

**EVALUACION DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES
BASADA EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN ACOPLADAS A UN REACTOR ANAEROBIO
COMPARTIMENTADO**

**EVALUATION OF A MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT BASED ON STABILIZATION
PONDS COUPLED TO A COMPARTMENT ANAEROBIC REACTOR**

Ivette Echeverría^{1,3}, Cesar Escalante¹, Oliver Saavedra¹, Ramiro Escalera², Gustavo Heredia³, Renato Montoya³

¹*Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)*

²*Centro de Investigaciones en Procesos Industriales (CIPI),*

Universidad Privada Boliviana

³*Fundación Aguatuya, Cochabamba, Bolivia*

echeverria.ivette@upb.edu

(Recibido el 27 de mayo 2020, aceptado para publicación el 25 de junio 2020)

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de una zona conformada originalmente por lagunas de estabilización, la cual fue ampliada. La ampliación se llevó a cabo a través del dragado y mejoramiento del sistema de lagunaje. El aumento de capacidad consistió en la implementación de un Reactor Anaeróbico Compartimentado (RAC), un sistema de pre-tratamiento mejorado que incluye rejas, un tamiz mecánico, un desarenador con una cámara desgrasadora, y lechos destinados al secado de lodos provenientes del RAC. La PTAR actualmente atiende a una población de 20 000 habitantes aproximadamente y trata un caudal de 2 416 m³/d. El RAC implementado contribuye principalmente a la reducción de DBO, DQO y especialmente de SST. El acondicionamiento de las lagunas demostró mejorar la capacidad de tratamiento de la PTAR. La eficiencia global de la PTAR es de: 55, 67, 54, 80, 15 y 26 % para los parámetros de DBO₅, DQO total, DQO soluble, SST, N-NH₃ y P. Con la adición del RAC y la optimización de las lagunas, la eficiencia de la PTAR se ha incrementado del 52 al 67% en la eliminación de DQO. Estos parámetros demuestran que anteponer un sistema de pretratamiento y un RAC al sistema de lagunaje para ampliar su capacidad de tratamiento es una alternativa adecuada. Adicionalmente se resalta la importancia de realizar el mantenimiento y remoción periódica de lodos para optimizar su funcionamiento.

Palabras Clave: Tratamiento Aguas Residuales, Lagunas de Estabilización, Ampliación Capacidad, Reactores Anaeróbicos Compartimentados (RAC), Evaluación.

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the performance of a wastewater treatment plant (WWTP) originally based on a series of stabilization ponds which has been expanded. The enlargement was carried out through the desludging and improvement of the stabilization ponds. The expansion consisted of the implementation of an anaerobic baffled reactor (ABR), an improved pre-treatment system which includes screens, a mechanical sieve, a sand trap with degreasing chamber, and beds for drying sludge from the ABR. The WWTP currently serves a population of approximately 20 000 inhabitants and treats a flow of 2 416 m³/d. The newly implemented ABR contributes mainly to the reduction of BOD, COD and especially TSS. The conditioning of the stabilization ponds improved the treatment capacity of the WWTP. The global efficiency of the WWTP is: 55, 67, 54, 80, 15 and 26% for BOD₅, total COD, soluble COD, TSS, N-NH₃ and P. With the addition of the ABR and the enhancement of the stabilization ponds, the efficiency of the WWTP has increased from 52 to 67% in the removal of COD. These parameters demonstrate that the implementation of a ABR before the ponds to expand the treatment capacity of a stabilization pond system is a suitable alternative. Additionally, the importance of maintaining the ponds and regularly removing sludge to optimize their operation is highlighted.

Keywords: Wastewater Treatment, Stabilization Ponds, Upgrading, Anaerobic Baffled Reactors (ABR), Design, Evaluation, Capacity Increase.

1. INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización han sido y son ampliamente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales especialmente en ciudades pequeñas con disponibilidad de grandes terrenos debido a sus características favorables como rendimiento satisfactorio, bajo costo, bajo mantenimiento y sostenibilidad [1]. Entre los diferentes tipos de lagunas de estabilización, las más comunes son las lagunas anaerobias, facultativas, de maduración y lagunas aireadas.

La configuración más usual de los sistemas de lagunaje es la que consiste de lagunas anaeróbicas seguidas de lagunas facultativas y, dependiendo de los requisitos de tratamiento requeridos, pueden incluirse lagunas de maduración [2].

