

Guía de diseño preliminar de plantas de tratamiento de aguas residuales para comunidades de Bolivia



Créditos

Título: Guía de diseño preliminar de plantas de tratamiento de aguas residuales para comunidades de Bolivia.

Autor: Programa Modelos Descentralizados de Saneamiento en Bolivia.

Redacción y revisión: Aguatuya.

Diseño y diagramación: Gabriela A. Saavedra, Técnico de imagen y diagramación, Aguatuya.

Fotos de portada e interiores: Aguatuya.

Año: 2026

Contacto

C. Nicolás Ortiz Pacheco N. 33 edificio TESAI, primer piso,
oficina 1B - entre C. Antonio Salinas y Av. Calampampa.

Tel.: (591) 4 4242164

info@aguatuya.org

www.aguatuya.org

[Facebook.com/Aguatuya](https://www.facebook.com/Aguatuya)

Primera edición

Queda permitida la reproducción del presente documento siempre que se cite la fuente.

Bolivia

Contenido

1.1. ¿Cómo utilizar esta guía?	5
1.1. Paso N°1 Identificar la población beneficiaria	5
1.2. Paso N°2 Identificar el piso ecológico	6
1.3. Paso N°3 Evaluar las condiciones de la comunidad	6
1.4. Paso N°4 Seleccionar la línea de tratamiento más adecuada	6
1.5. Paso N°5 Consultar los requerimientos de superficie y volumen	7
1.6. Paso 6. Verificar la viabilidad preliminar del proyecto	7
1.2. Presentación	8
1.3. Objetivo	9
3.1. Objetivo general	9
3.2. Objetivos específicos	9
1.4. Alcance y limitaciones	10
4.1. Alcance	10
4.2. Usuarios objetivos	10
4.3. Bases técnicas de la guía	11
4.4. Limitaciones	12
1.5. Descripción de las líneas de tratamiento consideradas	12
5.1. Generalidades	12
5.2. Línea de tratamiento 1: Sistemas naturales de bajo requerimiento operativo	13
5.3. Línea de tratamiento 2: Sistemas compactos de alta eficiencia	14
5.4. Consideraciones para la selección de la tecnología	15
5.5. Escenarios de diseño considerados	15
5.6. Caudales de diseño adoptados	16
5.7. Cargas contaminantes y concentraciones de diseño	17

6.6. Dimensionamiento preliminar de la línea de tratamiento	19
6.1. Generalidades	19
6.2. Criterios de diseño adoptados	19
6.3. Requerimiento de volúmenes de las unidades de tratamiento	
- Línea 1	25
6.4. Requerimiento de superficie de las unidades de tratamiento	
- Línea 1	26
6.5. Requerimiento total de terreno para la línea de tratamiento 1	27
6.7. Dimensionamiento preliminar de la línea de tratamiento 2	28
7.1. Generalidades	28
7.2. Criterios de diseño adoptados	28
7.3. Requerimiento de volúmenes de las unidades de tratamiento	
- Línea 2	33
7.4. Requerimiento de superficies de las unidades de tratamiento	
- Línea 2	34
7.5. Requerimiento total de terreno para la línea de tratamiento 2	35
6.8. Consideraciones, recomendaciones y conclusiones	36
8.1. Consideraciones para la selección del terreno	36
8.2. Recomendaciones para la implementación de PTARs comunitarias	37
8.3. Conclusiones	38

Guía de diseño preliminar de plantas de tratamiento de aguas residuales para comunidades de Bolivia

1.1

¿Cómo utilizar esta guía?

La presente guía ha sido elaborada como una herramienta práctica para apoyar la planificación preliminar de sistemas de tratamiento de aguas residuales en comunidades bolivianas. Su principal objetivo es facilitar la evaluación inicial de alternativas tecnológicas y estimar los requerimientos aproximados de superficie y volumen necesarios para la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Esta guía permite realizar una evaluación rápida de factibilidad antes de iniciar estudios de ingeniería detallados, constituyéndose en una herramienta útil para gobiernos municipales, entidades prestadoras de servicios de agua y saneamiento (EPSA), cooperativas, comités de agua, organizaciones no gubernamentales y entidades financiadoras. Para utilizar la guía se recomienda seguir los siguientes pasos:

1.1. Paso N°1 Identificar la población beneficiaria

Determinar la población que será atendida por el sistema de alcantarillado sanitario y la futura planta de tratamiento.

La presente guía considera los siguientes grupos poblacionales de referencia:

- ☑ 1.000 habitantes
- ☑ 3.000 habitantes
- ☑ 5.000 habitantes
- ☑ 7.000 habitantes
- ☑ 10.000 habitantes

Si la población de la comunidad no coincide exactamente con alguno de estos valores, podrán emplearse interpolaciones simples entre los grupos poblacionales presentados.



1.2. Paso N°2 Identificar el piso ecológico

Seleccionar el piso ecológico al que pertenece la comunidad. La guía considera tres regiones representativas del territorio boliviano:

- ☑ **Altiplano:** Corresponde a comunidades ubicadas en regiones de elevada altitud, caracterizadas por temperaturas medias bajas y menores consumos de agua per cápita.
- ☑ **Valles:** Corresponde a comunidades ubicadas en regiones intermedias con condiciones climáticas templadas y consumos de agua moderados.
- ☑ **Llanos:** Corresponde a comunidades ubicadas en regiones tropicales y subtropicales caracterizadas por temperaturas elevadas y mayores consumos de agua.

La clasificación es importante debido a que las características climáticas y los hábitos de consumo influyen directamente en los caudales generados y en las concentraciones de contaminantes presentes en las aguas residuales.

1.3. Paso N°3 Evaluar las condiciones de la comunidad

Antes de seleccionar una alternativa de tratamiento, se recomienda analizar:

- ☑ **Disponibilidad de terreno:** Determinar si la comunidad dispone de áreas suficientes para la construcción de la planta.
- ☑ **Capacidad de operación y mantenimiento:** Evaluar la disponibilidad de personal técnico y recursos económicos para operar el sistema.
- ☑ **Disponibilidad de energía eléctrica:** Verificar la existencia de suministro eléctrico continuo y confiable.
- ☑ **Capacidad de pago de los usuarios:** Analizar la sostenibilidad financiera del sistema a largo plazo.

1.4. Paso N°4 Seleccionar la línea de tratamiento más adecuada

La guía presenta dos alternativas tecnológicas de tratamiento ampliamente implementadas en Bolivia y validadas por Aguatuya.





1.4.1. Línea de tratamiento 1

Pretratamiento + Reactor Anaerobio Compartimentado (RAC) + Biofiltro de Flujo Horizontal + Biofiltro de Flujo Vertical + Desinfección - Recomendado para:

- ☑ Comunidades rurales.
- ☑ Comunidades periurbanas.
- ☑ Sistemas con baja disponibilidad de recursos para operación y mantenimiento.
- ☑ Proyectos con disponibilidad suficiente de terreno.

1.4.2. Línea de tratamiento 1

Pretratamiento + Reactor UASB + Lodos Activados + Sedimentador Secundario + Desinfección - Recomendado para:

- ☑ Centros poblados con mayor densidad poblacional.
- ☑ EPSAs con estructura organizativa consolidada.
- ☑ Proyectos con disponibilidad limitada de terreno.
- ☑ Sistemas con capacidad técnica y financiera para una operación más intensiva.

1.5. Paso N°5 Consultar los requerimientos de superficie y volumen

Una vez seleccionada la alternativa de tratamiento, el usuario podrá consultar las tablas correspondientes para estimar:

- ☑ Volumen requerido de cada unidad de tratamiento.
- ☑ Superficie requerida de cada unidad.
- ☑ Superficie total aproximada de la planta.
- ☑ Requerimientos preliminares de terreno.

Los valores presentados son referenciales y tienen como finalidad facilitar la planificación inicial de proyectos.

1.6. Paso N°6 Verificar la viabilidad preliminar del proyecto

Finalmente, la comunidad podrá comparar los requerimientos estimados de superficie con el terreno disponible y evaluar la factibilidad preliminar de implementar una planta de tratamiento. La evaluación permitirá detectar posibles restricciones técnicas, económicas o territoriales antes de iniciar estudios de ingeniería.

Importante:

Los valores presentados en esta guía corresponden a estimaciones preliminares y no sustituyen un diseño de ingeniería definitivo. Toda PTAR deberá ser posteriormente desarrollada mediante estudios específicos que consideren las condiciones particulares de cada comunidad, la calidad del agua residual, la topografía del terreno, las características geotécnicas y los requisitos normativos vigentes.

