

UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA
VICERRECTORÍA ACADÉMICA
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
MAESTRÍA ACADÉMICA EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES
CON ENFÁSIS EN GESTIÓN AMBIENTAL

**Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos
en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos.**

Tesis presentada al Tribunal Examinador del Programa de Maestría Académica en
Manejo de Recursos Naturales de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales
para optar por el grado de *Magister Scientiae* con énfasis en gestión ambiental

Carmen Mora Aparicio

Director de tesis: Carolina Alfaro Chinchilla, carolina.alfaro.chinchilla@una.cr

Lector de tesis: Ilena Vega Guzmán, ivega@aya.go.cr

Lector de tesis: Junior Pérez Molina, junior.perez.molina@una.cr

San José, Costa Rica

ABRIL, 2022

Dedicatoria

Dedicado en primer lugar a Dios, por su infinito amor, gracia y misericordia. Por permitirme avanzar y disfrutar cada día de su favor.

Paulita, esto y todo lo que haga siempre será dedicado a ti, eres mi mayor motivación.

Álvaro, te aseguro que todo tu apoyo y dedicación quedarán siempre atesorados en mi corazón.

A mis padres, que siempre me han apoyado sin importar las circunstancias.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a mi comité asesor por el compromiso, el apoyo y el tiempo dedicado al proyecto y a mi persona.

Al personal del Laboratorio Nacional de Aguas y del Laboratorio de la PTAR Los Tajos, ambos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, quienes realizaron los muestreos y/o generaron los datos analizados en este trabajo: Ernesto Alfaro Arrieta, Eduardo Salazar Mesén, Sergio Álvarez Mc Inerney, Juan Alfaro Lara, José Ramírez Corrales, Andrés Fonseca Picado, Carlos Salas Chacón. Además, a las direcciones de ambos departamentos por la autorización del uso de datos y anuencia: Olman Jiménez Rodríguez y Darner Mora Alvarado. Además, a la UEN Gestión Ambiental del AYA, Estudios Básicos, quienes generaron los datos de caudal analizados.

INDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	5
INTRODUCCIÓN	6
METODOLOGÍA	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
CONCLUSIONES	19
REFERENCIAS	19
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	22
ANEXOS	25

Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos en el río Torres

Carmen Mora Aparicio

Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales, UNED.

carmorapa@gmail.com

(Este trabajo fue sometido a la revista UNICIENCIA para su publicación formal. Debe buscarse como: Carmen Mora Aparicio, Carolina Alfaro Chinchilla, Junior Pérez Molina, Ilena Vega Guzmán. El título es: Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos en el río Torres)

Resumen

En el junio del 2015, la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Los Tajos inició operaciones, recibiendo las aguas de distintos sectores del Gran Área Metropolitana. El objetivo del estudio fue analizar el aporte ambiental hacia la calidad del río Torres considerando la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos por la PTAR. Se realizó el análisis de datos históricos de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas de afluente y efluente de la PTAR y se analizó la variación en concentración de contaminantes en el río Torres previo y posterior a la construcción de la PTAR, considerando la estacionalidad. El río Torres se clasificó como severamente contaminado antes de la construcción de la PTAR, esto según la Metodología del Índice Holandés. Se considera que aumenta su grado de contaminación después de la descarga de la PTAR en época lluviosa en comparación con la seca, lo cual se puede atribuir a mayor arrastre de materiales en el río y una disminución en el tiempo de retención del agua dentro de la PTAR. La PTAR presenta remoción significativa para 8 de los 9 parámetros analizados, los porcentajes de remoción más representativos son: SSed (95 %), SST (68 %), DBO (52 %), DQO (50%) y GyA (55 %). Se demostró el aporte cuantitativo de la PTAR al río Torres al remover contaminantes de las aguas residuales durante el 2015 y 2020, principalmente DQO (26,792 Mg), SST (24,163 Mg), DBO (12,290 Mg) y STT (30,268 Mg). Finalmente se deja en evidencia la necesidad de construir las siguientes etapas de la PTAR que incluyen tratamiento secundario, que mejoraría la remoción de materia orgánica, surfactantes y nutrientes.

Palabras clave: Carga contaminante, depuración, vertido, saneamiento, contaminación, alcantarillado

Abstract

In July 2015, the Los Tajos wastewater treatment plant (WWTP) began operations, receiving water from different sectors of the Greater Metropolitan Area. The objective of the investigation was to analyze the environmental contribution, in terms of removal of physicochemical and microbiological pollutants, from the wastewater treatment plant (WWTP) "Los Tajos" to the Torres River. The analysis made was focused on physicochemical and microbiological data including inflows and outflows waters of the WWTP. The difference in the concentration of pollutants in the Torres River, before and after the construction of the WWTP, was analyzed associated with seasonality. The Torres River had a severely polluted water quality before the construction of the WWTP, this according to the Dutch Index Methodology, it is considered that its degree of contamination increases after the

discharge of the WWTP, mainly in the rainy season, which can be attributed to greater carryover of materials in the river and decrease in the removal efficiency of the WWTP. The TP shows a significant removal of 8 out of the 9 parameters analyzed, the most representative removal percentages are: SS (95%), TSS (68%), OBD (52%), OCD (50%) and Oils (55%). The quantitative contribution of the TP was demonstrated to the Torres River by removing thousands of Mg of pollutants from wastewater during the years of operation (2015-2020), mainly OCD (26,792 total Mg), STT (24,163 total Mg), OBD (12,290 total Mg) and TSS (30,268 total Mg). Finally, it is evident that the building of the WWTP next stages that includes secondary treatment, which would improve the removal of organic matter, surfactants, and nutrients, is highlighted.

Keywords: Pollutant load, purification, discharge, sanitation, sewerage

Introducción

El aumento exponencial de la población y las consecuentes demandas energéticas, agrícolas y tecnológicas han ejercido mayor presión en el recurso hídrico (Martínez & Villalejo, 2018). El uso de este recurso aumenta un 1% cada año, y se estima que se mantendrá este ritmo hasta el 2050, aumentando hasta un 30% de consumo respecto al nivel actual (ONU-Agua, 2019). Según la FAO (2012), dentro de los distintos usos del agua se destaca el agrícola, municipal e industrial, con un promedio de consumo de 70%, 11% y 19% respectivamente. La agricultura incluye el riego, ganado, acuicultura, entre otras actividades. Mientras que la municipal corresponde, entre otros, al uso doméstico. Entre los usos del agua en la industria se destaca la creación de embalses, sistemas de calentamiento, lavado de productos, entre otros. En contraste con el patrón mencionado, es importante destacar que el agua es un recurso finito y vulnerable, que debe ser gestionado de forma planificada y responsable (Martínez & Villalejo, 2018).

Costa Rica es un país reconocido por su riqueza hídrica, con una disponibilidad per cápita anual que ronda los 31.300 metros cúbicos por persona (Vargas & Marín, 2016), siendo el Valle central la zona con mayor riqueza, mientras que las regiones Huetar Norte y Pacífico Sur las que sufren ciertas limitaciones de disponibilidad del recurso (Valverde, 2013). Ballesteros (2013) indica que se vive una crisis hídrica en el país debido, entre otros temas, a las políticas insuficientes de gestión. Echeverría & Cantillo (2013) señalan la presencia de algunos factores que complican la gestión del recurso en el país, por ejemplo la baja eficiencia de aprovechamiento y distribución, llegando a cuantificar pérdidas de agua de hasta un 50% en la distribución. Por otro lado, indican que los cuerpos de agua superficiales, sufren contaminación puntual y difusa por descargas de aguas residuales y las aguas de escorrentía, las cuales arrastran contaminantes que pueden deteriorar la calidad del cuerpo receptor. En ambos casos, la consecuencia es una reducción de la disponibilidad per cápita total (Echeverría & Cantillo, 2013), siendo el tema de la contaminación de las quebradas y ríos urbanos, uno de los problemas más serios para el recurso hídrico (Vargas & Marín, 2016), especialmente en la Gran Área Metropolitana, donde se encuentran los ríos más severamente contaminados (Calvo & Brenes, 2012).