En la actualidad, a pesar de sus ventajas, en algunos lugares se considera una opción de tratamiento menos aceptada dado que los parámetros con los que se diseñaban años atrás respondían a ciertos estándares de calidad de agua que con el tiempo se han vuelto más exigentes [3]. Otros aspectos que ponen en desventaja el uso de lagunaje en plantas de gran escala están relacionados con la escasez sistemática de datos de rendimiento o desempeño que conllevan desafíos asociados con el diseño, dado que algunos parámetros de importancia son omitidos resultando, por una parte, en plantas de tratamiento sobredimensionadas y costosas o, por otra parte, en plantas sub-dimensionadas que no llegan a cumplir con sus objetivos de rendimiento [4]. Otro problema asociado a los sistemas de tratamiento que emplean lagunaje es que con el pasar de los años se incrementan los caudales que llegan a la PTAR a causa del crecimiento poblacional y al tratarse de sistemas que ocupan grandes extensiones no existe espacio disponible para su expansión o este es limitado por lo que la evaluación de sistemas compactos que complementen al tratamiento es una necesidad.

Con el objeto de mejorar la calidad de los efluentes, varias alternativas se han planteado a lo largo del tiempo [5]. Entre ellas están las ampliaciones o modificaciones. Estas alternativas responden principalmente a dos razones: por un lado, mejorar la calidad de los efluentes debido a que los estándares de calidad son cada vez más estrictos, y por otro lado, cuando se requiere tratar mayores cargas orgánicas que pueden deberse al crecimiento poblacional desmedido o al ingreso de aguas residuales industriales. Asimismo, la sobrecarga orgánica en un sistema de tratamiento puede estar relacionada con que se haya cumplido su ciclo de vida o periodo de diseño.

Tal es el caso de la planta de tratamiento de Colquerancho ubicada en Punata, Bolivia, que había sido diseñada y construida alrededor de 1995 y que para el año 2017 ya había cumplido con su periodo de diseño útil y se encontraba operando en condiciones de sobrecarga orgánica. Esta PTAR estaba constituida por un sistema de lagunas de estabilización y para ampliar su capacidad de tratamiento se adicionó un reactor anaeróbico compartimentado además de mejorarse el sistema de pre-tratamiento. Adicionalmente, se retiraron de las lagunas todos los lodos acumulados a lo largo de los años con el fin de asegurar un funcionamiento adecuado de éstas. La incorporación de reactores anaeróbicos como pre-tratamiento a las lagunas de estabilización [6] constituye una de las alternativas viables para ampliar un sistema de lagunas y varios casos exitosos han sido reportados [7]. Los reactores anaerobios presentan numerosas ventajas, como altos niveles de remoción de carga orgánica en infraestructuras compactas [8]; aun cuando su eficiencia se ve comprometida por las condiciones ambientales en que operan, se tienen algunos ejemplos de desempeño adecuado en combinación con otros procesos de tratamiento como son los biofiltros en los que se alcanza una calidad en efluente apta para su reúso en riego [9], [10], por lo que, en combinación con otros procesos como es el lagunaje pueden constituirse en una opción adecuada para la ampliación de plantas de tratamiento.

Aunque existen varios reportes acerca de las plantas de tratamiento ampliadas que indican que estas tienen un buen desempeño en los primeros años, todavía existe una carencia de información respecto de su desempeño a largo plazo [3]. Esta investigación tiene por objeto evaluar el desempeño de la eficiencia de la PTAR de Colquerancho ampliada, al comparar con ciertos parámetros de diseño y caracterizaciones previas.

2. DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO

La ciudad de Punata está ubicada a aproximadamente 39 km al sur de la ciudad de Cochabamba (Figura 1), de acuerdo con el censo de Población y Vivienda del año 2001, contaba con 12 758 Habitantes. Actualmente Punata es uno de los municipios más poblados del Valle Alto, con una población estimada de más de 28 000 habitantes de los cuales aproximadamente 20 000 habitan la zona urbana.

Punata cuenta con 4 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) siendo la más grande la que atiende a la zona urbana ubicada en la zona de Colquerancho [11]. Esta PTAR fue construida entre los años 1995 y 1997. Originalmente la PTAR estaba compuesta por un desarenador-cámara de rejillas, tres lagunas anaerobias, dos lagunas facultativas y tres lagunas de maduración [12]. La configuración de esta planta de lagunaje se esquematiza en la Figura 2.

Para el año 2018, la PTAR con una antigüedad de más de 20 años había cumplido con su periodo de diseño. Una evaluación realizada entre el 2012 y el 2014 ponía en evidencia que las unidades que componían a la PTAR estaban colmatadas, observándose gran acumulación de lodo en las lagunas anaerobias y facultativas que llegaba a obstruir el paso hacia algunas de ellas [12], [13]. En el año 2018, con el objeto de mejorar el tratamiento, se antepuso a la secuencia de tratamiento por lagunaje, un sistema de pretratamiento con tamiz helicoidal mecanizado para la retención de sólidos mayores a 5 mm, un reactor anaeróbico compartimentado (RAC) y unos lechos para el secado de lodos provenientes del reactor. Adicionalmente, se drenaron las lagunas y se retiraron los lodos acumulados en ellas. La vista en planta de la PTAR ampliada puede apreciarse en la Figura 3.