Presentación

El acceso al saneamiento adecuado constituye uno de los principales desafíos para las comunidades urbanas, periurbanas y rurales de Bolivia. El crecimiento poblacional, la expansión de los sistemas de alcantarillado sanitario y la necesidad de proteger los recursos hídricos hacen indispensable la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales técnicamente adecuados, económicamente viables y sostenibles en el tiempo.

AGUATUYA, a través de su experiencia en el diseño, construcción, operación y monitoreo de sistemas de tratamiento de aguas residuales en diferentes regiones del país, ha desarrollado la presente **Guía de Diseño Preliminar de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales para Comunidades de Bolivia**, con el propósito de proporcionar una herramienta práctica que facilite la evaluación inicial de alternativas de tratamiento para comunidades comprendidas entre 1.000 y 10.000 habitantes.

La guía considera las condiciones particulares de los principales pisos ecológicos de Bolivia: Altiplano, Valles y Llanos, incorporando criterios de diseño basados en características climáticas, caudales de generación de aguas residuales y cargas contaminantes típicas de cada región.

Asimismo, se presentan dos líneas de tratamiento ampliamente implementadas y validadas por AGUATUYA:

- ☑ Línea de tratamiento basada en procesos anaerobios y biofiltros horizontales y verticales, dirigida a comunidades rurales y periurbanas con acceso de terreno y recursos limitados para operación y mantenimiento.
- ☑ Línea de tratamiento basada en reactores UASB y lodos activados, dirigida a comunidades con mayor densidad poblacional, disponibilidad de recursos económicos y capacidad institucional para la operación de sistemas mecanizados.

Los valores de áreas, volúmenes y parámetros presentados en esta guía tienen carácter referencial y fueron desarrollados a partir de criterios establecidos en bibliografía técnica internacional, principalmente las referencias de Metcalf & Eddy y los manuales de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México. Asimismo, para la estimación de caudales y la selección de alternativas tecnológicas se consideraron los criterios y recomendaciones establecidos en la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales publicada por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) en el año 2021.

Las líneas de tratamiento consideradas en la presente guía se encuentran incluidas y validadas dentro de las alternativas tecnológicas recomendadas por dicha publicación, constituyendo soluciones apropiadas para diferentes contextos operativos, económicos y ambientales presentes en las comunidades bolivianas, los criterios empleados han sido complementados con la experiencia práctica de Aguatuya en el diseño, construcción, operación y monitoreo de plantas de tratamiento de aguas residuales en distintas regiones del país.

Objetivo

3.1. Objetivo general

Proporcionar una herramienta de orientación técnica para el dimensionamiento preliminar y la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales en comunidades bolivianas de entre 1.000 y 10.000 habitantes, considerando las características de los diferentes pisos ecológicos del país.

3.2. Objetivos específicos

- ☑ Establecer parámetros referenciales de caudal y carga contaminante para comunidades ubicadas en el Altiplano, Valles y Llanos.
- ☑ Presentar alternativas de tratamiento de aguas residuales apropiadas para diferentes condiciones operativas, económicas y territoriales.
- ☑ Facilitar la estimación preliminar de requerimientos de superficie y volumen para las principales unidades de tratamiento.
- ☑ Apoyar a gobiernos municipales, EPSAs, comités de agua, cooperativas, organizaciones no gubernamentales y entidades financiadoras en la evaluación inicial de proyectos de saneamiento.
- ☑ Promover la implementación de soluciones de tratamiento sostenibles y adaptadas a las condiciones locales.

▼ Reúso del efluente tratado en la PTAR Villa el Carmen - Cochabamba.



Alcance y limitaciones

4.1. Alcance

La presente guía ha sido desarrollada como una herramienta de orientación técnica para la planificación preliminar de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades de Bolivia.

Su principal finalidad es facilitar la evaluación inicial de alternativas de tratamiento y requerimientos referenciales de superficie y volumen necesarios para la implementación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), permitiendo identificar tempranamente la viabilidad técnica de los proyectos antes del desarrollo de estudios de ingeniería a detalle.

La guía ha sido elaborada considerando las condiciones climáticas, demográficas y operativas predominantes en los principales pisos ecológicos de Bolivia:

- ☑ Altiplano
- ☑ Valles
- ☑ Llanos

Asimismo, contempla comunidades con poblaciones comprendidas entre:

- ☑ 1.000 habitantes
- ☑ 3.000 habitantes
- ☑ 5.000 habitantes
- ☑ 7.000 habitantes
- ☑ 10.000 habitantes

Para cada escenario se presentan valores referenciales correspondientes a:

- ☑ Caudales de diseño.
- ☑ Cargas contaminantes.
- ☑ Concentraciones típicas de aguas residuales.
- ☑ Volúmenes de unidades de tratamiento.
- ☑ Superficies requeridas.

La guía considera dos líneas de tratamiento, según la guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales del *Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA, 2021)*:

a. Línea de tratamiento 1

Pretratamiento + Reactor anaerobio compartimentado (RAC) + Biofiltro de flujo horizontal + Biofiltro de Flujo vertical + Desinfección.

Orientada a comunidades rurales y periurbanas con disponibilidad de terreno y sistemas con bajos costos de operación y mantenimiento.

b. Línea de tratamiento 2

Pretratamiento + Reactor UASB + Sistema de lodos activados + Sedimentador secundario + Desinfección.

Orientada a comunidades con mayores restricciones de espacio, mayor capacidad institucional y disponibilidad de recursos para la operación y mantenimiento de sistemas mecanizados.

4.2. Usuarios objetivos

La presente guía está dirigida a:

- ☑ Gobiernos Autónomos Municipales.
- ☑ Entidades Prestadoras de Servicios de Agua y Saneamiento (EPSA).
- ☑ Cooperativas de agua potable y alcantarillado.
- ☑ Comités de agua y saneamiento.
- ☑ Organizaciones no gubernamentales.
- ☑ Instituciones de cooperación.
- ☑ Profesionales y técnicos en saneamiento.
- ☑ Comunidades que analizan la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

4.3. Bases técnicas de la guía

Los criterios técnicos utilizados para el desarrollo de la presente guía fueron obtenidos a partir de normativa nacional, bibliografía técnica especializada y de la experiencia práctica de AGUATUYA en el diseño, construcción, operación y monitoreo de sistemas de tratamiento de aguas residuales implementados en diferentes regiones de Bolivia.

Para el desarrollo de la guía se emplearon, entre otras, las siguientes referencias técnicas:

- ☑ Norma Boliviana NB 688 - Diseño de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial.
- ☑ Norma Boliviana NB 689 - Reglamentos técnicos de diseño para sistemas de agua potable.
- ☑ Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2021).
- ☑ Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (Metcalf & Eddy).
- ☑ Manuales de Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA).
- ☑ Experiencia técnica de Aguatuya en proyectos de saneamiento implementados en diversos contextos climáticos y poblacionales del país.

Los caudales de diseño utilizados en la presente guía fueron estimados considerando los criterios establecidos en la Norma Boliviana NB 688 - Diseño de Sistemas de Alcantarillado Sanitario y Pluvial, la Norma Boliviana NB 689 - Reglamentos técnicos de diseño para Sistemas de agua potable y la Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA, 2021).

Los parámetros de dimensionamiento de las diferentes unidades de tratamiento fueron obtenidos a partir de criterios de diseño internacionalmente reconocidos, principalmente de las referencias de Metcalf & Eddy y de los manuales técnicos de CONAGUA, siendo posteriormente adaptados a las condiciones climáticas, operativas y poblacionales de Bolivia.

Y las líneas de tratamiento consideradas en la presente guía se encuentran alineadas con los criterios



tecnológicos establecidos en la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales del MMAYA, dentro de la cual ambas alternativas constituyen tecnologías recomendadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades bolivianas.

4.4. Limitaciones

La guía constituye una herramienta de planificación y orientación preliminar y no reemplaza el desarrollo de estudios y diseños de ingeniería a detalle.

Los valores de caudales, cargas contaminantes, volúmenes y superficies presentados constituyen referencias para la evaluación preliminar de proyectos y no sustituyen la realización de los siguientes estudios específicos:

- ☑ Estudios de población y proyección demográfica.
- ☑ Estudios topográficos.
- ☑ Estudios geotécnicos.
- ☑ Estudios hidrológicos e hidrogeológicos.
- ☑ Caracterización de aguas residuales.
- ☑ Diseño hidráulico detallado.
- ☑ Diseño estructural.
- ☑ Diseño electromecánico.
- ☑ Evaluación ambiental.
- ☑ Análisis económico y financiero.