Las aguas residuales son aquellas que se descartan después de su uso, siendo que su naturaleza fue modificada gracias a la incorporación de sustancias diversas. Normalmente llegan a los ríos y a los mares alterando las características naturales de dichos cuerpos receptores (Rodríguez et al, 2006). Dentro de estas, se conocen como aguas ordinarias o domésticas, aquellas utilizadas con fines higiénicos que provienen de las casas y contienen

distintas sustancias como materia orgánica (restos de comida, distintos materiales), excretas humanas, detergentes, fármacos, y productos de limpieza, principalmente (Acosta, 2008). Además, existen las aguas especiales que corresponden a líquidos generados en los procesos agrícolas, industriales o comerciales; cuyas características contaminantes son específicas según el tipo de industria (Rodríguez et al, 2006.; Ramalho, 1996).

Dentro de las características de las aguas residuales se destacan el posible mal olor producto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, la toxicidad debida a la presencia de productos químicos, su capacidad infecciosa por la presencia de microorganismos patógenos y finalmente la mala estética, esta última consecuencia de todas las alteraciones mencionadas (Rojas, 2002).

Las aguas residuales deben recibir un tratamiento previo a su disposición final. Dicha acción controla los niveles de contaminación o toxicidad para reducir el impacto en el cuerpo receptor y cumplir con la legislación (Reynolds, 2002). Para la elección de un método o sistema adecuado, se valoran las características fisicoquímicas de las aguas, definiendo a partir de esto el pretratamiento requerido para la corriente, y finalmente la viabilidad económica y técnica (Reynolds, 2002).

Costa Rica sufrió por varios años las consecuencias de un rezago en temas de infraestructura y tecnologías en el tratamiento de aguas residuales y en el control del cumplimiento de la legislación vigente para reducir la contaminación de los cuerpos de agua (Herrera, 2016). A pesar del aumento histórico en la cobertura de saneamiento, este sigue siendo limitado. En el 2015 la población que contaba con un alcantarillado sanitario con tratamiento era solo de un 4,2% (Angulo, 2015), en el 2019 esta cobertura subió a un 22,9% gracias al avance en la rehabilitación, construcción y conexión de tuberías en algunos cantones del Gran Área Metropolitana GAM. Es importante mencionar que aún se mantiene el uso de tanques sépticos para el 75% de la población y mientras que el 1,4 % restantes usan letrinas (Mora & Portugez, 2019). Los entes encargados de la gestión y tratamiento de estas aguas son el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AYA), la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), ASADAS y algunas municipalidades (ARESEP, 2017).

En Costa Rica, con la intención de prevenir la contaminación del recurso hídrico, el AYA elaboró un proyecto denominado Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana de San José. Para esto se han realizado la construcción de colectores y redes de alcantarillado que trasladarán las aguas residuales del GAM hacia la PTAR Los Tajos, para que reciban un tratamiento antes de ser descartadas a río (Mora & Portugez, 2019). La población beneficiada es la que habita en los cantones de San José, Desamparados, Escazú, Goicoechea, Alajuelita, Vásquez de Coronado, Tibás, Moravia, Montes de Oca, Curridabat y la Unión (Presidencia de la República, 2016).

La PTAR Los Tajos inició sus operaciones en junio del 2015, entrando en funcionamiento la primera etapa del proyecto que consiste en un tratamiento primario de las aguas residuales. Este proceso incluye el tratamiento físico de las aguas (cribado, desarenado, desengrasado y sedimentación primaria), el tratamiento de los lodos generados (espesado, digestión anaeróbica y deshidratación), el tratamiento del biogás producido (remoción de siloxanos, compuestos orgánicos volátiles y sulfuro de hidrógeno) y la depuración de los olores resultantes del proceso (remoción de amoníaco y sulfuro de hidrógeno), para realizar un vertido final en el río Torres. Se tiene proyectada la construcción de una etapa intermedia que ampliaría el tratamiento primario, incorporando más soplantes, gasómetros, módulos de tratamiento de biogás, antorcha, desarenadores y sedimentadores primarios. Además,

incluiría una segunda etapa que brindará un tratamiento secundario a las aguas residuales, (reactores biológicos, digestores de lodos, silos de lodos y sedimentadores secundarios), sin embargo, es importante aclarar que estas etapas son parte de un proyecto a mediano-largo plazo.

En el 2013 se analizó la condición ambiental de la subcuenca del río Virilla, incluyendo al río Torres (2006 y 2010), estableciendo que este se considera un cuerpo de agua severamente contaminado y consideraron como principales razones el aporte de minerales según el tipo de suelo y las descargas de aguas residuales crudas (Herrera, Rodríguez, Rojas, Herrera, & Chaves, 2013).

Con el fin de establecer el aporte del tratamiento primario realizado por la PTAR al río Torres, se analizaron los resultados de todos los muestreos de este río realizados antes de la puesta en marcha de la PTAR y posteriormente a su puesta en marcha, tanto en época seca como lluviosa, utilizando la Metodología del Sistema Holandés (MIH), establecida en el artículo 4 del Decreto 33903 (MINAE-MS, 2007). Además, se analizó la remoción de contaminantes de las aguas residuales que ingresan a la PTAR, para identificar diferencias en las cargas de contaminantes y la remoción de la misma según la época del año.

Metodología

La investigación se realizó en la Planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, ubicada en San José, La Uruca (Figura 1). Las coordenadas geográficas son 9°57'38" Norte y 84°08'13" Oeste. La misma se encuentra cercana al Río Torres, lugar donde actualmente vierte el agua que ha recibido tratamiento.

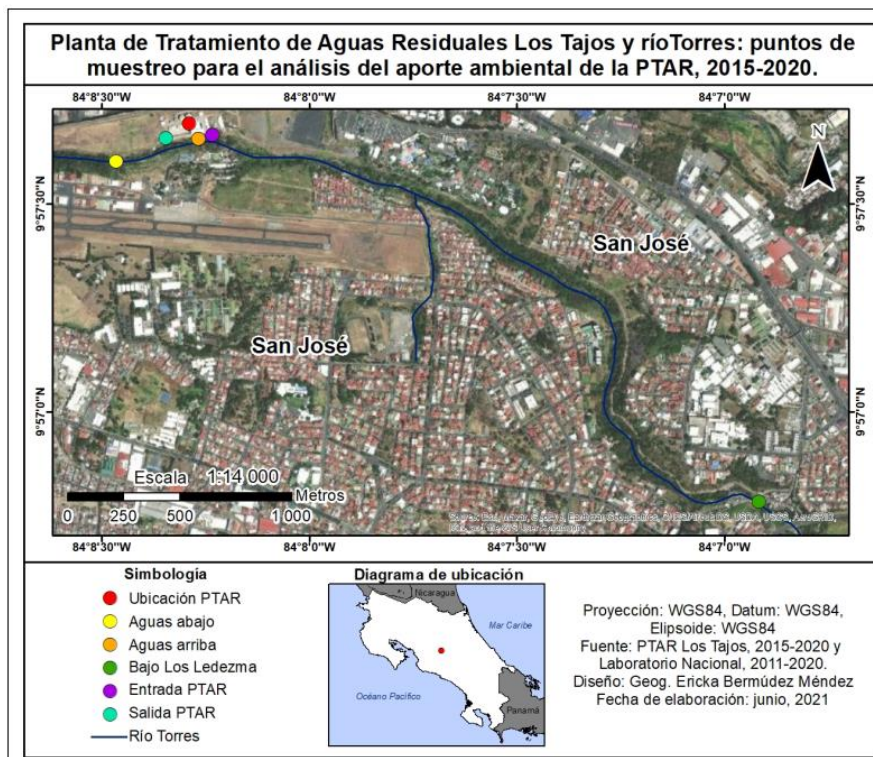


Figura 1. *Ubicación de la PTAR Los Tajos y los puntos de muestreo del presente estudio.* Fuente propia.

Los datos utilizados en esta investigación son recopilaciones brindadas por el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos, ambos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Dichos datos se detallan en tabla 1.

