

## EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR LAGUNAS FACULTATIVAS SECUNDARIAS. EVALUACION ESTACIONAL.

Marín Graciela N.<sup>1</sup>; Biolé Fernanda G.<sup>1</sup>; Moyano Silvia A.<sup>1</sup>; Bruno Sofía<sup>1</sup>; Murialdo Estefano<sup>1</sup>; Carabajal Simón<sup>1</sup>.

1: Laboratorio de Química y Microbiología.  
Facultad Regional Villa María.  
Universidad Tecnológica Nacional  
Av. Universidad 450. (5900). Villa María, Córdoba, Argentina.  
e-mail: gramarin@hotmail.com, web: <http://www.frvn.utn.edu.ar>

**Resumen.** *Las lagunas de estabilización son una opción viable para el tratamiento de aguas residuales. El objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño de las lagunas facultativas secundarias de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, durante las diferentes épocas climáticas del año. En la planta depuradora en estudio, las lagunas facultativas realizan el segundo tratamiento biológico del sistema. Su función es continuar el proceso de estabilización del líquido efluente, proveniente de las lagunas aireadas, mediante varios procesos simultáneos como la decantación, la digestión anaeróbica, la oxidación biológica y la eliminación de los patógenos. Para la evaluación de dichos procesos, se monitorean mensualmente la entrada y salida de dichas lagunas facultativas, durante un periodo de cuatro años (2018 a 2021). Se realiza la medición de: Demanda Química de Oxígeno (DQO); Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>); Sólidos Sedimentables; Sólidos en Suspensión; Coliformes Termotolerantes y Coliformes Totales, utilizando los métodos del Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater. Los porcentajes de remoción máximos oscilaron para la DQO entre 47% y 83 %, la DBO<sub>5</sub> entre 67 y 85%, la DBO<sub>5</sub> filtrada entre 61 y 84 %, los Sólidos Sedimentables en 100%, los Sólidos en Suspensión entre 45 % y 99%. En relación a los parámetros microbiológicos, tanto en Coliformes Totales, como en Coliformes Termotolerantes, alcanzaron máximos de hasta el 99%. Dichos valores máximos de % de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub> y Coliformes Termotolerantes, en general son coincidentes con los meses de temperaturas más altas. Para Coliformes Totales, la eficiencia de remoción no presenta diferencias significativas entre el invierno y verano. En relación a los resultados se concluye que las lagunas facultativas secundarias, permiten efectuar la estabilización y desinfección de las aguas residuales mediante la acción de microorganismos aeróbicos, anaerobios y facultativos, con mejores resultados en los meses de mayor temperatura.*

**Palabras clave:** Eficiencia de Remoción en Efluentes, Lagunas Facultativas Secundarias, Monitoreo DBO<sub>5</sub> y DQO, Tratamiento De Aguas Residuales.

## 1. INTRODUCCIÓN

El propósito principal del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, el cual puede estar en forma de partículas en suspensión y/o disueltas, con objeto de alcanzar una calidad de agua requerida por la normativa, según la reutilización a la que se destinará. Esto se logra mediante la integración de operaciones (físicas) y procesos (químicos y biológicos) unitarios, que serán seleccionados en función de las características del agua residual a tratar y de la calidad deseada del agua tratada.

Los objetivos del tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En el caso del agua residual doméstica, el principal objetivo es la reducción de la materia orgánica presente y la eliminación de nitrógeno y fósforo (Metcalf & Eddy, 1991).

En los procesos de tratamiento por lagunaje, los estanques en los que la estabilización de las aguas residuales se lleva a cabo mediante una combinación de bacterias facultativas, anaerobias y aerobias, se conocen como estanques de estabilización facultativos o lagunas facultativas.

En un estanque facultativo existen tres zonas: (1) una zona superficial en la que existen bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica, (2) una zona inferior anaerobia en la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias y (3) una zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas (Metcalf & Eddy, 1991).

Cuando un agua residual que contiene materia orgánica en solución o en suspensión se pone en contacto con una población de microorganismos, éstos la utilizan para efectos de derivar de dicha materia orgánica la energía necesaria para sus procesos vivientes y para asegurar la conservación de la especie con la generación de más microorganismos.

Los estanques de estabilización facultativos se alimentan con agua residual procedente de un proceso previo de desbaste o con el efluente de un tratamiento primario. Los sólidos de gran tamaño sedimentan para formar una capa de fango anaerobio. Los materiales orgánicos sólidos y coloidales se oxidan por la acción de las bacterias aerobias y facultativas empleando el oxígeno generado por las abundantes algas presentes cerca de la superficie. El dióxido de carbono que se produce en el proceso de oxidación orgánica, sirve como fuente de carbono para las algas. La descomposición anaerobia de los sólidos de la capa de fango comporta la producción de compuestos orgánicos disueltos y de gases tales como el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{S}$  y el  $\text{CH}_4$ , que o bien se oxidan por las bacterias aerobias, o se liberan a la atmósfera. La eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables, y la estabilización de la materia orgánica se consiguen biológicamente, gracias a la acción de una variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Los microorganismos se utilizan para convertir la materia orgánica carbonosa coloidal y disuelta en diferentes gases y tejido celular (Metcalf & Eddy, 1991).