Las dimensiones finales de una planta de tratamiento podrán diferir de los valores presentados en esta guía debido a factores locales tales como la calidad del agua residual, las condiciones climáticas, las características del terreno, las exigencias regulatorias y los requerimientos específicos de cada proyecto.

5

Descripción de las líneas de tratamiento consideradas

5.1. Generalidades

La selección de una línea de tratamiento constituye una de las decisiones más importantes dentro de la planificación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), ya que influye directamente en los requerimientos de terreno, los costos de construcción, las necesidades de operación y mantenimiento, el consumo energético y la calidad del efluente tratado.



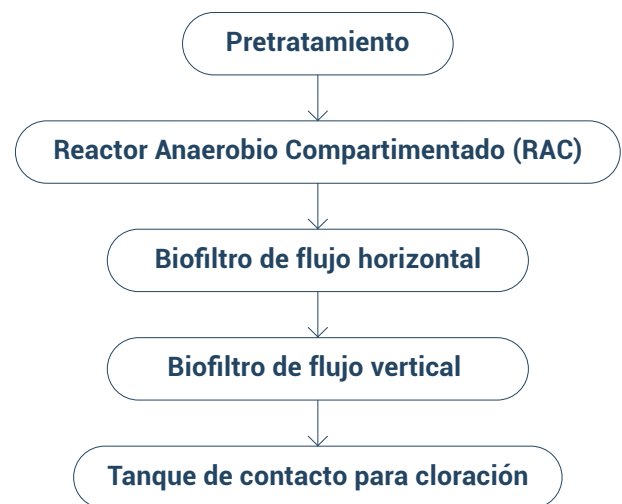


Con el propósito de brindar alternativas viables para diversos contextos de Bolivia, la presente guía considera dos líneas de tratamiento implementadas por AGUATUYA y compatibles con los criterios establecidos en la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA, 2021).

Las tecnologías seleccionadas representan soluciones adecuadas para comunidades comprendidas entre 1.000 y 10.000 habitantes y responden a diferentes niveles de disponibilidad de terreno, capacidad institucional y recursos económicos para la operación de los sistemas.

5.2. Línea de tratamiento 1: Sistemas naturales de bajo requerimiento operativo

5.2.1. Configuración



5.2.2. Descripción General

Esta línea de tratamiento combina procesos anaerobios y sistemas naturales basados en biofiltros para lograr elevadas eficiencias de remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos.

El tratamiento inicia con una etapa de pretratamiento, para proteger las unidades posteriores y mejorar las condiciones de operación de la planta. Esta etapa deberá considerar, como mínimo, unidades para la remoción de residuos gruesos y finos mediante sistemas de cribado, remoción de arenas y remoción de grasas y aceites mediante una unidad desgrasadora.

Posteriormente, las aguas residuales ingresan a un Reactor Anaerobio Compartimentado (RAC), donde se degrada la materia orgánica en ausencia de oxígeno, una vez completado este proceso, el efluente es conducido a un Biofiltro de flujo horizontal y un Biofiltro de flujo vertical, en los cuales se desarrollan procesos físicos, químicos y biológicos que, de manera complementaria, permiten incrementar la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes y microorganismos patógenos.

Finalmente, el efluente tratado es conducido a una unidad de desinfección mediante cloración, con el objetivo de reducir la presencia de organismos patógenos antes de su descarga al cuerpo receptor o su eventual reúso.

Principales ventajas

- ✔ Bajo consumo energético.
- ✔ Simplicidad operativa.
- ✔ Bajos costos de operación y mantenimiento.
- ✔ Alta robustez frente a variaciones de caudal y carga.
- ✔ Baja generación de lodos.
- ✔ Adecuada integración paisajística.
- ✔ Posibilidad de reúso del efluente tratado.

Principales limitaciones

- ✔ Mayor requerimiento de superficie.
- ✔ Necesidad de disponibilidad de terreno.
- ✔ Mayor tiempo de estabilización biológica.
- ✔ Requiere mantenimiento periódico de la vegetación y medios filtrantes.

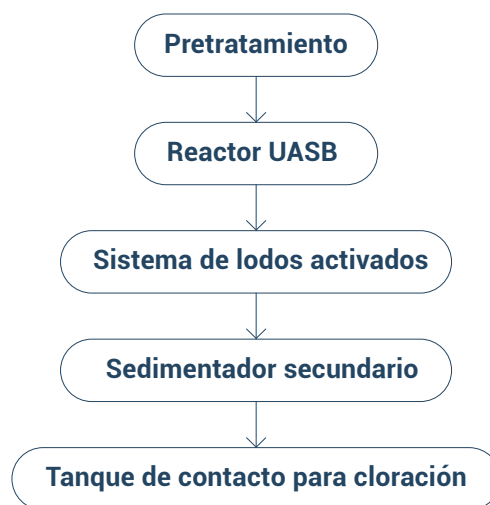
Aplicaciones recomendadas

Esta alternativa es particularmente adecuada para:

- ✔ Comunidades rurales.
- ✔ Comunidades periurbanas.
- ✔ Pequeñas EPSAs.
- ✔ Sistemas con disponibilidad de terreno.
- ✔ Localidades con recursos limitados para operación y mantenimiento.

5.3. Línea de tratamiento 2: Sistemas compactos de alta eficiencia

5.3.1. Configuración



5.3.2. Descripción general

Esta línea de tratamiento combina procesos anaerobios y aerobios de alta eficiencia para lograr elevadas remociones de contaminantes en áreas reducidas.

El tratamiento inicia con una etapa de pretratamiento, la cual está destinada a proteger las unidades posteriores mediante la remoción de materiales que puedan afectar su funcionamiento. Esta etapa deberá considerar sistemas de cribado para la retención de sólidos gruesos y finos, así como unidades de remoción de arenas y una unidad desgrasadora para la separación de grasas y aceites.

Posteriormente, las aguas residuales son tratadas en un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB), en el cual se remueve una fracción importante de la materia orgánica mediante procesos anaerobios. Una vez finalizada esta etapa, el efluente del reactor es conducido a un sistema de lodos activados, donde, de manera complementaria, el tratamiento aerobio permite alcanzar mayores niveles de depuración.

Posteriormente, la separación de la biomasa generada se realiza en un sedimentador secundario, desde donde el efluente clarificado es conducido a una unidad de desinfección mediante cloración antes de su descarga o posible reúso.

5.4. Consideraciones para la selección de la tecnología

La selección de la alternativa de tratamiento debe considerar aspectos técnicos, económicos, ambientales e institucionales. La tabla comparativa siguiente puede utilizarse para escoger la alternativa más adecuada.

Tabla 1. Comparación general de las alternativas

Parámetro	Línea 1: RAC + Biofiltros	Línea 2: UASB + Lodos Activados
Requerimiento de terreno	Medio	Bajo
Consumo energético	Muy bajo	Medio a alto
Complejidad operativa	Baja	Alta
Costos de O&M	Bajos	Medio a altos
Personal especializado	Poco requerido	Requerido
Robustez operativa	Alta	Media
Aplicación principal	Rural y periurbana	Urbana y periurbana
Dependencia de equipos	Baja	Alta
Inversión inicial	Moderada	Alta
Facilidad de operación	Alta	Media

En general, cuando exista disponibilidad suficiente de terreno y recursos limitados para la operación y mantenimiento, se recomienda priorizar la Línea de tratamiento 1. Por otro lado, cuando el terreno disponible sea reducido y exista una estructura operativa consolidada capaz de garantizar la correcta gestión del sistema, podrá considerarse la implementación de la Línea de tratamiento 2.

Las tablas de dimensionamiento preliminar en los capítulos siguientes permitirán estimar los requerimientos de superficie y volumen asociados a cada alternativa para diferentes tamaños poblacionales y pisos ecológicos de Bolivia.

5.5. Escenarios de diseño considerados

Con el propósito de representar las condiciones más comunes de las comunidades bolivianas, la guía considera tres pisos ecológicos representativos del país: Altiplano, Valles y Llanos, además de 5 escenarios poblacionales de referencia.

Tabla 2. Escenario de población consideradas

Escenario	Población (habitantes)
Población 1	1.000
Población 2	3.000
Población 3	5.000
Población 4	7.000
Población 5	10.000

5.6. Caudales de diseño adoptados

Los caudales de diseño utilizados en la presente guía fueron estimados considerando los criterios establecidos en la Norma Boliviana NB 688 - Diseño de Sistemas de Alcantarillado Sanitario y Pluvial, la Norma Boliviana NB 689 - Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable y la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA, 2021).