Contaminación en el río Torres

Se recopiló la información histórica de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del río Torres, antes y después de la construcción de la PTAR. Este monitoreo se realizó en tres puntos específicos, Bajo los Ledezma (para la condición previa a la construcción) y los puntos aguas arriba y aguas abajo de la descarga de la PTAR (luego de iniciada su actividad). Además, se recopiló la información histórica de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas residuales de entrada (afluente) y salida (efluente) de la PTAR. Con la información mencionada se analizó cualitativa y cuantitativamente la situación ambiental del río Torres previo y posterior a la construcción de la PTAR, tomando en cuenta la variación estacional (época seca y lluviosa). En este punto se determinó si existe una diferencia significativa en las concentraciones de contaminantes por época en el río antes y después de la construcción de la PTAR.

Se evaluó la calidad del río en términos de contaminación, utilizando la Metodología del Índice Holandés (MIH), la cual contempla los parámetros más relevantes que indican la contaminación orgánica como la DBO, el N-NH_4^+ y el porcentaje de saturación de oxígeno. Según la concentración de los parámetros mencionados, se asigna un puntaje y la suma total de estos indica el nivel de contaminación, que podría ser incipiente, moderada, severa y muy severa (MINAE-S, 2007).

Evaluación de la PTAR Los Tajos

Se determinó la eficiencia de remoción promedio de contaminantes y la carga vertida en las aguas residuales por la planta de tratamiento Los Tajos. Se consideraron los siguientes parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Sedimentables (SSed), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Totales (STT), pH, Temperatura, Conductividad, Sustancias activas al azul de metileno (SAAM), Grasas y Aceites (GyA), Nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+), Fósforo total (P-PO_4^{3-}) y coliformes fecales (cf). Para esto se utilizaron los datos operativos históricos de la PTAR, así como los caudales de operación.

A partir de la información disponible, se realizó la comparación de medias mensuales de las concentraciones de los parámetros y la remoción de la PTAR a lo largo del tiempo considerando el efecto de la estacionalidad (seca y lluviosa), a través de análisis de varianza (ANDEVA). Finalmente se analizaron las posibles relaciones entre la remoción de la PTAR y la carga vertida, con las características analizadas del río Torres con el fin de evaluar los aportes ambientales de la planta de tratamiento Los Tajos.

La reducción de carga de contaminantes por la PTAR se analizó con *t*-student. Todos los análisis estadísticos se ejecutaron con ayuda del lenguaje de programación R versión 3.6.1.

Tabla 1

Descripción de los tipos de datos fisicoquímicos y microbiológicos recopilados para las muestras de aguas residuales de la PTAR Los Tajos y de aguas superficiales en el río Torres.

	Río Torres			PTAR	
Punto de muestreo	Bajo los Ledezma (9°56'47''N y 84°06'55''O)	Aguas arriba de la descarga (9°57'39''N y 84°04'16''O)	Aguas debajo de la descarga (9°57'36''N y 84°08'28''O)	Entrada o Afluente (9°57'40''N y 84°04'14''O)	Salida o Efluente (9°57'38''N y 84°04'22''O)
Años de monitoreo	2011-2015 (Antes de la construcción de la PTAR)	2015-2020	2015-2020	2015-2020	2015-2020
Muestreo realizado por	LNA			PTAR (semanales) LNA (trimestrales)	
Tipo de muestreo	Muestreos puntuales anuales	Muestreos puntuales trimestrales	Muestreos puntuales trimestrales	Muestreos compuestos (24 horas) semanales	
Parámetros analizados	DBO, DQO, SSed, SST, STT, pH, Temperatura, Conductividad, N-NH ₄ ⁺ , P-PO ₄ ³⁻ , GyA N-NO ₃ ⁻ , SAAM, Coliformes fecales			DBO, DQO, SSed, SST, STT, pH, Temperatura, Conductividad, N-NH ₄ ⁺ , P-PO ₄ ³⁻ , Caudal (2016-2020) + coliformes fecales (LNA)	

Resultados y discusión

Se realizaron 9 muestreos en el río Torres en el punto de muestreo denominado Bajo los Ledezma, esto antes de la puesta en marcha de la PTAR Los Tajos, desde el año 2012 hasta el 2015. Por otro lado, una vez que inició la operación de la PTAR, se continuó con el monitoreo del río Torres, reportando 30 muestreos desde el 2015 al 2020, tomando muestra en dos puntos específicos: aguas arriba y aguas abajo de la descarga de la PTAR.

En la tabla 2 se muestran los valores promedio para los parámetros evaluados por la MIH para el periodo del 2011 al 2015 en el río Torres. En primera instancia el promedio general, seguido del promedio en época seca y finalmente en la lluviosa. Los resultados indican que existía contaminación severa en esos años, independientemente de la estacionalidad, lo cual concuerda con lo establecido por Herrera et al (2013). Por lo tanto, la calidad del cauce del río Torres antes de la construcción de la PTAR estaba comprometida ambientalmente.

Otro detalle que se observa en la tabla 2 es que las medias de DBO y N-NH₄⁺ en los tres casos, obtienen el puntaje máximo de la MIH, indicando la concentración elevada de estos en las aguas del río. Las consecuencias de estos resultados se pueden resumir en alto consumo de oxígeno en las aguas para la degradación microbiológica de la materia orgánica presente (DBO) y la toxicidad en la vida acuática del nitrógeno amoniacal (Calvo & Mora, 2007)

Tabla 2

Evaluación de la calidad fisicoquímica del agua del Río Torres del 2012 al 2015 según la estacionalidad, utilizando la Metodología del Índice Holandés, (Contaminación, incipiente: +; moderada: ++; severa: +++; muy severa: ++++)

Promedio	DBO mg L ⁻¹	Puntaje	N-NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	Puntaje	% Saturación Oxígeno	Puntaje	Suma	Clasificación
General	30.0	5.0	10.0	5.0	77.3	2.0	12.0	+++
Época Seca	37.8	5.0	12.6	5.0	74.2	2.0	12.0	+++
Época Lluviosa	16.9	5.0	5.6	5.0	82.3	2.0	12.0	+++

En la tabla 3 se encuentran las concentraciones y puntajes utilizados en la evaluación del río Torres con el MIH, después de la construcción de la PTAR. De los 30 muestreos realizados, en 15 se analizaron los parámetros necesarios para el MIH, 8 realizados en estación seca y 7 en lluviosa. Se observa que las medias del DBO y del N-NH₄⁺ son mayores en época seca, caso contrario el porcentaje de saturación de oxígeno que disminuye debido a una menor aireación del agua. Esto indica mayor grado de contaminación ya que las temperaturas son mayores, el caudal del río y el nivel de las aguas disminuyen, provocando un aumento en la concentración de algunos parámetros (Calvo & Mora, 2007b).

El resultado anterior concuerda con un estudio realizado por Calvo y Mora en 2007. En dicho estudio se estableció que el río Torres varía su calidad entre las categorías de “Contaminación severa” y “Contaminación muy Severa”, haciendo énfasis en que la alta densidad poblacional relacionada con el cauce del río, lo que se relaciona directamente con el grado de contaminación (Calvo & Mora, 2007a).

Si se comparan los resultados de aguas arriba y aguas debajo de la PTAR (tabla 43) en época seca, se observa que no hay un cambio significativo en la condición del río debido al vertido de la PTAR la cual se mantuvo entre contaminación severa y muy severa, con excepción de dos muestreos, en abril del 2016 en el que la contaminación aumentó y en diciembre 2017 donde disminuyó. En general se puede mencionar que este comportamiento se debe a que el efecto de dilución y el aporte de contaminación de la PTAR en época seca no es significativo. En los casos de los meses de abril y diciembre, el efecto observado de aumento de contaminación y disminución respectivamente se puede deber a la transición entre épocas seca, lluviosa y viceversa.

Por otro lado, en época lluviosa se evidencia el aporte del efluente de la PTAR aumentando el grado de contaminación del río Torres en 6 de los 7 muestreos manteniéndose en un nivel de contaminación severa y uno en muy severa.

