

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA GESTIÓN Y COSTOS EN SISTEMAS DESCENTRALIZADOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

COMPARATIVE EVALUATION OF MANAGEMENT AND COSTS IN DECENTRALIZED DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS

Valeria Escalante¹, Ivette Echeverría^{1,3}, Gabriel Aliaga¹, Gustavo Heredia³, Ramiro Escalera², Oliver Saavedra¹

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 10 de julio 2023, aceptado para publicación el 21 de julio 2023)

RESUMEN

Se ha realizado una evaluación comparativa de los costos de tratamiento de aguas residuales en 6 diferentes plantas descentralizadas, ubicadas en las comunidades de Cliza, Ucureña, Tolata, Punata, Tarata y San Benito, en el Valle Alto de Cochabamba que atienden a poblaciones de tamaño intermedias (de 4 500 a 25 000 habitantes). Se estimaron los costos de inversión anualizados (CAPEX/Vida útil), el costo anualizado de operación (OPEX) y se describen las características de gestión y eficiencias de las plantas. Los resultados de los CAPEX/Vida útil para las PTARs de Cliza, Ucureña, Tolata, Punata, San Benito y Tarata fueron de 44 566; 34 603; 22 414; 97 194; 25 412 y 36 399 USD/año, respectivamente. Los OPEX para estas PTAR fueron de 21 613; 28 625; 16 720; 19 841; 19 404 y 19 766 USD/año, respectivamente. Los costos por metro cúbico oscilan entre 0,13 y 0,48 USD/m³. Se observó que un menor costo por volumen de agua tratada está relacionado con una menor eficiencia en el sistema de tratamiento. Por otra parte, se encontró que los bajos porcentajes de remoción de contaminantes se ven afectados por la falta de una adecuada operación y mantenimiento. Mayores deficiencias en la operación y mantenimiento se presentaron en las PTAR de Tarata y San Benito, gestionadas por el municipio. La PTAR de Punata, aunque es adecuadamente operada y mantenida, presenta eficiencias relativamente bajas limitadas por la tecnología. Las PTAR de Tolata, Ucureña y Cliza gestionadas por la Fundación Aguatuya bajo un programa de cooperación internacional mostraron mejores eficiencias de remoción.

Palabras Clave: Aguas Residuales, Costo Anual Equivalente, Eficiencia de Tratamiento, Costos de Inversión, Costos de Operación y Mantenimiento.

ABSTRACT

A comparative evaluation of the costs of wastewater treatment has been carried out in 6 different decentralized plants, located in the towns of Cliza, Ucureña, Tolata, Punata, Tarata and San Benito, in the Upper Valley of Cochabamba that serve populations of intermediate size (from 4 500 to 25 000 inhabitants). The annualized investment costs (CAPEX/useful life), the annualized cost of operation (OPEX) were estimated, and the management characteristics and efficiencies of the plants are described. The results of the CAPEX/useful life for the WWTPs of Cliza, Ucureña, Tolata, Punata, San Benito and Tarata were 44 566; 34 603; 22 414; 97 194; 25 412 and 36 399 USD/year, respectively. The OPEX for these WWTPs were 21 613; 28 625; 16 720; 19 841; 19 404 and 19 766 USD/year, respectively. Costs per cubic meter range from 0.13 to 0.48 USD/m³. It was observed that a lower cost per volume of treated water is related to a lower efficiency in the treatment system. On the other hand, it was found that the low percentages of contaminant removal are affected by the lack of proper operation and maintenance. Greater deficiencies in operation and maintenance occurred in the Tarata and San Benito WWTPs, managed by the municipality. The Punata WWTP, although it is adequately operated and maintained, presents relatively low efficiencies limited by technology. The Tolata, Ucureña and Cliza WWTPs managed by the Aguatuya Foundation under an international cooperation program showed better removal efficiencies.

Keywords: Wastewater, Annual Equivalent Cost, Treatment Efficiency, Investment Costs, Operation and Maintenance Costs.

1. INTRODUCCIÓN

Bolivia cuenta con 86% de cobertura de acceso al agua potable, donde el 94,3% de la zona urbana tiene acceso al agua potable a diferencia del 67,3% de la zona rural. Sin embargo, solamente el 60% de la población cuenta con el servicio de saneamiento. Esta es una evidencia de que las aguas residuales domésticas no están siendo tratadas antes de ser descargadas o reutilizadas [1].

Según estudios realizados en el 2013, aproximadamente un 74 % de los municipios en Bolivia cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Sin embargo, el 37 % de estas no se encuentran en funcionamiento debido a la falta de presupuesto de los municipios destinado a la operación y mantenimiento de los mismo [2]. Según inventarios realizados en el 2016, se estima que del total de PTARs inventariadas, el 78% operaba de manera deficiente y solo el 22% se encontraban en un buen estado de funcionamiento [3].

El buen desempeño de las PTARs está estrechamente vinculado a una gestión integral adecuada que comprende la asignación correcta de recursos humanos, financieros y técnicos para actividades de administración, operación y mantenimiento, así como la implementación de un sistema de control de la calidad de los efluentes tratados. La falta de operación y mantenimiento en una PTAR es una de las principales razones de su mal funcionamiento [3].

En este sentido, la operación y el mantenimiento son componentes clave de la gestión integral de las PTAR y tienen un impacto significativo en su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo. Mantener las instalaciones en buen estado garantiza el correcto funcionamiento de estas infraestructuras y reduce el riesgo de fallos que podrían generar un daño medioambiental debido al mal funcionamiento o a paradas del proceso de tratamiento [4]. Es importante tener en cuenta que el mantenimiento preventivo y operación óptimos de una PTAR, conllevan costos que en ocasiones pueden ser elevados. En conjunto con los costos de operación y mantenimiento, los costos de inversión también tienen una gran influencia en el costo global del tratamiento de agua variando en función a la tecnología empleada por el tratamiento, el nivel de automatización, el consumo energético, el uso de insumos, e incluso el requerimiento de terreno asociados a estas instalaciones.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar los costos asociados al tratamiento de las aguas residuales en diferentes sistemas descentralizados, todos ellos situados en un contexto geográfico común, teniendo en cuenta la gestión implementada en cada uno como la eficiencia alcanzada. La investigación se llevó a cabo en los las poblaciones de Cliza, Ucareña, Tolata, Punata, Tarata y San Benito, ubicados en la zona del Valle Alto del departamento de Cochabamba.

2. MATERIAL Y METODOLOGIA

Este estudio se fundamenta en la metodología conocida como Costo Anual Equivalente (CAE) la cual se basa en el análisis de todos los costos relacionados con un servicio o producto durante toda su vida útil. En el contexto de las plantas de tratamiento la metodología se enfoca en considerar todos los costos necesarios para asegurar un funcionamiento eficiente y sostenible de la planta durante todo su periodo de vida de diseño [5]. Estos son los gastos de inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento, los costos energéticos, los insumos utilizados, entre otros. Esta metodología permite una comparación precisa entre las diferentes opciones de tratamiento analizadas en este estudio. Para la estimación del CAE se realizaron estimaciones de los costos de inversión anualizados (CAPEX) que consideran los gastos en implementación de la infraestructura, terreno, conexiones hidráulicas, instalaciones eléctricas, equipos mecanizados y eléctricos y amortización de capital y los gastos anualizados de operación y mantenimiento (OPEX). El CAE para las PTAR de Cliza y Tolata se recopiló a partir de la referencia [6]. Para el resto de las PTAR evaluadas se utilizaron los mismos conceptos para la estimación de costos.

