



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

VICEMINISTERIO DE AGUA POTABLE
Y SANEAMIENTO BÁSICO



Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales

Autoría:



FUNDACIÓN PÚBLICA ANDALUZA
CENTRO DE LAS NUEVAS
TECNOLOGÍAS DEL AGUA (CENTA)
Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible

Con la colaboración de:



MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

Con el apoyo de:



Cooperación
Española



FCAS Fondo de Cooperación
para Agua y Saneamiento



BID
Banco Interamericano
de Desarrollo

El presente trabajo se ha elaborado gracias a la financiación de la Unión Europea y los apoyos del Banco Interamericano de Desarrollo y del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de la Cooperación Española. El presente documento no expresa necesariamente las opiniones de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, de la Unión Europea o del Banco Interamericano de Desarrollo.



Prefacio

Los recursos utilizados para el desarrollo de la Guía proceden de la Facilidad de Inversiones para América Latina (LAIF) de la Unión Europea y del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS) de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). En el marco de este instrumento de financiamiento, la Unión Europea firmó con la AECID un Acuerdo de Delegación para la ejecución del proyecto regional "Promover la adaptación al cambio climático y la gestión integral de los recursos hídricos en el sector de agua y saneamiento en América Latina en el marco del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS)", el cual establece que las actividades relacionadas con asistencias técnicas serán ejecutadas a través del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). El presente documento hace parte de la Cooperación Técnica del Banco Interamericano de Desarrollo RG-T2693 "Desarrollo de Herramientas para la sostenibilidad de Sistemas Rurales de Agua", con el objetivo de apoyar a los municipios e instituciones sectoriales con herramientas para la gestión integral del ciclo de agua.

El Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS) es un instrumento de la Cooperación Española dirigido a la promoción de servicios de agua y saneamiento, la participación comunitaria y el fortalecimiento institucional del sector en 18 países de América Latina y el Caribe. Junto con el BID, impulsa en la región una cartera con programas por valor de más de 2.400 millones de dólares, principalmente en zonas rurales y periurbanas. En Bolivia, se ha apoyado programas por un valor de más de 163 MUSD tanto en zonas rurales como urbanas, aportando significativamente al desarrollo del sector de agua y saneamiento en el país a través de cuatro programas. Junto al BID se ha incidido de manera particular en el saneamiento y el tratamiento de las aguas residuales.

Además de la donación de los fondos, se ha brindado un importante asesoramiento técnico a través de instituciones españolas especialistas en la materia, como la Fundación Pública Andaluza Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), ambas han colaborado estrechamente para la elaboración de la presente Guía.

A fin de mitigar los impactos negativos en la población y el medio ambiente causados por el vertido de las aguas residuales sin tratar en los cuerpos de agua, desde el año 2015, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), a través del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico (VAPSB), está promoviendo diversas acciones para incrementar y mejorar la gestión de las aguas residuales en el país, que se enmarcan en la Estrategia Nacional de Tratamiento de las Aguas Residuales (ENTAR). Durante la elaboración de la ENTAR se identificó la necesidad de disponer de lineamientos técnicos para la selección y diseño de líneas de tratamiento para las plantas a nivel nacional, que incorporen la especificidad de los diferentes segmentos poblacionales y pisos ecológicos presentes en Bolivia y coadyuven a la construcción de proyectos sostenibles y bien conceptualizados para el tratamiento de las aguas residuales.

Bajo esa perspectiva, la presente **Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales** ha sido elaborada bajo el liderazgo del VAPSB con el fin de apoyar efectivamente el proceso de gestión de proyectos de tratamiento de las aguas residuales, facilitando su planificación, diseño, ejecución y supervisión de parte de los gobiernos municipales, instituciones, entidades prestadoras de los servicios de agua y saneamiento, empresas y todos los profesionales relacionados con el sector de agua y saneamiento.



Las instituciones y representantes de éstas que participaron en la elaboración de la Guía fueron

Jaime Condori	AAPS	Theo Lingster	GIZ
David De la Torre	AECID	Grover Rivera Ballesteros	IIS-UMSA
Yasmina Ferrer	AECID	Tito Calvimontes Ordoñez	SAGUAPAC
Gustavo Heredia	AGUATUYA	Wilfredo Iporre Torrico	SeLA
Francisco Gonzalez	BID	Percy Medina Quiroga	SeLA
José Luis Márquez	BID	Juan Antonio Gamón	SENASBA
Cristina Mecerreyes	BID	Freddy Vilca Lovera	SENASBA
Angela Salinas	BID	Juan Carlos Vacaflor D.	SIB
Ignacio del Río	CEDEX	Oscar Suntura	SUMAJ HUASI
María Leal	CEDEX	Freddy Angel Soria Céspedes	UCB
Carlos López	CEDEX	Olga Gutiérrez	UCP-PAAP
Enrique Ortega	CEDEX	Amilkar Ilaya Ayza	UTO
Isabel Martín	CENTA	Carla Argandoña	VAPSB
Juan José Salas	CENTA	Fernando Cárdenas López	VAPSB
Guillermo Solís	CENTA	Rafael Clavel	VAPSB
Sergio Varona Gandulfo	CENTA	Freddy Corazón	VAPSB
Rodrigo López Ramírez	COSAALT	Fabiola Espejo	VAPSB
Rubén Edgar Aillón Miranda	ELAPAS	Hernán Mamani	VAPSB
Roger Ruiz	EMAGUA	Alina Manriquez	VAPSB
Nancy Vino Santalla	EMAGUA	Christian Michel	VAPSB
María Elena Ramírez Antelo	EMAPAS	Joaquín Ortuño	VAPSB
Gerencia Técnica	EPSAS	Jesinka Pastor	VAPSB
Miguel Rodríguez	FPS	Jannet Tarqui	VAPSB
Zelmy Rojas Prado	GAD COCHABAMBA	Weimar Yugar	VAPSB
Juan Ballón Postigo	GIZ	José Luis Lahore Bernal	VRHR



RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 596

La Paz, 18 de octubre de 2021

VISTOS:

La Nota Interna NI/MMAYA/VASPSB/DGAPAS/UDESIGI N° 0287/2021 de 05 de octubre de 2021, el Viceministro de Agua Potable y Saneamiento Básico solicita la aprobación de la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales y autorización al VAPSB su difusión y socialización y demás documentación; y todo cuanto a ver convino y se tuvo presente.

CONSIDERANDO I:

Que el párrafo I del Artículo 175 de la Constitución Política del Estado, establece como atribuciones de las Ministras y Ministros, entre otras: "(...) 2. Proponer y dirigir las políticas gubernamentales en su sector. (...) 3. La gestión de la administración pública en el ramo correspondiente. (...) 4. Dictar normas administrativas en el ámbito de su competencia", por su parte el párrafo II, dispone que las Ministras y Ministros de Estado son responsables de los actos administrativos adoptados en sus respectivas carteras.

Que el numeral 9 del párrafo II de Artículo 299 de la Constitución Política del Estado establece: "...II. Las siguientes competencias se ejercerán de forma concurrente por el nivel central del Estado y las entidades territoriales autónomas: (...) 9. Proyectos de agua potable y tratamiento de residuos sólidos..."

Que el Artículo 3 de la ley N°1178 de 20 de julio de 1990, de Administración y Control Gubernamentales, establece lo siguiente: "Los sistemas de Administración y de Control se aplicarán en todas las entidades del Sector Público, sin excepción (...); por su parte, el inciso a) del artículo 13 de la citada disposición legal, manifiesta que el Control Gubernamental está integrado por el Sistema de Control Interno que comprende "(...) los instrumentos de control previo y posterior incorporados en el plan de organización y en los reglamentos y manuales de procedimientos de cada entidad(...)".

Que el Artículo 14 del Decreto Supremo N° 29894 de 7 de febrero de 2009 de la Estructura Organizativa del órgano Ejecutivo del Estado Plurinacional de Bolivia, establece que son atribuciones de las Ministras y Ministros de Estado: "(...) 4. Dictar normas administrativas en el ámbito de su competencia. (...) 22. Emitir Resoluciones Ministeriales en el marco de sus competencias".

El Decreto Supremo N° 29894 en el Artículo 95 establece: "...Las atribuciones de la Ministra(o) de Medio Ambiente y Agua, en el marco de las competencias asignadas al nivel central por la Constitución Política del Estado, son las siguientes: (...) d) Formular, ejecutar, evaluar y fiscalizar las políticas y planes de agua potable y saneamiento básico..."

El Decreto Supremo N° 29894 en el Artículo 96 establece las atribuciones del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico refiere: "...Las atribuciones del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, en el marco de las competencias asignadas al nivel central por la Constitución Política del Estado, son las siguientes: a) Coadyuvar en la formulación e implementación de políticas, planes y normas para el desarrollo, provisión y mejoramiento de los servicios de agua potable saneamiento básico (alcantarillado sanitario, disposición de excretas, residuos sólidos y drenaje pluvial). b) Promover normas técnicas, disposiciones reglamentarias e instructivos para el buen aprovechamiento y regulación de los servicios de agua potable y saneamiento básico. c) Impulsar y ejecutar políticas, planes, programas y proyectos, así como gestionar financiamiento para la inversión destinados a ampliar la cobertura de los servicios de saneamiento básico en todo el territorio nacional, particularmente en el área rural y en sectores de la población urbana y periurbana de bajos ingresos, coordinando con las instancias correspondientes. d) Difundir y vigilar la aplicación de políticas, planes, proyectos y normas técnicas para el establecimiento y operación de los servicios de agua potable y saneamiento básico..."



Que el inciso b) del Artículo 100 del Decreto Supremo N° 29894, refiere como atribuciones del Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, lo siguiente: "(...) Promover normas técnicas, disposiciones reglamentarias e instructivos para el buen aprovechamiento y regulación de los servicios de agua potable y saneamiento básico (...)".