Tabla 3

Evaluación de la calidad fisicoquímica del agua del Río Torres del 2015 al 2020 según la estacionalidad, utilizando la Metodología del Sistema Holandés, (Contaminación, incipiente: +; moderada: ++; severa: +++; muy severa: ++++)

Época	Fecha	DBO ₅ mg/L		% Saturación O ₂		N-NH ₄ ⁺		Sumatoria y clasificación			
		Agua arriba	Agua abajo	Agua arriba	Agua abajo	Agua arriba	Agua abajo	Agua arriba	Clase	Agua abajo	Clase
Seca	abr-16	14 (4)	47 (5)	48 (4)	24 (5)	3 (4)	14 (5)	12	+++	15	++++
	abr-17	15 (4)	48 (5)	86 (2)	81 (2)	5 (4)	18 (5)	10	+++	12	+++
	dic-17	29 (5)	15 (4)	91 (1)	89 (2)	5 (5)	0.2 (1)	11	+++	7	++
	mar-18	23 (5)	41 (5)	87 (2)	74 (2)	7 (5)	23 (5)	12	+++	12	+++
	dic-18	15 (4)	36 (5)	99 (1)	95 (1)	6 (5)	13 (5)	10	+++	11	+++
	mar-19	18 (5)	42 (5)	52 (3)	34 (4)	16 (5)	39 (5)	14	++++	14	++++
	dic-19	37 (5)	49 (5)	7 (5)	12 (5)	8 (5)	16 (5)	15	++++	15	++++
	mar-20	42 (5)	66 (5)	10 (5)	7 (5)	15 (5)	19 (5)	15	++++	15	++++
Lluviosa	nov-15	12 (4)	18 (5)	100 (1)	92 (1)	0.7 (2)	4 (4)	7	++	10	+++
	jun-17	12 (4)	24 (5)	92 (1)	92 (1)	0.4 (1)	3 (4)	6	+	10	+++
	sep-17	11 (4)	26 (5)	99 (1)	96 (1)	1 (2)	2 (4)	7	++	10	+++
	jun-18	14 (4)	23 (5)	100 (1)	99 (1)	1 (3)	10 (5)	8	++	11	+++
	sep-18	14 (4)	30 (5)	87 (2)	84 (2)	3 (4)	14 (5)	10	+++	12	+++
	jun-19	5 (2)	12 (4)	96 (1)	91 (1)	2 (4)	17 (5)	7	++	10	+++
	sep-19	13 (4)	38 (5)	87 (2)	64 (3)	6 (5)	36 (5)	11	+++	13	++++

Tabla 4

Valores de caudales del río Torres y de la PTAR Los Tajos desde el 2015 al 2020, n=30

Caudal (L/s)	Agua arriba		Agua abajo		Afluente / Efluente	
	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa
Promedio	2096	2880	2610	3481	446	592
Desviación	1025	1205	1045	1327	102	504
Mínimo	573	1115	1035	1651	140	152
Máximo	3335	4843	3823	5675	709	5734

Durante la época seca, las temperaturas en el valle central se mantienen entre los 16-25 ° y las precipitaciones son escasas (4% del total anual) (Solano & Villalobos, 2001). Es posible que durante la época seca se presente un aumento en las concentraciones de los contaminantes debido al bajo caudal del río y las fuentes puntuales y difusas de contaminación, perdiendo el factor de dilución proporcionado por las precipitaciones (tabla 4). Es importante destacar, que el sistema automático de la PTAR (SCADA) detecta picos de

caudal debido al ingreso de aguas de lluvia, afectando operativamente algunos factores de la PTAR.

De las muestras de río se analizaron los siguientes parámetros: pH, Temperatura, Conductividad, Oxígeno disuelto, DBO, DQO, SST, STT, SSed, SAAM, N-NH₄⁺, P-PO₄³⁻, N-NO₃⁻ y coliformes fecales. Para todas las concentraciones reportadas de cada parámetro se calcularon las medias, desviación estándar, valores mínimos y máximos, el detalle se observa en la Tabla 5. Los mismos se dividieron según la época del año.

El oxígeno disuelto aumenta su valor en época lluviosa tanto aguas arriba como aguas abajo, esto se debe al aumento de caudal que permite mayor oxigenación del agua. Por otro lado, los valores disminuyen ligeramente de la época seca a la lluviosa, esto se puede relacionar con la dilución propia de las lluvias. Para los parámetros de temperatura, pH, SST, STT, SSed y N-NO₃⁻ en ambos puntos de muestreo no se obtuvo diferencias significativas (*n.s.*) entre ellos, independientemente de la época de los muestreos, indicando así que el aporte de la PTAR para estos no se considera relevante.

Caso contrario para los parámetros de Conductividad, DQO, N-NH₄⁺, P-PO₄³⁻, los cuales obtuvieron un valor de $P < 0.01$, lo que confirma la existencia de una diferencia significativa entre los distintos puntos del río y también entre las épocas del año. Para el caso de la Conductividad se presentó una diferencia significativa entre épocas en ambos puntos de muestreo, con tendencia a una reducción en época lluviosa, lo mismo ocurre con el DQO.

Respecto al SAAM, se observa una diferencia poco significativa entre las épocas de ambos puntos de muestreo. Con un nivel mayor de significancia, el N-NH₄⁺ presentó diferencias entre las épocas seca y lluviosa en aguas arriba con la seca aguas abajo, el análisis estadístico indica que, las concentraciones de este parámetro para el efluente no varían significativamente. Algo similar ocurre con el P-PO₄³⁻, que no presenta diferencias entre las épocas del año, pero sí entre los puntos de muestreo. El aumento de las concentraciones de nitrógeno amoniacal y fósforo aguas abajo es de esperarse, debido a que la PTAR no remueve nutrientes de las aguas residuales, ya que por el momento solo brinda un tratamiento primario el cual remueve habitualmente un 10-20 % de fósforo total y 0 % de nitrógeno amoniacal (Metcalf & Eddy, 1996)

El resultado del DBO y coliformes fecales indican diferencias significativas para las distintas épocas en ambos puntos ($P < 0.001$), siendo el punto de aguas abajo donde se presenta un aumento en la concentración. Dicha situación se considera típica, ya que las aguas residuales domésticas contienen principalmente materia orgánica como residuos de alimentos, detergentes, E.coli y coliformes fecales. Las aguas domiciliarias normalmente presentan un alto contenido de N-NH₄⁺ por la orina y coliformes fecales por las excretas humanas y aguas grises provenientes de las cocinas, pilas y duchas (Díaz, Alvarado, & Camacho, 2012).

El promedio de los coliformes fecales en el río, previo a la puesta en marcha de la PTAR fue de $7,423 \times 10^6$ NMP/100 mL demostrando así la existencia de vertidos de aguas negras al río previo a la PTAR. En los muestreos posteriores al 2015, los valores promedio de cf aguas arriba fue de $4,417 \times 10^6$ NMP/100 mL y aguas debajo de $1,835 \times 10^7$ NMP/100 mL. Lo anterior establece el impacto del efluente de la PTAR en el río, sin embargo, la mayor diferencia se evidencia entre los valores de aguas arriba y aguas abajo, especialmente en época lluviosa. Los valores reportados son concordantes con el reportado en la literatura que indica que el valor promedio de coliformes fecales ronda los $10^5 - 10^6$ NMP/mL, esto para las aguas residuales crudas (Metcalf & Eddy, 1996).

Tabla 5

Parámetros fisicoquímicos analizados en el Río Torres aguas arriba y aguas debajo de la descarga de la PTAR, desde el 2015-2020 (n = 61)