Adicionalmente, se recopilaron de evaluaciones anteriores las características del afluente (AF) y efluente (EF) para estimar la eficiencia en la reducción de concentración de materia orgánica en el agua expresada como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) para las PTARs de Cliza, Tolata y Punata [7]–[9]. Para las PTARs de San Benito y Tarata las características de materia orgánica se recopilaron de [10] y para la PTAR de Ucareña se llevaron a cabo campañas de muestreo para la caracterización. Se realizaron entre 3 y 12 campañas de monitoreo Los análisis de calidad de agua fueron realizados por prestación de servicios en laboratorios externos de SPECTROLAB.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el presente estudio se seleccionaron seis PTARs pertenecientes a la región del Valle Alto de Cochabamba, cuya selección se basó principalmente en la accesibilidad de la ubicación, la información disponible, el modelo de gestión implementado y su estado de funcionamiento, Figura 1.

A continuación, se presenta una descripción general del contexto geográfico y operacional de cada PTAR estudiada.



Figura 1: Ubicación general de las seis PTARs estudiadas.

3.1 Descripción de las PTARs evaluadas

3.1.1 PTAR Cliza

La PTAR de Cliza (Figura 2) está ubicada en las afueras del centro urbano, muy próxima al borde territorial del municipio en el sector de Villa del Carmen, a una altura aproximada de 2.715 m.s.n.m. Recibe las aguas residuales provenientes del centro de Cliza y de Villa del Carmen. El municipio de Cliza forma parte de la provincia Germán Jordán, ubicada dentro de la zona central del Valle Alto de Cochabamba a 37 kilómetros al sudeste de la ciudad de Cochabamba.

El tren de tratamiento de la PTAR consiste en un cárcamo de bombeo, dentro del cual existe una cámara de rejas destinada a proteger la bomba reteniendo la mayor cantidad de sólidos gruesos. A continuación, el agua es bombeada hacia el proceso de pretratamiento, donde se remueven los sólidos más finos (mayores a 6 mm), seguido del tanque de homogenización. En ese punto el agua es distribuida en cinco módulos de tratamiento y cada módulo tiene dos trenes de tratamiento iguales que trabajan en paralelo. En el módulo el agua pasa por un tanque desgrasador (para retirar las grasas en suspensión), un biorreactor anaeróbico (para descomponer la materia orgánica), una cámara de aireación (para estabilizar la materia orgánica aun presente en el agua) y finalmente por un biofiltro horizontal (compuesto por un biofiltro de grava para remover los sólidos suspendidos y promover la descomposición de la materia orgánica). El agua tratada es descargada a un canal de concreto que se encuentra en las afueras de la PTAR para su uso en el riego de cultivos.

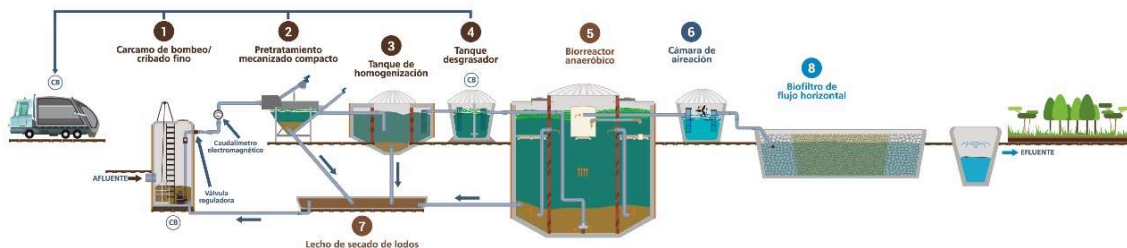


Figura 2: Planta de tratamiento de aguas residuales de Cliza.

▪ **Gestión implementada**

En el año 2011 se creó un convenio entre el Gobierno Autónomo Municipal (GAM) de Cliza y la Fundación Aguatuya con la finalidad de asistir técnicamente en el diseño de una PTAR que beneficié alrededor de 10.000 habitantes de la zona. La construcción del proyecto se dividió en 2 etapas, la primera con el financiamiento de la Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo y la segunda con una contraparte del municipio del 50%.

En el año 2014 se empezó con la puesta en marcha de la PTAR y el acondicionamiento del tratamiento que tuvo una duración de 1 año. El GAM de Cliza vio por conveniente firmar nuevamente un convenio con la Fundación Aguatuya para la asistencia técnica y la contratación de un operador especializado para la PTAR durante el periodo de 5 años, con el objetivo de garantizar la correcta operación, mantenimiento y monitoreo de la PTAR. Este convenio puede ser renovado de mutuo acuerdo entre partes o, el GAM de Cliza puede hacerse cargo de la operación de la PTAR por su cuenta si así lo viera conveniente. Actualmente, la operación y mantenimiento de la PTAR la realiza la Fundación Aguatuya dentro de un programa financiado por la Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (ASDI) [11].

3.1.2 PTAR de Ucureña

La PTAR de Ucureña (Figura 3) está ubicada en la comunidad de Ucureña que pertenece a la provincia Germán Jordán. La PTAR de Ucureña, está ubicada sobre la Carretera Cliza. Esta está ubicada a una altura aproximada de 2.715 m.s.n.m. La PTAR recolecta las aguas residuales de las comunidades de Ucureña y Retamas. Las aguas residuales ya tratadas son reutilizadas para el riego.

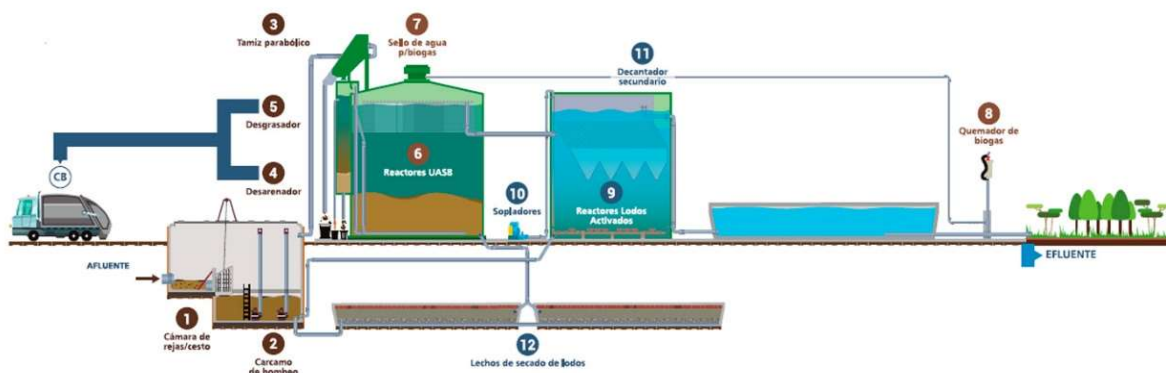


Figura 3: Planta de tratamiento de aguas residuales de Ucureña.