Que el Informe INF/MMAY/VAPSB/DGAPAS/UDESIGI N° 0169/2021 emitido por el Jefe de la Unidad de Desarrollo Sectorial y Gestión de la Información, sustenta y justifica la necesidad de aprobación de la Actualización de la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales de la siguiente manera: "...En el marco del contrato entre el BID y el CENTA (se adjunta fotocopia de TdRs.) se realizó la elaboración de la Guía Técnica; bajo la supervisión de personal técnico del VAPSB en coordinación con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) de España. En una primera oportunidad la Guía fue aprobada mediante Resolución Ministerial N° 318 de 23 de diciembre de 2020; no obstante, previo al armado y diagramación final de esta versión de la Guía, se observaron que ciertos términos y nomenclatura técnica utilizada en la Guía no son los habitualmente empleados en nuestro medio; adicionalmente se identificaron errores en la escritura de algunas ecuaciones y gráficas, de igual manera ciertas figuras no se encontraban en correspondencia con el contexto de los sub títulos y su calidad no permitían reconocer las variables que se desea analizar. Bajo estas nuevas revisiones, es que se ajusta y corrige la guía en una versión definitiva que es objeto de solicitud de aprobación para la elaboración de la Resolución Ministerial correspondiente..." (sic)

Que el Informe Legal INF/MMAY/DGAJ/UGJ N° 0764/2021 de 18 de octubre de 2021 emitido por la Unidad de Gestión Jurídica dependiente de la Dirección General de Asuntos Jurídicos concluye: "...la solicitud formulada el Jefe de la Unidad de Desarrollo Sectorial y Gestión de la Información, refrendado por el Director General de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario y Aprobado por el Viceministro de Agua Potable y Saneamiento Básico, concierne a la Actualización de la Guía Técnica para la selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales, se enmarca a las disposiciones normativas aplicables en la materia, por ello es Viable su aprobación, conforme el anexo adjunto referido en el informe Técnico INF/MMAY/VAPSB/DGAPAS/UDESIGI N° 0169/2021..." (sic), llegando a las siguientes conclusiones y recomendaciones: "...La Guía será un instrumento de apoyo al proceso de gestión de proyectos de tratamiento de aguas residuales, y está orientado a facilitar su planificación, diseño, evaluación, ejecución y supervisión por parte de los técnicos de los gobiernos municipales, gobiernos departamentales, gobierno central, organizaciones gestoras, operadores y administradores de los servicios de agua potable y saneamiento, institucionales locales de desarrollo, y profesionales especialistas del sector de agua y saneamiento del país en general. // De cara a los desafíos en el marco de la Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (ENTAR), la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales, busca fortalecer las capacidades del sector para mejorar las intervenciones de implementación a nivel nacional, permitiendo la construcción de proyectos sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales, adecuadamente conceptualizados y acordes a la realidad del lugar de emplazamiento, considerando las condiciones climatológicas y fisiográficas, así también incrementará la resiliencia al cambio climático a través de la disminución de la contaminación en los cuerpos receptores. // Debido a la nueva revisión de la Guía, previa a su diagramación final, se encontraron ciertas fallas en la utilización de la terminología técnica habitual en nuestro medio; así como también equivocaciones en la nomenclatura de algunas ecuaciones, gráficas y figuras, que obligaron a la corrección de estas observaciones, derivando en una solicitud de elaboración de una nueva Resolución Ministerial que apruebe esta nueva versión de la Guía..." (sic)

Que los manuales de procesos, procedimientos, reglamentos y guías, deben ser flexibles y adecuados a las circunstancias internas y/o del entorno que los justifiquen, en el marco de las disposiciones legales vigentes en materia de organización administrativa, contribuyendo al logro de los objetivos institucionales.

POR TANTO:

El Ministro de Medio Ambiente y Agua, designado mediante Decreto Presidencial N° 4389 de 9 de noviembre de 2020, en ejercicio de las facultades establecidas en el Numeral 4,



Parágrafo I del Artículo 175 de la Constitución Política del Estado y el Parágrafo I del Artículo 14 del Decreto Supremo N° 29894 de 7 de febrero de 2009 de Estructura Organizativa del Órgano Ejecutivo del Estado Plurinacional,

RESUELVE:

PRIMERO.- APROBAR el Informe Técnico INF/MMAyA/VAPSB/DGAPAS/UDESGI N° 0169/2021 de 04 de octubre de 2021 emitido por Jefe de Unidad de Desarrollo Sectorial y Gestión de la Información, mediante el cual se sustenta y justifica la necesidad de aprobación de la Actualización de la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales.

SEGUNDO.- APROBAR la Guía Técnica para la Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales, modificado, ajustado y actualizado, en el marco de la presente Resolución Ministerial, que en Anexo forma parte integrante e indivisible de la misma.

TERCERO.- Se deja sin efecto la Resolución Ministerial N° 318 de 23 de diciembre de 2020 y toda disposición normativa de igual o inferior jerarquía contraria a la presente Resolución.

CUARTO.- El Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, queda encargada de la difusión, aplicación e implementación de la presente Resolución Ministerial.

Regístrese, comuníquese, cúmplase y archívese.

Lic. Juan Santos Cruz
MINISTRO
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA
ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA



HR: 39971
C.c Arch.
MAM/MAVD/cecr



Presentación de

Juan Santos Cruz

Ministro de Medio Ambiente y Agua

El Estado Plurinacional de Bolivia en el marco de sus atribuciones y en cumplimiento de las leyes que orientan y rigen el aprovechamiento de los Recursos Hídricos, protección de la Madre Tierra, Medio Ambiente y prestación de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario; a través del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, gestiona y desarrolla estrategias, programas y proyectos que permitan alcanzar las metas trazadas en pos de satisfacer las necesidades de la población en armonía con el medio ambiente.

Para alcanzar los fines previstos, se hace necesario la formulación de políticas, normas, reglamentos y guías, que orienten a los actores involucrados en la generación de proyectos a elaborar diseños que respondan a los criterios de viabilidad económica y sostenibilidad operativa, financiera y técnica.

El ámbito del Tratamiento de Aguas Residuales domésticas tiene dificultades que van desde la conceptualización, diseño, evaluación, construcción, operación y mantenimiento; convirtiéndose este tipo de proyectos en los “puntos” críticos para los sistemas de alcantarillado sanitario.

Se espera que la presente Guía pueda contribuir a superar los aspectos adversos señalados y desarrollar proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales sostenibles que se encuentren en equilibrio con la naturaleza.



Presentación de

Carmelo Valda Duarte

**Viceministro de Agua
Potable y Saneamiento Básico**

Uno de los problemas de contaminación del agua dulce son las descargas de aguas residuales domésticas sin el tratamiento adecuado al medio ambiente. El tratamiento de aguas residuales domésticas merece atención especial porque las mismas pueden ser reutilizadas en diferentes actividades productivas, y pueden reintegrarse como un caudal adicional tanto superficial como recarga de acuíferos.

El Estado Plurinacional de Bolivia a través del Ministerio de Medio Ambiente y Agua en el marco de sus competencias ha desarrollado la **Guía Técnica de Selección y Diseño de Líneas de Tratamiento de Aguas Residuales**, herramienta que apoyará a los profesionales encargados de la delicada tarea de diseñar Plantas de Tratamiento en el dimensionamiento de las unidades depuradoras.

El objetivo de la guía es mejorar las intervenciones en tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel nacional, permitiendo la construcción de proyectos sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, adecuados a las condiciones climatológicas y fisiográficas locales en un escenario de resiliencia al cambio climático. La presente guía facilitará la toma de decisiones en el tipo de diseño de tratamiento a seleccionar.

Invitamos al uso y aplicación de la presente guía, para reducir la contaminación por vertido de agua residual doméstica no tratada, en bien de nuestra población y cuidado de nuestra Madre Tierra.



Contenido

Prefacio	5
Resolución Ministerial	9
Presentación - Ministro de Medio Ambiente y Agua	13
Presentación - Viceministro de Agua Potable y Saneamiento Básico	15

MÓDULO 0

Capítulo 1 Introducción 31

1.1 Antecedentes y justificación	33
1.2 Objetivos	34
1.3 Enfoque	35
1.4 Metodología	37
1.5 Estructura de la Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales	37
Referencias bibliográficas	41

Capítulo 2 Condicionantes del desarrollo del tratamiento de las aguas residuales en Bolivia 43

2.1 Características del territorio	46
2.1.1 Organización administrativa	46
2.1.2 Demografía	47
2.1.3 Zonas ecológicas y climatología	50
2.1.4 Usos y calidad de las masas de agua	53
2.2 Saneamiento	54
2.2.1 Marco competencial	54
2.2.2 Marco normativo	57

2.2.3	Planificación	60
2.2.4	Gestión	61
2.2.5	El estado actual del saneamiento	62
2.2.6	Gestión de los residuos	72
2.2.7	Gestión de las aguas pluviales	74
	Referencias bibliográficas	75

Capítulo 3 La contaminación de las aguas y su tratamiento 77

3.1	La contaminación de las aguas	79
3.2	Los principales contaminantes de las aguas residuales	81
3.3	El tratamiento de las aguas residuales urbanas	85
3.1.1	Mecanismos de eliminación de los contaminantes	86
	Referencias bibliográficas	99

MÓDULO 1

Capítulo 4 Información básica para la redacción de proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) 115

4.1	Normas técnicas existentes	118
4.2	Información de carácter administrativo	119
4.3	Población servida y población horizonte del proyecto	120
4.4	Instalaciones existentes de abastecimiento, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales	124
4.5	Gestión de los sistemas de abastecimiento y saneamiento	127
4.6	Condicionantes para la selección del terreno en el que ubicar la PTAR	128
4.7	Condicionantes climáticas y geográficas del área de intervención	131
4.8	La gestión de las aguas de lluvia	132
4.9	Características del agua residual a tratar (caudales y cargas contaminantes), en los distintos horizontes temporales previstos	133
4.9.1	Campañas de aforo y muestreo de las aguas residuales	135
4.9.2	Estimación de los caudales y cargas a tratar en la PTAR	138

4.10	Calidad exigida al efluente tratado	141
4.11	Posible reúso de los efluentes tratados	143
	Referencias bibliográficas	146
Capítulo 5 Líneas de tratamiento adoptadas y aspectos considerados en los dimensionamientos básicos		147
5.1	Consideraciones previas	150
5.2	Análisis de los tratamientos a considerar	151
5.2.1	Pretratamiento	152
5.2.2	Tratamientos primarios	152
5.2.3	Tratamientos anaerobios	153
5.2.4	Tratamientos extensivos	156
5.2.5	Tratamientos intensivos	158
5.2.6	Tratamientos de desinfección	161
5.2.7	Tratamiento de lodos	163
5.3	Líneas de tratamiento adoptadas	167
5.3.1	Tratamientos anaerobios	168
5.3.2	Tratamientos extensivos	169
5.3.3	Tratamientos intensivos	172
5.4	Aspectos considerados en cada tratamiento	174
5.4.1	Fundamentos	174
5.4.2	Rendimientos	174
5.4.3	Producción de lodos	175
5.4.4	Generación de biogás	175
5.4.5	Consumo de energía eléctrica	175
5.4.6	Dimensionamiento	175
5.4.7	Líneas de tratamiento	176
5.4.8	Características de las líneas de tratamiento	176
5.5	Dimensionamientos básicos a efectos de comparar tecnologías	179
5.5.1	Bases de partida	179
5.5.2	Consideraciones para las estimaciones de superficie, costos de construcción y de operación y mantenimiento	183
	Referencias bibliográficas	192

Capítulo 6	Pozo de gruesos, obra de llegada, pretratamiento, medición de caudal y tratamientos primarios	193
6.1	Pozo de gruesos	196
6.2	Obra de llegada	197
6.2.1	Descripción y fundamentos	197
6.2.2	Criterios de dimensionamiento	198
6.2.3	Operación y mantenimiento	200
6.3	Pretratamiento	200
6.3.1	Desbaste	201
6.3.2	Desarenado	213
6.3.3	Desengrasado	221
6.3.4	Desarenado-desengrasado	224
6.3.5	Características constructivas de las etapas del pretratamiento	226
6.3.6	Operación y mantenimiento de las etapas del pretratamiento	228
6.3.7	Pretratamiento manual <i>vs.</i> mecanizado	232
6.4	Medición de caudales	233
6.4.1	Medición de caudal en canales abiertos	234
6.4.2	Medidores de caudal en conducciones en carga	236
6.4.3	Operación y mantenimiento	238
6.5	Tratamientos primarios	239
6.5.1	Tanque Sépticos	239
6.5.2	Tanques Imhoff	248
6.5.3	Sedimentación Primaria	258
	Referencias bibliográficas	269

MÓDULO 2

Capítulo 7 Tratamientos secundarios **287**

7.1	Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)	289
7.1.1	Fundamentos	289
7.1.2	Rendimientos	292
7.1.3	Producción de lodos	293
7.1.4	Generación de biogás	293
7.1.5	Consumo de energía eléctrica	293