Para la determinación de los caudales se consideraron parámetros de diseño tales como las dotaciones de agua potable, coeficientes de retorno, coeficientes de punta y demás criterios establecidos por la normativa nacional vigente para cada piso ecológico y rango poblacional.

Los valores de caudal presentados en esta guía corresponden a caudales de diseño calculados para un período de diseño de 20 años, considerando el crecimiento poblacional esperado durante dicho horizonte de planificación.

En consecuencia, antes de utilizar las tablas contenidas en la presente guía, el usuario deberá realizar la proyección de la población para el período de diseño correspondiente y seleccionar posteriormente el escenario poblacional que mejor represente la población futura estimada.

Por ejemplo, una comunidad que actualmente cuenta con 4.000 habitantes podría alcanzar una población de diseño superior a 5.000 habitantes al final del período de diseño. En ese caso, para efectos de la presente guía deberán utilizarse los parámetros correspondientes al escenario poblacional de 5.000 habitantes o al escenario que resulte más representativo de la población proyectada.

Los caudales adoptados constituyen valores referenciales para fines de planificación preliminar y fueron utilizados para la estimación de cargas hidráulicas, concentraciones características y dimensionamiento de las unidades de tratamiento consideradas en la guía. La tabla de caudales adoptados se presenta a continuación.

Tabla 3. Caudales adoptados en (l/s)

Piso ecológico	Caudales adoptados (l/s)				
	1.000 habitantes	3.000 habitantes	5.000 habitantes	7.000 habitantes	10.000 habitantes
Altiplano	1,07	3,06	5,73	9,24	14,44
Valles	1,20	3,44	6,97	11,85	19,42
Llanos	1,32	3,81	8,21	14,46	24,39

Importante: La selección del escenario poblacional deberá realizarse utilizando la población proyectada al final del período de diseño y no la población actual de la comunidad.





5.7. Cargas contaminantes y concentraciones de diseño

5.7.1. Generalidades

Las características de las aguas residuales domésticas varían en función de factores como los hábitos de consumo de agua, las condiciones climáticas, el nivel de urbanización y las actividades desarrolladas por la población. Para representar las condiciones típicas de las aguas residuales en Bolivia, la guía adopta valores de cargas contaminantes sugeridos por la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA, 2021).

Para el dimensionamiento preliminar de las unidades de tratamiento se consideraron solo los parámetros de calidad más representativos para el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas:

- ✓ Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO_5).
- ✓ Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- ✓ Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Las cargas contaminantes unitarias fueron transformadas a concentraciones mediante los caudales de diseño establecidos para cada piso ecológico y escenario poblacional.

5.7.2. Cargas contaminantes unitarias sugeridas por el MMAyA

Tabla 4. Escenarios de población consideradas

Piso ecológico	1.000 - 2.000 habitantes	2.001-10.000 habitantes	10.001 - 50.000 habitantes
Carga de contaminantes SST ($gSST/hab/d$)			
Altiplano	20 - 35	30 - 45	40 - 50
Valles y llanos	30 - 45	40 - 50	45 - 55
Carga de contaminantes DBO_5 ($gDBO_5/hab/d$)			
Altiplano	20 - 35	30 - 45	40 - 50
Valles y llanos	30 - 45	40 - 50	45 - 55
Carga de contaminantes DQO ($gDQO/hab/d$)			
Altiplano	30 - 55	50 - 70	65 - 90
Valles y llanos	50 - 75	70 - 90	85 - 100

Tal como se presentó en la Tabla 4, se muestran las cargas contaminantes unitarias recomendadas por el MMAyA (2021) para los diferentes pisos ecológicos de Bolivia. Sobre la base de esta información y, en consecuencia, dichos valores fueron utilizados para estimar las concentraciones características de diseño adoptadas en la guía.

5.7.3. Concentraciones adoptadas para el diseño

A partir de las cargas contaminantes unitarias y de los caudales de diseño previamente definidos, se estimaron las concentraciones características de las aguas residuales utilizadas para el dimensionamiento preliminar de las alternativas de tratamiento consideradas en la guía. Con base en estos parámetros, las concentraciones fueron calculadas mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{Carga \times P \times 1.000}{Q \times 86.400}$$

C = Concentración del contaminante (mg/L).

$Carga$ = Carga contaminante unitaria (g/hab • día).

P = Población (hab).

Q = Caudal de diseño (L/s).

A continuación, se presenta la tabla resumen con las concentraciones de carga obtenidas:

Tabla 5. Cargas de contaminantes en mg/l

Piso ecológico	Requerimiento de volúmenes por grupo de habitantes en (m ³)				
	1.000	3.000	5.000	7.000	10.000
Carga de contaminantes SST (mg/l)					
Altiplano	270	345	370	375	390
Valles y llanos	310	330	310	280	270
Carga de contaminantes DBO₅ (mg/l)					
Altiplano	270	345	370	375	390
Valles y llanos	310	330	310	280	270
Carga de contaminantes DQO (mg/l)					
Altiplano	425	540	580	585	610
Valles y llanos	485	515	490	430	425

Las concentraciones presentadas constituyen valores de referencia para el dimensionamiento preliminar de las unidades de tratamiento consideradas en la presente guía. En proyectos de diseño definitivo se recomienda realizar campañas de caracterización de aguas residuales que permitan verificar las condiciones específicas de cada comunidad.





Asimismo, los valores adoptados reflejan tendencias generales observadas en Bolivia, donde las aguas residuales generadas en regiones del Altiplano suelen presentar mayores concentraciones debido a menores consumos de agua, mientras que en los valles y llanos las concentraciones son menores como consecuencia de mayores dotaciones y caudales generados.

6.6

Dimensionamiento preliminar de la línea de tratamiento 1

6.1. Generalidades

La presente línea de tratamiento está orientada principalmente a comunidades rurales y periurbanas que disponen de superficie adecuada para infraestructura de saneamiento y requieren sistemas de bajo costo de operación y mantenimiento.

La alternativa está compuesta por unidades de tratamiento anaerobio y sistemas naturales basados en biofiltros, permitiendo alcanzar elevadas eficiencias de remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos con procesos de baja complejidad operativa.

Los valores de volumen y superficie presentados en este capítulo corresponden a estimaciones preliminares obtenidas a partir de criterios de diseño base y tienen como finalidad facilitar la evaluación inicial de factibilidad de proyectos de tratamiento de aguas residuales.

Las dimensiones presentadas no sustituyen un diseño definitivo y deberán ser verificadas mediante estudios específicos durante la fase de diseño a detalle.

6.2. Criterios de diseño adoptados

Para el dimensionamiento preliminar de las unidades de tratamiento consideradas en la presente guía se adoptaron criterios de diseño basados en referencias técnicas nacionales e internacionales, complementados con la experiencia de AGUATUYA en proyectos de saneamiento implementados en Bolivia.

6.2.1. Reactores Anaerobios Compartimentados (RAC)

El Reactor Anaerobio Compartimentado (RAC) constituye la principal unidad de tratamiento biológico de la Línea de tratamiento 1. Su función es promover la degradación anaerobia de la materia orgánica presente en el afluente mediante el contacto con biomasa anaerobia retenida en diferentes compartimentos.

Para la guía se consideran reactores construidos en fibra de vidrio o hormigón armado, preferentemente recomendado el uso de reactores de fibra de vidrio debido a su mayor resistencia a la corrosión provocada por los gases generados durante los procesos anaerobios, particularmente sulfuro de hidrógeno (H₂S) y dióxido de carbono (CO₂).

Con fines de estandarización y facilidad constructiva, se adoptaron reactores cilíndricos horizontales de 3,0 m de diámetro y 10,0 m de longitud, divididos internamente en un mínimo de tres compartimentos para favorecer la separación de fases y mejorar el tratamiento. Se sugiere que los reactores sean instalados de forma semienterrada, especialmente en comunidades ubicadas en los pisos ecológicos de altiplano y valles, con el fin de minimizar las variaciones térmicas y favorecer condiciones más estables para el desarrollo de los procesos biológicos anaerobios.

Parámetros de diseño adoptados

El dimensionamiento preliminar de los reactores se realizó utilizando como parámetro principal el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), según las diferencias climáticas de los pisos ecológicos del país.

El volumen requerido para el tratamiento se determinó mediante la siguiente expresión:

$$V= Q \times TRH$$

V= Volumen útil del reactor (m³).

Q= Caudal medio de diseño (m³/h).

TRH= Tiempo de retención hidráulica (h).

Considerando que la eficiencia de los procesos anaerobios disminuye a bajas temperaturas, se adoptaron tiempos de retención hidráulica diferenciados para cada piso ecológico.