El proceso de tratamiento de las aguas residuales de Ucureña se realiza en dos trenes de tratamiento. La PTAR cuenta con una cámara de rejillas, donde se retienen sólidos gruesos. Desde el cárcamo de bombeo, se impulsa el agua hacia dos trenes de tratamiento. En este punto, el agua residual pasa por un pretratamiento compuesto por un tamiz parabólico, un

desarenador y un desgrasador donde se retienen los sólidos finos (de tamaño mayor a 1,5 mm) y arenas y se separa el material graso en suspensión de la fase acuosa del agua. A continuación, el agua pasa a un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA). Esta etapa se encarga de descomponer la materia orgánica en compuestos más simples mediante procesos metabólicos anaerobios. Luego, el agua se dirige al reactor de lodos activados donde se inyecta aire mecánicamente, el cual es utilizado por las bacterias para que descompongan la materia orgánica en compuestos más simples. Los lodos en suspensión pasan por un sedimentador secundario para que sean retenidos, y los lodos estabilizados que se extraen del reactor de lodos activados, por una parte, son conducidos a un lecho de secado de lodos y otra parte se recircula hacia el cárcamo de bombeo. Finalmente, el agua residual tratada se utiliza en el riego de cultivos almacenándose el exceso en un tanque.

▪ **Gestión implementada**

La PTAR fue construida con financiamiento de la ASDI y el Gobierno Autónomo Municipal de Cliza. El diseño y construcción de esta obra estuvo a cargo de la empresa brasilera Sauber y de la Fundación Aguatuya. Esta PTAR arrancó sus operaciones en septiembre de 2021 estando a cargo del arranque y estabilización de sistema la Fundación Aguatuya. De la operación y mantenimiento se encarga también la fundación durante un periodo de transición hasta que pueda pasarse la responsabilidad total de la gestión al municipio.

3.1.3 PTAR de Tolata

La PTAR de Tolata (Figura 4) está ubicada al sudoeste del municipio, a una altura aproximada de 2.702 m.s.n.m. Cercano a la PTAR se encuentra el río Sulty. El tratamiento de estas aguas ayuda a la no contaminación del río Sulty y al reúso de las mismas en el riego de cultivos seleccionados. El municipio de Tolata forma parte de la provincia Germán Jordán, ubicada dentro de la zona central del Valle Alto de Cochabamba a 30 kilómetros de distancia de la ciudad de Cochabamba (medidos sobre la carretera Cochabamba - Santa Cruz).

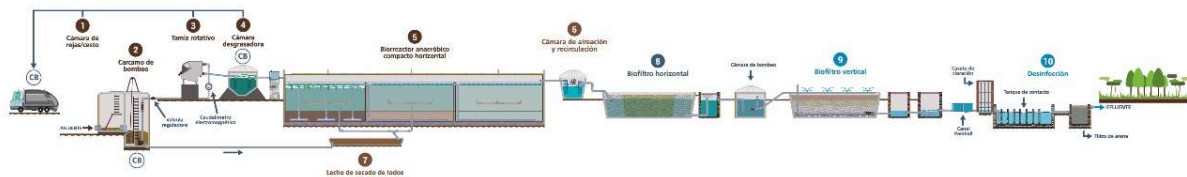


Figura 4: Planta de tratamiento de aguas residuales de Tolata.

En la PTAR, las aguas residuales pasan por una cámara de rejillas en las que se retienen sólidos gruesos (mayores a 5 cm de diámetro), a continuación, ingresan al cárcamo de bombeo donde el agua es almacenada temporalmente para posteriormente ser elevada y distribuida por el resto de las unidades. En el tamiz rotativo se separan los sólidos finos (mayores a 3 mm de diámetro) y el agua continua hacia la cámara desgrasadora donde se retienen y separar las grasas

suspendidas. En este punto el agua es distribuida a dos trenes de tratamiento iguales que funcionan en paralelo constituidos por un reactor anaeróbico compartimentado (RAC), para la sedimentación y digestión de la materia orgánica, un biofiltro horizontal y un biofiltro vertical que permiten afinar el tratamiento. Finalmente, los flujos de los dos trenes de tratamiento se unen y pasan hacia un tanque de contacto de cloro, aunque actualmente no se realiza el proceso de desinfección. A continuación, el agua es conducida hacia un filtro de arena instalado al ingreso de un tanque de almacenamiento para poder ser utilizada por los regantes de la zona mediante bombas.

▪ **Gestión implementada**

En el año 2014 el Gobierno Autónomo Municipal (GAM) de Tolata firmó un convenio con la Fundación Agutuya para el diseño y la construcción de una PTAR, que reciba las aguas residuales de aproximadamente 2.250 habitantes. El proyecto estuvo financiado por la Embajada de Suecia en Bolivia en un 70%, el restante 30% fue una contribución de parte de los fondos del municipio.

La construcción del proyecto fue finalizada para el año 2018. Además, de emplearse 6 meses adicionales para el acondicionamiento de la PTAR y la realización de ajustes técnicos necesarios. Como parte del convenio la Fundación Agutuya realizó una evaluación de la gestión y administración de la PTAR y sugirió una tarifa tentativa que cubra todos los gastos de monitoreo, operación y mantenimiento.

En este caso el municipio es el propietario de la PTAR y la Fundación Agutuya se encarga del monitoreo, operación y mantenimiento de la misma bajo un programa de cooperación de la Embajada de Suecia [12].

3.1.4 PTAR de Punata

La PTAR de Punata (Figura 5) está ubicada en el extremo oeste del municipio, en la zona de Colque Rancho, en cercanías de la laguna Sulty. Se caracteriza por utilizar una gran superficie territorial ubicada estratégicamente en lejanías del centro urbano, a una altura aproximada de 2705 m.s.n.m. El municipio de Punata forma parte de la provincia con el mismo nombre y se encuentra ubicada a 40 km al sur de la ciudad de Cochabamba.

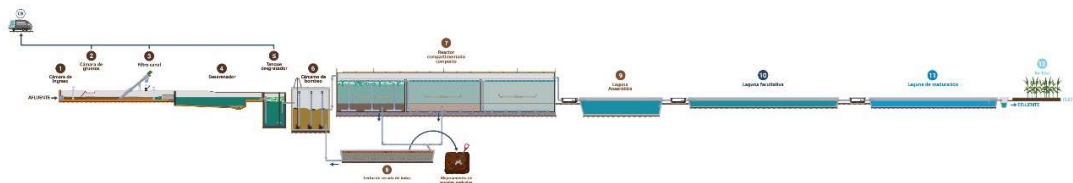


Figura 5: Planta de tratamiento de aguas residuales de Punata.

El tren de tratamiento de la PTAR consiste en un canal de ingreso hasta la zona de cribado grueso, en la que se retiran los sólidos gruesos (mayores a 5 cm de diámetro). A continuación, el agua pasa al proceso de cribado fino, donde un tamiz tipo tornillo mecánico extrae los sólidos finos (mayores a 5 mm de diámetro). El pretratamiento continúa en un desarenador donde se eliminan las partículas más pesadas del agua, una cámara desgrasadora remueve las grasas en suspensión y un sistema de bombeo eleva el agua para su ingreso a los reactores anaeróbicos. En este punto el flujo es distribuido en dos reactores anaeróbicos compartimentados que trabajan en paralelo, a la salida de esta unidad el flujo se uniformiza para nuevamente ser distribuido en 3 lagunas anaerobias en paralelo, 2 lagunas facultativas en paralelo y 3 lagunas de maduración en paralelo. Finalmente, el efluente es descargado a un canal de concreto que sale de la PTAR y que es destinado al riego de cultivos de la zona.