7.1.6	Dimensionamiento	293
7.1.7	Línea de tratamiento propuesta	296
7.1.8	Características constructivas	308
7.1.9	Operación y mantenimiento	313
7.1.10	Ventajas e inconvenientes	315
Referencias bibliográficas		316
7.2	Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA)	317
7.2.1	Fundamentos	317
7.2.2	Rendimientos	322
7.2.3	Producción de lodos	322
7.2.4	Generación de biogás	323
7.2.5	Consumo de energía eléctrica	324
7.2.6	Dimensionamiento	324
7.2.7	Línea de tratamiento propuesta	334
7.2.8	Características constructivas	346
7.2.9	Operación y mantenimiento	358
7.2.10	Ventajas e inconvenientes	360
Referencias bibliográficas		362
7.3	Lagunas de Estabilización	364
7.3.1	Fundamentos	364
7.3.2	Rendimientos	370
7.3.3	Producción de lodos	375
7.3.4	Consumo de energía eléctrica	376
7.3.5	Dimensionamiento	376
7.3.6	Línea de tratamiento propuesta	388
7.3.7	Características constructivas	403
7.3.8	Operación y mantenimiento	409
7.3.9	Ventajas e inconvenientes	411
Referencias bibliográficas		413
7.4	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial	415
7.4.1	Fundamentos	415
7.4.2	Rendimientos	419
7.4.3	Producción de lodos	420
7.4.4	Consumo de energía eléctrica	420
7.4.5	Dimensionamiento	420

7.4.6	Líneas de tratamiento propuestas	430
7.4.7	Características constructivas	450
7.4.8	Operación y mantenimiento	457
7.4.9	Ventajas e inconvenientes	458
	Referencias bibliográficas	460
7.5	Lombrifiltros	461
7.5.1	Fundamentos	461
7.5.2	Rendimientos	464
7.5.3	Producción de lodos	464
7.5.4	Consumo de energía eléctrica	465
7.5.5	Dimensionamiento	465
7.5.6	Línea de tratamiento propuesta	471
7.5.7	Características constructivas	484
7.5.8	Operación y mantenimiento	492
7.5.9	Ventajas e inconvenientes	493
	Referencias bibliográficas	495
7.6	Filtros Percoladores	496
7.6.1	Fundamentos	496
7.6.2	Rendimientos	501
7.6.3	Producción de lodos	503
7.6.4	Consumo de energía eléctrica	503
7.6.5	Dimensionamiento	503
7.6.6	Líneas de tratamiento propuesta	515
7.6.7	Características constructivas	555
7.6.8	Operación y mantenimiento	565
7.6.9	Ventajas e inconvenientes	568
	Referencias bibliográficas	569
7.7	Contactores Biológicos Rotativos (CBR)	570
7.7.1	Fundamentos	570
7.7.2	Rendimientos	574
7.7.3	Producción de lodos	574
7.7.4	Consumo de energía eléctrica	575
7.7.5	Dimensionamiento	575
7.7.6	Líneas de tratamiento propuesta	585

7.7.7	Características constructivas	608
7.7.8	Operación y mantenimiento	612
7.7.9	Ventajas e inconvenientes	614
Referencias bibliográficas		615
7.8	Aireación Extendida	617
7.8.1	Fundamentos	617
7.8.2	Rendimientos	620
7.8.3	Producción de lodos	621
7.8.4	Consumo de energía eléctrica	621
7.8.5	Dimensionamiento	621
7.8.6	Línea de tratamiento propuesta	650
7.8.7	Características constructivas	664
7.8.8	Operación y mantenimiento	668
7.8.9	Ventajas e inconvenientes	669
Referencias bibliográficas		670

MÓDULO 3

Capítulo 8	Tratamientos para la eliminación de nutrientes	687
8.1	Nitrificación	690
8.1.1	Oxidación de carbono y nitrificación en una sola etapa	693
8.2	Eliminación de nitrógeno	697
8.2.1	Desnitrificación	697
8.3	Eliminación de fósforo	706
8.3.1	Eliminación biológica de fósforo	706
8.3.2	Eliminación química del fósforo	710
8.4	Eliminación conjunta de nitrógeno y fósforo	712
8.4.1	Proceso A ² /O	713
8.4.2	Reactores SBR	714
Referencias bibliográficas		715

Capítulo 9 Tratamientos de desinfección 717

9.1 Características de las aguas tratadas de las diferentes líneas de tratamiento propuestas, a efectos de su desinfección	721
9.2 Tratamientos de desinfección aplicables a las aguas residuales tratadas	721
9.2.1 Cloración	722
9.2.2 Radiación UV	735
9.2.3 Lagunas de Maduración	751
9.2.4 Humedales Artificiales de Flujo Superficial	755
9.3 Selección de tratamientos para la desinfección de las aguas tratadas	763
9.3.1 Líneas de desinfección propuestas	764
Referencias bibliográficas	772

Capítulo 10 Reúso de las aguas tratadas 775

10.1 Visión general del reúso de las aguas tratadas	777
10.2 Beneficios y riesgos del reúso de las aguas tratadas	780
10.2.1 Riesgos del reúso de las aguas tratadas para la salud	782
10.2.2 Evaluación de riesgos en el reúso de las aguas tratadas	785
10.3 Pautas y normativas sobre el reúso de las aguas tratadas	786
10.3.1 Panorámica general	786
10.4 Estado del reúso de las aguas tratadas en Bolivia y en países limítrofes	797
10.4.1 La situación del reúso de aguas tratadas en Bolivia	797
10.4.2 El reúso de aguas tratadas en Brasil	801
10.4.3 El reúso de aguas tratadas en Chile	801
10.4.4 El reúso de aguas tratadas en Paraguay	802
10.4.5 El reúso de aguas tratadas en Perú	803
10.4.6 El reúso de las aguas tratadas en México	804
10.5 Tecnologías de regeneración	804
10.5.1 Tratamientos fisicoquímicos	805
10.5.2 Filtración	810
10.5.3 Tamices	816
10.5.4 Membranas	818
10.6 Esquema básico de un sistema de reúso	819
Referencias bibliográficas	821

Capítulo 11 Tratamiento de lodos	825
11.1 Producción y características de los lodos	828
11.2 Tecnologías de tratamiento	830
11.2.1 Espesamiento de lodos	832
11.2.2 Estabilización de lodos	842
11.2.3 Acondicionamiento de los lodos	857
11.2.4 Deshidratación de lodos	861
11.3 Líneas de tratamiento de lodos propuestas para los dimensionamientos básicos	900
Referencias Bibliográficas	908
Capítulo 12 Criterios de selección de las líneas de tratamiento	911
12.1 Elementos de los problemas de decisión	915
12.2 Metodología multicriterio aplicada a la selección de tratamientos de las aguas residuales	918
12.2.1 Conocimiento técnico	920
12.2.2 Estudios previos	921
12.2.3 Criterios de selección	921
12.3 Los criterios limitantes	948
12.4 La ponderación de los criterios de selección	950
12.5 La valoración de cada alternativa respecto a cada criterio de selección	951
12.6 La matriz de decisión	952
12.7 La selección final	954
Referencias bibliográficas	955
ANEXOS	
Anexo 1 Detalles constructivos	971
Anexo 2 Cuadro de precios	989
Anexo 3 Glosario de términos	995
Anexo 4 Glosario de unidades	1047



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

VICEMINISTERIO DE AGUA POTABLE
Y SANEAMIENTO BÁSICO

Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales



Módulo

0

Contenido

- Capítulo 1 Introducción
- Capítulo 2 Condicionantes del desarrollo del tratamiento de las aguas residuales en Bolivia
- Capítulo 3 La contaminación de las aguas y su tratamiento



Autoría:



FUNDACIÓN PÚBLICA ANDALUZA
CENTRO DE LAS NUEVAS
TECNOLOGÍAS DEL AGUA (CENTA)
Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible

Con la colaboración de:

 <p>MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA</p>	<p>VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO</p> <p>MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO</p>	 <p>CEDEX CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS</p>
--	--	---

Con el apoyo de:



Capítulo 1

Introducción



Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes y justificación

En Bolivia, la cobertura media de saneamiento se sitúa en el 62% alcanzando al 69,4% en el área urbana y al 44,8% en el área rural (VAPSB, 2019).

En lo referente al número de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) construidas en el país, de acuerdo con los datos del Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (MMAyA, 2017), este número se eleva a 219 instalaciones, de las cuales tan sólo 106 (el 50,7%) presentan un estado "bueno" o "regular" y dan servicio a un total de 3.006.656 habitantes (el 26,6% de la población nacional).

La contaminación de los recursos hídricos, a causa de los desechos humanos sin tratar, es uno de los problemas más complejos a los que se enfrenta la gestión de estos recursos, por el elevado costo y el grado de dificultad tecnológica que supone el tratamiento de las aguas residuales para el cumplimiento de la normativa en vigor en Bolivia (Ley 1333 del Medio Ambiente y Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica), que regula el vertido de aguas residuales en cursos de aguas naturales y suelo.

El Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia, en el marco de la Agenda Patriótica 2025 y de los compromisos adquiridos para dar cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS, 2016), ha desarrollado la Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (ENTAR), dentro de la cual se contempla la necesidad de elaborar una Guía Nacional, que permita la construcción de proyectos sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales, que deben estar bien conceptualizados y adecuarse a la realidad del lugar de

construcción, principalmente en lo relacionado con sus condiciones climáticas y fisiográficas.

Con el objeto de apoyar efectivamente el proceso de gestión de proyectos y, de esta manera, facilitar su planificación, diseño, ejecución y supervisión para los gobiernos municipales, organizaciones gestoras y administradoras de los servicios de agua y saneamiento, instituciones locales de desarrollo, empresas consultoras, constructoras y profesionales del sector en general, nace la presente **Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales**.

1.2 Objetivos

El objetivo general de esta guía se centra en disponer de un instrumento técnico que oriente la concepción y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel nacional, de manera que se puedan seleccionar las líneas de tratamiento más adecuadas y eficaces en las distintas condiciones geográficas y climáticas de Bolivia, y que coadyuve a la reducción de la contaminación de los cuerpos receptores.

A este objetivo general se unen los siguientes objetivos específicos:

- Proponer una caracterización de las aguas residuales domésticas para cada zona ecológica y segmento poblacional del país.
- Establecer recomendaciones de carácter técnico que ayuden a la redacción de los proyectos de PTAR, tanto en lo relativo a la información básica necesaria, como a los datos de partida y aspectos de diseño y construcción de las distintas tecnologías de tratamiento, de acuerdo a las distintas zonas ecológicas.
- Identificar las líneas de tratamiento más adecuadas en cada zona ecológica.
- Recoger los aspectos constructivos más relevantes de las diferentes soluciones de tratamiento de aplicación en el territorio boliviano.
- Definir las principales labores de operación y mantenimiento de estas soluciones.

- Realizar la estimación de la superficie necesaria para la construcción de las distintas alternativas de tratamiento, así como la estimación de sus costos de construcción, operación y mantenimiento, por zona ecológica y tamaño poblacional servido.
- Establecer la metodología base para la selección de la línea de tratamiento más adecuada en cada situación concreta.

1.3 Enfoque

El territorio boliviano se dispone en distintas altitudes sobre el nivel del mar, lo que hace que sus características ambientales sean diferentes, distinguiéndose tres ecosistemas, o zonas ecológicas, principales: el Altiplano, los Valles y los Llanos.