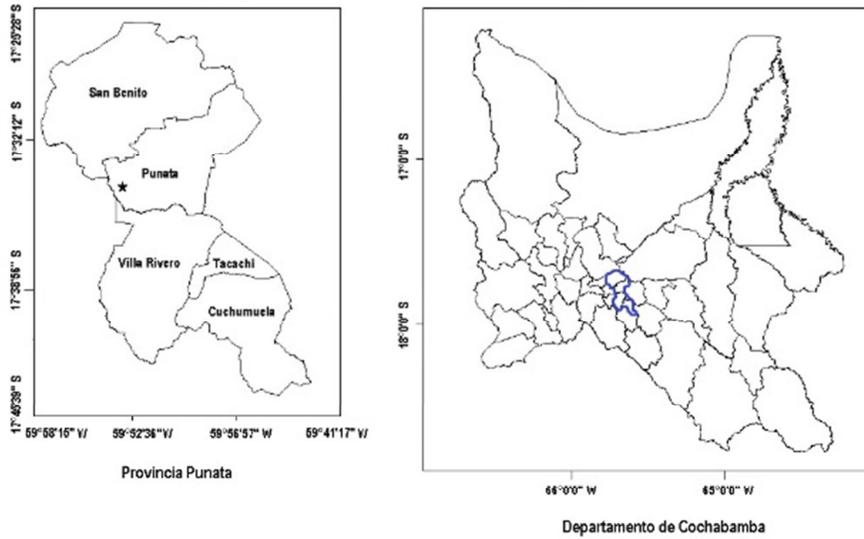


Figura 1: Localización de la zona de estudio.

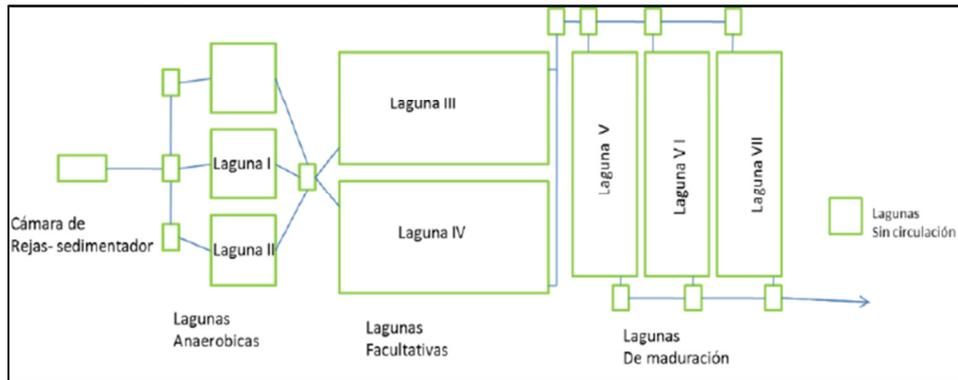


Figura 2: Esquema de la configuración original de la PTAR de Colquerancho[12].



Figura 3. Fotografía de la ampliación de la PTAR de Colquerancho, Punata.

3. METODOLOGÍA

3.1 Muestreo y análisis

Para la evaluación de esta ampliación realizada a la PTAR de Colquerancho, se llevaron a cabo 8 campañas de monitoreo durante los meses de septiembre 2020 a abril 2021. Se midieron en campo los parámetros susceptibles de cambio en el tiempo como son el: pH, temperatura, conductividad y niveles de oxígeno disuelto (OD). Para la medición de estos parámetros se utilizó un equipo de medición multiparámetro de la línea HANNA; además, se colectaron muestras en el afluente y efluente de la PTAR y en el efluente de cada proceso unitario que la componen. Los puntos de monitoreo junto con los códigos correspondientes se presentan en el siguiente esquema (Figura 4).