▪ Gestión implementada

Inicialmente, la PTAR fue construida en el año 1995 y al verse superada la vida útil y la carga orgánica de diseño de la planta de tratamiento, después de 20 años, se vio necesaria la ampliación y el rediseño del tren de tratamiento original. En el año 2018 el Gobierno Autónomo Municipal de Punata junto con la Fundación Aguatuya fueron los responsables de la ejecución de un proyecto de ampliación y mejora del sistema. El financiamiento estuvo a cargo de la Embajada de Suecia en Bolivia.

Actualmente la gestión de la PTAR se encuentra en una transición operacional, donde la Fundación Aguatuya aún realiza trabajos de monitoreo y mantenimiento. Pero, el manejo de la PTAR como tal se encuentra bajo el control de un operador contratado por el municipio. Se espera que, una vez finalizada la transición, el municipio sea el único encargado del monitoreo, operación y mantenimiento de la PTAR.

3.1.5 PTAR de Tarata

La PTAR de Tarata (Figura 6) está ubicada a un kilómetro al norte de la zona urbana, a una altura aproximada de 2.750 m.s.n.m. La planta está destinada al tratamiento de las aguas residuales de la población del centro del municipio las cuales posteriormente son descargadas mediante una tubería enterrada, al río Chaquimayu. El municipio de Tarata pertenece a la provincia Esteban Arce y es considerada la primera sección municipal de la misma. Se encuentra localizado a 26 kilómetros de la ciudad de Cochabamba, dentro de la zona del Valle Alto.



Figura 6: Planta de tratamiento de aguas residuales de Tarata.

Las aguas residuales recolectadas llegan por gravedad hasta el canal de ingreso a la PTAR. Inicialmente ingresan a un desarenador donde se sedimentan las partículas más pesadas del agua. Luego se encuentra la zona de cribado compuesta por tres pantallas de rejas destinadas a retener los sólidos de mayor tamaño. Los tratamientos primario, secundario y terciario se realizan en dos trenes de tratamiento que funcionan en paralelo. A la salida del cribado el agua se reparte en dos flujos, que ingresan a una laguna anaerobia (para la sedimentación de sólidos), una laguna facultativa (para la reducción de materia orgánica) y dos lagunas de maduración (para la reducción de nutrientes y algas) que trabajan en serie. Finalmente, el efluente es descargado a un canal de concreto que conduce el agua hasta dos estanques construidos por los pobladores de la zona. Para posteriormente distribuir el agua acumulada hacia sus cultivos mediante acequias.

Como se puede observar en las fotografías de la Figura 6, durante la visita de campo se apreció un estado de mantenimiento deficiente que ocasiona colmatación total del desarenador con una capa gruesa de natas y de residuos sólidos, obstrucción de las rejas con material retenido, compuertas oxidadas y sin funcionamiento.

▪ **Gestión implementada**

La PTAR fue construida el año 1995, pero a pesar de ya haber superado su tiempo de vida útil, sigue en funcionamiento para el servicio del municipio. Hasta la fecha el tren de tratamiento no ha sufrido ningún tipo de modificación o ampliación. La administración de la PTAR está a cargo del Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Tarata (SEAPA), una empresa autónoma destinada a brindar los servicios de saneamiento básico y de agua potable. Se caracteriza por tener una gestión descentralizada, esto quiere decir que operativamente y administrativamente SEAPA es independiente del GAM de Tarata. En el trabajo de campo se evidenció que no se realizan actividades de operación y mantenimiento cotidianos que ocasionan la colmatación de las unidades.

3.1.5 PTAR de San Benito

Ubicada en el extremo sur del sector denominado Paracaya Linde, muy cercano a la frontera con el municipio de Punata. Tiene una elevación aproximada de 2710 m.s.n.m. La planta de tratamiento (Figura 7) beneficia en su totalidad a las comunidades de Paracaya Linde, Pabellón A, Pabellón B y Mora-Mora. El agua tratada es usada principalmente en el riego de los cultivos.

Las aguas residuales recolectadas ingresan a la primera unidad de la PTAR mediante gravedad. Antes de ingresar del desarenador (para la sedimentación de las partículas más pesadas), el caudal pasa por una cámara de rejas para extraer los sólidos gruesos (mayores a 5 cm de diámetro). A continuación, el agua es almacenada en un cárcamo de bombeo y es distribuida a 4 reactores anaeróbicos de flujo ascendente (para la remoción y degradación de materia orgánica). Al salir de esta unidad el flujo se unifica para pasar al tratamiento secundario compuesto por 3 lagunas de maduración que funcionan en serie. Cabe destacar que entre cada unidad de tratamiento existen diferentes cámaras de registro y cámaras de interconexión que ayudan a controlar el funcionamiento y mantenimiento de la PTAR.

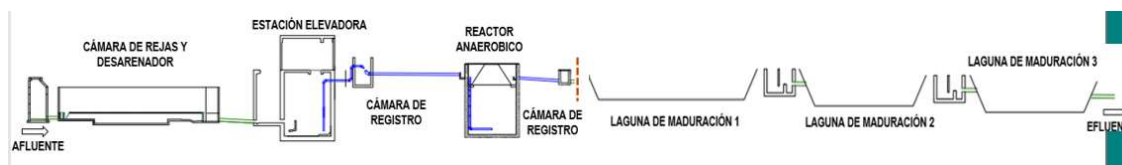


Figura 7: Planta de tratamiento de aguas residuales de San Benito.

El efluente es descargado a una cámara de inspección, que es por donde los pobladores extraen, mediante bombas, el agua necesaria para el riego de sus cultivos. La cámara de inspección no está conectada a ningún canal, esta distribuye el agua a una red de tuberías que conducen el agua a su destino final.

Durante la visita de campo se observaron inundaciones en las unidades del desarenador durante la época de lluvias y extracción de agua de las lagunas producto de la escasez de agua para el riego de los cultivos.

▪ Gestión implementada

La PTAR fue construida el año 2016 como parte de un programa de inversión impulsado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua. El financiamiento del proyecto estuvo a cargo de los Fondos de Cooperación de Agua y Saneamiento AECID y por una contraparte del municipio. La administración se encuentra a cargo de la Asociación de Agua Potable y Alcantarillado de Paracaya (ASAP). ASAP es una entidad encargada de prestar los servicios de agua potable y alcantarillado a todos los habitantes de Paracaya. Tiene una gestión descentralizada, donde la operación y administración de los servicios son autónomos al Gobierno Autónomo Municipal de San Benito. Durante la visita de campo se evidenció operación y mantenimiento deficientes.

3.2 Cálculo de los indicadores económicos

Los resultados de los indicadores económicos del CAPEX y OPEX de las PTAR evaluadas se muestran en la Tabla 1. Estos valores reflejan toda la sistematización de la información recolectada en las visitas de campo, la información brindada por los encargados del proyecto, la información deducida en gabinete y la información recopilada de estudios anteriores publicados.