En este tipo de lagunas se pueden encontrar múltiples tipos de microorganismos, desde anaerobios estrictos en el lodo del fondo, hasta aerobios estrictos en la zona inmediatamente adyacente a la superficie. Pero los seres más adaptados serán los microorganismos facultativos, dado que pueden sobrevivir a las condiciones cambiantes de oxígeno disuelto, típicas de estas lagunas a lo largo del día y del año. Además de bacterias y protozoos, es esencial la presencia de microalgas, que son las principales suministradoras de oxígeno.

Debido a la complejidad biológica de este sistema, las condiciones ambientales de temperatura y de pH tienen un papel importante en la supervivencia y crecimiento de las bacterias, y por

ende en los procesos de depuración, es que se tiene especial consideración su análisis. El objetivo principal de esta investigación es evaluar el desempeño de las lagunas facultativas secundarias, de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, durante las diferentes épocas climáticas del año.

## **2. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL SISTEMA.**

En la planta depuradora en estudio, las lagunas facultativas o de maduración realizan el segundo tratamiento biológico del sistema. Su función es continuar el proceso de estabilización del líquido efluente, proveniente de las lagunas aireadas, mediante varios procesos simultáneos como la decantación, la digestión anaeróbica y la oxidación biológica, facilitando además la eliminación de los patógenos.

El contenido de oxígeno en el líquido se debe principalmente a la acción de la aireación de la etapa anterior (lagunas aireadas), al aportado por la acción fotosintética de las algas, y en menor medida, a la transferencia desde la interfase aire-líquido de la superficie.

El módulo evaluado se encuentra conformado por tres lagunas facultativas dispuestas en paralelo. El líquido de ingreso proviene de una cámara partidora (líquido de entrada), y se distribuye de igual en igual medida entre las tres lagunas. El líquido de salida de las tres, que se reúne en una única cámara de salida (líquido de salida), para luego continuar con el proceso de desinfección. Las eficiencias se determinan a partir de la toma de muestras en dichas cámaras de entrada y salida. A partir de la diferencia del parámetro considerado entre ambos puntos de muestreo, se calcula el porcentaje de eficiencia (%).

Las lagunas están conformadas en el terreno natural mediante excavaciones y terraplenes. La superficie libre de cada laguna es de 413 m por 102 m y tienen una profundidad de 2,20 m, lo que da un volumen de 85.000 m<sup>3</sup> por laguna y un período aproximado de permanencia del líquido de 12 días, según el manual de diseño.

## **3. MATERIALES Y MÉTODOS.**

Para realizar esta evaluación de eficiencia y su variación estacional, se monitorea la entrada y la salida de las lagunas facultativas. El muestreo se realiza mensualmente, y se toma para este estudio un periodo de cuatro años (2018 a 2021).

Se realiza la medición y el seguimiento de los siguientes parámetros: Demanda Química de Oxígeno (DQO); Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>); Sólidos Sedimentables Totales en peso (SST), Sólidos en Suspensión (SS); Coliformes Termotolerantes (CTT) y Coliformes Totales (CT).

Las temperaturas del líquido son relevadas semanalmente, en cada una de las tres lagunas facultativas y se toma el promedio, como valor de registro semanal para este trabajo. La medición se realiza con un equipo Hanna HI 9142 Medidor Oxígeno Disuelto portátil (OD/Temperatura) con sonda polarográfica.

Tanto para la extracción de las muestras, como en la determinación los parámetros físico químicos, biológicos y microbiológicos considerados, se utilizan los métodos del Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater, 21<sup>st</sup>, Edition 2005. Los análisis se realizan en el Laboratorio de la UTN, Facultad Regional Villa María.

Los resultados indicados como porcentajes % de eficiencia corresponden al módulo evaluado, y se obtiene del muestreo del líquido de entrada desde una cámara, que se distribuye en igual medida entre las tres lagunas, y el líquido de salida de las mismas, que

se reúne en una única cámara.

Para el procesamiento de datos se utiliza Excel y sus herramientas de análisis estadístico.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### 3.1. Evaluación de las temperaturas del líquido.

Para el cumplimiento del objetivo y con el fin de analizar la incidencia de los cambios de temperatura del líquido sobre la eficiencia de la depuración, es que se tienen en cuenta las temperaturas del líquido y su variación en relación a los meses del año. Dado que la temperatura del agua posee un régimen de variación particular, se considera insuficiente solo relacionar los procesos con la temperatura ambiental.

Considerando entonces, que las bacterias pueden sobrevivir en un intervalo bastante amplio de valores de temperatura, el crecimiento óptimo se suele producir en un intervalo muy restringido. Las temperaturas por debajo de la óptima tienen efectos más importantes sobre el su crecimiento, que las superiores a ellas. Se ha podido comprobar que las tasas de crecimiento se duplican por cada aumento de 10 °C de la temperatura hasta alcanzar el valor óptimo. Según el intervalo de temperatura en el que el desarrollo bacteriano es óptimo, las bacterias se pueden clasificar en psicrófilas (-10 a 30 °C), mesófilas (20 a 50 °C) y termófilas (35 a 75 °C) (Metchalf Eddy, 1991).