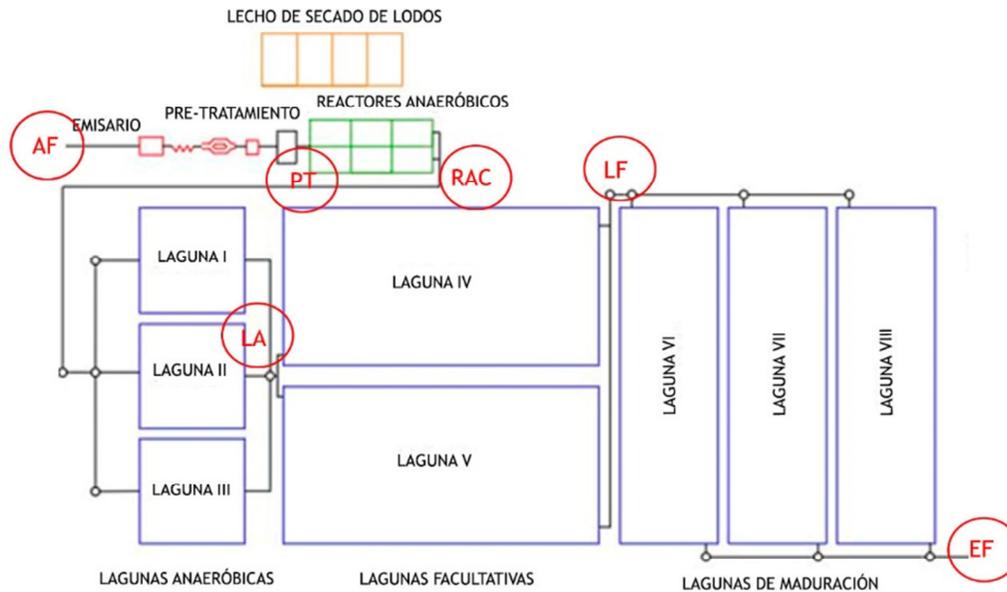


Figura 4: Esquematización de los puntos de monitoreo de la PTAR.

Los códigos asignados son los siguientes: AF (afluente a la PTAR), PT (efluente del pre-tratamiento), RAC (efluente del reactor anaeróbico compartimentado), LA (efluente de las lagunas anaerobias), LF (efluente de las lagunas facultativas) y EF (efluente de las lagunas de maduración) que a su vez es el efluente final tratado de la PTAR.

De las muestras colectadas, se analizaron los siguientes parámetros: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) total y soluble, sólidos suspendidos totales (SST), alcalinidad, nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) y fósforo (P). Todos los parámetros, a excepción de la DBO_5 , se analizaron en laboratorios de la Universidad Privada Boliviana (UPB) siguiendo los procedimientos establecidos en Standard Methods for Examination of Water and Wastewater [14]. El análisis de DBO_5 fue realizada en laboratorios de SPECTROLAB en la ciudad de Oruro.

3.2 Medición del flujo afluente a la PTAR

El flujo de ingreso a la PTAR se midió en el canal del desarenador a continuación del tratamiento mecanizado. El cálculo se realizó mediante la relación entre la velocidad lineal de flujo y el área transversal de flujo.

3.3 Determinación de la eficiencia de la PTAR de Colquerancho

Se determinó la eficiencia de remoción de los distintos contaminantes de la PTAR a partir de los parámetros de caracterización de las aguas residuales. Adicionalmente, la discusión estuvo orientada a comparar esta eficiencia con aquellos parámetros considerados para el diseño.

3.4 Revisión del Reactor Anaerobio Compartimentado (RAC)

Se calculó el TRH del RAC en base a los datos de diseño proporcionados por la Fundación Aguatuya como parámetro explicativo para la eficiencia del reactor.

3.5 Lagunas de estabilización

El cálculo y diseño de lagunas de estabilización es un proceso muy complejo debido a los diferentes criterios y consideraciones que deben analizarse. Las consideraciones de diseño tomadas en cuenta en este estudio son aquellas que hacen referencia a una configuración de: lagunas anaerobias seguidas de lagunas facultativas y seguidas por lagunas de maduración, una configuración que es muy común en el tratamiento de aguas residuales. Algunos de los parámetros que se consideran para el diseño un sistema de lagunaje que sigue esta secuencia son: la carga orgánica por unidad de superficie, la eficiencia de remoción de DBO₅, la eficiencia de remoción de coliformes fecales, el área, el volumen y el tiempo de retención hidráulico [15].

Todas las lagunas de estabilización de la PTAR de Colquerancho trabajan en paralelo, el caudal es repartido mediante una cámara principal que distribuye el afluente de cada laguna. Para efectos de cálculo se consideró una distribución equitativa del caudal al ingreso a los distintos tipos de lagunas.

3.6 Situación actual (posterior al reacondicionamiento)

Considerando que el sistema de lagunaje fue reacondicionado en su totalidad el año 2017 y la acumulación de lodo varía entre un espesor de 1 a 3 cm por año [16], se consideró, para la estimación del TRH que la acumulación de lodos es despreciable. El volumen de las lagunas y el TRH fueron calculados utilizando el caudal promedio obtenido en las campañas de muestreo y las dimensiones presentes en los planos. Dado que sólo se cuenta con un plano de vista en planta de las lagunas, la dimensión de profundidad y talud de las lagunas fue estimado en base a parámetros típicos de diseño. Para la determinación del volumen de las lagunas anaerobias se asumió una profundidad característica de diseño de 4 m y un talud característico de 1/2 [17]. Para las lagunas facultativas se asumió una profundidad de 1.8 m característica de diseño cuando se tienen lagunas de maduración a continuación de las mismas [18], de manera similar se adoptó un talud de 1/2 [17]. Para las lagunas de maduración se asumió una profundidad de 1.8 m [18] y un talud de 1/2 [17].