TABLA 1 - RESULTADOS DE LOS INDICADORES ECONÓMICOS DE LAS PTARS ESTUDIADAS

	Institución Responsable de O&M	Volumen Tratado (m ³ /año)	CAPEX/Vida útil USD/año	OPEX USD/año	CAE USD/año	CAE USD/m ³
CLIZA	Aguatuya	207 318	44 566	21 613	66 179	0,32
UCUREÑA	Aguatuya	247 287,5	34 603	28 625	63 228	0,26
TOLATA	Aguatuya	118 891	22 414	16 720	39 134	0,33
PUNATA	Aguatuya	924 005	97 194	19 841	117 035	0,13
SAN BENITO	ASAP	93 312	25 412	19 404	44 816	0,48
TARATA	SEAPA	279 936	36 399	19 766	56 165	0,20

TABLA 2 - INDICADOR DE COSTO POR CÁPITA – AÑO

	Población atendida (hab)	CAPEX USD/cápita-año	OPEX USD/cápita-año	CAE USD/cápita-año
CLIZA	10 000	6,10	2,96	9,07
UCUREÑA	7 572	6,26	5,18	11,44
TOLATA	5 000	6,14	4,58	10,72
PUNATA	23 291	5,72	1,17	6,88
SAN BENITO	4 500	7,74	5,91	13,64
TARATA	7 845	6,36	3,45	9,81

En la Tabla 2 se presentan indicadores de CAPEX, OPEX y CAE per cápita año. Se asume una población atendida del 73% estimada en base a registros de cobertura.

Los costos anualizados de inversión se encuentran entre 5,72-7,74 USD/cápita-año. El costo de inversión más elevado es el de la PTAR de San Benito que es la PTAR que atiende a una menor cantidad de habitantes. El CAPEX más bajo corresponde a la PTAR de Punata.

Los costos anualizados de operación varían entre 1,17-5,91 USD/cápita-año. La PTAR con mayores costos operacionales OPEX es la de San Benito alcanzando 5,91 USD/cápita-año. Estos costos elevados pueden estar relacionados a la cantidad de habitantes a la que sirve. Le sigue la PTAR de Ucuireña, donde los costos operacionales elevados de 5,18

USD/cápita-año, se justifican por el consumo energético. Asimismo, la PTAR de Tolata también presenta costos operacionales relativamente elevados de 4,58 USD/cápita-año, atribuibles a la necesidad de mantenimiento de los biofiltros. En contraste, la PTAR de Cliza tiene costos operacionales moderados de 2,96 USD/cápita-año. En el caso de la PTAR de Tarata, los costos operacionales de 3,45 USD/cápita-año se han estimado en base a las necesidades operativas, dado que la EPSA no lleva un registro de los costos de mantenimiento. Sin embargo, durante la visita de campo se pudo apreciar que la PTAR lleva mucho tiempo sin recibir mantenimiento, lo que ha ocasionado la colmatación de las unidades de pre-tratamiento. Por otro lado, la PTAR de Punata presenta los costos operacionales más bajos, con un valor de 1,17 USD/cápita-año. La principal diferencia entre los costos operacionales de la PTAR de Punata y la de Tarata, considerando que las tecnologías son similares basadas en lagunaje, radica en la escala ya que la primera atiende a una población mucho mayor que la segunda.

Estas variaciones en los costos operacionales de las 6 PTARs evaluadas pueden atribuirse a diversos factores, como el tamaño de la población atendida, la infraestructura existente, la complejidad del tratamiento requerido y los costos operativos y de mantenimiento específicos de cada localidad.

El costo total de tratamiento anualizado por habitante (CAE) se encuentra entre 6,88- 13,64 USD/cápita-año. De estos costos, la PTAR de San Benito muestra el CAE más alto (13,64 USD/cápita-año) en correspondencia con un CAPEX también elevado (7,74 USD/cápita-año). Estos valores indican una inversión inicial significativa y costos operativos elevados para una población de diseño relativamente pequeña.

Las PTAR de Cliza, Tarata y Tolata presentan costos de tratamiento relativamente similares, oscilando entre 9,07 y 10,72 USD/cápita-año. Estos valores indican un nivel de inversión y operación moderado en comparación con las demás PTAR evaluadas. Por otro lado, las PTAR de Ucureña y San Benito muestran costos de tratamiento más elevados, con valores de 11,44 y 13,64 USD/cápita-año, respectivamente. En contraste, la PTAR de Punata es la que tiene el menor costo de tratamiento, 6,88 USD/cápita-año. Estos resultados ponen de manifiesto la existencia de una economía de escala en los sistemas de tratamiento que permiten disminuir los costos a medida que las instalaciones de saneamiento estén proyectadas para atender una mayor cantidad de habitantes.

Una investigación realizada por [13] sugiere que un costo asequible que se destine a los servicios de agua y saneamiento en el contexto boliviano podría corresponder al 3% de los ingresos anuales de la vivienda. De estos costos un 60% deberían destinarse exclusivamente para el servicio de saneamiento. De este monto, destinar solamente un tercio al tratamiento de las aguas residuales en base a un salario mínimo nacional para una vivienda de 4 integrantes en promedio, daría un monto referencial de 5,48 USD/cápita-año. Los autores [13] sugieren que este valor referencial sería un valor umbral para garantizar la sostenibilidad de la PTAR pero solo bajo el supuesto que todos los beneficiarios pagaran un tarifa de saneamiento, sin embargo, la realidad es que no todos los usuarios podrían permitirse afrontar estos costos. De los datos recabados en la evaluación de las 6 PTAR, se puede observar que el OPEX en casi todos los casos es menor a este valor umbral sugerido, a excepción de la PTAR de San Benito, que excede aunque no por mucho este valor. Estos resultados sugieren que la población a partir de un ingreso básico podría costear el costo de operación y mantenimiento, sin embargo, el costo de inversión tendría que ser financiado por el municipio.

Un análisis más detallado de los costos de tratamiento considera el volumen que trata actualmente cada PTAR. Estos indicadores comparativos se presentan en la Figura 8.

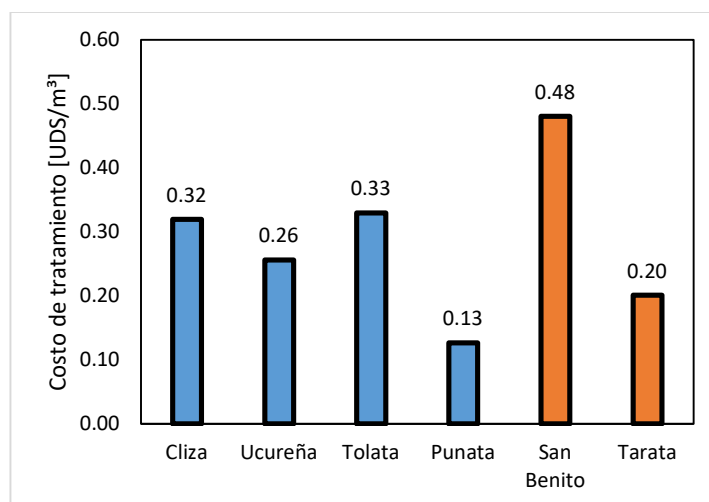


Figura 8: Comparación de los costos de tratamiento.

Al incluir el volumen de agua tratada al costo de tratamiento en USD/m³ se aprecia que la PTAR de Punata tiene el menor costo con 0,13 USD/m³, que se debe a que esta PTAR atiende a una mayor cantidad de habitantes y por tanto trata el caudal más elevado. La PTAR de Tarata reporta costos de tratamiento bajos, con 0,20 USD/m³, pero para una población más reducida que podría deberse a que no se destinen muchos recursos para la operación y mantenimiento, situación que fue observada en el trabajo de campo. La PTAR de Ucuireña también registra uno de los costos más bajos de tratamiento, 0,26 USD/m³, siendo incluso una de las PTAR más sofisticadas y con mejores rendimientos. Los costos de tratamiento son similares para las PTAR de Cliza y Tolata, 0,32 y 0,33 USD/m³ respectivamente. Los costos de tratamiento de San Benito son los más elevados y ascienden a 0,48 USD/m³ respectivamente. Con esta información se pone de manifiesto que los costos de tratamiento responden en algunos casos a una economía de escala.