Esta circunstancia justifica que la elaboración de la guía se enfoque en función de esta diversidad de características ambientales, en especial de la temperatura reinante en cada una de las zonas ecológicas del país, dado que el comportamiento de las distintas tecnologías de tratamiento se ve altamente influenciado por este parámetro.

En lo referente al rango de aplicación de la guía, este se ha fijado en el ámbito de los 1.000 a 50.000 habitantes. El valor inferior de este rango se justifica porque las pequeñas poblaciones presentan una problemática específica para el tratamiento de las aguas residuales que en ellas se generan.

El saneamiento de las aguas residuales urbanas es más complejo y costoso cuanto menor es el tamaño de la población servida.

Las aguas residuales procedentes de las pequeñas poblaciones presentan características propias, que difieren notablemente de las que proceden de los núcleos de población de tamaño mediano/grande, debido a su diferente grado de desarrollo económico y social y a su condición de tamaño reducido, que las hace muy sensibles a cualquier alteración en las condiciones del sistema, pudiendo presentar importantes variaciones de caudal y carga contaminante en la entrada a la planta de tratamiento, tanto a lo largo del día como entre unos días y otros a lo largo del año.

Por debajo de los 1.000 habitantes estas variaciones de caudal y carga se amplifican, por lo que se hacen imprescindibles las campañas previas de aforo

y muestreo cuando se realice una intervención de saneamiento en este rango poblacional.

En materia de saneamiento, las pequeñas poblaciones precisan actuaciones que compatibilicen las condiciones exigidas a los efluentes depurados con técnicas de funcionamiento sencillas y con costes de explotación y mantenimiento que puedan ser realmente asumidos.

Deben primarse pues las instalaciones de tratamiento que (EPA 1977):

- Requieran un mínimo de mantenimiento.
- Mantengan un funcionamiento eficaz ante un amplio rango de caudal y carga.
- Presenten un gasto mínimo de energía.
- Simplifiquen y abaraten la gestión de los lodos generados en los procesos de depuración.
- Causen el mínimo deterioro de la calidad de los efluentes tratados frente a posibles fallos de equipos y procesos.
- Presenten una máxima integración en el medioambiental.

Los tratamientos que se apliquen para el tratamiento de las aguas residuales deberán cumplir con la normativa boliviana de vertidos y sus etapas de: diseño, construcción y operación y mantenimiento, deben ser abordadas con la misma rigurosidad con la que se realicen estas etapas en las poblaciones de mayor tamaño.

La selección del valor superior del rango de aplicación viene motivada por el hecho de que por encima de los 50.000 habitantes tan sólo se encuentran 23 de los 339 municipios bolivianos, que en su mayoría cuentan ya con PTAR, o están en vía de disponer en breve de este servicio.

1.4 Metodología

En la elaboración de la guía se ha seguido un método participativo, al objeto de asegurar la colaboración del personal técnico boliviano (gestores, proyectistas, operadores investigadores, expertos, etc.), con conocimientos en la materia.

Para dar cumplimiento a este requerimiento, el MMAyA constituyó inicialmente los siguientes Grupos de Trabajo: Grupo de Tecnologías, Grupo de Costos de Construcción, Grupo de Operación y Mantenimiento, Grupo de Aspectos Sociales y Grupo de Suministro de Información, en los que han participado, de forma activa, tanto personal propio, como técnicos de otras administraciones, EPSA, universidades, etc.

Igualmente, en las tres misiones llevadas a cabo en Bolivia por la empresa consultora, a lo largo del período de elaboración de la guía, se ha visitado un buen número de PTAR y se han organizado talleres con los profesionales locales, en los que se han debatido los diferentes contenidos de este documento.

1.5 Estructura de la Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales

La guía se estructura en 12 Capítulos, en los que se abordan los siguientes aspectos:

Capítulo 1.- Introducción.

Se describen los antecedentes que justifican la redacción de la guía y se analizan sus objetivos, enfoque, metodología y estructura.

Capítulo 2.- Condicionantes del desarrollo del tratamiento de las aguas residuales en Bolivia.

Se analizan las características del territorio boliviano (organización administrativa, demografía, zonas ecológicas, climatología y usos y calidades de las masas de aguas) y se aborda el saneamiento, tanto desde el punto de vista institucional (marco competencial, planificación, normativa y gestión), como del de su situación actual, detallándose las tecnologías de tratamiento que se

emplean en las distintas zonas ecológicas y rangos poblacionales, junto con los diagramas de flujo que se usan para la aplicación de las mismas.

Capítulo 3.- La contaminación de las aguas y su tratamiento.

Se analizan los principales contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas, se presentan sus concentraciones habituales en este tipo de vertidos y se describen los principales mecanismos para lograr su eliminación.

Capítulo 4.- Información básica para la redacción de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Se detalla la información básica a recopilar como paso previo, e imprescindible, para la redacción de un proyecto de PTAR, al objeto de garantizar que las instalaciones a implementar se adecúan convenientemente a las condiciones reales del entorno y a las características de las aguas a tratar.

Capítulo 5.- Líneas de tratamiento adoptadas y aspectos considerados en los dimensionamientos básicos.

Se justifica la selección de las líneas de tratamiento, que se desarrollan posteriormente en el Capítulo 7, y se presentan las bases de partida que se emplearán para la elaboración de los dimensionamientos básicos de estas líneas. Estos dimensionamientos se utilizan posteriormente para la estimación de los requisitos de superficie, costos de construcción, operación y mantenimiento de las líneas de tratamiento propuestas.

Capítulo 6.- Pozo de gruesos, obra de llegada, pretratamiento, medición de caudal y tratamientos primarios.

Se abordan las primeras etapas por las que pasan las aguas residuales urbanas a su ingreso en las PTAR (pozo de gruesos, obra de llegada, desbaste, desarenado y desengrasado). Posteriormente, se introducen los tratamientos primarios, representados en esta guía por los Tanques Sépticos, los Tanques Imhoff y los Sedimentadores Primarios.

Para todos los elementos del pretratamiento, y para los tratamientos primarios, se abordan sus fundamentos, diseño, principales características constructivas, residuos que generan y sus labores de operación y mantenimiento.

En el capítulo también se analiza la medición de los caudales de las aguas residuales que ingresan en las PTAR, tanto en canales abiertos, como en conductos cerrados.

Capítulo 7.- Tratamientos secundarios.

Se analizan los distintos tratamientos seleccionados: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA), Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA), Lagunas de Estabilización, Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial, Lombrifiltros, Filtros Percoladores, Contactores Biológicos Rotativos (CBR) y Aireación Extendida, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Para todos estos tratamientos se describen sus fundamentos y características principales, se analizan los métodos de diseño, se detallan sus características constructivas, sus labores de operación y mantenimiento y se presentan los resultados del dimensionamiento básico llevado a cabo sobre la línea de tratamiento seleccionada, que permite la estimación de los requisitos de superficie, los costos de construcción, operación y mantenimiento.

Capítulo 8. Tratamientos para la eliminación de nutrientes.

Se presentan los distintos tratamientos disponibles para la eliminación de nitrógeno y fósforo, planteándose cuatro posibles escenarios, en función de las características del cuerpo receptor de las aguas tratadas en una PTAR, o de la posible reutilización directa de estas aguas: i) tan sólo es necesario nitrificar; ii) se precisa la eliminación de nitrógeno; iii) se precisa la eliminación de fósforo, y iv) se precisa la eliminación conjunta de nitrógeno y fósforo.

Capítulo 9.- Tratamientos de desinfección.

Como tecnologías de tratamiento para la desinfección de las aguas tratadas en las PTAR se analizan la Cloración, la Radiación Ultravioleta y el empleo de Lagunas de Maduración y de Humedales Artificiales de Flujo Superficial.

Para todas ellas se describen sus fundamentos y métodos de diseño, se analizan sus características y se presentan los resultados del dimensionamiento básico llevado a cabo, que permite la estimación de sus requisitos de superficie, sus costos de construcción, operación y mantenimiento.

Capítulo 10.- Reúso de las aguas tratadas.

Se aborda el reúso directo de las aguas residuales tratadas, pasando revista a la situación mundial de esta fuente alternativa del recurso agua, a sus principales beneficios y sus posibles riesgos, a las principales guías y normativas existentes a nivel mundial sobre el reúso de las aguas tratadas, a la situación actual del reúso de las aguas tratadas en Bolivia y en países limítrofes, así como a las principales tecnologías de regeneración, que permiten el reúso las aguas residuales tratadas.

Capítulo 11.- Tratamientos de lodos.

En este capítulo se abordan el espesamiento de los lodos, su estabilización vía aerobia y anaerobia y su deshidratación, haciendo uso de equipos mecánicos, Lechos de Secado y de Humedales Artificiales.

Para todos estos tratamientos se describen sus fundamentos y métodos de diseño y, en el caso de los Lechos de Secado, se presentan los resultados del dimensionamiento básico llevado a cabo, que permite la estimación de sus requisitos de superficie y de sus costos de construcción en las diferentes líneas de tratamiento. Para la realización de estos dimensionamientos básicos se ha cuantificado la cantidad de lodos que se genera en cada una de las líneas de tratamiento seleccionadas, para las distintas zonas ecológicas y rangos de población analizados.

Capítulo 12.- Criterios de selección de las líneas de tratamiento.

En el último capítulo de la guía se definen los criterios y se desarrolla la metodología, que haciendo uso toda la información presentada en los anteriores capítulos, permite facilitar la toma de decisiones a la hora de seleccionar la línea de tratamiento que mejor se adapta para la depuración de las aguas residuales generadas en cada caso concreto.

ANEXOS:

ANEXO I.- Detalles constructivos.

Para las diferentes líneas de tratamiento propuestas se adjunta un plano básico, con sus principales detalles constructivos.

ANEXO II.- Cuadro de precios.

Se anexa un cuadro con los precios unitarios empleados para la estimación de los costos de construcción, operación y mantenimiento de las diferentes líneas de tratamiento.

ANEXO III.- Glosario de términos.

Se incluye un glosario de los términos técnicos empleados en la redacción de la guía.

ANEXO IV.- Glosario de unidades.

Se incluye un glosario de las unidades empleadas en la redacción de la guía.

Referencias bibliográficas

EPA (1977). Response to Congress on Use of Decentralized Wastewater Treatment Systems, EPA 832-R-97-001b, Environmental Protection Agency Office of Wastewater Management, Washington, DC.

MMAyA (2017). Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

VAPSB (2019). Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico. Ministerio del Medio Ambiente y Agua del documento. "Ministerio de Medio Ambiente y Agua".

Capítulo 2

Condiciones del desarrollo del tratamiento de las aguas residuales en Bolivia



Capítulo 2

Condiciones del desarrollo del tratamiento de las aguas residuales en Bolivia

En este capítulo se analizan los condicionantes relacionados con el desarrollo del tratamiento de las aguas residuales urbanas en Bolivia. En primer lugar, se exponen las características del territorio, analizándose su organización administrativa, demografía, zonas ecológicas, su climatología y los usos y calidades de las masas de aguas.

Posteriormente se aborda el tema del saneamiento, describiéndose, inicialmente, los marcos competenciales, de planificación y normativo. Se analiza a continuación la gestión de las aguas residuales urbanas y el estado actual del tratamiento de estos vertidos, detallándose las tecnologías de tratamiento que se emplean en las distintas zonas ecológicas y rangos poblacionales, junto con los diagramas de flujo que se usan para la aplicación de las mismas.

Finalmente se analiza la gestión a nivel nacional de los residuos sólidos (por la necesidad de gestionar convenientemente los diferentes subproductos que se generan en las instalaciones de tratamiento de las aguas residuales) y la gestión de las aguas pluviales (por su influencia en el saneamiento).