Tabla 6. Tiempos de retención hidráulica adoptados

Piso ecológico	TRH Adoptado (h)
Altiplano	11
Valles	9
Llanos	8

Los valores adoptados buscan compensar las menores tasas de degradación biológica observadas en regiones de clima frío y garantizar un desempeño adecuado de la unidad de tratamiento.

Una vez determinado el volumen requerido, se calculó la cantidad de reactores necesarios para cada escenario poblacional utilizando el volumen útil de los reactores estandarizados adoptados en la guía.

▼ PTARC Urbanización Laguna Vista Urubó - Santa Cruz.



6.2.2. Biofiltros de flujo horizontal

Los biofiltros de flujo horizontal constituyen la segunda etapa de tratamiento de la Línea de tratamiento 1 y tienen como finalidad complementar la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y otros contaminantes presentes en el efluente del Reactor Anaerobio Compartimentado (RAC).

El tratamiento se desarrolla mediante el paso subsuperficial del agua residual a través de un medio granular, donde, de manera simultánea, se generan procesos físicos, químicos y biológicos que permiten mejorar significativamente la calidad del efluente, asimismo, la presencia de vegetación puede contribuir a la remoción de contaminantes y, al mismo tiempo, favorecer la estabilización del sistema.

Para la presente guía se consideran biofiltros construidos en excavaciones impermeabilizadas mediante geomembrana, con el fin de evitar infiltraciones hacia el suelo y garantizar el adecuado control hidráulico del sistema.

Se recomienda que estas unidades sean construidas de forma enterrada o semienterrada, favoreciendo una mayor estabilidad térmica y una mejor integración con el entorno.

Aunque es posible incorporar especies vegetales nativas adaptadas a las condiciones locales, debe considerarse que estas deberán ser retiradas durante las actividades periódicas de mantenimiento y reemplazo del material filtrante, aspecto que puede incrementar la complejidad operativa del sistema.

Parámetros de diseño adoptados

El dimensionamiento preliminar de los biofiltros de flujo horizontal fue realizado mediante el modelo cinético de primer orden recomendado por la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA) y ampliamente empleado para el diseño de humedales de flujo subsuperficial horizontal.

La superficie requerida del biofiltro se determinó mediante la expresión:

$$A_s = \frac{Q_{di} \cdot \ln \left(\frac{DBO_i}{DBO_{ef}} \right)}{K_t \cdot h \cdot n}$$

A_s = Superficie requerida del biofiltro (m^2).

Q_{di} = Caudal de diseño (m^3/d).

DBO_i = Concentración de DBO_5 en el afluente (mg/L).

DBO_{ef} = Concentración de DBO_5 en el efluente (mg/L).

K_t = Constante cinética de remoción en función de la temperatura (d^{-1}).

h = Profundidad del biofiltro (m).

n = Porosidad efectiva del medio filtrante.



La constante cinética K_t fue ajustada para cada piso ecológico utilizando temperaturas medias representativas de la época invernal, considerando que la actividad biológica del sistema depende directamente de la temperatura media en invierno de cada piso ecológico.

Para todos los escenarios evaluados se adoptaron los siguientes parámetros constructivos:

Tabla 7. Parámetros constructivos de los biofiltros

Parámetro	Valor adoptado
Profundidad del biofiltro	1,0 m
Diámetro medio de grava	32 mm
Porosidad efectiva	40%

La concentración afluente de DBO_5 fue determinada para cada escenario poblacional y piso ecológico a partir de las concentraciones características adoptadas en la presente guía. Para el efluente, se adoptó una concentración objetivo de DBO_5 de 80 mg/L con el fin de garantizar una remoción adecuada de materia orgánica y proporcionar un margen de seguridad para las etapas posteriores de tratamiento.

6.2.3. Biofiltro de flujo vertical

Los biofiltros de flujo vertical constituyen la etapa final de tratamiento biológico de la Línea de tratamiento 1 y tienen como objetivo complementar la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y otros contaminantes remanentes provenientes del biofiltro de flujo horizontal.

En este tipo de sistemas el agua residual es distribuida sobre la superficie del lecho filtrante y percola verticalmente a través del medio granular, permitiendo una mayor transferencia de oxígeno al sistema y favoreciendo procesos biológicos aerobios que incrementan la eficiencia global del tratamiento.

Al igual que los biofiltros de flujo horizontal, estas unidades deberán construirse en excavaciones impermeabilizadas mediante geomembrana para evitar infiltraciones al terreno para un control adecuado hidráulico del sistema. Asimismo, se recomienda que las unidades sean construidas de forma enterrada o semienterrada, favoreciendo una mayor estabilidad térmica y una mejor integración con el entorno.

◀ Biofiltro de flujo vertical PTAR Tolata - Cochabamba.

La incorporación de vegetación nativa es opcional y puede contribuir a mejorar el desempeño del sistema, no obstante, durante el mantenimiento mayor y reposición del material filtrante, la vegetación deberá ser retirada, aspecto que puede incrementar la complejidad de operación y mantenimiento.

Parámetros de diseño adoptados

El dimensionamiento preliminar de los biofiltros de flujo vertical se efectuó según los criterios propuestos por Tilley et al. (2018), utilizando como parámetro principal la población equivalente asociada a la carga orgánica aplicada al sistema. La población equivalente se calculó con la siguiente expresión:

$$P_{eq} = \frac{DBO_i \cdot Q_{di}}{COV}$$

- P_{eq} = Población equivalente (hab - eq).
- DBO_i = Concentración de DBO₅ en el afluente (g/m³).
- Q_{di} = Caudal de diseño (m³/d).
- COV = Carga orgánica per cápita (g DBO₅/hab • d).

Una vez obtenida la población equivalente, la superficie requerida del biofiltro fue determinada mediante la aplicación de una superficie específica por habitante equivalente. Con base en este dimensionamiento, se adoptaron los parámetros de diseño de la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros constructivos de los biofiltros

Parámetro	Valor adoptado
DBO ₅ afluente	80 mg/L
Carga orgánica per cápita (COV)	54 g DBO ₅ /hab • d
Superficie específica	1 m ² /hab -eq

En este sentido, la concentración de DBO₅ afluente corresponde a la calidad esperada del efluente de los biofiltros de flujo horizontal, asegurando así la continuidad del tratamiento por tanto permitirá alcanzar una mayor eficiencia global en la remoción de contaminantes.

La superficie total requerida para el biofiltro vertical se obtuvo multiplicando la población equivalente calculada por la superficie específica adoptada para este tipo de sistemas.

Los biofiltros de flujo vertical permiten incrementar significativamente la aireación del tratamiento y mejorar la calidad final del efluente, constituyendo una etapa complementaria al tratamiento proporcionado por los biofiltros de flujo horizontal.

Los valores presentados en la presente guía tienen carácter referencial y fueron adoptados con fines de planificación preliminar. Durante el diseño definitivo deberán verificarse estos aspectos relacionados con la distribución hidráulica, frecuencia de alimentación, características del medio filtrante, drenaje inferior y aspectos específicos de operación de cada proyecto.

▼ Afluente de ingreso en estación elevadora de la PTAR Villa el Carmen - Cochabamba.



6.2.4. Tanque de contacto para cloración

El tanque de contacto para cloración comprende la etapa final de tratamiento de la Línea de tratamiento 1 y su objetivo es proporcionar el tiempo de contacto necesario entre el desinfectante y el agua residual tratada, reduciendo la concentración de microorganismos patógenos antes de la descarga o eventual reúso del efluente.

Para esta guía se consideró un sistema de desinfección mediante cloración, tecnología ampliamente utilizada debido a su simplicidad operativa, bajo costo y facilidad de implementación en comunidades de pequeña y mediana escala.

Parámetros de diseño adoptados

El dimensionamiento preliminar del tanque de contacto fue realizado considerando un tiempo de retención hidráulica de 30 minutos, valor usualmente utilizado para sistemas de desinfección de aguas residuales y el volumen requerido se determinó mediante la siguiente expresión:

$$V = Q \times TRH$$

V = Volumen útil del tanque (m^3).

Q = Caudal de diseño (m^3/h).

TRH = Tiempo de retención hidráulica (h).

Tabla 9. Parámetros utilizados para la cloración

Parámetro	Valor adoptado
Tiempo de retención hidráulica	30 min
Profundidad útil	1,0 m

Una vez determinado el volumen requerido y con base en la profundidad de diseño adoptada, se calculó la superficie del tanque. En consecuencia, se definieron las dimensiones de la unidad.