3.3 Análisis de los costos en relación con la eficiencia de las PTARs

En la Tabla 3 se presentan los valores de DBO₅ en el afluente y efluente de las PTAR, la eficiencia y una estimación de los kg de DBO₅ removidos en el proceso y el costo que esa remoción implica.

TABLA 1 - ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA Y COSTOS POR kg DE DBO₅ REMOVIDO

	DBO ₅ (mg/L)					
	CLIZA n=7	UCUREÑA n=9	TOLATA n=12	PUNATA n=6	SAN BENITO n=3	TARATA n=3
AF	366	344	396	302	352	549
EF	80	39,3	18	137	96	194
Eficiencia (%)	78,1	89	95,5	54,6	72,7	64,7
Caudal (m³/d)	568	250	326	2 532	256	767
kg removidos/d	162,5	206,4	123,2	417,8	65,5	272,3
CAE (USD/año)	66 179	47 854	39 134	117 035	44 816	56 165
USD/kg removidos	1,12	0,84	0,87	0,77	1,88	0,57

La Figura 9 permite establecer una comparación entre los costos de tratamiento por unidad de volumen y las eficiencias en la reducción de DBO₅. La PTAR de Tolata se destaca como la más eficiente logrando un 95 % de eficiencia con un costo de 0,33 UDS/m³, lo que la posiciona en un rango de costos intermedio entre las seis PTAR evaluadas. La PTAR de Ucuireña se encuentra en un segundo lugar con un costo aún menor de 0,26 UDS/m³. Por otro lado, las PTARs de Cliza y San Benito presentan una reducción de DBO₅ similar, con un 78 % y 73 % respectivamente y costos de 0,32 y 0,48 UDS/m³ respectivamente. En cuanto a las PTAR con menor eficiencia, se encuentran Tarata y Punata, con 65 % y 55 % respectivamente. Ambas PTAR reportan además costos bajos de tratamiento, 0,20 UDS/m³ y 0,13 UDS/m³ respectivamente.

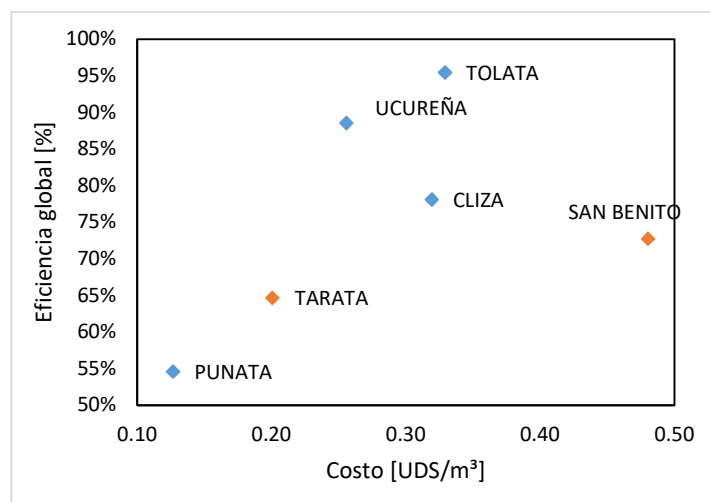


Figura 9: Comparación de la eficiencia de DBO₅ y el costo por volumen tratado.

Los resultados de la Figura 9 sugieren una relación entre la eficiencia y el costo de tratamiento de las aguas residuales. Esta relación puede ser atribuida a la asignación de recursos humanos, técnicos y financieros destinados a la operación y mantenimiento de dichas instalaciones, pero también están relacionados a la tecnología que se emplea, como es el caso de la PTAR de Ucureña que constituye la excepción al presentar bajos costos de tratamiento por unidad de volumen en relación a sus altas eficiencias. En este contexto se observó que las PTAR de Tarata y Punata son las que más baja eficiencia presentan, en relación a la tecnología empleada, coincidentemente, ambas PTAR presentan lagunas de estabilización en su tren de tratamiento.

En la Figura 10 se presenta una comparación del costo de remoción de un kilogramo de DBO₅ para las seis PTARs estudiadas.

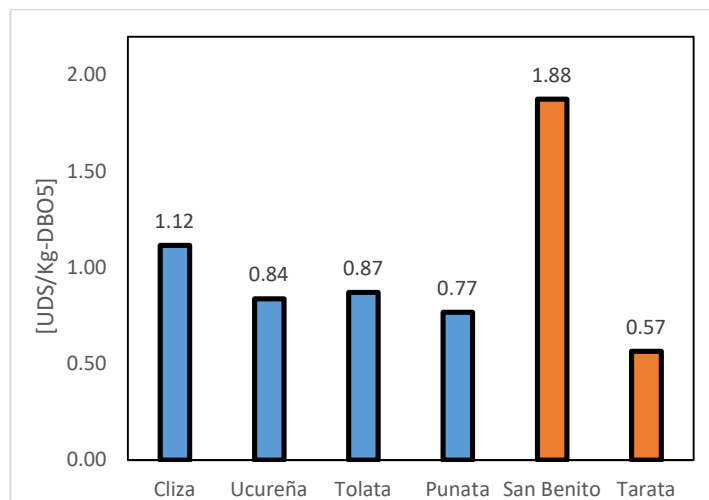


Figura 10: Costo por kg de DBO₅ removido.

El costo de eliminación de 1 kg-DBO₅ oscila entre 0,57 y 1,88 USD. El costo más elevado corresponde a 1,88 USD/kg-DBO₅ removido en la PTAR de San Benito. El costo más bajo corresponde al de la PTAR de Tarata con 0,57 USD/kg removido. El costo de tratamiento por metro cúbico tiene una tendencia similar al costo de tratamiento por kg-DBO₅ removido. Esto puede deberse a que la diferencia en la concentración de materia orgánica afluente a las PTAR no es significativa por ubicarse dentro de un mismo contexto geográfico

Se ha identificado que uno de los costos más significativos en términos de operación de las PTAR es el consumo de energía. Para poder establecer una relación entre el costo energético de las PTAR y la eficiencia en la eliminación de DBO₅ se ha desarrollado un indicador específico que se presenta en la Figura 11.

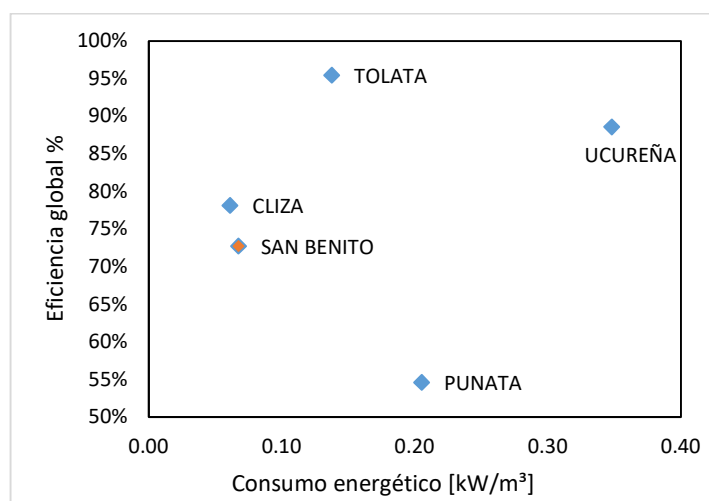


Figura 11: Eficiencia vs Costo de energía por volumen de agua tratada.