Variable	Agua arriba		Agua abajo		KW	P
	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa		
Temperatura (°C)	22 ± 2.7 (18 - 25)	23 ± 0.84 (22 - 24)	23 ± 2.7 (18 - 25)	23 ± 0.49 (22 - 23)	0.97	n.s.
pH	7.5 ± 0.54 (6.6 - 8.0)	7.7 ± 0.44 (7.1 - 8.6)	7.4 ± 0.62 (6.4 - 7.9)	7.7 ± 0.49 (7.0 - 8.5)	0.43	n.s.
Conductividad (µS cm ⁻¹)	385 ± 92.6 (220 - 523) a	285 ± 50.8 (223 - 355) c	511 ± 126 (278 - 695) b	379 ± 76.1 (275 - 508) a	13.38	**
DBO (mg L ⁻¹)	24 ± 11 (14 - 42) a	11 ± 3.3 (4.6 - 14) c	43 ± 14 (15 - 66) b	24 ± 8.6 (12 - 38) a	22.49	***
DQO (mg L ⁻¹)	56.8 ± 28.3 (32.0 - 120) bc	36.0 ± 16.9 (19.0 - 70.0) c	108 ± 37.8 (34.0 - 153) a	63.6 ± 31.2 (35.0 - 129) ab	13.12	**
Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	4.7 ± 2.9 (0.54 - 7.7) a	7.3 ± 0.41 (6.6 - 7.9) b	4.1 ± 2.9 (0.52 - 7.5) a	6.8 ± 0.94 (4.9 - 7.5) ab	10.03	*
SST (-mg L ⁻¹)	30 ± 13 (6.0 - 51)	48 ± 39 (11 - 127)	45 ± 16 (22 - 66)	61 ± 37 (24 - 129)	4.35	n.s.
STT (mg L ⁻¹)	360 ± 83.6 (239 - 512)	309 ± 98.4 (176 - 484)	434 ± 119 (262 - 598)	356 ± 97.4 (191 - 506)	4.41	n.s.
SSed (mL L ⁻¹)	0.10 ± 0.15 (0.0 - 0.30)	0.10 ± 0.10 (0.0 - 0.20)	0.10 ± 0.14 (0.0 - 0.30)	0.10 ± 0.14 (0.0 - 0.30)	0.33	n.s.
SAAM (mg L ⁻¹)	1.0 ± 0.52 (0.49 - 2.0) ab	0.63 ± 0.31 (0.15 - 1.1) c	1.7 ± 0.72 (0.54 - 2.3) a	1.2 ± 0.57 (0.68 - 2.1) a	9.31	*
N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	8.1 ± 4.8 (2.7 - 16) b	2.1 ± 2.0 (0.37 - 6.0) c	19 ± 11 (0.17 - 39) a	12 ± 12 (2.5 - 36) ab	15.95	**
P-PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	0.72 ± 0.52 (0.40 - 1.7) ab	0.41 ± 0.22 (0.10 - 0.76) b	1.2 ± 0.56 (0.62 - 2.3) a	0.97 ± 0.45 (0.49 - 1.8) a	14.75	**
N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	16 ± 3.4 (13 - 20)	11 ± 4.0 (8.4 - 14)	18 ± 3.4 (14 - 22)	20 ± 7.8 (15 - 26)	4.1	n.s.
coliformes fecales (log ₁₀ NMP 100mL ⁻¹)	6.1 ± 0.90 (4.9 - 7.4) b	6.2 ± 3.0 (5.7 - 6.9) b	6.9 ± 0.50 (5.9 - 7.4) b	7.3 ± 0.50 (6.7 - 7.9) a	16.63	***

Media ± desviación estándar (Min. - Máx.); KW: prueba de Kruskal-Wallis ; n.s.: P>0.05; *: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001. Letras iguales indican no diferencias estadísticamente significativas de la prueba *a posteriori* de *Least Significant Difference* (LSD), P<0.05.

Tabla 6

Parámetros físicoquímicos analizados al afluente y efluente de la PTAR Los Tajos, desde el 2015 al 2020, n=317

Variable	Afluente		Efluente		KW	P
	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa		
Temperatura (°C)	24 ± 1.6 (20 - 29)	24 ± 1.7 (19 - 28)	24 ± 1.5 (19 - 28)	24 ± 1.7 (19 - 29)	NA	NA
pH	7.5 ± 0.26 (6.7 - 8.1)	7.5 ± 0.26 (6.8 - 8.0)	7.5 ± 0.22 (6.8 - 8.2)	7.5 ± 0.18 (7.0 - 7.9)	NA	NA
Conductividad (µS/cm)	762.8 ± 151.9 (447.7 - 1212)	669.0 ± 154.8 (340.9 - 1361)	739.0 ± 125.4 (411.7 - 1065)	627.3 ± 134.6 (353.0 - 1466)	NA	NA
DBO (mg/L)	293 ± 99.0 (119 - 716) b	215 ± 80.9 (75.0 - 595) a	128 ± 38.3 (65.0 - 332) d	95.0 ± 32.0 (14.0 - 203) c	407.17	***
DQO (mg/L)	706.5 ± 238.7 (248.0 - 1689) b	517.4 ± 314.8 (161.0 - 3064) a	326.6 ± 76.42 (106 - 713.0) d	230.9 ± 76.01 (40.00 - 715.0) c	385.39	***
SST (mg/L)	420.0 ± 306.1 (92.00 - 2110) b	286.4 ± 247.8 (80.00 - 2386) a	99.08 ± 45.77 (20.00 - 377.6) d	77.11 ± 42.64 (6.000 - 288.0) c	455.51	***
STT (mg/L)	841.5 ± 378.5 (410.0 - 3434) b	642.9 ± 338.7 (298.0 - 3966) a	508.5 ± 122.3 (106.0 - 1227) d	415.5 ± 89.74 (18.00 - 640) c	339.48	***
Ssed (mL/L)	10 ± 6.8 (1.0 - 68) b	7.0 ± 4.6 (1.1 - 42) a	0.30 ± 1.3 (0.00 - 10) c	0.20 ± 0.46 (0.00 - 4.0) c	483.48	***
GyA (mg/L)	95.3 ± 152 (12.2 - 516) b	18.3 ± 10.5 (2.40 - 40.2) a	8.40 ± 4.55 (3.40 - 17.2) c	8.48 ± 4.53 (0.400 - 21.0) c	40.88	***
SAAM (mg/L)	4.5 ± 3.8 (1.8 - 7.2) ab	8.3 ± 2.1 (4.0 - 12) a	3.2 ± 1.8 (1.9 - 4.5) b	4.9 ± 1.6 (2.7 - 9.0) b	25.4	***
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	42 ± 3.9 (33 - 49) b	32 ± 8.5 (15 - 46) a	42 ± 5.9 (31 - 56) b	29 ± 7.7 (14 - 46) a	21.94	***
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	24 ± 5.7 (13 - 35) b	14 ± 7.5 (2.1 - 26) a	16 ± 4.0 (6.4 - 24) a	10 ± 4.6 (1.0 - 18) a	34.73	***

Media ± desviación estándar (Min. - Máx.); KW: prueba de Kruskal-Wallis; n.s.: ***: P<0.001. Letras iguales indican no diferencias estadísticamente significativas de la prueba *a posteriori* de Least Significant Difference (LSD), P<0.05. NA: no analizado al no ser necesario para valorar la eficiencia de la PTAR.

Eficiencia de la PTAR

En la tabla 6 se observan los resultados de los parámetros analizados del afluente y efluente de la PTAR, divididos según la estacionalidad. En este caso, y al igual que para los datos del río, la temperatura el pH y la conductividad no presentan diferencias notorias en los puntos de muestreo, incluso los promedios de temperatura y pH son iguales en ambas épocas tanto en afluente como efluente, demostrando que estos parámetros se mantienen constantes durante el tratamiento.

El resto de los parámetros mostraron diferencias significativas ($P < 0.001$) entre el afluente y el efluente, demostrando remoción. El DBO, DQO, SST, STT presentan diferencias entre las dos épocas estudiadas en cada punto de muestreo, probablemente asociado a la influencia del bajo caudal (tabla 4) y concentración de contaminantes en época seca y las precipitaciones que permiten la dilución de estos por la entrada de agua de lluvia a la PTAR en la época lluviosa. Los SSed y las GyA presentan medias significativamente menores en el efluente, demostrando una remoción importante (95 % y 55 % respectivamente), lo cual coincide con el tratamiento físico de desarenado y desengrasado con que cuenta la PTAR. El análisis estadístico evidencia que no hay diferencias en las concentraciones del efluente en la época seca y la lluviosa para dichos parámetros, pero sí en el afluente en ambas épocas, alcanzándose un valor objetivo considerado en el diseño

El SAAM presentó diferencias significativas solamente entre el afluente y el efluente evidenciando remoción (21 %), pero no entre la época seca y lluviosa. Se considera importante reducir la concentración del SAAM en las aguas residuales, ya que puede provocar inconvenientes en algunos sistemas de tratamiento por la formación de espumas en etapas donde se utilice aireación, por ejemplo, en desengrasado, además de la afectación que puede provocar en los ríos (Ramírez, 2006).

