

Remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno y Coliformes Termotolerantes en aguas residuales mediante mamparas: caso de estudio en la PTAR Machupicchu

Biochemical Oxygen Demand and Thermotolerant Coliform removal in wastewater using baffles: case study at the Machupicchu WWTP

Cynthia Alegre-Palomino¹ 

¹ Escuela Profesional de Biología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Av. La Cultura 733, Cusco, Perú; cynthia.alegre@unsaac.edu.pe

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la implementación de mamparas en una laguna de maduración como una alternativa para optimizar el tratamiento de aguas residuales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Central Hidroeléctrica de Machu Picchu, con el fin de mejorar la eficiencia del proceso y garantizar el cumplimiento de estándares ambientales. Durante tres meses, se analizaron parámetros físico-químicos y bacteriológicos mediante métodos estandarizados, se aplicó herramientas estadísticas como T-Student y ANOVA para determinar la significancia de los resultados. Las mamparas demostraron optimizar el tiempo de retención hidráulica, incrementando la eficiencia en la separación de fases y promoviendo la actividad bacteriana. Los resultados evidenciaron una reducción del 25.7% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y del 92.9% en coliformes termotolerantes, cumpliendo los límites normativos. Además, se obtuvo una remoción de 1.18 a 1.81 ciclos logarítmicos de coliformes termotolerantes, con tiempos de retención hidráulica entre 2.2 y 3.5 días. Estos hallazgos confirman que las mamparas son una solución eficaz, sostenible y replicable para mejorar el tratamiento de aguas residuales en instalaciones similares, asegurando un efluente seguro para su descarga.

Palabras clave: mampara, tiempo de retención hidráulica y remoción de DBO.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the implementation of baffles in a maturation pond as an alternative to optimize wastewater treatment at the Wastewater Treatment Plant (WWTP) of the Machu Picchu Hydroelectric Power Plant, aiming to enhance process efficiency and ensure compliance with environmental standards. Over three months, physicochemical and bacteriological parameters were analyzed using standardized methods, and statistical tools such as T-Student and ANOVA were applied to determine the significance of the results. Baffles proved effective in optimizing hydraulic retention time, increasing phase separation efficiency, and promoting bacterial activity. The results showed a 25.7% reduction in Biochemical Oxygen Demand (BOD) and a 92.9% reduction in thermotolerant coliforms, meeting regulatory limits. Additionally, a removal efficiency of 1.18 to 1.81 log cycles of thermotolerant coliforms was achieved, with hydraulic retention times ranging from 2.2 to 3.5 days. These findings confirm that baffles are an effective, sustainable, and replicable solution to improve wastewater treatment in similar facilities, ensuring a safe effluent for discharge.

Key words: baffles, hydraulic retention time, BOD removal.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales sigue siendo un desafío ambiental significativo, especialmente en zonas donde los efluentes afectan directamente cuerpos de agua naturales como ríos y lagos. Este problema no solo compromete la biodiversidad, sino también la calidad de vida de las comunidades locales, que dependen del agua para actividades esenciales como la agricultura, el consumo doméstico y el turismo (Huamán et al., 2022). Los sistemas de tratamiento convencionales suelen presentar limitaciones para cumplir con los límites máximos permisibles, especialmente en áreas sensibles, lo que incrementa el riesgo de degradación ambiental en ecosistemas vulnerables (Velasco et al., 2019).

Como respuesta a estas limitaciones, las mamparas se proponen como una innovación tecnológica dentro de las lagunas de maduración. Estas estructuras permiten segmentar las lagunas, mejorando la eficiencia en la separación de fases y optimizando los procesos de oxidación y reducción de compuestos orgánicos. Este diseño incrementa el tiempo de retención hidráulica y fomenta la actividad bacteriana, contribuyendo así a la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y coliformes en los efluentes tratados. Estudios previos han demostrado la eficacia de esta tecnología para mejorar los estándares de calidad del agua y proteger los ecosistemas receptores (García et al., 1998; Mancera et al., 2016).

El presente estudio se enfoca en evaluar la implementación de mamparas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Central Hidroeléctrica Machupicchu como una solución de bajo costo y alta eficiencia. La investigación buscó analizar la efectividad de este sistema en la remoción de DBO y coliformes termotolerantes antes de la descarga al río Vilcanota, destacando su potencial como una alternativa sostenible y replicable en otras instalaciones con condiciones similares.