De la Figura 11 se puede apreciar que la PTAR de Ucareña es la que presenta un mayor consumo energético (0,35 kW/m³), pero exhibe también una buena eficiencia en la remoción de DBO₅ alcanzando un 89 %. La PTAR de Tolata se destaca por ser la que logra mejor eficiencia en la remoción de DBO₅, con un consumo notablemente bajo de 0,14 kW/m³. En contraste, las PTARs de Cliza y San Benito presentan consumos de energía bastante bajos con valores de 0,06 y 0,07 kW/m³ respectivamente. La PTAR de Tarata no tiene consumo energético puesto que el flujo es por gravedad. La PTAR de Punata que tiene un consumo energético relativamente alto de 0,21 kW/m³ para la eficiencia que alcanza.

En Bolivia se reportan constantemente problemas relacionados a la falta de mantenimiento y operación [3]. Estos se deben a una variedad de factores entre los que destaca la falta de asignación de recursos económicos para dichas actividades. En la Figura 12 se presenta una relación entre la eficiencia de eliminación de DBO₅ de las PTAR con el OPEX.

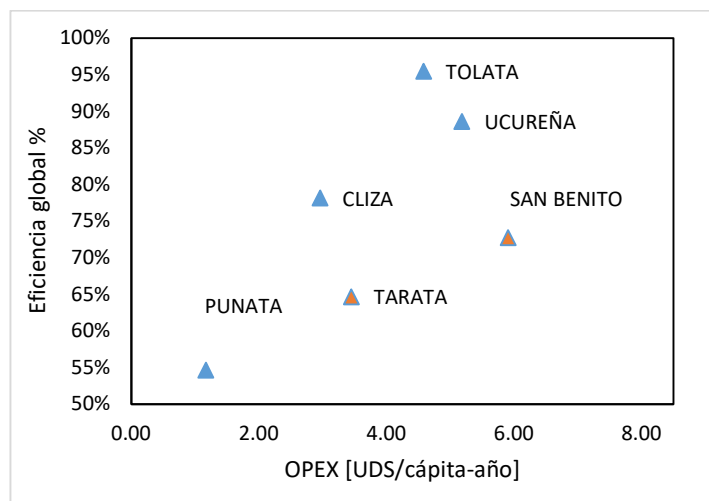


Figura 12: Eficiencia de eliminación de DBO₅ vs costos de operación y mantenimiento.

De la Figura 12 puede apreciarse que la PTAR de Punata tiene el menor costo de operación reportando un valor de 1,17 UDS/cápita-año y una remoción del 55 % de DBO₅. Para una mejor comprensión de la relación entre los costos operacionales y las eficiencias alcanzadas, en la Tabla 4 se presenta una descripción de las actividades de operación y mantenimiento, los recursos humanos destinados a la operación y el tiempo asignado a estas labores, la frecuencia del mantenimiento además del estado de funcionamiento al momento de la inspección de cada PTAR evaluada.

TABLA 4 - DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DE LAS PTAR

PTAR	Operadores en planta	Horas/semanas destinadas a la operación	Frecuencia de mantenimiento general	Operación y mantenimiento Actividad	Estado de funcionamiento al momento de la inspección
Cliza	2 (1 operador permanente y otro de apoyo)	40 horas 5 días por semana 8 horas por día	3 veces/año	Limpieza de pretratamiento Limpieza de cesto Limpieza de grasas y natas	Funcionando con operación y mantenimiento
Ucareña	1	28 horas 7 días por semana 4 horas por día	1 vez/año	Limpieza de pretratamiento Limpieza desgrasador Desbroce de predios Medición de lodos Registro de caudales Registro de caudales Recirculación de lodos del reactor de lodos activados Retiro de natas y lodos de RAFA	Funcionando con operación y mantenimiento

Tolata	1	24 horas 3 días por semana 8 horas por día	2 veces/año	Limpieza de pretratamiento Limpieza desgrasador Desbroce de predios Retirado de lodos RAC Limpieza de biofiltros	Funcionando con operación y mantenimiento
Punata	1	40 horas	1 vez/año	Limpieza pretratamiento Desbroce de predios Mantenimiento de RAC	Funcionando con operación y mantenimiento
San Benito	1	20 horas 5 días por semana 4 horas por día	1 vez/año	Limpieza pretratamiento Limpieza de lagunas	Con caudal insuficiente para alcanzar flujo en el efluente. Tiene operación y mantenimiento
Tarata	-	Indefinido, se opera cuando se presenta alguna emergencia	-	-	En mal estado de funcionamiento, pre- tratamiento colmatado, rejas presentan corrosión

Con esta descripción se explican por un lado las bajas eficiencias de la PTAR Tarata y los bajos costos asociados con sus actividades de operación y mantenimiento ya que como se describe en la tabla, esta PTAR solo recibe mantenimiento ocasional encontrándose al momento de la inspección con serias deficiencias, entre estas, unidades de pre-tratamiento colmatadas de lodo y basura y rejas y compuertas al ingreso afectadas por la corrosión.

En un estudio realizado por [14] donde se evaluaban cinco PTARs descentralizadas en zonas rurales de Cochabamba (<10 000 habitantes), se identificó a la falta de operación y mantenimiento como la causa principal del funcionamiento deficiente de las PTARs. La limitación de los recursos disponibles para estas actividades deriva en la ausencia de operadores capacitados para monitorear el funcionamiento de la PTAR.

3.4 Requerimiento de área y eficiencias de las PTAR

El área requerida por una instalación podría ser uno de los ítems que represente los mayores costos de inversión. En este estudio se presenta (Figura 13) de manera referencial los requerimientos de área de las distintas PTAR evaluadas en función a la eficiencia alcanzada en las PTAR.

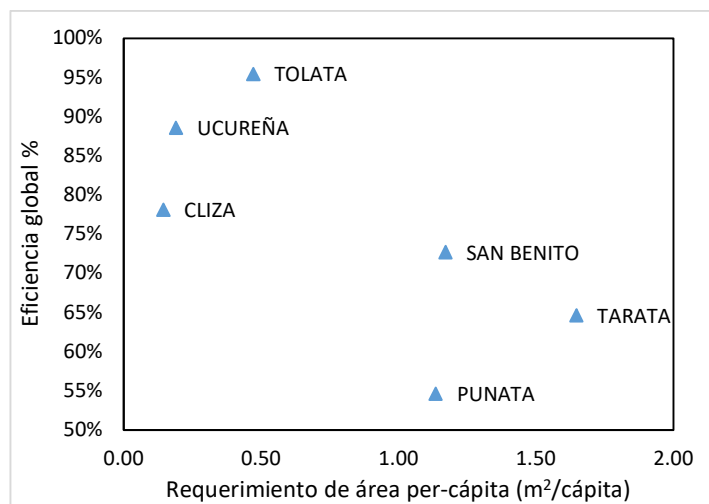


Figura 13: Eficiencia vs requisitos de área por caudal tratado.