2.1 Características del territorio

2.1.1 Organización administrativa

El Estado Plurinacional de Bolivia ocupa una extensión total de 1.098.581 km² y se estructura, política y administrativamente, en nueve departamentos, 112 provincias, 339 municipios y 1.384 cantones. En la Figura 2.1 puede apreciarse la ubicación de estos departamentos en la geografía boliviana, mientras que la Tabla 2.1 muestra la superficie que ocupan, indicándose cuál es su capital (IGM CNPV-INE, 2001).

Figura 2.1. Distribución geográfica de los departamentos bolivianos.



Tabla 2.1. División departamental de Bolivia.

Departamento	Superficie (km ²)	Capital
Beni	213.564	Trinidad
Cochabamba	55.631	Cochabamba
Chuquisaca	51.524	Sucre
La Paz	133.985	La Paz
Oruro	53.588	Oruro
Pando	63.827	Cobija
Potosí	118.218	Potosí
Santa Cruz	370.621	Santa Cruz de la Sierra
Tarija	37.623	Tarija

2.1.2 Demografía

De acuerdo al Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV), realizado en el año 2012, el Estado Plurinacional de Bolivia contaba con una población de 10.059.856 habitantes, de los cuales 6.788.962 (67%) habitaban en el área urbana y 3.270.894 (33%) en la rural, habiéndose registrado un crecimiento poblacional intercensal del 1,7% con relación al censo de 2001.

La población de Bolivia en 2019 se elevaba a 11.469.896 habitantes, lo que supone un crecimiento de 1.410.040 habitantes desde la fecha del último censo realizado. Esta población, estimada por el MMAyA, se distribuía por tamaño y ámbito (rural/urbano) conforme a la Tabla 2.2, y por departamentos de acuerdo con la Tabla 2.3 (*elaboración propia a partir de datos del VASPSB y MMAyA*).

**Tabla 2.2. Distribución de la población por ESA, al 2019
(En número de habitantes).**

Ámbito	Rango poblacional	Habitantes
Pequeñas comunidades	Rural	3.471.550
Urbana	hasta 10.000	683.249
Urbana	mayores a 10.000	7.315.097
Total		11.469.896

FUENTE: Estimaciones del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, en base a la proyección de población del INE (Revisión 2014).

Para el año 2020 la población boliviana se estima en 11.633.371 habitantes (INE, 2014).

Tabla 2.3 Distribución de la población por departamento y ESA (Enfoque Sectorial Amplio), al 2019.

DEPARTAMENTO	Rural (habitantes)		TOTAL
	hasta 10.000	mayores a 10.000	
Beni	119.999	309.732	474.257
Chuquisaca	310.960	278.347	631.608
Cochabamba	598.561	1.250.438	1.999.933
La Paz	944.014	1.849.471	2.904.996
Oruro	185.943	336.188	544.608
Pando	62.087	71.718	149.214
Potosí	513.301	330.211	894.466
Santa Cruz	552.077	2.516.511	3.297.483
Tarija	184.608	372.481	573.331
TOTAL	3.471.550	7.315.097	11.469.896

FUENTE: Estimaciones del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, en base a la proyección de población del INE (Revisión 2014).

La Tabla 2.4 muestra la distribución de las comunidades bolivianas por rangos poblacionales.

Tabla 2.4 Número de comunidades y habitantes según rango de población, al 2019 (En número de habitantes y número de comunidades).

Rango de Población	Nro Comunidades	Población
0 - 500	17.952	2.352.029
501 - 1.000	929	624.333
1.001 - 2.000	296	399.027
2.001 - 5.000	125	397.453
5.001 - 10.000	57	381.957
10.001 - 25.000	26	405.077
25.001 - 50.000	14	480.314
50.001 - 100.000	6	419.304
100.001 - 250.000	8	1.304.851
> 250.000	6	4.705.551
TOTALES	19.419	11.469.896

Fuente: Estimaciones del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, en base a la proyección de población del INE (Revisión 2014).

A la vista de estos datos, se puede concluir que la presente guía será de aplicación para la mayoría de las comunidades bolivianas.

Por último, en relación con la distribución de la población en el rango de aplicación de la guía en las diferentes zonas ecológicas (Tabla 2.5), puede establecerse que esta distribución es ligeramente variable, concentrándose en los Llanos el 40%

de la población total, mientras que en los Valles y el Altiplano lo hace el 33 y el 27% respectivamente (elaboración propia a partir de datos de VAPSB, MMAyA).

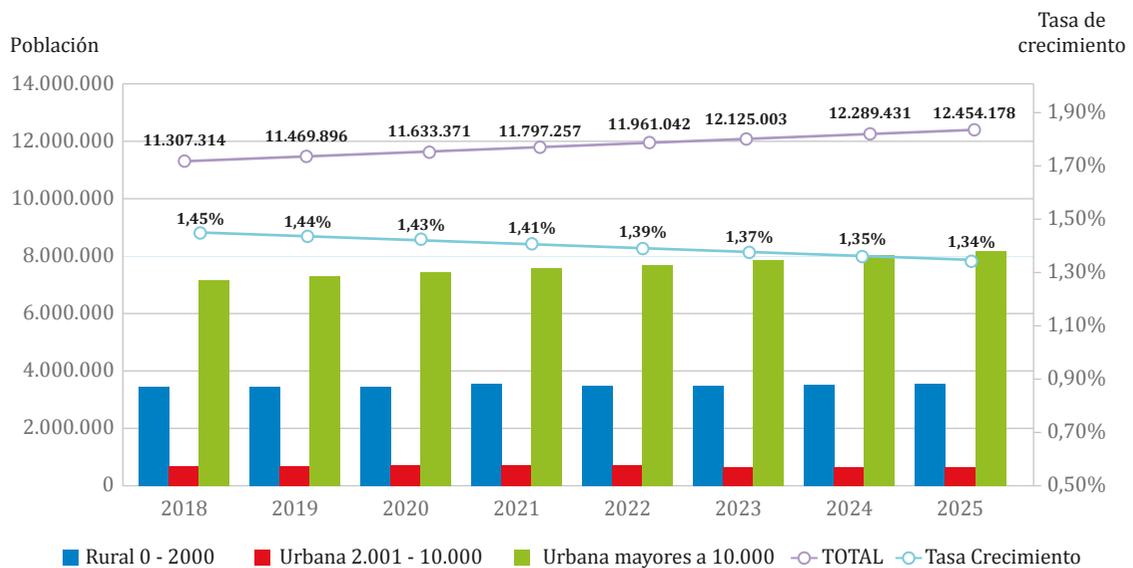
Tabla 2.5 Número de comunidades y habitantes, según rango de población y piso ecológico, al 2019 (En número de habitantes y número de comunidades).

Rango de Población	Altiplano		Valles		Llanos		TOTAL	
	Nro Comunidades	Población						
0 - 500	6.352	897.450	5.187	704.846	6.413	749.733	17.952	2.352.029
501 - 1.000	370	250.211	229	152.617	330	221.505	929	624.333
1.001 - 2.000	84	109.874	74	102.924	138	186.229	296	399.027
2.001 - 5.000	28	83.469	30	102.350	67	211.634	125	397.453
5.001 - 10.000	11	69.124	15	101.340	31	211.493	57	381.957
10.001 - 25.000	5	83.874	5	79.079	16	242.124	26	405.077
25.001 - 50.000	3	95.953	2	83.292	9	301.069	14	480.314
50.001 - 100.000	1	70.452	2	117.859	3	230.993	6	419.304
100.001 - 250.000	1	200.177	3	551.859	4	552.815	8	1.304.851
> 250.000	2	1.229.510	3	1.782.948	1	1.693.093	6	4.705.551
TOTAL	6.857	3.090.094	5.550	3.779.114	7.012	4.600.688	19.419	11.469.896

FUENTE: Estimaciones del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, en base a la proyección de población del INE (Revisión 2014).

La Figura 2.2 muestra la estimación de la evolución anual de la población rural y urbana en el periodo 2018-2025 (VAPSB, MMAyA).

Figura 2.2. Evolución de la población rural y urbana al año horizonte 2025.



Como se puede observar el crecimiento más importante, en torno al 2%, se producirá en las ciudades más habitadas, lo que supone la contribución más significativa al crecimiento total de la población boliviana. En cambio, en el área rural se producirá un crecimiento de población en torno al 0,3% interanual durante el mismo periodo de tiempo. En cuanto a la población urbana ubicada en ciudades de mediano tamaño, las tasas de crecimiento interanual fluctúan desde valores positivos superiores al 2%, hasta valores negativos de igual valor absoluto.

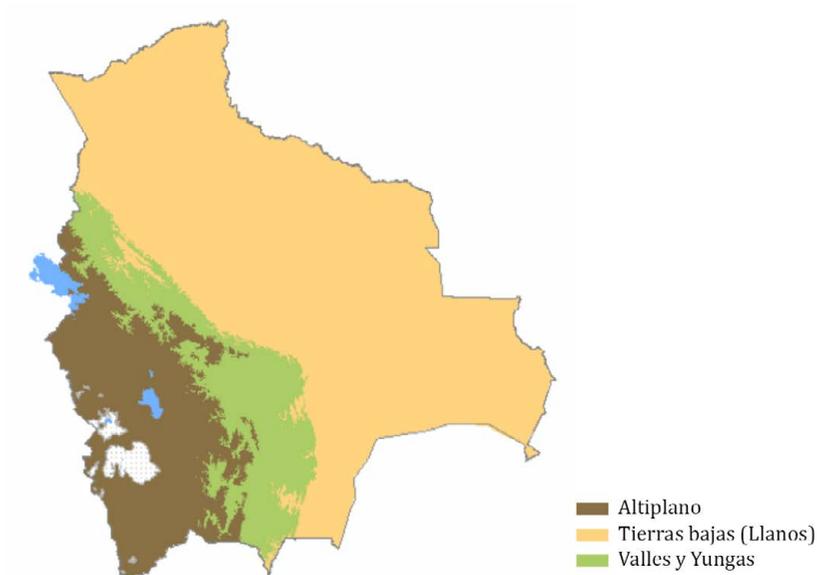
2.1.3 Zonas ecológicas y climatología

El territorio boliviano se dispone en distintas altitudes sobre el nivel del mar, lo que hace que sus características ambientales sean diferentes. Así, se habla de zonas ecológicas entendiéndose como tales los diferentes ecosistemas que pueden encontrarse en el país y que son los siguientes:

- **El Altiplano:** abarca un 28% del territorio nacional, con alturas casi constantes de más de 3.600 m.s.n.m. y con doce cimas de más de 6.000 m. Su extensión es de 307.000 km² y en ella se distinguen: la Cordillera Occidental o Volcánica, la Cordillera Oriental y la Meseta Altiplánica. En esta zona se encuentran los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí.
- **Los Valles:** esta zona comprende los valles que se sitúan a una altitud de 500 a 3.600 m.s.n.m. y que constituyen áreas agrícolas por excelencia, así como la exuberante región subtropical de Los Yungas, con fértiles valles. En esta zona encontramos los departamentos de Cochabamba, Chuquisaca, Tarija y parte del departamento de Santa Cruz.
- **Los Llanos:** es la zona de tierras bajas a una altitud entre los 100 y los 500 m.s.n.m., que cubren cerca del 60% del territorio boliviano. Está constituida por extensos pastizales, sabanas, bosques húmedos y semihúmedos de maderas preciosas y numerosos ríos navegables, largos y caudalosos. Comprende las últimas estribaciones de la Cordillera Andina sobre los departamentos de La Paz, Cochabamba, Santa Cruz y, más hacia el norte, los departamentos de Beni y Pando.