Los valores obtenidos corresponden a estimaciones preliminares para fines de planificación. Durante el diseño definitivo deberán verificarse aspectos de con la dosificación de cloro, mezcla hidráulica, eficiencia de contacto, seguridad operacional y cumplimiento de la normativa ambiental vigente.





6.3. Requerimiento de volúmenes de las unidades de tratamiento - Línea 1

Los volúmenes presentados en este apartado fueron obtenidos aplicando los criterios de diseño descritos previamente para cada piso ecológico y escenario poblacional considerado en la guía.

Los valores mostrados corresponden a requerimientos mínimos estimados para la implementación de reactores anaerobios compartimentados destinados al tratamiento de aguas residuales domésticas. La cantidad final de reactores se deberá definir durante la etapa de diseño definitivo considerando aspectos constructivos, operativos y de mantenimiento.

Tabla 10. Volúmenes requeridos por las unidades de tratamiento de la línea 1

Unidad de tratamiento	Zona Ecológica	1.000 habitantes	3.000 habitantes	5.000 habitantes	7.000 habitantes	10.000 habitantes
Requerimiento de volúmenes por grupo de habitantes en (m ³)						
RAC	Altiplano	42,40	121,30	226,80	365,80	571,80
	Valles	38,70	111,30	225,80	383,90	629,10
	Llanos	38,00	109,70	236,60	416,50	702,50
Biofiltro horizontal	Altiplano	156,80	711,40	1.470,60	2.415,80	3.974,90
	Valles	195,30	614,30	1.138,70	1.638,00	2.509,50
	Llanos	195,40	610,50	1.216,10	1.853,20	2.952,00
Biofiltro vertical	Altiplano	150,80	431,20	806,20	1.300,60	2.033,20
	Valles	168,30	483,70	981,40	1.668,50	2.733,80
	Llanos	185,80	536,30	1.156,60	2.036,30	3.434,50
Desinfección	Altiplano	1,90	5,50	10,30	16,60	26,00
	Valles	2,20	6,20	12,50	21,30	34,90
	Llanos	2,40	6,90	14,80	26,00	43,90

La tabla siguiente presenta la cantidad referencial de reactores requerida para cada escenario de diseño, considerando reactores estandarizados de 3 m de diámetro y 10 m de longitud adoptados en la guía.

Tabla 11. Número de reactores RAC necesarios

Unidad de tratamiento	Zona Ecológica	1.000 habitantes	3.000 habitantes	5.000 habitantes	7.000 habitantes	10.000 habitantes
Número de Reactores Anaerobios Compartimentados (RAC)						
RAC	Altiplano	1	2	3	5	8
	Valles	1	2	3	5	8
	Llanos	1	2	3	6	10

6.4. Requerimiento de superficie de las unidades de tratamiento - Línea 1

Las superficies presentadas en este apartado corresponden al área aproximada requerida para la implementación de las principales unidades que conforman la Línea de tratamiento 1. Los valores permiten realizar una evaluación preliminar de disponibilidad de terreno para la construcción de la PTAR.

Tabla 12. Superficie requerida por las unidades de tratamiento de la línea 1

Unidad de tratamiento	Zona Ecológica	1.000 habitantes	3.000 habitantes	5.000 habitantes	7.000 habitantes	10.000 habitantes
Requerimiento de volúmenes por grupo de habitantes en m³						
RAC	Altiplano	60,00	120,00	180,00	300,00	480,00
	Valles	60,00	120,00	180,00	300,00	540,00
	Llanos	60,00	120,00	180,00	360,00	600,00
Biofiltro horizontal	Altiplano	188,20	853,70	1.764,70	2.899,00	4.769,90
	Valles	234,40	737,20	1.366,40	1.965,60	3.011,40
	Llanos	234,50	732,60	1.459,30	2.223,80	3.542,40
Biofiltro vertical	Altiplano	181,00	517,40	967,40	1.560,70	2.439,80
	Valles	202,00	580,40	1.177,70	2.002,20	3.280,60
	Llanos	223,00	643,60	1.387,90	2.443,60	4.121,40
Desinfección	Altiplano	2,50	7,20	13,40	21,60	33,80
	Valles	2,90	8,10	16,30	27,70	45,40
	Llanos	3,10	9,00	19,20	33,80	57,10

Las superficies indicadas corresponden únicamente a las unidades de tratamiento y no incluyen áreas destinadas a circulación, accesos, cercado perimetral, casetas de operación, almacenamiento de materiales ni futuras ampliaciones del sistema.

▼ Vista aérea PTAR Villa el Carmen - Cochabamba.



6.5. Requerimiento total de terreno para la línea de tratamiento 1

La implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales requiere no solamente el espacio ocupado por las unidades de tratamiento, sino también áreas complementarias necesarias para garantizar una adecuada operación, mantenimiento y accesibilidad de la infraestructura.

Con el propósito de facilitar una estimación preliminar de los requerimientos de terreno, se determinó la superficie total de la Línea de tratamiento 1 considerando la suma de las áreas requeridas por el Reactor Anaerobio Compartimentado (RAC), el Biofiltro de Flujo horizontal, el Biofiltro de flujo vertical y la Desinfección.

Adicionalmente, se incorporó un 30 % de superficie adicional destinado a cubrir requerimientos asociados a:

- ☑ Caminos internos.
- ☑ Áreas de circulación y mantenimiento.
- ☑ Separación entre unidades.
- ☑ Accesos para equipos y personal.
- ☑ Áreas de maniobra.
- ☑ Obras complementarias.
- ☑ Posibles ampliaciones menores de la infraestructura.

Tabla 13. Requerimiento total estimado de terreno para la línea de tratamiento

Unidad de tratamiento	Zona Ecológica	1.000 habitantes	3.000 habitantes	5.000 habitantes	7.000 habitantes	10.000 habitantes
Requerimiento de superficie total para la PTAR por grupo de habitantes en (m ²)						
RAC + Biofiltro Horizontal + Biofiltro Vertical + Desinfección	Altiplano	561,20	1.947,80	3.803,20	6.215,70	10.040,60
	Valles	649,10	1.879,40	3.562,50	5.584,20	8.940,60
	Llanos	676,80	1.956,80	3.960,30	6.579,60	10.817,20

Los valores presentados corresponden a una estimación preliminar del terreno requerido para la implementación de la planta de tratamiento y deberán ser verificados durante la etapa de diseño definitivo.

Dependiendo de las condiciones particulares del proyecto, tales como la topografía, configuración de las unidades, criterios de urbanización, accesibilidad y requerimientos operativos específicos, las superficies finales podrán diferir de los valores presentados en esta guía.

No obstante, los valores propuestos permiten contar con una aproximación razonable para la evaluación inicial de factibilidad y selección de terrenos destinados a la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales en comunidades bolivianas.



7

Dimensionamiento preliminar de la línea de tratamiento 2

7.1. Generalidades

La Línea de tratamiento 2 está orientada a comunidades que disponen de recursos técnicos, económicos e institucionales para operar sistemas de tratamiento con mayor grado de mecanización y menores requerimientos de superficie.

Esta alternativa integra procesos anaerobios y aerobios de alta eficiencia, permitiendo alcanzar elevadas remociones de materia orgánica y sólidos suspendidos en áreas significativamente menores que las previstas por sistemas naturales de tratamiento.

La línea está conformada por un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB), un sistema de lodos activados, un sedimentador secundario y una unidad de desinfección mediante cloración. La combinación de estas unidades permite obtener efluentes de alta calidad y constituye una alternativa adecuada para comunidades con limitaciones de espacio y capacidad operativa consolidada.

Los valores de volumen y superficie presentados en este capítulo corresponden a estimaciones preliminares obtenidas con criterios de diseño referenciales y tienen como finalidad facilitar la evaluación inicial de factibilidad de proyectos de tratamiento de aguas residuales.

Las dimensiones obtenidas no sustituyen un diseño definitivo y deberán ser verificadas mediante estudios específicos durante la etapa de ingeniería de detalle.

7.2. Criterios de diseño adoptados

Para el dimensionamiento preliminar de las unidades de tratamiento consideradas en la presente guía se adoptaron criterios de diseño basados en referencias técnicas nacionales e internacionales, complementados con la experiencia de AGUATUYA en proyectos de saneamiento implementados en Bolivia.

7.2.1. Reactor UASB

El Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB) constituye la primera unidad de tratamiento biológico de la Línea de tratamiento 2. En este sentido, su función es remover una parte importante de la materia orgánica presente en las aguas residuales mediante procesos anaerobios que se desarrollan en el manto de lodos formado al interior del reactor.