Estos valores fueron comparados con los obtenidos antes del reacondicionamiento de las lagunas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Características del agua residual en el afluente y efluente

La caracterización del agua residual como resultado de 8 muestreos puntuales consecutivos en la PTAR se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1 - CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL AFLUENTE Y EFLUENTE A LA PTAR

Parámetro	AF	PT	RAC	LA	LF	EF
pH	7,12±0,1	7,21±0,1	6,65±0,2	7,32±0,4	7,08±0,3	7,46±0,2
Temperatura °C	23,1±1,1	22,6±1,0	22,6±1,2	22,3±2,6	19,6±1,2	19,4±0,2
O.D (mg/l)	0,12±0,14	0,12±0,09	0,21±0,17	0,24±0,19	0,14±0,06	0,29±0,29
DBO ₅ (mg/l)*	302±50	325±61	274±101	193±32	170±42	137±41
DQO total (mg/l)	1012±204	1027±109	747±180	529±132	378±59	333±73
DQO soluble (mg/l)	310±79	347±81	295±107	172±87	176±114	141±63
SST (mg/l)	396±152	352±98	251±66	148±60	82±20	78±24
N-NH ₃ (mg/l)	87±15	87±14	99±14	83±14	77±12	74±17
P (mg/l)	13±2	12±2	14±2	11±2	10±1	9±2

*Para todos los parámetros n=8 excepto para DBO₅ n=6.

Los resultados de esta caracterización permitieron determinar la eficiencia global y la eficiencia de cada proceso que compone el tren de tratamiento. Estos resultados se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2 - EFICIENCIA GLOBAL Y POR PROCESO DE LA PTAR DE COLQUERANCHO

	DBO ₅	DQO	DQO soluble	SST	N-NH ₃	P
Pre-tratamiento	-7,4	-1,5	-12,0	11,1	0,6	2,8
RAC	15,5	27,3	14,9	28,7	-14,7	-14,1
Lagunas anaerobias	29,5	29,1	41,6	41,0	16,4	19,9
Lagunas facultativas	11,9	28,6	-2,3	44,7	6,6	9,6
Lagunas de maduración	19,7	11,8	19,7	4,6	4,1	8,1
Global	54,7	67	54	80	15	26

4.2 Cálculo de parámetros operacionales

4.2.1 Lagunas de estabilización

Los resultados del cálculo del volumen de las lagunas se presentan en la Tabla 3. Para el cálculo del TRH se tomó en cuenta el volumen total ocupado por las lagunas.

TABLA 3 – VOLUMENES Y TIEMPOS DE RETENCIÓN DE LAS LAGUNAS DE LA PTAR DE COLQUERANCHO

	Caudal (m ³ /d)	Número lagunas	Volumen unitario (m ³)	Volumen total (m ³)	TRH (días)
Lagunas anaerobias	2 416,4	3	1 321	3 963	4,92
Lagunas facultativas	2 416,4	2	6 298	12 596	10,42
Lagunas de maduración	2 416,4	3	3 399	10 197	12,66
Total				26 756	28,00

El TRH actual de las lagunas en su máxima capacidad es de 28 días para el caudal que actualmente trata la PTAR. Se expresa como máxima capacidad considerando que el volumen útil es igual al volumen de diseño y que la acumulación de lodos es despreciable. En 2006, el TRH era de 15,5 días y el volumen de las lagunas representaba un 84% del volumen actual debido a la acumulación de lodos en las lagunas [19]. Para el 2014, este volumen útil se había reducido aún más debido a una severa acumulación de lodos y plantas acuáticas representando solamente un 31% del volumen actual y proporcionando un TRH de solamente 2,5 días [12]. Esta acumulación de lodos y plantas tiene efectos en la calidad del agua tratada debido a la reducción del volumen de tratamiento y el TRH.

La eficiencia de las lagunas anaerobias en la eliminación de DBO₅ es de 30%. Algunos autores utilizan un parámetro de 40% en la remoción de DBO₅ para el diseño de lagunas anaerobias a temperaturas del ambiente cercanas a 10 °C [21]. Se espera que la eficiencia actual sea menor a la eficiencia de diseño puesto que se ha añadido a la secuencia de tratamiento un reactor anaeróbico y los parámetros de diseño usualmente consideran solamente una secuencia basada en lagunaje. La eficiencia de las lagunas anaerobias en la remoción de DQO total y DQO soluble es de: 29 y 42 % respectivamente. Las lagunas facultativas presentaron una eficiencia de: 12 y 27% en la remoción de DBO y DQO respectivamente y las lagunas de maduración remueven: 18, 12 y 20 % de DBO, DQO total y DQO disuelta respectivamente.