En la tabla 1 se presentan las temperaturas promedio del líquido tomadas semanalmente a partir de la medición en cada una de las tres lagunas facultativas, y se realiza el gran promedio de los datos mensuales para cada año. Se aplica el análisis estadístico de Excel, que marca por colores aquellos datos que se encuentran por encima (verde) y por debajo (rojo) del promedio de 21,07 °C.

**Tabla1.** Temperaturas promedio de Lagunas Facultativas.

Año	2018	2019	2020	2021
<b>Mes</b>	<b>Temperatura °C</b>			
Enero	27,4	26,9	26,9	26,9
Febrero	25,9	29,1	25,0	24,8
Marzo	24,5	24,6	26,1	25,5
Abril	24,2	21,9	21,8	22,2
Mayo	17,5	17,5	15,3	16,7
Junio		14,3	13,5	13,8
Julio	12,7	13,2	11,1	13,8
Agosto		15,8	13,9	15,9
Septiembre		17,2	17,4	17,5
Octubre		19,6	19,0	
Noviembre	24,7	25,6	25,1	25,4
Diciembre	26,5	24,5	26,5	28,6

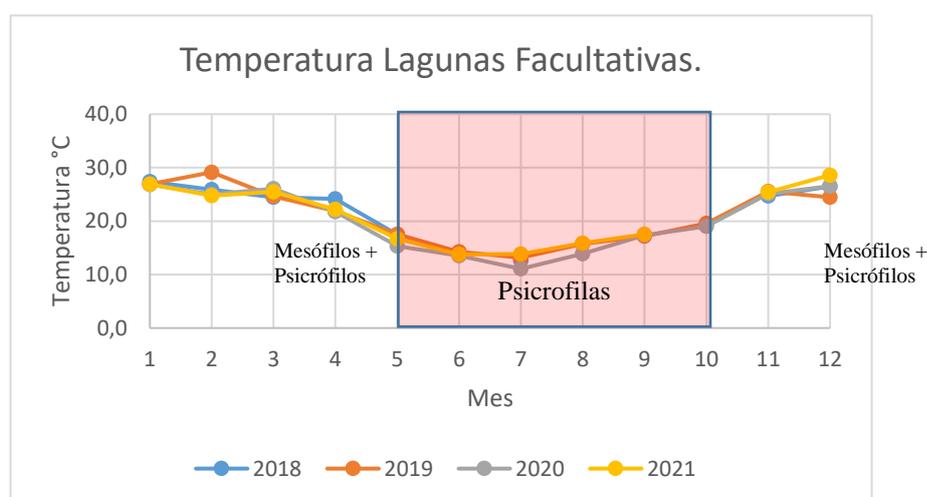
La división por color realizada por el análisis estadístico de Excel muestra en color rojo, que los meses comprendidos entre mayo y octubre, presentan temperaturas se encuentran por debajo del promedio de 21,07 °C. Además dicho período las temperaturas están entre 11,1 °C y 19,6 °C, encontrándose en el rango óptimo para el desarrollo de las bacterias y organismos psicrófilos según lo expuesto. Este comportamiento de temperatura se mantiene durante los 4 años del periodo evaluado (figura 1). La denominación numérica de los meses corresponde a 1: enero, hasta 12: diciembre, respectivamente.

Se observa además en la tabla 1 y la figura 1 que en los meses de enero, febrero, marzo, abril,

noviembre y diciembre, las temperaturas se encuentran en un rango mayor a 20°C, con máximos registrados de 29,1°C, lo que favorece el desarrollo de las bacterias mesófilas (20 a 50 °C) conjuntamente con las psicrófilas (-10 a 30°C).

Se realiza aplicación de ANOVA entre-grupos tomando los resultados de los 4 años evaluados y un componente dentro-de-grupos. La razón-F es igual a 0,429821, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 4 años considerados.

La Figura 1 muestra el periodo del año en donde se produce este mínimo de la temperatura del líquido de las lagunas facultativas, que coinciden en los 4 años evaluados.



**Figura 1.** Temperaturas lagunas facultativas. □ Temperaturas inferiores al promedio de 21,07 °C.

Según Sierra (2011) la temperatura ambiental es un parámetro físico de consideración en el agua residual, a su vez interviene en los parámetros de instalación y diseño de las plantas depuradoras para aguas residuales, en las operaciones de coagulación, actividad microbiana, sedimentación, etc. La temperatura incide en las reacciones físicas, químicas y biológicas, una caída al 10°C de temperatura reduce la actividad microbiana en un 50%, la producción óptima de oxígeno se obtiene con temperaturas de 20°C a 25°C. La temperatura ejerce una influencia significativa sobre la oxidación de la materia orgánica (Droste & Gehr, 2019).

Todas las bacterias necesitan de oxígeno, las aerobias utiliza oxígeno disuelto para la descomposición de la materia orgánica, las anaerobias obtienen oxígeno de las materias en descomposición, para una mejor eficiencia en la actividad microbiana, los microorganismos necesitan de una temperatura favorable, entre ellos tenemos los mesófilos las cuales prosperan mejor a temperaturas entre 20°C a 40°C (New York State Department of Health, 1980).