En este contexto, esta tecnología permite alcanzar elevadas eficiencias de remoción con menores requerimientos de superficie en comparación con otros sistemas anaerobios convencionales, razón por la cual, por su eficiencia operativa y a la optimización del espacio requerido, se ha consolidado como una de las tecnologías más empleadas en plantas de tratamiento de aguas residuales de mediana y gran escala.

Para la presente guía se consideran reactores construidos en hormigón armado, pudiendo adoptarse configuraciones rectangulares o circulares según las condiciones particulares de cada proyecto.

Parámetros de diseño adoptados

El dimensionamiento preliminar del reactor UASB fue realizado siguiendo los criterios de diseño propuestos por Metcalf & Eddy (1995) para reactores anaerobios de flujo ascendente, utilizando como parámetro principal el tiempo de retención hidráulica (TRH) y la velocidad ascensional del flujo dentro del reactor. En este marco, estos parámetros permiten estimar de manera preliminar el volumen, la altura y la superficie requerida para la unidad de tratamiento.

El volumen requerido del reactor fue determinado mediante la siguiente expresión:

$$V_r = Q_{di} \times TRH$$

V_r = Volumen útil del reactor (m^3).

Q_{di} = Caudal de diseño (m^3/h).

TRH = Tiempo de retención hidráulica (h).

Para el dimensionamiento se adoptaron los mismos tiempos de retención hidráulica utilizados para los Reactores Anaerobios Compartimentados (RAC), considerando que las bajas temperaturas reducen la velocidad de los procesos anaerobios.

La altura útil del reactor fue estimada utilizando una velocidad ascensional de diseño de 0,65 m/h, valor ampliamente utilizado para sistemas UASB de tratamiento de aguas residuales domésticas

La altura del reactor se calculó mediante la siguiente expresión:

$$H = TRH \times V_a$$

H = Altura útil del reactor (m).

TRH = Tiempo de retención hidráulica (h).

V_a = Velocidad ascensional (m/h).

Una vez determinados el volumen y la altura útil del reactor, se procedió a estimar el área requerida para cada escenario poblacional y piso ecológico.

▼ Vista aérea PTAR Pucara - Cochabamba.



7.2.2. Sistema de lodos activados

El sistema de lodos activados constituye la principal unidad de tratamiento aerobio de la Línea de tratamiento 2. Su función es remover la materia orgánica remanente obtenido del reactor UASB con procesos biológicos desarrollados en presencia de oxígeno.

La aireación continua favorece el crecimiento de microorganismos que degradan la materia orgánica, mejorando la eficiencia del tratamiento y la calidad del efluente.

Parámetros de diseño adoptados

El dimensionamiento preliminar del tanque de aireación fue realizado siguiendo los criterios de diseño recomendados por Metcalf & Eddy para sistemas convencionales de lodos activados.

Para la estimación del volumen del reactor se utilizó una expresión derivada del tiempo de retención celular, la remoción esperada de materia orgánica, el caudal de diseño y los parámetros cinéticos característicos del proceso biológico.

La ecuación empleada fue la siguiente:

$$V = \frac{TRC \cdot Y \cdot Q \cdot (S_o - S)}{X \cdot (1 + K_d \cdot TRC)}$$

V = Volumen del tanque de aireación (m^3).

TRC = Tiempo de retención celular (d).

Y = Coeficiente de crecimiento bacteriano.

Q = Caudal de diseño (m^3/d).

S_o = DBO_5 afluente (mg/L).

S = DBO_5 efluente (mg/L).

K_d = Coeficiente de decaimiento bacteriano.

X = Concentración de sólidos suspendidos del licor mezclado (mg/L).

Una vez determinado el volumen requerido, se verificó el cumplimiento de los criterios hidráulicos mínimos adoptados para la guía. Para todos los escenarios de diseño se consideraron los siguientes parámetros mínimos:

Tabla 14. Parámetros adoptados para lodos activados

Parámetro	Valor adoptado
Altura útil mínima	3,0 m
Tiempo de retención hidráulica mínimo	4 h

Estos criterios garantizan condiciones adecuadas para la aireación, mezcla y tratamiento biológico del agua residual.





Los valores obtenidos corresponden a estimaciones preliminares para fines de planificación y evaluación de factibilidad. Durante el diseño definitivo deberán verificarse aspectos de los requerimientos de oxígeno, selección de equipos de aireación, recirculación de lodos, producción de biomasa y condiciones específicas de operación del sistema.

7.2.3. Sedimentador secundario

El sedimentador secundario constituye la unidad encargada de separar los sólidos biológicos generados durante el proceso de lodos activados. En esta unidad se produce la sedimentación de los flóculos biológicos, permitiendo obtener un efluente clarificado y favoreciendo la recirculación de lodos hacia el tanque de aireación.

La adecuada operación de esta unidad es fundamental para garantizar la eficiencia global del sistema de tratamiento y mantener las concentraciones de biomasa requeridas en el proceso biológico.

Parámetros de diseño adoptados

El dimensionamiento preliminar del sedimentador secundario fue realizado siguiendo los criterios de diseño recomendados por Metcalf & Eddy para sistemas de lodos activados convencionales.

Inicialmente se determinó el volumen útil del sedimentador a partir del caudal de diseño y del tiempo de retención hidráulica adoptado.

La ecuación utilizada fue:

$$V = Q \times TRH$$

V = Volumen útil del sedimentador (m^3).

Q = Caudal de diseño (m^3/h).

TRH = Tiempo de retención hidráulica (h).

Para esta guía se adoptaron tiempos de retención hidráulica comprendidos entre 2 y 4 horas, de acuerdo con las recomendaciones de diseño para sedimentadores secundarios. Posteriormente, el área superficial requerida fue calculada mediante la relación entre el caudal de diseño y la carga superficial adoptada para la unidad.

La ecuación utilizada fue:

$$A = \frac{Q}{CS}$$

A = Área superficial requerida (m^2).

Q = Caudal de diseño (m^3/d).

CS = Carga superficial ($m^3/m^2 \cdot d$).

Una vez obtenidos el volumen y el área superficial, se determinaron las dimensiones preliminares de la unidad para cada escenario poblacional considerado en la presente guía.

Los valores obtenidos corresponden a estimaciones preliminares para fines de planificación y evaluación de factibilidad. Durante la etapa de diseño definitivo deberán verificarse aspectos como la carga hidráulica, la carga de sólidos, el sistema de extracción de lodos, la recirculación, los vertederos perimetrales y las condiciones específicas de operación del sistema.

7.2.4. Tanque de contacto para cloración

El tanque de contacto para cloración constituye la etapa final de tratamiento de la Línea de tratamiento 2 y tiene como objetivo proporcionar el tiempo de contacto necesario entre el desinfectante y el agua residual tratada, permitiendo reducir la concentración de microorganismos patógenos antes de la descarga o eventual reúso del efluente.

Para la presente guía se consideró un sistema de desinfección mediante cloración, debido a que es una tecnología ampliamente utilizada por su simplicidad operativa, bajo costo y facilidad de implementación, lo que la convierte en una alternativa adecuada para comunidades de pequeña y mediana escala.

Parámetros de diseño adoptados

El dimensionamiento preliminar del tanque de contacto, para tal efecto, fue realizado considerando un tiempo de retención hidráulica de 30 minutos, valor comúnmente utilizado para sistemas de desinfección de aguas residuales.

El volumen requerido se determinó mediante la siguiente expresión:

$$V = Q \times TRH$$

V = Volumen útil del sedimentador (m^3).

Q = Caudal de diseño (m^3/h).

TRH = Tiempo de retención hidráulica (h).

Para todos los escenarios evaluados se adoptaron los siguientes parámetros:

Tabla 15. Parámetros utilizados para la cloración

Parámetro	Valor adoptado
Tiempo de retención hidráulica	30 min
Profundidad útil	1,0 m

Una vez determinado el volumen requerido, la superficie del tanque fue calculada a partir de la profundidad adoptada.

Los valores obtenidos corresponden a estimaciones preliminares para fines de planificación. Durante el diseño definitivo deberán verificarse aspectos relacionados con la dosificación de cloro, mezcla hidráulica, eficiencia de contacto, seguridad operacional y cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

▼ Proceso de preparación de la cloración en la PTAR Chinchaya A2 - La Paz.





▲ PTARC Distrito 10 Torrecillas (Vela) - Tarja.

7.3. Requerimiento de volúmenes de las unidades de tratamiento - Línea 2

Los volúmenes presentados en este apartado corresponden a las principales unidades que conforman la Línea de tratamiento 2. Los valores fueron obtenidos aplicando los criterios de diseño descritos previamente para cada piso ecológico y escenario poblacional considerado en la guía.