METODOLOGÍA

La investigación, de enfoque descriptivo, simple y experimental, se desarrolló durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2016. Su propósito fue evaluar la eficiencia de la laguna de maduración equipada con mamparas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu. Para ello, se implementó una estructura interna diseñada para optimizar el proceso de depuración y asegurar que los efluentes cumplieran con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la normativa nacional, según el D.S. N°003-2010-MINAM.

El muestreo se realizó en dos puntos del sistema de tratamiento, se recolectaron muestras representativas de agua residual en frascos estériles, tanto en la entrada como en la salida de la laguna de maduración equipada con mamparas. Estas muestras fueron transportadas bajo condiciones

controladas a un laboratorio certificado, donde se analizaron la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y los Coliformes Termotolerantes, empleando métodos estandarizados APHA 5210 B y APHA 9221E, respectivamente. Los parámetros de temperatura y pH, se midieron insitu.

Figura 1. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo



En base a los resultados obtenidos y según la ecuación propuesta por Von Sperling (2015), la eficiencia del sistema está influenciada por la temperatura, ya que esta afecta el metabolismo de los microorganismos y la producción de biomasa, reflejándose en la constante de decaimiento bacteriano. Para calcular la remoción bacteriana, se utilizó la siguiente ecuación:

$$K_{b,T} = K_{b,20} \theta^{(T-20)} = K_{b,20} (1.07)^{(T-20)}$$

Donde:

K_b : constante de remoción bacteriana en día
 T : temperatura

Para calcular la remoción de coliformes termotolerantes se utilizó la siguiente ecuación, que permite determinar el número de ciclos logarítmicos eliminados durante el tratamiento (Von Sperling, 2015).

$$N_t = N_0 \frac{4a * e^{1/2d}}{\sqrt{(1+a)^2 e^{\frac{a}{2d}} - (1-a)^2 e^{-a/2d}}}$$

Donde:

N_0 : concentración de coliformes termotolerantes
 e : logaritmo inverso
 a : ancho de la laguna de maduración.
 d : relación entre el largo y ancho del interior de la laguna con mamparas

La eficiencia de un sistema de tratamiento de aguas se evalúa mediante el porcentaje de remoción de materia orgánica (DBO) y coliformes termotolerantes, siendo este el principal indicador de su rendimiento (Romero, 1999).

Para evaluar la efectividad del sistema de mamparas en la laguna de maduración, se llevó a cabo un análisis comparativo de los parámetros medidos antes y después de su

implementación, empleando datos históricos correspondientes a los años 2014 y 2015. Para ello, se aplicaron herramientas estadísticas como la prueba T-Student y el Análisis de Varianza (ANOVA), las cuales permitieron identificar diferencias significativas en los resultados. El procesamiento y análisis de los datos se realizó con el software SPSS versión 23, asegurando una interpretación precisa y adecuada del nivel de significancia estadística en relación con la eficiencia del sistema de tratamiento.

RESULTADOS

Los análisis realizados tras la implementación de la laguna de maduración con mamparas evidenciaron mejoras significativas en la calidad del efluente descargado al río Vilcanota. El pH del agua residual mostró una variación positiva, pasando de 7.3 en la entrada de la laguna y estabilizándose en 6.9 en el efluente final, cumpliendo con los Límites Máximos Permisibles (6.5-8.5). La temperatura del efluente final aumentó ligeramente a 21.7°C, un efecto atribuido a las reacciones de oxidación y reducción en la laguna, manteniéndose dentro del límite de 35°C (Tabla 1).

El tratamiento también fue eficaz en la reducción de sólidos suspendidos totales, disminuyendo de 35.1 mg/L a 26 mg/L, cumpliendo con el límite permisible (<150 mg/L). En cuanto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), se registró una disminución, pasando de 69.5 mg/L a 56.5 mg/L en el efluente final, por debajo del límite de 100 mg/L. La concentración de aceites y grasas no se vio afectada, ya que su remoción ocurrió en etapas previas del tratamiento (Tabla 1).