Por otro lado, el $N-NH_4^+$ muestra diferencias entre la época seca y la lluviosa en los mismos puntos de muestreo, pero no entre el afluente y efluente, esto se podría relacionar con la baja o nula remoción en la PTAR ya que con un sistema de sedimentación primaria como el de la PTAR, la remoción esperada para este parámetro es de cero. Unido a lo anterior se puede considerar el fenómeno de concentración mencionado en época seca que se repite tanto en el afluente y efluente. (Metcalf, & Eddy Inc., 1991).

Finalmente, el $P-PO_4^{3-}$ solamente presentó una diferencia entre la época seca del afluente respecto al resto, manteniendo la época lluviosa del afluente y ambas épocas del efluente sin cambios significativos. Lo anterior indica que las concentraciones de fósforo que entra a la PTAR en época seca es mayor al resto. Dicho contaminante es común en las aguas residuales ya que forma parte de la materia orgánica (proteínas y aminoácidos) y de la materia inorgánica que acarrea el agua (Teixeira, Sánchez, Gebara, Dall'Adlio, & Matsumoto, 2013). El porcentaje de remoción promedio obtenido para este parámetro fue de un 13 %, lo cual está dentro de lo esperado (teóricamente 10- 20 %) (Metcalf & Eddy, 1996).

Es importante mencionar que al ser una PTAR con sólo tratamiento primario, el Decreto de Gradualidad, le permite a la PTAR Los Tajos un efluente con límites de vertido mayores en 3 de los parámetros fisicoquímicos regulados a nivel nacional, estableciendo valores de 184 mg L^{-1} de DBO, 460 mg L^{-1} de DQO y 140 mg L^{-1} de SST (Decreto 32133-S, 2004). Los límites anteriores son mayores a los establecidos por el Reglamento de Vertido y Reuso de aguas residuales (50 mg L^{-1} de DBO, 150 mg L^{-1} de DQO y 50 mg L^{-1}). Esta condición se mantiene mientras el Proyecto de Saneamiento avance en la construcción y arranque en las siguientes etapas, en ese momento la PTAR deberá cumplir con los límites mencionados (Decreto 33601, 2010).

En la tabla 7 se detallan los valores de carga de contaminantes que ingresan y salen de la PTAR, entre ambas cantidades se demuestra que la remoción de carga es significativa ($P < 0.001$), demostrando así la capacidad de remoción de la PTAR. Los porcentajes de eficiencia de remoción mayores son para SSed (95%), SST (68 %), DBO (52 %) y DQO (50). Lo anterior es positivo considerando los porcentajes de remoción de diseño para la primera etapa de 32% para DBO, 32% para DQO y de 50% para SST. Según la literatura, para el tipo de tratamiento

primario que reciben aguas residuales domésticas se esperan valores de remoción 50-65% de SST, 30-40 % de DBO y 30-40% de DQO (Metcalf, & Eddy Inc., 1991).

Cabe destacar que, para la mayoría de los parámetros, la remoción de contaminantes por la PTAR fue mayor en época seca que en lluviosa, lo anterior coincide con lo establecido por Jiménez (2012), quien indica que, a menor grado de contaminación de las aguas residuales, el porcentaje de remoción del sistema de tratamiento disminuye (Jiménez, 2012). Por otro lado, la diferencia no significativa entre los valores de entrada y salida de N-NH₄⁺ deja en evidencia la necesidad de continuar con el proyecto de mejoramiento ambiental, ya que un tratamiento primario no es suficiente para la remoción de este parámetro. Se tiene proyectada una etapa intermedia y segunda etapa de la PTAR con tratamiento secundario, para mejorar la remoción de materia orgánica (DBO y DQO), surfactantes (SAAM) y nutrientes (N-NH₄⁺, P-PO₄³⁻). La continuidad de este proyecto se encuentra a la espera de la conexión y rehabilitación de tuberías y colectores de los 11 cantones involucrados, acción que aumentaría el caudal de entrada a la PTAR, la cual se encuentra operando actualmente con aproximadamente un 20% del caudal de diseño diario, proyectado a 2.81 m³/s (3.45 m³/s máximo diario).

Tabla 7

Cargas de contaminantes del Afluente y Efluente de la PTAR y porcentaje de eficiencia de remoción de la PTAR desde el 2015 al 2020

Variable	Carga Afluente	Carga Efluente	% Eficiencia de remoción	% Eficiencia de remoción teórica	Wilcoxon	P
DBO (Mg día ⁻¹)	11 ± 7.3 (1.6 – 97)	4.7 ± 3.3 (0.50 – 48)	52 ± 19 (0.0 – 89)	30 - 40	201295	***
DQO (Mg día ⁻¹)	27 ± 25 (2.1 – 314)	1.0 ± 7.4 (0.50 – 76)	50 ± 18 (0.0 – 92)	30 - 40	177906	***
SST (Mg día ⁻¹)	15.1 ± 19.0 (2.4 – 275)	3.7 ± 2.7 (0.20 – 22)	68 ± 18 (0.0 – 97)	50 - 65	201295	***
STT (Mg día ⁻¹)	32.9 ± 29.5 (6.1 – 338)	20 ± 13 (0.40 – 173)	31 ± 18 (0.0 - 90)	-	180901	***
SSed (Mg día ⁻¹)	0.4 ± 0.4 (0.0 – 5)	0.0 ± 0.0 (0.0 – 0.5)	95 ± 34 (0.0 - 100)	-	117855	***
GyA (Mg día ⁻¹)	1.2 ± 2.6 (0.10 – 20)	0.30 ± 0.20 (0.10 – 1.7)	55 ± 30 (0.0 – 100)	-	8001	***
SAAM (Mg día ⁻¹)	0.40 ± 0.60 (0.00 – 3.8)	0.30 ± 0.30 (0.10 – 2.1)	21 ± 42 (0.0 - 72)	-	3486	***
N-NH ₄ ⁺ (kg día ⁻¹)	3.2 ± 0.70 (1.3 – 4.3)	3.1 ± 1.0 (0.30 – 4.8)	3.1 ± 18 (0.0 - 46)	0	5151	***
P-PO ₄ ³⁻ (Mg día ⁻¹)	3.7 ± 1.5 (0.30 - 6.9)	2.4 ± 1.0 (0.20 – 4.7)	13 ± 14 (0.0 - 40)	10 - 20	4186	***

Media ± desviación estándar (Min. - Máx.); P<0.001.

Tabla 8

Carga removida total anual de los distintos contaminantes de las aguas residuales que ingresaron a la PTAR Los Tajos. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Sumatoria
DBO (Mg año ⁻¹)	2,056	2,763	2,169	1,276	1,176	2,849	12,290
DQO (Mg año ⁻¹)	ND	6,739	4,279	2,334	3,805	9,635	26,792
SST (Mg año ⁻¹)	2,360	4,753	3,429	1,864	3,791	7,966	24,163
STT (Mg año ⁻¹)	7,906	5,247	3,235	2,042	3,831	8,006	30,268
SSed (ML año ⁻¹)	69	165	117	76	124	167	718
GYA (Mg año ⁻¹)	171	228	81	111	2,359	485	3,434
SAAM (Mg año ⁻¹)	49	33	0.00	5.8	0.00	125	213
N-NH ₄ (kg año ⁻¹)	0.00	0.10	0.040	0.00	0.03	0.60	0.80
P-PO ₄ ³⁻ (Mg d ⁻¹)	0.00	0.40	0.40	0.10	0.40	0.00	1.3

En la tabla 8 se muestra la sumatoria de las remociones de carga para los parámetros analizados, desde el 2015 al 2020, con fin de establecer la cantidad total de contaminantes removidos por año en la PTAR Los Tajos. Es importante destacar que, al retener los contaminantes en cuestión, se evitó la presencia de estos en el río, realizando un aporte ambiental considerable. Desde el inicio de operación de la PTAR y hasta el 2020 se removió en total 12,290 Mg de DBO, 26,782 de Mg de DQO, 24,163 Mg de SST, 30,268 Mg de STT, 718 ML de SSed y 3,434 Mg de GYA de las aguas residuales. En menor cantidad, y considerando que la PTAR brinda solamente tratamiento primario, se removieron 213 Mg de SAAM, 0.80 de kg de N-NH₄⁺ y 1.3 Mg de P-PO₄³⁻.