4.2.2 Reactor anaerobio compartimentado

Se calculó el TRH a partir de la relación entre el volumen del RAC y el caudal promedio medido. El volumen neto del RAC es de 540,4 m³ [22] y el caudal promedio medido entre septiembre de 2020 y abril de 2021 es de 100,7 m³/h. El TRH para este caudal es de 5,4 horas.

La eficiencia reportada del RAC en términos de la remoción de DBO₅ fue del 16% para un TRH de 5,4 horas. El TRH de diseño es de 8 horas [22]. Existen pocos reportes de remoción de DBO₅ en reactores anaeróbicos compartimentados a pesar de que, en la literatura, los criterios de diseño se basan en parámetros de carga orgánica biodegradable expresada como DBO₅. En 2009, se reportó una eficiencia de eliminación de DBO₅ mayor al 60 % en un RAC con un TRH de 12 h [7]. La remoción de DQO en la PTAR de Colquerancho alcanza un 27 %. Eficiencias de eliminación de DQO mayores al 70% han sido reportadas [9, 10, 11, 12], la mayoría de ellas en estudios realizados bajo condiciones

controladas. Existen muchos factores que condicionan a la eficiencia en un reactor anaerobio, entre estas se pueden mencionar a la temperatura, carga orgánica, carga hidráulica y TRH. El tiempo de retención correspondiente al caudal con el que actualmente trabaja el RAC de Colquerancho es menor al TRH de diseño lo cual explica la baja eficiencia reportada bajo estas condiciones de operación.

4.2.3 SITUACIÓN POSTERIOR AL REACONDICIONAMIENTO

Varias evaluaciones se han realizado en la PTAR de Colquerancho en el periodo 2012-2017 [12], [13], [20]. En la Tabla 4 se presentan los resultados de caracterización de estas evaluaciones, previas a la ampliación de la PTAR, y los resultados del estudio actual, posterior a la ampliación y mantenimiento de las lagunas de la PTAR. en las que se reportan valores de: 120,4 mg-DBO/l, 289,2 mg-DQO/l, los mismos que sobrepasan a los límites permisibles para descargas de la Ley 1333. La eficiencia reportada de la PTAR es de: 66 y 52 % en los parámetros de DBO₅ y DQO respectivamente.

TABLA 4 - RESULTADOS COMPARATIVOS DE EFICIENCIA DE LA PTAR COLQUERANCHO

	2013 [13][20]			2012-2017 [12]			2020-2021		
	DBO ₅	DQO	SST	DBO ₅	DQO	SST	DBO ₅	DQO	SST
AF	192	643	616	360.2	603.7	-	302	1012	396
EF	59.7	239	72	120.4	289.17	-	137	333	78
Eficiencia	68.9	62.8	88.3	66.6	52.1		54.6	67.1	80.3
Caudal (m³/d)	2730			3335			2416		
kg removidos/d	361.18	1102.92	1485.12	799.73	1048.96	-	398.64	1640.46	768.29

La concentración de DBO₅ es similar al promedio reportado en el periodo 2012-2017, no obstante, la concentración de DQO se ha incrementado en un 68%. Estos valores elevados de DQO en la actualidad pueden deberse a la disminución en la dotación de agua de suministro lo que ocasiona aguas residuales de mayores concentraciones orgánicas. A pesar de este incremento la eficiencia de la PTAR aumentó del 52 % reportada por [12] a un 67% por efectos de la ampliación y mantenimiento de la PTAR.

La eficiencia que aporta cada proceso en la eliminación de contaminantes se presenta en la Figura 5.

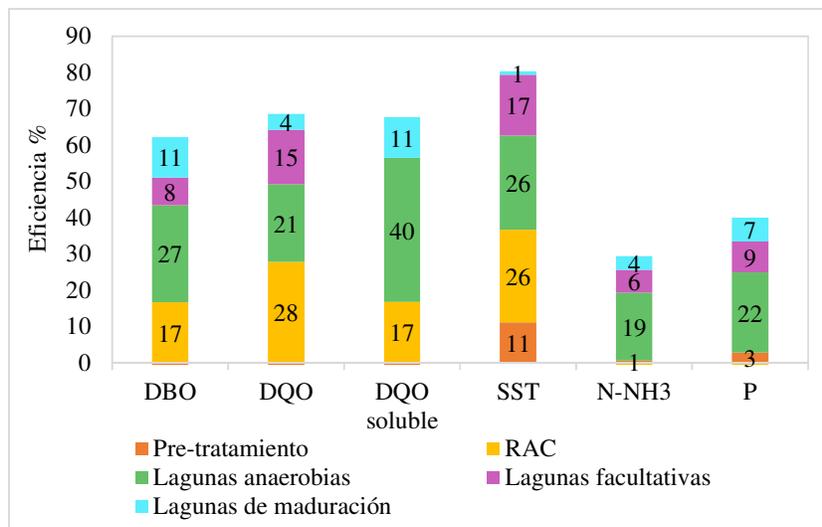


Figura 5: Eficiencia que aporta cada proceso que compone a la PTAR de Colquerancho.