### 3.2. Evaluación de la eficiencia de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub> y Sólidos Sedimentables y en Suspensión.

Los resultados de las eficiencias halladas para DQO, DBO<sub>5</sub> y Sólidos Sedimentables y en Suspensión se resumen en las tablas de datos indicando los % de eficiencia según la evaluación del líquido de entrada – salida de este módulo facultativo.

Se presentan a continuación en la tabla 2, los datos de % de eficiencia mensuales de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Se resaltan con color verde los máximos y con rojo los mínimos de eficacia encontrados por año evaluado (\*), y resaltan con negrita los máximos y mínimos de los 4 años evaluados (\*\*), con el fin de visualizar el comportamiento de los mismos.

**Tabla 2.** Eficiencia de Demanda Química de Oxígeno (DQO).

		DQO: Eficiencia %													
Año		Mes												Anual (*)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Max	Min
2018		46,99	28,70	13,66	19,14	38,58	33,15	33,45	31,89	26,85	44,42	39,10	34,62	46,99	13,66
2019		1,90	20,60	15,16	52,03	24,76	83,85	32,04	5,07	53,77	59,76	60,76		83,85	1,90
2020		47,04	21,55	49,42	19,67	11,95	42,19	-4,88	25,33	52,28	36,26	32,10	27,13	52,28	-4,88
2021		34,58	31,36	33,18	63,62	37,11	67,31	27,02	38,98	28,68	16,20	22,52	10,77	67,31	10,77
4 años (**)	Max	47,04	31,36	49,42	63,62	38,58	83,85	33,45	38,98	53,77	59,76	60,76	34,62		
	Min	1,90	20,60	13,66	19,14	11,95	33,15	-4,88	5,07	26,85	16,20	22,52	10,77		

Los porcentajes de eficiencia máximos y mínimos anuales, no poseen un comportamiento asociado a las temperaturas del líquido, ni a las variaciones estacionales. Se encuentra gran variabilidad en los máximos evaluados por año, con valores que van desde el 47 % hasta el 83 %. El valor promedio máximo es de 49,60 % y el promedio de mínimos de 14,74%. Los mínimos negativos, están indicando un valor de salida superior al de entrada, que pueden asociarse al desarrollo algal, u otros factores composicionales. A continuación en la tabla 3 se realiza un análisis similar para la DBO<sub>5</sub>.

**Tabla 3.** Eficiencia de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

		DBO <sub>5</sub> : Eficiencia %													
Año		Mes												Anual	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Max	Min
2018		55,79	47,03	47,34	58,39	63,11	4,35	25,15	9,09	40,44	49,46	43,53	70,89	70,89	4,35
2019		45,05	41,35	43,06	60,75	13,48	53,68	49,58	-48,23	47,00	72,07	51,34	51,95	72,07	-48,23
2020		85,21	45,48	46,34	65,33	49,70	35,14	1,42	25,81	42,04	49,75	38,89	49,74	85,21	1,42
2021		59,89	49,85	43,48	66,90	38,37	56,49	16,34	-5,69	33,00	52,11	34,11	34,31	66,90	-5,69
4 años (**)	Max	85,21	49,85	47,34	66,90	63,11	56,49	49,58	25,81	47,00	72,07	51,34	70,89		
	Min	45,05	41,35	43,06	58,39	13,48	4,35	1,42	-48,23	33,00	49,46	34,11	34,31		

En la tabla 3 se observa que los porcentajes de eficiencia máximos y mínimos anuales, poseen un comportamiento asociado a las temperaturas del líquido (fig. 1), y por ende a las variaciones estacionales. Siendo el promedio de mínimos para los 4 años estudiados de 25,81%, las eficiencias mínimas por debajo del promedio son registradas entre mayo y agosto. Se encuentra variabilidad en los máximos evaluados por año, con valores que van desde el 67 % hasta el 85 %, siendo el promedio de máximos de 57,13%. Los mínimos negativos, están indicando un valor de salida superior al de entrada, esto puede que pueden asociarse a cambios de temperatura del líquido y composicionales, durante el tiempo de residencia en la laguna. Este fenómeno deberá ser mejor estudiado. En la tabla 4 se observa que los porcentajes de eficiencia máximos y mínimos anuales (\*), poseen un comportamiento asociado a las temperaturas del líquido (fig. 1), y por ende a las variaciones estacionales.

**Tabla 4.** Eficiencia de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) Filtrada.

		DBO <sub>5</sub> Filtrada: Eficiencia %													
Año		Mes												Anual (*)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Max	Min
2018					67,68		13,79	20,16	-3,33	35,37	58,96	35,51	83,79	<b>83,79</b>	<b>-3,33</b>
2019		45,23	42,07	44,56	61,31	9,90	46,20	40,66	-58,40	41,10	62,86	50,73		<b>62,86</b>	-58,40
2020			47,95	41,88	61,21	45,17	21,16	-18,24	31,87	44,44	33,11	37,21	48,99	<b>61,21</b>	-18,24
2021		56,80	46,41	23,39	69,94	15,76	53,25	27,50	13,46	36,79	49,66	42,05	66,79	<b>69,94</b>	<b>13,46</b>
4 años	Max	56,80	47,95	44,56	69,94	45,17	53,25	40,66	31,87	44,44	62,86	50,73	83,79		
	Min	45,23	42,07	23,39	61,21	9,90	13,79	-18,24	-58,40	35,37	33,11	35,51	48,99		

El promedio registrado para los mínimos % de eficiencia en los 4 años es de 22,66%. Las eficiencias mínimas por debajo de dicho promedio son registradas en los meses de mayo a agosto.