Es importante recordar que la PTAR inició operaciones en el segundo semestre del 2015. Los años 2016 y 2020 son los que presentan mayor remoción de carga de contaminantes, excepto para GYA. La remoción promedio del 2017 se pudo ver afectada por las precipitaciones de ese año, que fueron las más altas desde el 2010 en la GAM (ICAFE, 2018), incluyendo el huracán Nate. Por otro lado, en el año 2018 se dio una acumulación de precipitación mayor respecto al año anterior, y es importante indicar que, del caudal total, las precipitaciones corresponden a un 40% aproximadamente. La remoción aumenta en los años posteriores se retoma el aumento de remoción.

Según el personal encargado de la operación de la PTAR, desde el 2018 se aumentó la centrifugación de lodos, aumentando así la extracción de sólidos del agua tratada, lo cual se evidencia en la tabla para los SST, STT y SSed. Conforme han pasado los años, el caudal que ingresa a la PTAR ha crecido paulatinamente, lo cual conlleva a la operación sistemática de la planta, modificando funciones propias del tratamiento, como el tiempo de retención en sedimentadores, niveles de lodos en espesadores, caudal de entrada a digestores, entre otras muchas.

Conclusiones

Se estableció que río Torres ya presentaba (según el MIH) un nivel de contaminación severo desde antes de la construcción de la PTAR, siendo uno de los ríos más contaminados de la GAM, junto con el María Aguilar y otros. Posteriormente, para ver el efecto del desfogue de la PTAR al río, se comprobó durante los muestreos aguas arriba y aguas abajo de la PTAR que la calidad del río no cambia en época seca, pero sí lo hace en época lluviosa, aumentando un nivel de contaminación con la emisión de la misma. Esto se evidenció especialmente por el aporte de coliformes fecales de la PTAR al río Torres aguas abajo.

Se comprobó que la PTAR remueve efectivamente los contaminantes esperados para un tratamiento primario, superando el rango esperado según la literatura para SSed (95%), DBO (52%), DQO (50%), SSed (95%) y SST (68%). Por otro lado, se obtuvo un porcentaje de 31 para STT, 55 para GyA y 21 para SAAM. Los porcentajes de remoción de N-NH_4^+ y P-PO_4^{3-} obtenidos fueron bajos, sin embargo, es de esperar dado la falta de un tratamiento específico.

En el periodo comprendido del 2015 y 2020, la PTAR removió en total 12,290 Mg de DBO, 26,782 de Mg de DQO, 24,163 Mg de SST, 30,268 Mg de STT y 3,434 Mg de GyA de las aguas residuales, principalmente. En menor cantidad, y considerando que la PTAR brinda solamente tratamiento primario, se removieron 213 Mg de SAAM, 0.80 de kg de N-NH_4^+ y 1.3 Mg de P-PO_4^{3-} . Estas cantidades resultantes es contaminación equivalente que no recibió el río Torres gracias al tratamiento realizado por la PTAR, lo cual se considera un aporte ambiental al río.

El estudio demostró la necesidad de continuar con el Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José y construir la etapa intermedia y segunda etapa de la PTAR con tratamiento secundario, con el fin de mejorar la remoción de materia orgánica (DBO y DQO), surfactantes (SAAM) y nutrientes (N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-}) aportando así positivamente la calidad del Río Torres como cuerpo receptor.

Recomendaciones

Se recomienda determinar el tiempo de retención de las aguas en la PTAR, tanto en época seca como lluviosa, con el fin de analizar si hay diferencias respecto al valor del diseño, esto facilitaría realizar ajustes operativos convenientes para la operación de la planta.

Con las bajas remociones de fósforo y nitrógeno amoniacal, se deja en evidencia la necesidad de continuar con el proyecto de mejoramiento ambiental, y construir la etapa intermedia y segunda etapa de la PTAR con tratamiento secundario, con el fin de mejorar la remoción de materia orgánica (DBO y DQO), surfactantes (SAAM) y nutrientes (N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-}).

A pesar de que los coliformes fecales no son requeridos para monitorear el vertido de la PTAR es importante valorar una modificación en la normativa del Reglamento de Vertido y reuso de aguas residuales para que se lleve un control completo microbiológico del vertido, con el fin de valorar el impacto en los cuerpos de agua.

Con el fin de establecer una congruencia entre el Reglamento de clasificación de cuerpos de agua y el Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales, se recomienda incluir el

monitoreo de nitrógeno amoniacal en los parámetros de control obligatorio para el vertido a cuerpos de agua.

Se recomienda valorar la posibilidad de incluir otros índices de contaminación en el Reglamento de Clasificación de cuerpos de agua que incorpore otros parámetros fisicoquímicos que den una visión más completa del estado de contaminación.

Se recomienda al AyA establecer algún sistema que permita la recopilación y transmisión de información expedita sobre la población que ha sido beneficiada con la conexión a la PTAR, estos datos aportarían mucha información para ampliar el análisis sobre los comportamientos mostrados de los contaminantes y la PTAR.

Referencias

- Acosta, R. (2008). *Saneamiento ambiental e higiene de los alimentos*. Córdoba: Brujas.
- Angulo, F. (2015). Gestión del Recurso Hídrico y Saneamiento en Costa Rica. *Vigésimo primer informe del Estado de la Nación y Desarrollo Humano Sostenible*.
- ARESEP. (2017). *Política Nacional de Saneamiento de aguas residuales*. Costa Rica.
- Ballesteros, M. (2013). Organizaciones comunales prestadoras del servicio de agua universalizan el acceso y disminuyen la pobreza. *Revista de Ciencias ambientales*, 45(1), 23-40. doi:<https://doi.org/10.15359/rca.45-1.3>
- Calvo, G., & Mora, J. (2007a). Evaluación y clasificación preliminar de la calidad de agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón. Parte III: Calidad de cuerpos receptores de agua, según el Sistema Holandés de Valoración. *Tecnología en marcha*, 20(4), 59-67. Recuperado el 17 de julio de 2021, de https://181.193.125.13/index.php/tec_marcha/article/view/452/380
- Calvo, G., & Mora, J. (2007b). Evaluación y clasificación preliminar de la calidad del agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón. Parte I: Análisis de la contaminación de cuatro ríos del área metropolitana. *Tecnología en Marcha*, 20(2), 3-9. Recuperado el 17 de julio de 2021, de https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/46/45
- Calvo, G., & Mora, J. (2012). Contaminación fecal en varios ríos de la Gran Área Metropolitana y la Península de Osa. *Tecnología en Marcha*, 25(4), 33-39. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i4.617>
- Díaz, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (Junio de 2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 14(1), 78-97. Recuperado el 4 de julio de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>
- Echeverría, J., & Cantillo, B. (2013). Instrumentos económicos para la gestión del agua. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 13-22. doi:<https://doi.org/10.15359/rca.45-1.2>
- FAO. (2012). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo* (Segunda ed.). Madrid: Mundi-

Prensa. Recuperado el 16 de Julio de 2021, de Usos del agua:
<http://www.fao.org/3/i1688s/i1688s.pdf>

Herrera, J., Rodríguez, S., Rojas, F., Herrera, E., & Chaves, M. (Junio de 2013). Variación temporal y espacial de la calidad de las aguas superficiales en la subcuenca del río Virilla (Costa Rica) entre 2006 y 2010. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 51-62.
doi:[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:1\(13\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:1(13))

ICAFE. (29 de Noviembre de 2018). *Análisis histórico de lluvias*. Obtenido de Análisis de condiciones agroclimáticas de las regiones cafetaleras: <http://www.icafe.cr/analisis-historico-de-lluvias/>

Jiménez, O. (2012). *Revisión de los límites de DBO y SST especificados para el agua tratada de la primera etapa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Los Tajos*. *Hidrogénesis*, 10 (1) 65-71. <https://es.scribd.com/document/386624821/Revista-Hidrogenesis-Vol-10-No-1-2012>

Martínez, G., & Villalejo, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72.

Metcalf, & Eddy, I. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (Vol. I). México: McGraw Hill / Interamericana editores S.A.