Como puede apreciarse, la inclusión de un sistema de pre-tratamiento mejorado que incluye rejas gruesas, un tamiz mecánico, un desarenador y una cámara desgrasadora aporta principalmente en la eliminación de sólidos no llegando a apreciarse una disminución en cuanto a la DBO₅ y la DQO. Por otro lado, la inclusión del RAC, sí tiene un aporte significativo en la remoción de DBO, DQO total, DQO soluble y, sobre todo, en la reducción de SST. El hecho de haberse realizado el vaciado de los lodos acumulados a lo largo de los años tiene un efecto importante en el desempeño de las lagunas, notándose principalmente, un buen desempeño en las lagunas anaerobias. La eficiencia global de la PTAR es de: 55, 67, 54, 80, 15 y 26 % para los parámetros de DBO₅, DQO total, DQO soluble, SST, N-NH₃ y P, respectivamente. En comparación con la eficiencia reportada en el periodo 2012-2017 [20] se aprecia un incremento en

la eficiencia en términos de DQO. No se aprecia una elevada remoción de nutrientes, sin embargo, como las aguas están destinadas al riego de cultivos, el contenido de éstos, junto con la materia orgánica biodegradable remanente, se considera de algún modo beneficioso.

5. CONCLUSIONES

Se evaluó la PTAR de Colquerancho en el municipio de Punata con un enfoque que analiza los parámetros operacionales con respecto a los de parámetros de diseño. Esta PTAR se basa en un sistema de lagunas de estabilización acopladas a un reactor anaerobio compartimentado (RAC) y un sistema de pre-tratamiento mejorado para ampliar la capacidad de tratamiento. La PTAR atiende a una población aproximada de 20 000 habitantes y actualmente trata un caudal de 2 416 m³/d. La implementación del RAC ha ayudado a reducir la carga orgánica que ingresa al sistema de lagunaje aun cuando las eficiencias reportadas por el RAC son menores a las que típicamente reportan otros estudios. El tiempo de retención hidráulica para el caudal de aguas que actualmente ingresa a la PTAR es de 5 horas, el cual es menor al tiempo de 8 horas esperado en el diseño. Las lagunas de estabilización presentaron un rendimiento aceptable en general, en especial, las lagunas anaerobias. La eficiencia global alcanzada por la PTAR fue de: 55, 67, 54, 80, 15 y 26 % para los parámetros de DBO₅, DQO total, DQO soluble, SST, N-NH₃ y P, respectivamente. Con la adición del RAC, la eficiencia de la PTAR se ha incrementado de 52 a 67 % en la eliminación de DQO. Estos resultados permiten concluir que anteponer un sistema de pretratamiento y reactor anaerobio a un sistema de lagunas de estabilización puede considerarse una opción adecuada para incrementar la capacidad de tratamiento de la PTAR y a la vez aumentar su periodo útil de diseño sin requerir grandes extensiones de terreno adicionales. Por otro lado, es fundamental realizar la extracción periódica de lodos ya que esta acción por sí sola mejora en gran medida la capacidad de depuración de la PTAR. Actualmente se viene realizando un monitoreo periódico de la eficiencia de la PTAR y verificar si se cumple con la norma para considera en un re-uso en riego.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Fundación AGUATUYA y a la Universidad Privada Boliviana por el financiamiento y el trabajo conjunto desarrollado en esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. von Sperling and C. A. de L. Chernicharo, *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*, 1st ed. Belo Horizonte, Brazil: IWA Publishing, 2005.
- [2] D. Mara, "Waste Stabilization Ponds: A Highly Appropriate Wastewater Treatment Technology for Mediterranean Countries," in *Efficient Management of Wastewater*, no. April, A. Baz, I. Otterpohl, and C. Wendland, Eds. Springer Heidelberg, 2008.
- [3] H. Ratsey, "Upgrading waste stabilisation ponds: Reviewing the options," *Water Intell. Online*, vol. 6, no. 0, pp. 9781780402109–9781780402109, 2015.
- [4] M. F. Espinosa, M. Von Sperling, and M. E. Verbyla, "Performance evaluation of 388 full-scale waste stabilization pond systems with seven different configurations," *Water Sci. Technol.*, vol. 75, no. 4, pp. 916–927, 2017.
- [5] H. W. Pearson, D. D. Mara, and C. R. Bartone, "Guidelines for the minimum evaluation of the performance of full-scale waste stabilization pond systems," *Water Res.*, vol. 21, no. 9, pp. 1067–1075, 1987.
- [6] S. H. Jamshidi and G. Badalians Gholikandi, "An assessment of using anaerobic baffled reactor to upgrade wastewater stabilization ponds: A pilot study," *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 9, no. 4, pp. 597–607, 2014.
- [7] F. A. Nasr, H. S. Doma, and H. F. Nassar, "Treatment of domestic wastewater using an anaerobic baffled reactor followed by a duckweed pond for agricultural purposes," *Environmentalist*, vol. 29, no. 3, pp. 270–279, 2009.
- [8] G. Zhu, R. Zou, A. K. Jha, X. Huang, L. Liu, and C. Liu, "Recent developments and future perspectives of anaerobic baffled bioreactor for wastewater treatment and energy recovery," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 12, pp. 1243–1276, 2014.
- [9] O. Saavedra, R. Escalera, G. Heredia, R. Montoya, I. Echeverría, A. Villarroel, L. Brito, "Evaluation of a domestic wastewater treatment plant at an intermediate city in Cochabamba, Bolivia," *Water Pract. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 908–920, 2019.
- [10] I. Echeverría R., L. Machicado, O. Saavedra V., R. Escalera, G. Heredia, and R. Montoya, "Domestic Wastewater Treated With an Anaerobic Baffled Reactor Followed By Gravel Filters As a Potential To Be Used in Agriculture Area in Tolata, Bolivia," *Investig. Desarro.*, vol. 19, no. 1, pp. 63–72, 2019.
- [11] AGUATUYA, "Planta de tratamiento de aguas residuales Punata," 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=MpQMb4EGg-g>.
- [12] A. Mercado, O. Coronado, and M. Iriarte, "Evaluation of Punata waste water treatment Plant in Cochabamba , Bolivia . Importance of operation and maintenance," in *Congreso Bolivariano de Ingenieria Sanitaria AIDIS*