Por último, en términos bacteriológicos, la remoción de coliformes termotolerantes fue notable, reduciendo de 13×10^3 NMP/100 ml en el ingreso a 16×10^2 NMP/100 ml en el efluente final. Este valor cumple con el límite de 10,000 NMP/100 ml exigido para efluentes domésticos o municipales según el D.S. N°003-2010-MINAM, asegurando la calidad bacteriológica del agua tratada (Tabla 2).

El análisis estadístico mediante la prueba T-Student reveló que el p-valor (0.000) asociado al pH y la temperatura es menor al nivel de significancia de 0.05, lo que permite afirmar, con un 95% de confianza, que existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores promedio registrados antes y después de implementar las mamparas. Por otro lado, para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), el p-valor obtenido (0.338) es superior a 0.05, lo que indica que no se observaron diferencias significativas entre los valores promedio antes y después de la intervención.

En cuanto a los coliformes termotolerantes, el p-valor de 0.071 también supera el umbral de significancia, lo que sugiere que no hay una diferencia estadísticamente significativa en los valores promedio registrados antes y después del uso de mamparas. Sin embargo, al comparar los valores de coliformes termotolerantes entre el afluente de la laguna de maduración y la descarga al río Vilcanota, el p-valor fue de 0.016, inferior a 0.05. Esto indica, con un 95% de confianza, que existen diferencias significativas entre los valores registrados en esta etapa del proceso de tratamiento.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) en la laguna de maduración con mamparas, con una profundidad de 0.5 m, un área de 25.4 m² y un caudal promedio de 4.68 m³/día, se estimó entre 2.2 y 3.5 días. El TRH permitió alcanzar entre 1.18 y 1.81 ciclos logarítmicos de remoción de coliformes termotolerantes, partiendo de concentraciones iniciales de 103 a 104 unidades. Como resultado, el cuerpo receptor (río Vilcanota) recibió una concentración promedio de $1E+03$ (102) coliformes termotolerantes, cumpliendo con la normativa ambiental que establece un límite de 1000 NMP/100 ml.

Se analizó la relación entre el sustrato (DBO) y la biomasa (coliformes termotolerantes), donde el tiempo de tratamiento juega un papel crucial. A través de modelos estadísticos, se obtuvo la ecuación para el sustrato $y = -0.0121x + 4.1146$ ($\ln S = \mu t + \ln S_0$) y para la biomasa $y = -0.1524x + 8.2235$ ($\ln X = \mu t + \ln X_0$). En ambos casos, la constante “ μ ”, indicando una disminución progresiva de la biomasa con el tiempo de tratamiento. Además, el tiempo de utilización del sustrato por la biomasa, según el modelo matemático desarrollado, se estimó en $c=1.0124$ días. Esto sugiere un equilibrio eficiente entre el consumo de sustrato y la disminución de la biomasa en los días siguientes.

Con un coeficiente de decaimiento bacteriano de 1.34 días y un coeficiente de producción bacteriana $Y=0.6$, además de una tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de $k=0.02$, y una tasa de utilización específica del sustrato $U=0.092$, y con la ecuación del tiempo de retención celular (θ_c), se obtiene un valor de 0.78 t^{-1} .

Considerando un tiempo de retención celular (θ_c) de 0.78 días y una tasa de crecimiento bacteriano de 0.054 mg/L , se determinó una eficiencia de remoción del 25.7% para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y del 92.9% para la reducción de coliformes termotolerantes.

Tabla 1. Resultados promedio de afluente y efluente de la laguna de maduración con mamparas.

Puntos de muestreo	Unidad	Afluente (Ingreso a la laguna de maduración con mamparas).	Efluente (Descarga al río Vilcanota)	LMP D.S. N° 003-2010-MINAM
pH	Unidad	7.3	6.9	6,5 – 8,5
Temperatura	(°C)	19.8	21.6	<35
Aceites y Grasas	(mg/l)	3.0	3.0	20
Sólidos totales en suspensión	(mg/l)	35.1	26.0	150
Color	Pt/Co	9.7	8.3	-
Oxígeno Disuelto	(mg/l)	3.2	3.86	-
DBO	(mg/l)	69.5	56.5	100
DQO	(mg/l)	143.6	128.7	200
Coliformes termotolerantes	(NMP/100ml)	13×10^3	16×10^2	10000