En el caso de los % máximos de remoción, presentan un promedio de 52,67 %. Además se encuentra variabilidad en los máximos evaluados por año, con valores que van desde el 61 % hasta el 84 %. El comportamiento es similar al de DBO<sub>5</sub>, aunque no puede realizarse un análisis estricto, ya que no hay registros en algunos meses de 2018 y 2020.

Los mínimos negativos, están indicando un valor de salida superior al de entrada., que pueden asociarse a que la temperatura del líquido, tiempos de residencia y a factores composicionales y otras variables.

En el caso de las eficiencias de remoción de los Sólidos Sedimentables Totales, puede observarse en la tabla 5, que se mantiene en el 100% de remoción casi todo el año, y que los mínimos se encuentran distribuidos sin un orden atribuible a los cambios estacionales.

**Tabla 5.** Eficiencia de Sólidos Sedimentables Totales

		SST: Eficiencia %													
Año		Mes												Anual	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Max	Min
2018		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	86,7	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	<b>86,7</b>
2019		100,0	79,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	88,6	100,0	100,0	91,9	100,0	<b>100,0</b>	<b>79,0</b>
2020		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
2021		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-59,8	100,0	55,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	<b>-59,8</b>
4 años	Max	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		
	Min	100,0	79,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-59,8	100,0	55,0	91,9	100,0		

Crites & Tchobanoglous, (1998) aclaran que las Lagunas facultativas, conocidas como lagunas de estabilización, poseen 3 zonas, la aerobia, en donde las algas y bacterias tienen la actividad predominante; en la zona facultativa los principales descomponedores de la materia orgánica son las bacterias aerobias y anaerobias y por último la zona anaerobia, en donde los sólidos son depositados y fermentados. En este caso, se observa que el proceso descrito se realiza con elevada eficiencia la mayor parte del tiempo evaluado.

En la tabla 6 se presentan las eficiencias de remoción de los Sólidos en Suspensión Totales.

**Tabla 6. Eficiencia de Sólidos en Suspensión Totales**

		SST: Eficiencia %													
Año		Mes												Anual	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Max	Min
2018		-12,4	12,2	-11,3	19,9	18,6	-50,0	-9,0	-1,6	-2,3	99,1	57,5	-31,6	99	-50
2019		-21,4	-49,2	2,3	50,8	16,3	35,8	72,3	56,6	59,1	36,3	2,8	23,1	72	-49
2020		7,2	25,3	30,8	6,3	10,3	30,0	21,4	29,1	19,2	24,3	44,9	35,5	44,9	6,3
2021		14,6	14,6	47,2	29,9	53,9	25,7	44,4	31,9	34,9	18,2	22,1	-55,1	54	-55
4 años	Max	14,6	25,3	47,2	50,8	53,9	35,8	72,3	56,6	59,1	99,1	57,5	35,5		
	Min	-21,4	-49,2	-11,3	6,3	10,3	-50,0	-9,0	-1,6	-2,3	18,2	2,8	-55,1		

Los Sólidos en Suspensión Totales muestran eficiencias Máximas van desde 45 % al 99%, siendo el promedio de máximos de 50,6 %. El promedio de mínimos es de -13,5%, lo que indica que en muchos casos se producen valores de salida de SST mayores que los de entrada. Los máximos y mínimos se encuentran distribuidos sin un orden atribuible a los cambios estacionales.

Yáñez, (1976) aclara que el funcionamiento global del sistema de tratamiento de agua residual mediante procesos biológicos requiere que dichos procesos operen adecuadamente para que otros procesos subsiguientes dentro del sistema cumplan con su cometido. Tal es el caso de la relación entre el funcionamiento de los procesos biológicos y los procesos de separación líquido-sólido. Los procesos biológicos logran la remoción de materia orgánica mediante la conversión de una fracción considerable en nueva masa celular. Si dicha masa celular queda en el efluente de la planta de tratamiento, la eficiencia global del proceso en la remoción de materia orgánica, cuya estabilización demanda oxígeno, no será muy alta. Por consiguiente, es necesario un proceso que separe del efluente los sólidos en suspensión, compuestos en su mayor parte por masa celular.

En las lagunas facultativas secundarias es en donde se produce la separación de las fases líquido-sólido, a través de la sedimentación. Para que la eficiencia del sistema de tratamiento sea suficientemente alta, es preciso que la sedimentación secundaria opere adecuadamente. Una sedimentación pobre conduce a aumentar la DBO del efluente debido a la respiración endógena de los microorganismos.

### 3.3. Evaluación de la eficiencia de remoción de Coliformes Totales y Termotolerantes.

En la tabla 7 se presentan las eficiencias de remoción para Coliformes Termotolerantes.