MINAE-S. (2004). Decreto 32133. *Declaratoria de interés público y necesidad social el diseño, financiamiento, ejecución, operación y mantenimiento de obras para la recolección, tratamiento y disposición final de aguas residuales, generados en centros urbanos*. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=54049&nValor3=102115&strTipM=TC

MINAE-S. (9 de marzo de 2007). *DIGECA*. Obtenido de Decreto N° 33903. Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de los cuerpos de agua superficiales:
http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/de-33903reglamento_evaluacion_clasificacion_cuerpos_de_agua_0.pdf

Mora, D., & Portuguez, C. (2019). Agua para consumo humano por provincias y saneamiento por regiones manejados en forma segura en zonas urbanas y rurales de Costa Rica al 2018. *Tecnología en Marcha*, 31(2). Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v31n2/0379-3982-tem-31-02-72.pdf>

ONU-Agua. (2019). *Informe mundial de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. Francia: UNESCO.

Presidencia de la República (29 de marzo de 2016). *Planta de tratamiento Los Tajos genera beneficios adicionales al saneamiento*. Recuperado el 16 de julio de 2021, de Proyecto de préstamo Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José:
<https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2016/03/planta-de-tratamiento-los-tajos-genera-beneficios-adicionales-al-saneamiento/>

- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. España: Reverté.
- Ramírez, J. (2006). Detergentes orgánicos sintéticos y ambiente. *Hidrogenesis*, 4(1), 22-27.
- Reynolds, K. (2002). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación del problema. *De la Llave, Agua Latinoamericana*, 1-4.
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (2006). *Informe de vigilancia tecnológica: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: CITME.
- Rojas, R. (2002). Gestión integral de tratamiento de aguas residuales. *Sistemas de tratamiento de aguas residuales*. OMS. Recuperado el 11 de Abril de 2021, de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57123734/GESTION_INTEGRAL_DEL_TRATAMIENTO_AR.pdf?1533263624=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCurso_Internacional_GETION_INTEGRAL_DE_T.pdf&Expires=1618167283&Signature=O9OKErGYlt-0KtqFLJw2RTG4untPLxJo
- Solano, J., & Villalobos, R. (2001). Aspectos fisiográficos aplicados a un Bosquejo de Regionalización Geográfica Climático de Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanog.*, 8(1), 26-39. Recuperado el 17 de julio de 2021, de https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Villalobos/publication/228799654_Aspectos_Fisiograficos_aplicados_a_un_Bosquejo_de_Regionalizacion_Geografico_Climatico_de_Costa_Rica/links/54f0b0b60cf2f9e34efd1860/Aspectos-Fisiograficos-aplicados-a-un-Bosquej
- Teixeira, G., Sánchez, I., Gebara, D., Dall'Adlio, M., & Matsumoto, T. (2013). Remoción de fósforo de diferentes aguas residuales en reactores aeróbios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna. *Fac. Ing. Univ. Antioquia*(67), 172-182.
- Valverde, R. (2013). Disponibilidad, distribución, calidad y perspectivas del agua en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 5-12. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5536178>
- Vargas, E., & Marín, A. (2016). Costa Rica demanda una gestión integral del recurso hídrico: Escenario latinoamericano y la realidad país. *InterSedes*, 17(35), 1-26. Obtenido de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/25565>

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

La contaminación de los cuerpos de agua se relaciona directamente con la descarga de aguas residuales. Debido a esto es necesario que el país continúe invirtiendo en saneamiento y alcantarillado, evitando así que las aguas residuales lleguen crudas a los ríos y disminuir el grado de contaminación de estos.

Se estableció que el río Torres ya presentaba un nivel de contaminación severo antes de la construcción de la PTAR. Sin embargo, durante los muestreos aguas arriba y aguas abajo se

comprobó que la calidad del río no cambia en época seca, pero sí lo hace en época lluviosa, aumentando un nivel de contaminación con el vertido de la PTAR.

Se demostró el aporte de coliformes fecales de la PTAR al río Torres aguas abajo. La mayor diferencia en los valores se evidencia entre los datos de aguas arriba y aguas abajo, en época lluviosa.

Se comprobó que la PTAR remueve efectivamente los contaminantes esperados para un tratamiento primario, superando el rango esperado según la literatura para DBO (52 %), DQO (50 %) SSed (95%) y SST (68 %). Por otro lado, se obtuvo un porcentaje de 31 para STT, 55 para GyA y 21 para SAAM. Los porcentajes de remoción de $N-NH_4^+$ y $P-PO_4^{3-}$ obtenidos fueron bajos, sin embargo, es de esperar para este tipo de tratamiento por que los nutrientes y surfactantes no se remueven en un tratamiento primario, sino que requieren de tratamiento secundario y/o terciario.

La PTAR Los Tajos ha realizado un aporte ambiental al río Torres al remover contaminantes de las aguas residuales durante los años de operación (2015-2020). Removió en total 12,290 Mg de DBO, 26,782 de Mg de DQO, 24,163 Mg de SST, 30,268 Mg de STT y 3,434 Mg de GyA de las aguas residuales, principalmente. En menor cantidad, y considerando que la PTAR brinda solamente tratamiento primario, se removieron 213 Mg de SAAM, 0.80 de kg de $N-NH_4^+$ y 1.3 Mg de $P-PO_4^{3-}$.

Recomendaciones

Se recomienda determinar el tiempo de retención de las aguas en la PTAR, tanto en época seca como lluviosa, con el fin de analizar si hay diferencias respecto al valor del diseño, esto facilitaría realizar ajustes operativos convenientes para la operación de la planta.

Con las bajas remociones de fósforo y nitrógeno amoniacal, se deja en evidencia la necesidad de continuar con el proyecto de mejoramiento ambiental, y construir la etapa intermedia y segunda etapa de la PTAR con tratamiento secundario, con el fin de mejorar la remoción de materia orgánica (DBO y DQO), surfactantes (SAAM) y nutrientes ($N-NH_4^+$, $P-PO_4^{3-}$).

A pesar de que los coliformes fecales no son requeridos para monitorear el vertido de la PTAR es importante valorar una modificación en la normativa del Reglamento de Vertido y reuso de aguas residuales para que se lleve un control completo microbiológico del vertido, con el fin de valorar el impacto en los cuerpos de agua.

Con el fin de establecer una congruencia entre el Reglamento de clasificación de cuerpos de agua y el Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales, se recomienda incluir el monitoreo de nitrógeno amoniacal en los parámetros de control obligatorio para el vertido a cuerpos de agua.

Se recomienda valorar la posibilidad de incluir otros índices de contaminación en el Reglamento de Clasificación de cuerpos de agua que incorpore otros parámetros fisicoquímicos que den una visión más completa del estado de contaminación.

Se recomienda al AyA establecer algún sistema que permita la recopilación y transmisión de información expedita sobre la población que ha sido beneficiada con la conexión

a la PTAR, estos datos aportarían mucha información para ampliar el análisis sobre los comportamientos mostrados de los contaminantes y la PTAR.

Anexos

ANEXO 1: CARTA DE RECEPCIÓN DE LA REVISTA CIENTÍFICA



UNA-UNICIENCIA-FCEN-CONS-038-2021

Pág 1

14 de julio de 2021

Certificado de recepción

Por medio de la presente, en calidad de director de la Revista Uniciencia certifico que el artículo:

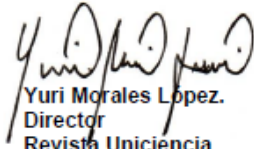
Nombre del manuscrito: *Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos*

Autores: *Carmen Mora-Aparicio, Carolina Alfaro-Chinchilla, Junior Pastor Pérez-Molina, Ilena Vega-Guzmán*


Fue recibido para valoración en nuestra revista el día 9 de julio de 2021, cumpliendo con todas las condiciones para la postulación de trabajos.

Este certificado de recepción no implica la publicación del manuscrito indicado.

Atentamente,



Yuri Morales López.
Director
Revista Uniciencia
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
Universidad Nacional.
86-3000, Heredia, Costa Rica.
revistauniciencia@una.cr
<http://www.revistas.una.ac.cr/uniciencia>



Uniciencia

Tel. (506) 2277-3000
Apartado 86-3000
Heredia
Costa Rica
www.una.ac.cr