Tabla 2. Parámetros antes y después de tratamiento con mamparas

N°	SIN MAMPARAS					CON MAMPARAS				
	pH	Temperatura (°C)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100ml)	pH	Temperatura (°C)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100ml)
1	8	15.5	3	145.9	54×10^5	6.7	21	4	75	17×10^2
2	8.1	16.5	3	78.6	35×10^5	7	21.5	3.8	5	0
3	8.1	16.5	3	390.3	14×10^5	7.3	22.1	3.4	92	3×10^3
4	8.1	16.5	3	44	11×10^2	6.9	21	4	48.9	21×10^2
5	8.1	16.1	3	35	13×10^2	6.9	21.9	4	62.9	17×10^2
6	7.9	15.5	3	42	8×10^2	6.8	22.1	4	55	12×10^2
\bar{x}	8.0	16.10	3	122.6	9.0×10^5	6.9	21.6	3.86	56.5	16×10^2

DISCUSIONES

Según CEPIS (1991), el rango favorable de pH para la actividad biológica se encuentra entre 6.5 y 9. Por su parte, Tebbutt (1994) afirma que dicha actividad ocurre en un rango de pH entre 6 y 8. Considerando estas afirmaciones, el pH registrado está dentro de los límites normales, lo que permite la actividad biológica en el agua residual, esencial para la remoción de materia orgánica.

Mamani G. (1999) demostró que *Escherichia coli* alcanza su fase logarítmica de crecimiento a las 6 horas, lo que provoca una disminución del pH del medio de 7.5 a 6. El descenso del pH se atribuye a la actividad metabólica de las células bacterianas, las cuales, al consumir sustrato (DBO), liberan CO_2 como producto final, disminuyendo así el pH (Beltran et al, 2027). En el tratamiento de agua residual, El descenso del pH también puede deberse a la liberación de ácidos orgánicos de cadena corta (fórmico, acético, láctico) por ciertas bacterias.

Alva et al (2021), mencionan que el aumento de temperatura se da por la degradación de la materia orgánica mediante reacciones de óxido-reducción y se libera energía que incrementa la temperatura del agua. Según Metcalf y Eddy (1995), este incremento está asociado a la velocidad de crecimiento bacteriano y al consumo del sustrato. Huamán et al (1993), advierten que efluentes con concentraciones de DBO superiores a los límites normales pueden causar problemas de

contaminación al ser vertidos directamente en cuerpos de agua como ríos, por otro lado, Belly y Argota (2023) determinaron que las concentraciones de DBO5 fueron elevadas (Angostura Limón: $203,1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Yaurilla: $273,1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Pueblo Nuevo: $366,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), indicando que el contenido de materia orgánica es alto, estos valores sugieren que el tiempo de retención en las lagunas de oxidación no fue suficiente para una degradación adecuada.

Kilani y Ogunrombi (1984) reportaron que las lagunas de estabilización con mamparas instaladas presentan mejores eficiencias de tratamiento en comparación con aquellas que no las tienen. Este mejoramiento se debe a la reducción de la dispersión y al favorecimiento del crecimiento de una biopelícula que, junto con la biomasa suspendida, contribuye significativamente a la degradación de la materia orgánica.

García et al (1998) mencionan que el tiempo de retención hidráulica (TRH) es crucial en el tratamiento de aguas residuales, permitiendo la eliminación eficiente de materia orgánica y nutrientes. Finalmente, Lancheros (2001) informó que una laguna de maduración con un tiempo de retención de 5 días logró una remoción del 54.52% de Coliformes, mientras que Bracho (2003), trabajando con una profundidad de 60 cm, obtuvo eficiencias de remoción del 35% para la DBO y del 43% para Coliformes.