La Figura 2.3 muestra la ubicación en el territorio de estas tres zonas ecológicas.

Figura 2.3. Ubicación de las zonas ecológicas.



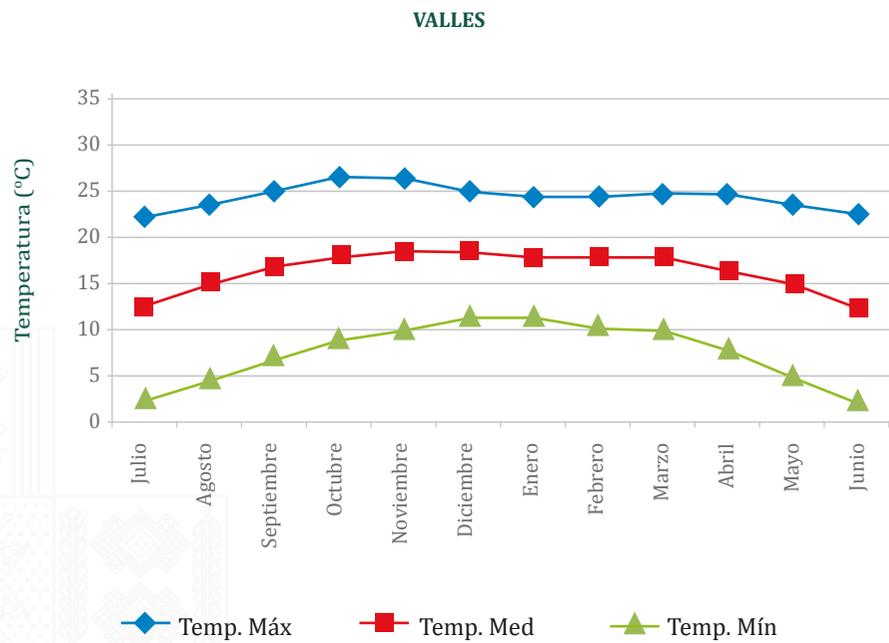
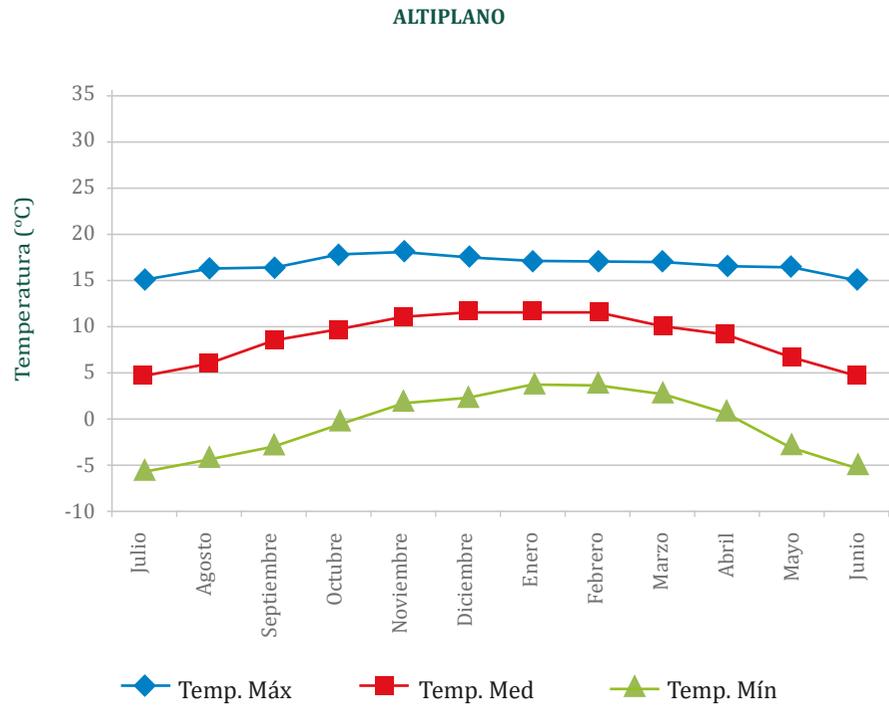
En lo referente a climatología de estas zonas ecológicas, la Tabla 2.6 recoge los valores medios de las temperaturas máximas, mínimas y medias, junto a los de la precipitación anual media. Se muestra también el gradiente altitudinal (MMAyA, 2011).

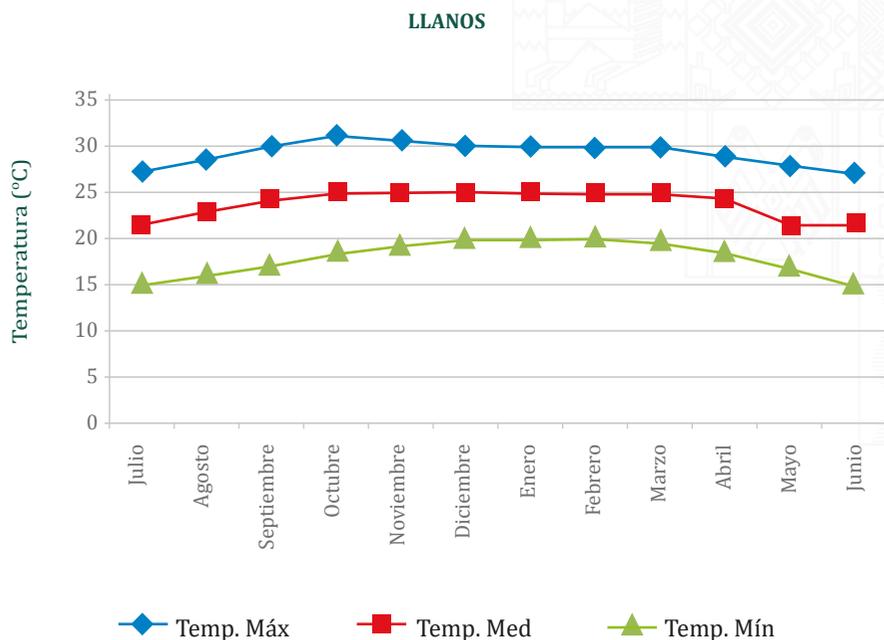
Tabla 2.6. Características climatológicas de las zonas ecológicas.

Zonas ecológicas	Gradiente altitudinal (m.s.n.m.)	Temperatura			Precipitación media (mm/a)
		Mínima (°C)	Media (°C)	Máxima (°C)	
Altiplano	3.600 - 4.000	-5,6	8,5	18,1	385
Valles	500 - 3.600	2,5	18,6	26,5	857
Llanos	100 - 500	14,5	25,5	31,2	1.456

Por último, la Figura 2.4 refleja la evolución anual de las temperaturas máximas, mínimas y medias para las diferentes zonas ecológicas (Senamhi, Bolivia).

Figura 2.4. Evolución anual de las temperaturas en las diferentes zonas ecológicas.





2.1.4 Usos y calidad de las masas de agua

Según datos de 2008, la extracción hídrica a nivel nacional alcanzó los 2.088 millones de metros cúbicos, destinándose el 92% de esta cantidad al sector agrícola, el 6% al sector urbano y el 2% restante al sector industrial (AQUASTAT, 2015).

De acuerdo con el Informe Calidad de Agua (VRHR, 2017), en gran parte de los cuerpos de aguas bolivianos se detecta una buena calidad hídrica en las zonas altas, mientras que en las zonas medias y bajas esta calidad se deteriora notablemente, como consecuencia de los vertidos de aguas residuales urbanas e industriales sin tratar y de las actividades mineras y agropecuarias.

La actividad minera, la industrial y la ciudadana (en las urbes que no cuentan con tratamiento de sus vertidos), originan la contaminación de los principales cursos de agua, que luego son utilizados aguas abajo, principalmente en actividades agrícolas. En estos cursos la carga contaminante es extremadamente grande y los valores de materia orgánica están por encima de 100 mg/L (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC., 2012).

La minería genera un drenaje de aguas ácidas con metales pesados, que da lugar a una contaminación difusa, difícil de controlar en los sistemas hídricos superficiales y subterráneos.

En los cursos de agua mayores de la vertiente amazónica, el deterioro de la calidad de las aguas se manifiesta por la elevada concentración de sedimentos, originados por los procesos de erosión laminar y movimiento de masas en las cuencas altas, así como por los altos niveles de concentración de sustancias utilizadas en la explotación aurífera.

La misma situación se presenta en los ríos de la vertiente de La Plata, donde la contaminación por la actividad minera se debe, predominantemente, a explotaciones de estaño, zinc y plomo (*Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC., 2012*).

2.2 Saneamiento

2.2.1 Marco competencial

La Tabla 2.7 recoge las instituciones del Estado con competencias en el sector del saneamiento (*MMAyA, 2012*). En ella se especifican:

- El nivel de gobierno en las que se encuadran las instituciones (central, departamental, municipal, autonomía indígena y comunal).
- El nombre de la institución junto a su acrónimo.
- Las competencias de la institución.
- La normativa en la que se articulan estas competencias.

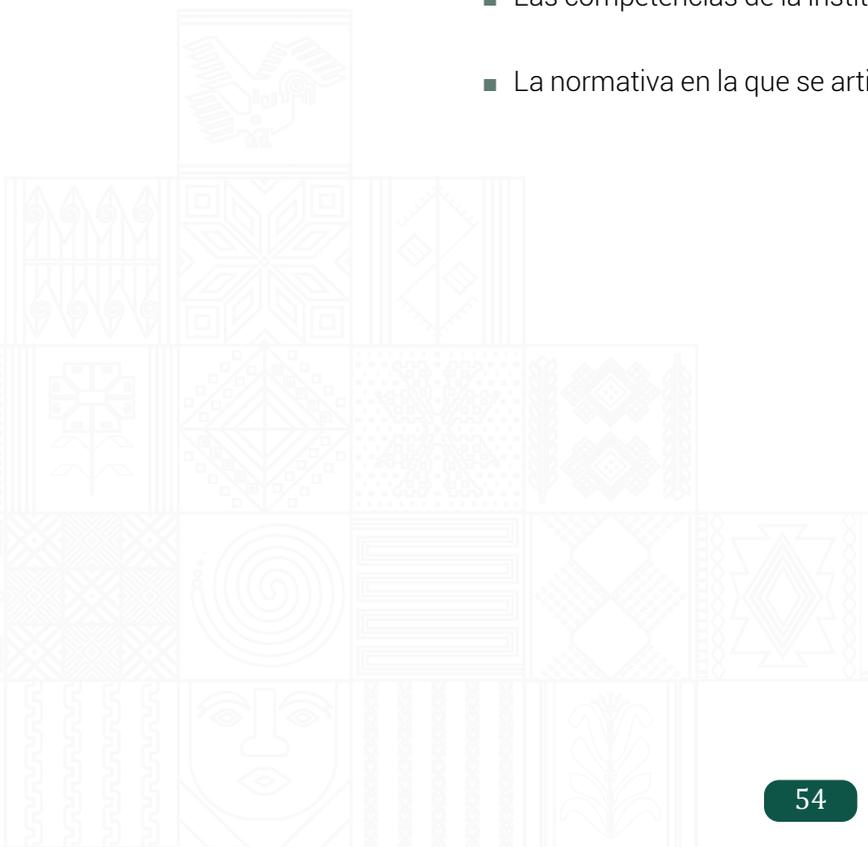


Tabla 2.7. Instituciones con competencias en materia de saneamiento.