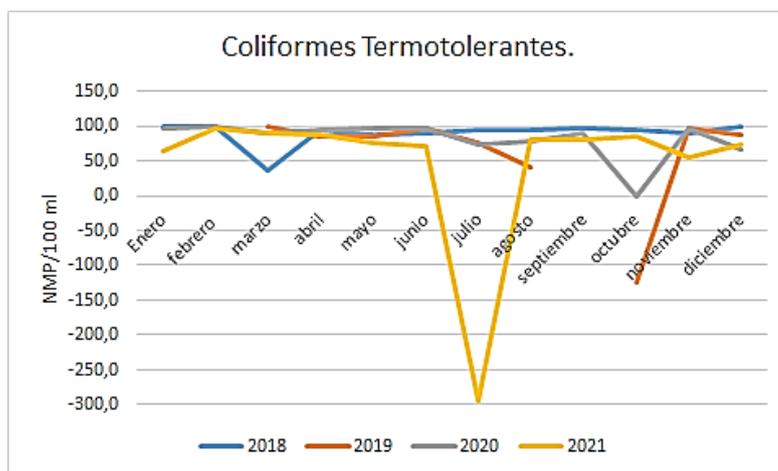
**Tabla 7. Eficiencia de Coliformes Termotolerantes.**

		Coliformes Termotolerantes - Eficiencia %													
Año		Mes												Anual (*)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Max	Min
2018		99,8	98,4	37,2	95,2	86,9	90,0	95,3	95,0	97,0	95,1	90,0	99,9	99,9	37,2
2019				99,3	85,3	84,5	97,0	76,6	41,8		-124,5	95,5	86,5	99,3	-124,5
2020		95,6	99,6	90,6	93,5	97,8	97,1	72,5	77,6	90,0	0,0	96,6	66,7	99,6	0,0
2021		65,0	96,6	88,5	88,2	76,6	70,9	-293,9	81,3	80,6	86,1	55,9	73,0	96,6	-293,9
4 años	Max	99,8	99,6	99,3	95,2	97,8	97,1	95,3	95,0	97,0	95,1	96,6	100,0		
	Min	65,0	96,6	37,2	85,3	76,6	70,9	-293,9	41,8	80,6	-124,5	55,9	66,7		

Las eficiencias máximas anuales (\*) para estos microorganismos se encuentran entre el 96 % y el 99,9 %.

Se observa en la figura 2 que en los meses de mayor temperatura la eficiencia de remoción presenta menor variabilidad anual. Por su parte se observan mínimos y rangos mayores en marzo de 2018, julio de 2019 octubre de 2020 y julio de 2021

Figura 2. Eficiencia por año o anual (\*).



Estos resultados están de acuerdo con los encontrados en estudios para sistemas de depuración similares donde se observa una eficiencia de remoción de coliformes Termotolerantes de hasta 99%, realizados en la PTAR de Sicaya, en Huancayo, Perú (Bunja Benguer, 2018).

El porcentaje de remoción alcanzado en el sistema de depuración a través de lagunas de estabilización reportados por Berto et al. (2009) que utilizan una combinación de degradación biológicas, con el cual se logra obtener un porcentaje de remoción de 100% de este parámetro.

Para la evaluación del conjunto de datos de los 4 años evaluados, los coliformes Termotolerantes poseen variaciones en las distintas épocas del año, encontrado rangos de dispersión mayores en marzo, julio, octubre y noviembre. Es por ello que no puede asociarse a una tendencia estacional aunque se observa una mejor eficacia y menos variabilidad en el periodo de temperaturas mayores como puede verse en la figura 3.