La PTARs de Cliza y Uchureña tienen requerimientos similares de área per cápita para el tratamiento (0,14 y 0,19 m²/cápita respectivamente) y pueden considerarse sistemas compactos. La PTAR de Tolata tiene un requerimiento un tanto mayor que asciende a 0,47 m²/cápita. Las tecnologías basadas en reactores tienen por lo general bajos requerimientos de área, de entre 0,1 a 0,4 m²/cápita, en el caso de los reactores anaeróbicos y 0,2 m²/cápita en el caso de los sistemas aerados [15]. En función de la eficiencia alcanzada, se observa una ventaja competitiva de la PTAR de Uchureña sobre la PTAR de Tolata ya que es un sistema más compacto que alcanza eficiencias altas. Las PTAR de

Punata y San Benito tienen requisitos de área similares (1,13 y 1,17 m²/cápita respectivamente) y la PTAR de Tarata tiene el más alto requisito de terreno alcanzando un valor de 1,65 m²/cápita. Los sistemas de lagunaje y los humedales construidos, ya sea solos o en combinación, son por lo general los sistemas que más espacio ocupan en el tratamiento. Según reportes, un sistema convencional de lagunas de estabilización tiene un requisito de 4 m²/cápita. En un sistema que utiliza pre-tratamiento anaerobio combinado con lagunaje, por ej: un UASB+lagunas, el requisito de área se reduce a 1,5 m²/cap [15]. En el caso de la PTAR de Punata con respecto a la de Tarata, este requerimiento baja debido a que en la PTAR de Punata le antecede un reactor anaeróbico compartimentado, que es una de las tecnologías más compactas.

4. CONCLUSIONES

Los porcentajes de remoción de los contaminantes se ven afectados por la falta de una adecuada operación y mantenimiento como se observó en las PTARs de Tarata y San Benito en relación a la gestión que se realiza en las mismas y los recursos que se destinan, pero también están condicionadas por la tecnología implementada. Las PTARs de Cliza, Ucureña y Tolata, gestionadas por la Fundación Aguatuya bajo un programa de cooperación internacional, presentaron mejores eficiencias de remoción.

Los costos de inversión anualizados CAPEX tienen una relación inversa de proporcionalidad con la población de diseño y el caudal de tratamiento, respondiendo en algunos casos a una economía de escala. Los costos de operación y mantenimiento OPEX dependen de la frecuencia con la que se realizan los mantenimientos, la cantidad de personal empleado y el volumen de tratamiento de la PTAR.

Una mayor inversión, CAPEX, no necesariamente representa una mejor eficiencia en la eliminación de materia orgánica. Una inversión adecuada en OPEX contribuye en la eficiencia de las PTAR. Las PTARs de Ucureña y Tolata muestran las más elevadas eficiencias en la remoción de DBO₅ en relación a sus valores de OPEX, en cambio las PTAR de Punata y Tarata muestran un desempeño deficiente en relación a la inversión que se realiza en operación y mantenimiento. Para PTARs con poblaciones intermedias (4 500 a 25 000 habitantes) el costo de tratamiento para un desempeño entre bueno y aceptable se encuentra entre los 0,13 a 0,48 USD/m³.

La mayoría de las PTARs que se encuentran bajo la operación directa por parte del municipio carecen de una planificación sostenible para garantizar el buen funcionamiento del sistema. Todos los CAEs de las PTAR estudiadas superan el valor referencial sugerido para la sostenibilidad de sistemas de saneamiento, sin embargo, los OPEX están por debajo de este valor. Con esto se evidencia la necesidad de realizar un análisis de tarifas a aplicar en este contexto particular. Los recursos destinados a la operación y mantenimiento de las PTARs son muy limitados y en muchos casos usados inadecuadamente, ya que pocas veces estos recursos son destinados al monitoreo de la calidad del efluente y como resultado no se tiene conocimiento de las deficiencias dentro del tren de tratamiento para poder planificar los mantenimientos preventivos y correctivos correspondientes. En base a estos resultados, se recomienda abordar un enfoque integral en la planificación, diseño, operación y mantenimiento en proyectos de instalaciones de tratamiento de aguas residuales, a fin de garantizar un equilibrio adecuado entre la eficiencia, la sostenibilidad y los costos asociados. Esta planificación podría incluir en algún caso la subvención parcial por parte del municipio para alcanzar los objetivos de sostenibilidad de los servicios de saneamiento y beneficiar a una población de regantes.

REFERENCIAS

- [1] O. Delgadillo, A. Camacho, M. Andrade, and L. Pérez, *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba-Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA) Universidad Mayor de San Simón, 2010.
- [2] Ministerio de Medio Ambiente y Agua, "Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales," 2013.
- [3] Ministerio de Medio Ambiente y Agua, "Estrategia nacional de tratamiento de aguas residuales (ENTAR)," Bolivia, 2020.
- [4] V. Hernández-Chover, L. Castellet-Viciano, and F. Hernández-Sancho, "Preventive maintenance versus cost of repairs in asset management: An efficiency analysis in wastewater treatment plants," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 141, pp. 215–221, 2020.
- [5] C. Fonseca, A. Dub and J. Verhaegen, "Cost-based Decision Support Tools for Water and Sanitation", IRC International Water and Sanitation Centre, The Hague, The Netherlands, 2011.
- [6] G. Heredia, D., A. Becerra O., O. Saavedra V., and I. Echeverría R., "Evaluación del costo anual equivalente de las plantas de tratamiento de aguas residuales de los municipios de Cliza y Tolata," *Investigación & Desarrollo.*, vol. 19, no. 2, pp. 75–82, 2019.

- [7] O. Saavedra, R. Escalera, G. Heredia, R. Montoya, I. Echeverría, A. Villarroel and L. Lorenz., “Evaluation of a domestic wastewater treatment plant at an intermediate city of Bolivia,” *Water Practice and Technology.*, vol. 14, no. 4, pp. 908–920, 2019.
- [8] I. Echeverría, O. Saavedra, R. Escalera, G. Heredia, Y. Chihiro, and R. Montoya, “Small scale operation of an integrated Anaerobic Baffled Reactor and Biofilter: Factors Affecting its Performance,” *J. Environ. Eng.*, vol. 148, no. 11, 2022.
- [9] I. Echeverría, C. Escalante, O. Saavedra, R. Escalera, G. Heredia, and R. Montoya, “Evaluación De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Municipales Basada En Lagunas De Estabilización Acopladas a Un Reactor Anaerobio Compartimentado,” *Investigación & Desarrollo*, vol. 21, no. 1, pp. 37–45, 2021.
- [10] V. Escalante, “Evaluación de los costos de operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales en el Valle Alto de Cochabamba,” *Universidad Privada Boliviana*, 2020.
- [11] Programa, Modelos de saneamiento descentralizados en Bolivia. “Sistematización ‘Planificación estratégica para el escalamiento de modelos de saneamiento, en el municipio de Cliza,’” 2018.
- [12] Programa, Modelos de saneamiento descentralizados en Bolivia. “Sistematización ‘Puesta en marcha del servicio de saneamiento en el municipio de Tolata,’” 2018.
- [13] J. Burström and J. Burström, “Sustainability assessment of potential wastewater treatment techniques in Tupiza, Bolivia,” *Uppsala Universitet*, 2020.
- [14] C. Cossio, J. McConville, S. Rauch, B. Wilén, S. Dalahmeh, A. Mercado and A. Romero, “Wastewater management in small towns – Understanding the failure of small treatment plants in Bolivia,” *Environ. Technol.*, 2017.
- [15] J. Brault, K. Buchauer, and M. Gambrill, “Wastewater treatment and reuse: a guide to help small towns select appropriate options.” *World Bank, Washington*, 2022.