CONCLUSIONES

Se ha detectado la mayor cantidad de micro plásticos en agua La implementación de mamparas en la laguna de maduración de la PTAR de la Central Hidroeléctrica de Machu Picchu representa una innovación eficiente y sostenible en el tratamiento de aguas residuales, alcanzando reducciones significativas del 25.7% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y del 92.9% en Coliformes Termotolerantes, cumpliendo con estándares normativos estrictos. Los resultados destacan la optimización del tiempo de retención hidráulica (2.2-3.5 días) y la mejora en la actividad bacteriana, lo que evidencia un tratamiento más efectivo. Si bien algunos parámetros no presentaron diferencias estadísticamente significativas, el impacto general del sistema muestra un progreso relevante en la calidad del efluente descargado al río Vilcanota. Estos hallazgos refuerzan el potencial de las mamparas como una solución replicable y sostenible para optimizar plantas de tratamiento en contextos similares, garantizando no solo el cumplimiento ambiental, sino también una contribución tangible a la conservación de recursos hídricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva, J., Cano G., Juscamaíta J. y Quipuzco L. (2021). Reduction of pH by homolactic fermentation as indicator of fecal coliform inactivation in wastewater. *Ecología Aplicada*, 20(1), 93-100. <https://doi.org/10.21704/rea.v20i1.1693>
- Belli y Argota (2023). Costo ambiental del coeficiente de transformación biodegradable en efluentes de lagunas de oxidación, Ica, Perú. *Paideia XXI*, 13(1), 177–184. <https://doi.org/10.31381/paideia.v13i1.5702>
- Beltrán J., Guajardo C., Barceló I. y López U. (2017). Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO₂. *Revista de Biología Marina Y Oceanografía*, 52(3), 417–427. <https://doi.org/10.4067/s0718-19572017000300001>
- Bracho, N. (2003). Optimization of fecal coliform removal performance in three tertiary maturation ponds. PhD thesis. University of Surrey-England. 2003
- C.E.P.I.S. (1991). Reuso en acuicultura de las aguas residuales tratadas en las lagunas de estabilización de San Juan. CEPIS/OMS/OPS. Programa de Salud Ambiental Lima – Perú.
- García, J., Hernández, M., y Mujeriego, R. (1998). Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante lagunas de alta carga: evaluación experimental. *Ingeniería Del Agua*, 5(2). <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2748>
- Lancheros, G., y Saavedra S. (2001). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Mosquera, Fase II. Trabajo de grado (Ingeniería Civil), Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá.
- Huamán, W. S., Antonio, P., Mauricio, H., & Alberto, L. (2022). Aguas residuales en la calidad de agua del río. *GnosisWisdom*, 2(3), 30–36. <https://doi.org/10.54556/gnosiswisdom.v2i3.43>
- J.S Kilani, J.A Ogunrombi (1984). Effects of baffles on the performance of model waste stabilization ponds, *Water Research*, Volume 18, Issue 8,ISSN 0043-1354, [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(84\)90243-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(84)90243-4).
- Mamani G. (1999). Evaluación de la toxicidad de las aguas Residuales y comportamiento de las lagunas de estabilización de la ciudad de Juliaca. Tesis de la Facultad de Ciencias Biológicas.
- Mancera-De-La-Cruz, R., Camargo-Avila, A., Cohen-Padilla, H., & Ahumado-Monterrosa, M. (2016). Influencia de los factores bióticos en humedales artificiales. *IPSA Scientia*, revista científica multidisciplinaria.
- Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización*. Tercera Edición. Vol. 2 Editorial McGraw-Hill. Madrid. España
- MINAN. (2010). Decreto Supremo N°003. Aprueba Límites Máximos Permisibles para el Efluente de Planta de Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticos o Municipales. Normas Legales del Perú.
- Resolución Ministerial N°273-2013-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales – PTAR
- Romero J. A. (1999). Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. *Escuela Colombiana de Ingeniería* 3ª ed, Editorial Alfaomega. Bogotá, Colombia, 231 pp.
- Tebbutt T.H. (1994). *Fundamentos de control de la calidad del agua*. Editorial Limusa S.A. de C.V. (Grupo Noriego Editores) 3ª Edición (2ª Reimpresión). Mexico D.F. – Mexico.
- Von Sperling, M., y de Lemos Chernicharo, C. (2015). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions Volume I. Water Intelligence Online*, 4(0), <https://doi.org/10.2166/9781780402734>
- Velasco, T., Moncayo, S., y Chuquer, S.D. (2019). Diagnóstico del sistema de tratamiento de aguas residuales de Manta. infoanalítica. <https://doi.org/10.26807/IA.V7I1.93>

Presentado: 29/11/2024

Aceptado: 10/12/2024

Publicado: 20/12/2024