- 2013, 2013, no. July, pp. 1–8.
- [13] I. Echeverría, O. Coronado, and Á. Mercado, “Eficiencia de las lagunas de estabilización en la remoción de tensioactivos aniónicos,” in *XVII Congreso Bolivariano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 2018, p. 72.
 - [14] APHA/AWWA/WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 1999.
 - [15] F. Cortés Martínez, A. Luévanos Rojas, R. Luévanos Rojas, A. C. Uranga Sifuentes, C. M. Garza Ávila, and J. L. González Barrios, “Diseño de Lagunas de Estabilización en Serie con Diferentes configuraciones. (Caso Comarca Lagunera Estado de Durango, México),” *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 5, 2011.
 - [16] M. von Sperling, *Biological Wastewater Treatment Series, Volume Three, Waste Stabilization Ponds*, 1st ed. IWA publishing, 2007.
 - [17] S. M. Oakley, *Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad*. 2005.
 - [18] F. Cortés Martínez, A. Treviño Cansino, and A. C. Tomasini Ortiz, *Dimensionamiento de lagunas de estabilización*. 2017.
 - [19] L. F. Perez, “Informe de la batimetría de las lagunas de la planta de tratamiento de aguas residuales del centro poblado del municipio de Punata,” Cochabamba-Bolivia, 2007.
 - [20] Á. Mercado, J. Verduguez, and M. Iriarte, “Eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales de ciudades intermedias y pequeñas en Cochabamba. Muestreos puntuales 2012-2017,” in *XVII Congreso Bolivariano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 2018, no. October.
 - [21] F. Cortés-Martínez, A. Treviño Cansino, and A. C. Tomasini Ortiz, *Dimensionamiento de las lagunas de estabilización*, Primera., vol. 53, no. 9. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Universidad Juarez del Estado de Durango, 2017.
 - [22] AGUATUYA, “Memoria de cálculo RAC PTAR Punata Centro Urbano,” Cochabamba-Bolivia, 2017.
 - [23] S. Y. Bodkhe, “A modified anaerobic baffled reactor for municipal wastewater treatment,” *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 8, pp. 2488–2493, 2009.
 - [24] H. Feng, L. Hu, Q. Mahmood, C. Qiu, C. Fang, and D. Shen, “Anaerobic domestic wastewater treatment with bamboo carrier anaerobic baffled reactor,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 62, no. 3, pp. 232–238, 2008.
 - [25] P. Dama *et al.*, “Pilot-scale study of an anaerobic baffled reactor for the treatment of domestic wastewater,” *Water Sci. Technol.*, vol. 46, no. 9, pp. 263–270, 2002.