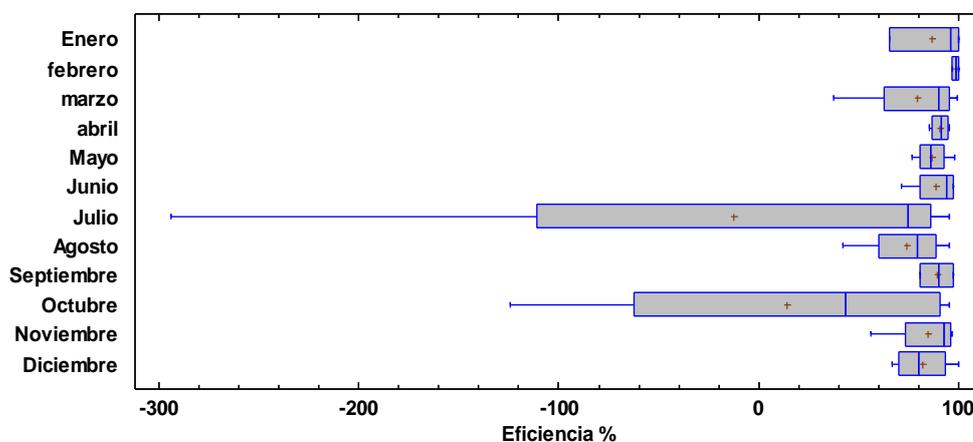


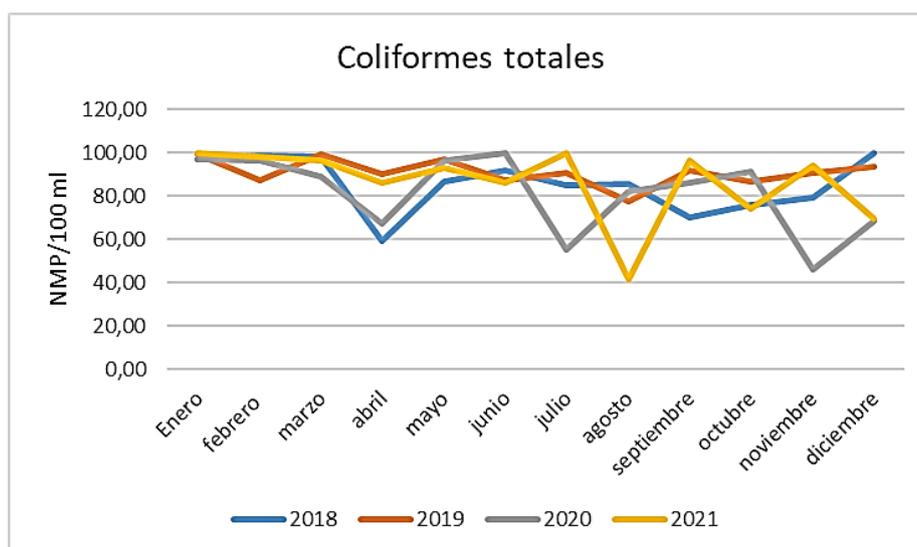
Figura 3. Eficiencia de Coliformes Termotolerantes para el periodo de 4 años.

En la tabla 9, se muestran los datos de eficiencia de Coliformes Totales. Se realiza el análisis de eficiencia por año o anual (\*) y el análisis del comportamiento del grupo de datos para los 4 años, en las figuras 3 y 4 respectivamente.

**Tabla 9. Eficiencia de Coliformes Totales.**

		Coliformes Totales - Eficiencia %													
Año		Mes											Anual (*)		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Max	Min
2018		97,0	99,0	98,0	59,3	86,9	92,0	85,0	85,4	70,0	75,9	79,6	99,9	99,9	59,3
2019		99,1	87,3	99,4	90,4	97,1	87,1	90,9	77,6	91,9	86,5	90,6	93,4	99,4	77,6
2020		97,0	96,2	88,8	67,1	96,7	99,8	55,6	82,3	86,3	91,4	46,2	68,6	99,8	46,2
2021		99,8	97,9	96,3	86,3	92,9	86,3	99,9	41,8	96,3	73,9	93,9	69,4	99,9	41,8
4 años	Max	99,8	99,0	99,4	90,4	97,1	99,8	99,9	85,4	96,3	91,4	93,9	100,0		
	Min	97,0	87,3	88,8	59,3	86,9	86,3	55,6	41,8	70,0	73,9	46,2	68,6		

Para coliformes totales se observa en la figura 4 que se presentan variaciones en las distintas épocas del año, encontrado rangos de dispersión mayores para % anuales (\*).



**Figura 4.** Eficiencia anual para coliformes totales.

Del mismo modo en la evaluación del conjunto de datos de los 4 años evaluados (figura 5) los valores mensuales evaluados en dicho periodo no presentan un comportamiento asociado a los meses de temperaturas del líquido, por ende estacional, encontrándose variabilidad de rangos, promedios y medianas, que no siguen un comportamiento estacional.

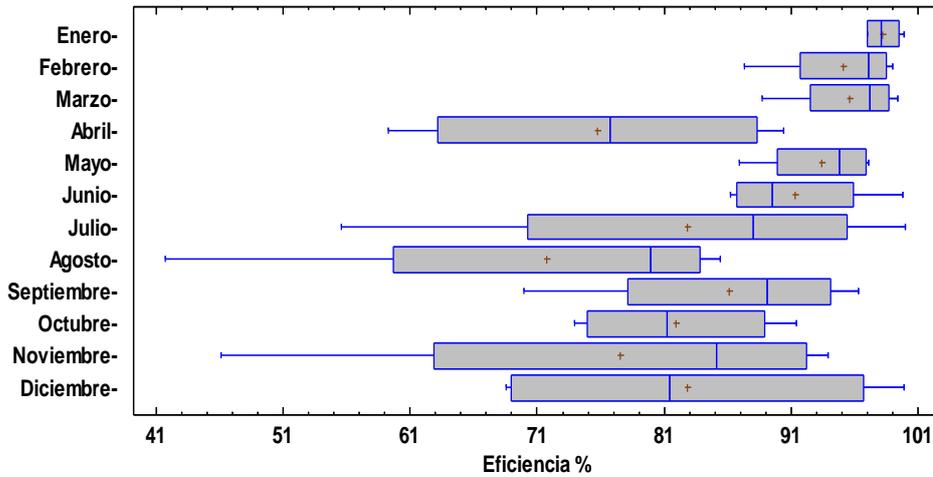


Figura 5. Eficiencia de Coliformes Totales para el periodo de 4 años

Finalmente, la temperatura juega un papel muy importante en todas las reacciones químicas y bioquímicas, pues afecta la tasa a la cual procede la reacción. La mayoría de las reacciones que ocurren en el rango de temperaturas en el cual hay óptima actividad biológica, sufre una duplicación en la velocidad a la cual procede la reacción por cada 10 °C que aumente la temperatura.