Nivel de gobierno	Institución	Competencias	Normativa
Nivel central (saneamiento)	Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)	<p>Formular, ejecutar, evaluar y fiscalizar las políticas y planes de agua potable y saneamiento básico.</p> <p>Elaborar, financiar y ejecutar subsidiariamente proyectos de agua potable y alcantarillado, de manera concurrente con los otros niveles autonómicos, en el marco de las políticas de servicios básicos.</p>	DS 29894 Ley 031
	Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico (VAPSB)	<p>Coadyuvar en la formulación e construcción de políticas, planes y normas para el desarrollo, provisión y mejoramiento de los servicios de agua potable y saneamiento básico.</p> <p>Promover normas técnicas, disposiciones reglamentarias e instructivas para el buen aprovechamiento y regulación de los servicios de agua potable y saneamiento básico.</p>	DS 29894
	Autoridad de Fiscalización y Control Social en Agua Potable y Saneamiento (AAPS)	Regular las actividades que realicen las personas naturales, jurídicas, privadas y operadores de servicios de agua potable y saneamiento (comunitarios, públicos, mixtos y cooperativas), en el uso del recurso hídrico y la provisión de los servicios de agua para consumo humano y saneamiento.	DS 0071
Nivel departamental	Gobiernos autónomos departamentales	<p>Elaborar, financiar y ejecutar subsidiariamente planes y proyectos de agua potable y alcantarillado de manera concurrente y coordinada con el nivel central del Estado, los gobiernos municipales e indígena originario campesinos que correspondan, pudiendo delegar su operación y mantenimiento a los operadores correspondientes, una vez concluidas las obras. Toda intervención del gobierno departamental debe coordinarse con el municipio o autonomía indígena originaria campesina beneficiaria.</p> <p>Coadyuvar con el nivel central del Estado en la asistencia técnica y planificación sobre los servicios básicos de agua potable y alcantarillado.</p>	Ley 031

Nivel municipal	Gobiernos autónomos municipales	<p>Asegurar la provisión de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario, a través de una EPSA concesionada por la Superintendencia de Saneamiento Básico (actualmente denominada AAPS conforme D.S. No 071 que crea las Autoridades de Fiscalización y Control Social en los Sectores Regulados) conforme a la presente Ley o en forma directa cuando corresponda, en concordancia con las facultades otorgadas por Ley a los Municipios, en lo referente a la competencia municipal por los Servicios de Agua Potable y alcantarillado Sanitario.</p>	Ley 2066
		<p>Ejecutar programas y proyectos de los servicios de agua potable y alcantarillado, conforme a la Constitución Política del Estado, en el marco del régimen hídrico y de sus servicios, y las políticas establecidas por el nivel central del Estado.</p> <p>Elaborar, financiar y ejecutar proyectos de agua potable en el marco de sus competencias, y cuando corresponda de manera concurrente y coordinada con el nivel central del Estado y los otros niveles autonómicos; así como coadyuvar en la asistencia técnica y planificación. Concluidos los proyectos podrán ser transferidos al operador del servicio.</p> <p>Proveer los servicios de agua potable y alcantarillado a través de entidades públicas, cooperativas, comunitarias o mixtas sin fines de lucro, conforme a la Constitución Política del Estado y en el marco de las políticas establecidas en el nivel central del Estado.</p>	Ley 031

La Figura 2.5 muestra, de forma gráfica, los distintos actores involucrados en el sector del agua y saneamiento básico y sus competencias en la materia (ENTAR, 2019).

Figura 2.5. Actores del sector del agua en Bolivia y competencias.



2.2.2 Marco normativo

Se recogen, a continuación, las principales normativas bolivianas relacionadas con el saneamiento.

Ley N° 1333 de 27 de abril de 1992 del Medio Ambiente

Tiene por objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población.

Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH)

Esta disposición legal reglamenta la Ley de Medio Ambiente 1333, de 27 de abril de 1992, en lo referente a la prevención y control de la contaminación hídrica, en el marco del desarrollo sustentable. En este reglamento se especifican:

- La clasificación de los cuerpos de aguas.

- Las atribuciones y competencias de las distintas instituciones.
- Los procedimientos técnico-administrativos de: la inspección y vigilancia; los servicios municipales y cooperativas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado; las descargas de efluentes en cuerpos de aguas y de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado.
- El monitoreo, evaluación, prevención y protección de la calidad hídrica: de la prevención y control de la contaminación y conservación de la calidad hídrica; de los sistemas de tratamiento; de la conservación de las aguas subterráneas; del reúso de aguas; de la contaminación de cuencas de curso sucesivo y de las infracciones y sanciones administrativas.

En este reglamento se especifican los límites de calidad de los cuerpos receptores (Anexo A-1) y los límites permisibles para las descargas líquidas (Anexo A.2).

Con relación a las descargas a la red de alcantarillado el reglamento especifica que: *"las descargas de aguas residuales crudas o tratadas a los colectores de alcantarillado sanitario serán aceptables si, a juicio del correspondiente Servicio de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado (EPSA), no interfieran los procesos de tratamiento de la planta ni perjudiquen a los colectores sanitarios, delegando a las mismas EPSA el establecer los procedimientos legales, técnicos y administrativos, para la disposición de aguas residuales provenientes de las industrias a los sistemas de alcantarillado sanitario"*.

Respecto al reúso de aguas, este reglamento en su Capítulo V, Art. 67, establece que: *el reúso de aguas residuales crudas o tratadas por terceros, será autorizado por el Prefecto (actualmente Gobernador), cuando el interesado demuestre que estas aguas satisfacen las condiciones de calidad establecidas en Cuadro N° 1 Anexo A- del presente Reglamento. Estas condiciones de calidad se especifican en el apartado 4.11 de la presente guía.*

En lo referente a los lodos, el reglamento en su Capítulo V, Art. 68, establece que: *"los fangos o lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales que hayan sido secados en lagunas de evaporación, lechos de secado o por medios mecánicos, serán analizados y en caso de que satisfagan lo establecido para el uso agrícola, deberán ser estabilizados antes de su uso o disposición final, todo bajo control de la Prefectura (actualmente Gobernación).*

Guía para la Elaboración de Procedimientos Técnicos y Administrativos para Descargas de Efluentes Industriales, Especiales y Lodos al Alcantarillado Sanitario (2015)

Esta guía se desarrolló para ayudar a las EPSA en la elaboración de sus propios Procedimientos Técnicos y Administrativos (PTA) y para que pudiesen ejercer un control sistematizado sobre las descargas industriales, especiales y lodos al alcantarillado sanitario, planta de tratamiento, o en puntos autorizados para dicho efecto.

La guía está orientada a la difusión y aplicación de conceptos técnicos, criterios de cálculo y procedimientos administrativos específicos, para que toda EPSA a nivel nacional pueda elaborar sus propios procedimientos técnicos y administrativos para las Descargas Industriales, Especiales y Lodos al Alcantarillado Sanitario (DIELAS).

El documento pretende servir de referencia para que el contenido de cada PTA sea al menos el mínimo exigible, tanto a las industrias como a las entidades generadoras de descargas especiales o lodos. Sin embargo, es factible que cada EPSA pueda realizar ajustes, o mejoras de la misma, con relación a su entorno y condiciones de prestación del servicio.

Ley N° 2066, de 11 de abril de 2000 de Prestación y Utilización de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario

Esta ley, que define los roles institucionales del sector y crea la Superintendencia de Servicios Básicos (reemplazada en el Decreto Supremo 0071 de abril de 2009 por la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico), establece las normas que regulan la prestación y utilización de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario y el marco institucional que los rige, el procedimiento para otorgar concesiones, licencias y registros para la prestación de los servicios, los derechos y obligaciones de los prestadores y usuarios, el establecimiento de los principios para fijar los precios, tarifas, tasas y cuotas, así como la determinación de infracciones y sanciones.

2.2.3 Planificación

Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (ENTAR)

La Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales (ENTAR) es un instrumento de política pública del país, que orienta las acciones necesarias para alcanzar una gestión sostenible de las aguas residuales y lodos, en los centros urbanos de Bolivia hacia el año 2030.

Para ello, la ENTAR define las acciones estratégicas que permitan normar, articular, definir, planificar e implementar medidas con miras a la universalización del acceso al tratamiento de aguas residuales y lodos y la gestión sostenible del servicio, en beneficio de la población y el medio ambiente.

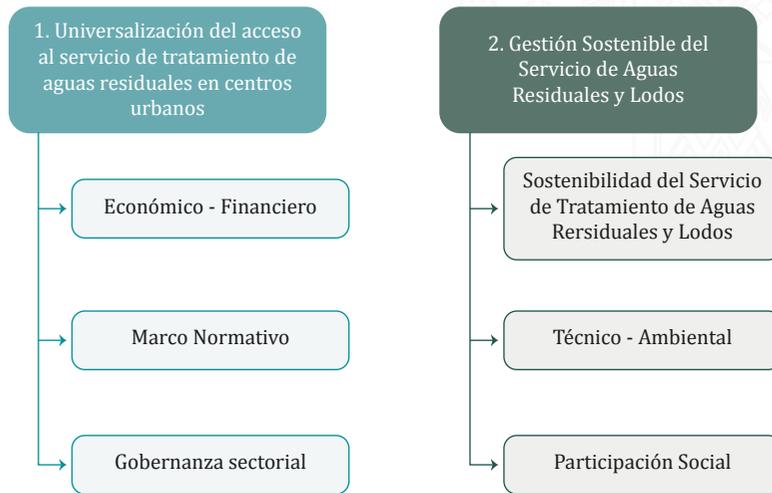
Bajo la perspectiva de planificación, la ENTAR se ha formulado sobre las bases fundamentales de la Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia, el Plan de Desarrollo Económico y Social (PDES), la Agenda Patriótica 2025, el Plan Sectorial de Desarrollo de Saneamiento Básico y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La misión de la ENTAR se orienta a normar, articular, definir, planificar e implementar las medidas necesarias en la gestión de las aguas residuales y lodos, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de la población boliviana, con criterios de calidad, cantidad, sostenibilidad, ética y transparencia.

La visión de la ENTAR se enfoca en lograr la gestión sostenible y resiliente de las aguas residuales, con innovación tecnológica, participación social y respeto a la Madre Tierra. Esta visión expresa la imagen que se quiere alcanzar en el periodo 2020-2030, no siendo simplemente un conjunto o suma de objetivos, sino una contribución en la que han participado los actores principales del Proceso de Planificación de la Estrategia, a través del planteamiento de ideas o de soluciones a la problemática actual.

La ENTAR se construye sobre dos pilares fundamentales, dentro de los cuales y para facilitar el proceso de planificación, se han definido ejes que contribuyen a cimentar los pilares definidos (Figura 2.6) (ENTAR, 2019).

Figura 2.6. Pilares y ejes de la ENTAR.



2.2.4 Gestión

En Bolivia los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario son prestados por las EPSA, entidades legalmente reconocidas y registradas por la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (AAPS) y que tienen personalidad jurídica propia.