Tabla 16. Volumen requerido de las unidades de tratamiento de la línea 2

Unidad de tratamiento	Zona Ecológica	1.000 habitantes	3.000 habitantes	5.000 habitantes	7.000 habitantes	10.000 habitantes
Requerimiento de volúmenes por grupo de habitantes en m ³						
Reactor UASB	Altiplano	46,30	132,30	247,40	399,10	614,70
	Valles	43,00	123,70	250,90	426,60	699,00
	Llanos	33,30	96,00	207,00	364,50	614,70
Tanque de lodos activados	Altiplano	15,90	64,70	132,90	218,40	359,60
	Valles	22,00	68,90	128,20	188,10	292,00
	Llanos	15,60	49,60	97,00	144,00	227,90
Sedimentador Secundario	Altiplano	11,60	33,10	61,80	99,80	156,00
	Valles	12,90	37,10	75,30	128,00	209,70
	Llanos	14,30	41,10	88,70	156,20	263,40
Desinfección	Altiplano	1,90	5,50	10,30	16,60	26,00
	Valles	2,20	6,20	12,50	21,30	34,90
	Llanos	2,40	6,90	14,80	26,00	43,90

Los valores presentados corresponden a volúmenes útiles referenciales y tienen como finalidad facilitar la estimación preliminar de los requerimientos de infraestructura para cada alternativa de tratamiento.

7.4. Requerimiento de superficies de las unidades de tratamiento - Línea 2

Las superficies presentadas en este apartado corresponden al área aproximada requerida para la implementación de las principales unidades que conforman la Línea de tratamiento 2. Los valores permiten realizar una evaluación preliminar de disponibilidad de terreno para la construcción de la PTAR.

Tabla 17. Superficie requerida de las unidades de tratamiento de la línea 2

Unidad de tratamiento	Zona Ecológica	1.000 habitantes	3.000 habitantes	5.000 habitantes	7.000 habitantes	10.000 habitantes
Requerimiento de superficie por grupo de habitantes en m²						
Reactor UASB	Altiplano	9,60	27,60	51,50	83,10	130,00
	Valles	8,60	24,70	50,20	85,30	139,80
	Llanos	6,80	19,60	42,20	74,40	125,40
Tanque de lodos activados	Altiplano	5,30	21,60	44,30	72,80	119,90
	Valles	7,30	23,00	42,70	62,70	97,30
	Llanos	5,20	16,50	32,30	48,00	76,00
Sedimentador Secundario	Altiplano	3,40	9,80	18,30	29,60	46,20
	Valles	3,80	11,00	22,30	37,90	62,10
	Llanos	4,20	12,20	26,30	46,30	78,10
Desinfección	Altiplano	2,50	7,20	13,40	21,60	33,80
	Valles	2,90	8,10	16,30	27,70	45,40
	Llanos	3,10	9,00	19,20	33,80	57,10

Las superficies indicadas corresponden únicamente a las unidades de tratamiento; en consecuencia, no consideran áreas destinadas a circulación, accesos, casetas de operación, sopladores, tableros eléctricos, almacenamiento de equipos ni futuras ampliaciones.

▼ Operación y mantenimiento del pretratamiento de la PTAR Irpa irpa - Cochabamba.





▲ Vista aérea PTAR Zona Norte - Cochabamba.

7.5. Requerimiento total de terreno para la línea de tratamiento 2

La implementación de la Línea de tratamiento 2 requiere considerar tanto la superficie ocupada por las unidades de tratamiento como las áreas complementarias necesarias para la correcta operación y mantenimiento de la planta.

Para facilitar la evaluación preliminar de factibilidad, se determinó la superficie total requerida considerando la suma de las áreas correspondientes al reactor UASB, sistema de lodos activados, sedimentador secundario y tanque de contacto para cloración.

Adicionalmente, se incorporó un 30 % de superficie adicional destinado a cubrir requerimientos asociados a:

- ☑ Caminos internos.
- ☑ Áreas de circulación y mantenimiento.
- ☑ Instalaciones eléctricas y de control.
- ☑ Casetas de operación.
- ☑ Accesos para equipos y personal.
- ☑ Áreas de maniobra.
- ☑ Obras complementarias.
- ☑ Posibles ampliaciones futuras.

Tabla 18. Superficie total requerida para la PTAR de la línea 2

Unidad de tratamiento	Zona Ecológica	1.000 habitantes	3.000 habitantes	5.000 habitantes	7.000 habitantes	10.000 habitantes
Requerimiento de superficie total para la PTAR por grupo de habitantes en (m²)						
UASB+Lodos activados+ Sedimentador secundario + Desinfección	Altiplano	27,00	86,10	165,80	269,20	428,90
	Valles	29,40	86,80	171,00	277,70	448,00
	Llanos	25,10	74,50	156,00	263,30	437,60

Los valores presentados corresponden a una estimación preliminar de los requerimientos de terreno y deberán verificarse en la etapa de diseño definitivo, pudiendo ajustarse según la configuración hidráulica, la topografía, el equipamiento electromecánico y los criterios de urbanización del proyecto.

Consideraciones, recomendaciones y conclusiones

8.1. Consideraciones para la selección del terreno

La selección adecuada del terreno constituye uno de los factores más importantes para garantizar la viabilidad técnica, económica y operativa de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Antes de seleccionar una alternativa tecnológica, se recomienda verificar que el terreno disponible cumpla, en la medida de lo posible, con los siguientes criterios:

- ✓ Contar con superficie suficiente para la implementación de las unidades de tratamiento y posibles ampliaciones futuras.
- ✓ Presentar accesibilidad adecuada durante todo el año para facilitar actividades de operación y mantenimiento.
- ✓ Ubicarse preferentemente aguas abajo de la comunidad para minimizar requerimientos de bombeo.
- ✓ Evitar áreas con riesgo de inundación o inestabilidad geotécnica.
- ✓ Disponer de condiciones topográficas favorables para el flujo gravitacional del agua residual.
- ✓ Considerar la proximidad de un cuerpo receptor o áreas potenciales para el reúso del efluente tratado.
- ✓ Mantener una distancia adecuada respecto a viviendas, centros educativos y otras áreas sensibles.
- ✓ Verificar la compatibilidad del terreno con la normativa municipal y los instrumentos de planificación territorial vigentes.

▼ Evaluación de planos del terreno como parte del proceso de selección del sitio para una planta de tratamiento.





▲ Involucramiento de la comunidad en las etapas de planificación, ejecución y seguimiento del proyecto.

8.2. Recomendaciones para la implementación de PTARs comunitarias

La presente guía constituye una herramienta de apoyo para la planificación preliminar de proyectos de saneamiento. Para una adecuada implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales se recomienda considerar adicionalmente los siguientes aspectos:

- ☑ Realizar estudios topográficos y geotécnicos previos al diseño definitivo.
- ☑ Verificar la disponibilidad y características reales del terreno seleccionado.
- ☑ Considerar los costos de operación y mantenimiento durante la selección de la tecnología.
- ☑ Garantizar personal capacitado para la operación de la planta.
- ☑ Implementar programas de monitoreo de calidad del agua residual afluente y efluente.
- ☑ Establecer procedimientos para el manejo y disposición final de lodos.
- ☑ Evaluar alternativas de reúso del agua tratada cuando las condiciones locales lo permitan.
- ☑ Considerar la participación de la comunidad y de la entidad operadora durante todas las etapas del proyecto.

8.3. Conclusiones

- ✔ La presente guía proporciona una metodología simplificada para estimar los requerimientos de volumen y superficie de plantas de tratamiento de aguas residuales destinadas a comunidades bolivianas comprendidas entre 1.000 y 10.000 habitantes.
- ✔ Las líneas de tratamiento consideradas corresponden a tecnologías ampliamente implementadas y validadas por Aguatuya para diferentes condiciones climáticas y operativas del país.
- ✔ La Línea de tratamiento 1 constituye una alternativa adecuada para comunidades rurales y periurbanas con disponibilidad de terreno y recursos limitados para operación y mantenimiento.
- ✔ La Línea de tratamiento 2 representa una solución más compacta y de mayor complejidad operativa, adecuada para comunidades con entidades prestadoras de servicios más consolidadas y restricciones de espacio.
- ✔ Los valores presentados permiten realizar una evaluación preliminar de factibilidad y constituyen una herramienta de apoyo para la planificación inicial de proyectos de saneamiento, contribuyendo a la toma de decisiones en etapas tempranas de desarrollo de proyectos.

▼ Comparación del afluente y efluente en el proceso de tratamiento.