La remoción de DBO y su oxidación es efectuada por las masas biológicas en el floc. El grado de oxidación depende de la difusión de oxígeno que utilizado por los microorganismos. Cuando la temperatura ambiente (del reactor) es baja, se presentan unas tasas de utilización del O<sub>2</sub> que permiten una mayor difusión del oxígeno en el interior del sistema biológico y consecuentemente una mayor parte será aeróbica. A temperaturas altas, las tasas de oxidación son mayores y por consiguiente el O<sub>2</sub> es consumido más rápidamente, con lo cual disminuye su difusión y una parte menor de él será aeróbica. Se puede asumir que una masa mayor de microorganismos con tasas de oxidación menores durante los períodos de temperaturas bajas realiza la misma remoción de materia orgánica que una masa aeróbica menor pero con tasas de oxidación mayores durante los períodos de temperaturas altas (Yanez F., 1985).

## 12. CONCLUSIONES

A continuación se indican las principales conclusiones:

- Los meses comprendidos entre mayo y octubre, presentan temperaturas se encuentran por debajo del promedio de 21,07 °C. Además dicho período las temperaturas están entre 11,1 °C y 19,6 °C, encontrándose en el rango óptimo para el desarrollo de las bacterias y organismos psicrofilos. Esto condiciona en gran medida el comportamiento del sistema biológico.
- Para la DQO los porcentajes de eficiencia de remoción máximos y mínimos anuales, no poseen un comportamiento asociado a las temperaturas del líquido, ni a las variaciones estacionales. Se encuentra gran variabilidad en los máximos evaluados por año, con valores que van desde el 47 % hasta el 83 %. El valor promedio de los máximos anuales es de 49,60 % y de los mínimos de 14,74%.

- En la DBO<sub>5</sub> los porcentajes de eficiencia máximos y mínimos anuales, poseen un comportamiento asociado a las temperaturas del líquido y por ende a las variaciones estacionales. Siendo el promedio de mínimos para los 4 años estudiados de 25,81%, las eficiencias mínimas por debajo del promedio son registradas entre mayo y agosto. Se encuentra variabilidad en los máximos evaluados por año, con valores que van desde el 67 % hasta el 85 %, siendo el promedio de máximos de 57,13%.
- Para la DBO<sub>5</sub> filtrada, los porcentajes de eficiencia máximos y mínimos anuales poseen un comportamiento asociado a las temperaturas del líquido, y por ende a las variaciones estacionales. El % de eficiencia promedio registrado para los mínimos en los 4 años es de 22,66%. Las eficiencias mínimas por debajo de dicho promedio son registradas en los meses de mayo a agosto. Para los % máximos de remoción, presentan un promedio de 52,67 %. Además se encuentra variabilidad en los máximos evaluados por año, con valores que van desde el 61 % hasta el 84 %.
- Los Sólidos Sedimentables Totales poseen % de remoción del 100% y los Sólidos en Suspensión entre 45 % y 99%, y no muestran variaciones estacionales.
- En relación a los parámetros microbiológicos, tanto en Coliformes Totales, como en Coliformes Termotolerantes, alcanzaron máximos de hasta el 99%.
- Para Coliformes Totales, la eficiencia de remoción no presenta diferencias significativas entre el invierno y verano.
- Las lagunas facultativas secundarias, permiten efectuar la estabilización y desinfección de las aguas residuales con mejores resultados de % de remoción para DBO, SST y Coliformes Termotolerantes en los meses de mayor temperatura. Para la DQO, los sólidos en suspensión y Coliformes Totales las lagunas facultativas poseen eficiencia aleatoria durante el año.
- Deben agregarse el estudio de otras variables del sistema, sobre todo el desarrollo algal, para evaluar mejor estos comportamientos.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

- APHA-AWWA-WEF. (2005) Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed.
- Bunja Benguer, R. (2018). Coliformes Fecales y su Relación Con La Demanda Bioquímica De Oxígeno De Aguas Residuales De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Sicaya-Huancayo, Perú. Tesis. <https://repositorio.uncp.edu.pe>
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). Small and Decentralized Wastewater Management Systems. New York, United States of America: The McGraw- Hill Companies Inc.
- Droste, R., & Gehr, R. (2019). Theory and practice of water and wastewater treatment. Canadá, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Metcalf & Eddy. (1991) Wastewater Engineering: Treatment, Disposal And Reuse, Metcalf & Eddy. Inc. 3ª ed.
- New York State Department of Health. (1980). Manual of instruction for sewage treatment plant operators (First Edition ed.). New York, Unites States of America: New York Department of Health..
- Sierra, C. A. (2011). Calidad del agua evaluación y diagnóstico. Bogotá, Colombia: Digiprint Editores E.U.
- Yáñez F. (1976). Lagunas de estabilización. CEPIS, Lima, Perú.
- Yáñez F., (1985). Evaluación de Lagunas de estabilización. CEPIS, OMS, Lima, Perú.