La finalidad última de las EPSA es garantizar la calidad, cantidad y continuidad de los servicios que reciben los usuarios finales, es decir, los ciudadanos. Las formas jurídicas en las que se presentan son varias, pudiendo estar constituidas como:

- Una empresa pública municipal.
- Una cooperativa de servicios públicos sin fines de lucro.
- Una empresa pública estatal.
- Comités de agua, pequeños sistemas urbanos independientes, juntas vecinales y cualquier otra organización, que cuente con una estructura jurídica EPSA reconocida por la ley y pueblos indígenas y originarios, comunidades indígenas y campesinas, asociaciones, organizaciones y sindicatos campesinos.

A título de ejemplo, en Cochabamba los servicios son operados por una EPSA municipal, mientras que en Santa Cruz la operadora principal es SAGUAPAC, una cooperativa.

Las funciones de la AAPS se orientan a: promover e implementar las políticas de control, supervisión y fiscalización del sector de agua potable y saneamiento básico; otorgar licencias de prestación de servicios de agua potable y saneamiento básico; emitir normas técnicas relacionadas con la regulación de los operadores y los derechos y obligaciones de los usuarios de los servicios; regular la gestión sustentable de los recursos hídricos para el consumo humano; regular a los prestadores del servicio en lo referente a planes de operación, mantenimiento, expansión, fortalecimiento del servicio, precios, tarifas y cuotas; resolver las controversias y conflictos que afecten al uso de recursos hídricos para consumo humano y a los servicios de agua potable y saneamiento básico y proteger los derechos de usuarios de los servicios de agua potable o saneamiento básico.

La AAPS publica anualmente información sobre el desempeño de las empresas prestadoras de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (EPSA) conforme el modelo de seguimiento regulatorio, el informe de "indicadores de Desempeño" refleja los resultados técnicos económicos, financieros en la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario.

2.2.5 El estado actual del saneamiento

La Tabla 2.8 recoge los indicadores de cobertura de saneamiento por departamento en el año 2019.

Tabla 2.8. Indicadores de la cobertura de saneamiento por departamentos.

Departamento	Porcentaje de cobertura (%)		
	Total	Urbano	Rural
Chuquisaca	64,2	97,1	30,4
La Paz	75,7	92,9	39,9
Cochabamba	62,3	69,0	46,7
Oruro	50,1	67,4	16,8
Potosí	50,0	87,4	22,2
Tarija	82,4	90,8	64,7
Santa Cruz	54,6	51,0	72,8
Beni	39,9	28,4	74,0
Pando	50,7	30,8	78,7
NACIONAL	62,0	69,4	44,8

Fuente: Estimado por el Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico (VAPSB), en base al reporte de nuevas conexiones y población nueva beneficiada de los proyectos ejecutados por el MMAyA, FPS, EPSAS, AEV, ONG y población proyectada por el INE.

Se observa que:

- El grado de cobertura del saneamiento en Bolivia oscila entre el 82,4% del departamento de Tarija y el 39,9% del departamento de Beni, con un porcentaje de cobertura a nivel nacional del 62,0%.
- En la mayor parte de los departamentos el nivel de cobertura del saneamiento en el ámbito urbano es superior al del rural, con la excepción de los departamentos de Santa Cruz, Beni y Pando.
- A nivel nacional los porcentajes de cobertura en los ámbitos urbano y rural se sitúan en el 69,4% y el 44,8%, respectivamente.

En lo referente al número de PTAR construidas en el país, de acuerdo con los datos del Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (MMAyA, 2017), este número se eleva a 219 instalaciones de tratamiento, que se reparten por departamentos de acuerdo a la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Distribución departamental de las PTAR en Bolivia.

Departamento	Nº de PTAR
Beni	6
Cochabamba	45
Chuquisaca	24
La Paz	45
Oruro	13
Pando	1
Potosí	30
Santa Cruz	40
Tarija	15

Atendiendo al reparto de las PTAR existentes por zonas ecológicas, 97 de estas instalaciones se ubican en los Valles, lo que supone el 44,3% del total. Los Llanos cuentan con un total de 66 PTAR (el 30,1%) y, por último, en el Altiplano se localizan 56 instalaciones (el 25,6%).

Del total de plantas de tratamiento existentes, y según los datos del propio inventario, tan sólo 106 (el 50,7%) presentan un estado "bueno" o "regular", dando servicio a un total de 3.006.656 habitantes (el 26,6% de la población total del país). La distribución de estas PTAR por departamentos se muestra en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Población servida por departamentos por las PTAR que presentan un estado bueno o regular.

Departamento	Nº de PTAR	Población servida (habitantes)	Departamento	Nº de PTAR	Población servida (habitantes)
Beni	3	72.882	Pando ¹	1	-
Cochabamba	28	520.638	Potosí	11	17.992
Chuquisaca	6	270.348	Santa Cruz	30	970.428
La Paz	10	692.741	Tarija	11	223.608
Oruro	6	238.019	Total general	106	3.006.656

¹No se cuantifica la población servida por la única PTAR de Pando, Cobija, ya que la misma nunca entró en funcionamiento.

A partir de la información recopilada en la Base Consolidada, que ha servido de base para la redacción del Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (MMAyA, 2017), se ha analizado la distribución de las plantas de tratamiento en las distintas zonas ecológicas y rangos poblacionales del país. Para ello, se han considerado tanto las PTAR que presentan un estado bueno o regular, como aquellas que se encuentran actualmente en construcción.

El análisis recoge también la clasificación de las PTAR de acuerdo a la tecnología de tratamiento que aplican, mostrando los diagramas de flujo que se emplean, que se ordenan según su frecuencia. En concreto, las tecnologías de tratamiento que se han analizado son las que se desarrollan en el Capítulo 7 de la presente guía.

ZONA ECOLÓGICA: ALTIPLANO

Lagunas de Estabilización

Número de PTAR: 11

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
<1.000	1	9,1
1.000 - 2.000	4	36,4
2.000 - 5.000	2	18,2
5.000 - 10.000	1	9,1
> 100.000	1	9,1
Sin datos de la población servida	2	18,1

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas + Lagunas de Maduración (2) ¹
Pretratamiento + Tanque Séptico + Lagunas Facultativas (2)
Lagunas Facultativas Primarias + Lagunas de Maduración (2)
Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas + Filtros Percoladores + Lagunas de Maduración (1)
Tanque Imhoff + Lagunas Facultativas + Lagunas de Maduración (1)
Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas (1)
Lagunas Facultativas Primarias (1)
Lagunas de Oxidación ² (1)

¹El número entre paréntesis muestra la cantidad de PTAR que operan con este diagrama de flujo.

²Se ha respetado la denominación de las tecnologías de tratamiento que aparece en el inventario 2017.

Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)

Número de PTAR: 7

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
< 1.000	2	28,6
1.000 - 2.000	4	57,1
2.000 - 5.000	1	14,3

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Tanque Séptico + FAFA (3)
Pretratamiento + Tanque Séptico + FAFA + Lagunas de Maduración (1)
Pretratamiento + Tanque Imhoff + FAFA (1)
Pretratamiento + FAFA + Humedales Artificiales (1)
Tanque Séptico + FAFA (1)

Humedales Artificiales

Número de PTAR: 1

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
2.000 - 5.000	1	100

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Humedales Artificiales (1)

ZONA ECOLOGICA: LOS VALLES

Lagunas de Estabilización

Número de PTAR: 13

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
< 1.000	3	21,4
1.000 - 2.000	2	14,3
2.000 - 5.000	2	21,4
5.000 - 10.000	2	14,3
10.000 - 50.000	1	7,1
> 100.000	2	14,3
Sin datos de la población servida	1	7,1

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas + Lagunas de Maduración (3)

Pretratamiento + Lagunas Anaerobias (2)

Pretratamiento + Tanque Séptico + Lagunas Facultativas + Lagunas de Maduración (1)

Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas (1)

Pretratamiento + Tanque Imhoff + Lagunas Facultativas (1)

Pretratamiento + Lagunas Facultativas Primarias + Lagunas Secundarias (1)

Pretratamiento + Lagunas Facultativas Primarias (1)

Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas + Lagunas de Maduración (1)

Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas (1)

Lagunas Facultativas Primarias (1)

Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)

Número de PTAR: 10

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
< 1.000	1	10,0
1.000 - 2.000	3	30,0
2.000 - 5.000	4	40,0
Sin datos de la población servida	2	20,0

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Tanque Imhoff + FAFA (4)
Pretratamiento + Tanques Sedimentadores ¹ + FAFA (2)
Pretratamiento + Tanque Imhoff + FAFA + Lagunas de Maduración (1)
Pretratamiento + Tanque Séptico + FAFA + Lagunas de Maduración (1)
Pretratamiento + Tanque Séptico + FAFA (1)
Sedimentador + Tanque Imhoff + FAFA (1)

¹Se ha respetado la denominación de las tecnologías de tratamiento que aparece en la Base Consolidada.

Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA/RALF)

Número de PTAR: 4

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
2.000 - 5.000	2	50,0
5.000 - 10.000	1	25,0
10.000 - 50.000	1	25,0

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + RAFA + Filtros Biológicos ¹ + Lagunas de Maduración (1)
Pretratamiento + RAFA + Humedales Artificiales (1)
Pretratamiento + RAFA + Lagunas Facultativas (1)
Pretratamiento + RALF + Lagunas de Maduración (1)

¹Se ha respetado la denominación de las tecnologías de tratamiento que aparece en la Base Consolidada.

Filtros Percoladores

Número de PTAR: 2

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
50.000 - 100.000	1	50,0
> 100.00	1	50,0

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Tanque Imhoff + Filtros Percoladores + Lagunas de Maduración (1)
Pretratamiento + Decantación Primaria + Filtros Percoladores + Decantación Secundaria (1)

Lombrifiltros

Número de PTAR: 2

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
1.000 - 2.000	1	50%
2.000 - 5.000	1	50%

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Lombrifiltros + Radiación UV (2)

Humedales Artificiales

Número de PTAR: 1

Reparto por rango poblacional: no se dispone de información.

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Tanque Séptico + Humedales Artificiales (1)
--

ZONA ECOLÓGICA: LOS LLANOS

Lagunas de Estabilización

Número de PTAR: 31

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
< 1.000	1	3,2
1.000 - 2.000	2	6,4
2.000 - 5.000	5	16,1
5.000 - 10.000	9	29,0
10.000 - 50.000	9	29,0
> 100.000	5	16,1

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas + Lagunas de Maduración (15)
Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas (5)
Pretratamiento + Lagunas Facultativas Primarias + Lagunas de Maduración (2)
Pretratamiento + Lagunas Facultativas Primarias (2)
Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas (2)
Pretratamiento + Tanque Imhoff + Lagunas Facultativas (1)
Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Lagunas de Maduración (1)
Pretratamiento + RAFA + Lagunas Facultativas (1)
Pretratamiento + FAFA + Lagunas Facultativas (1)
Pretratamiento + Digestores¹ + Lagunas Facultativas (1)

¹Se ha respetado la denominación de las tecnologías de tratamiento que aparece en la Base Consolidada.

Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)

Número de PTAR: 6

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
1.000 - 2.000	3	50,0
2.000 - 5.000	1	16,7
10.000 - 50.000	2	33,3

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Tanque Séptico + FAFA (5)
Pretratamiento + Tanque Séptico + FAFA + Lagunas de Maduración (1)

Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA/RALF)

Número de PTAR: 9

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
< 1.000	1	11,1
1.000 - 2.000	1	11,1
2.000 - 5.000	2	22,2
10.000 - 50.000	5	55,5

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + RAFA + Lagunas de Maduración (2)
Pretratamiento + RALF + Lagunas de Maduración (4)
Pretratamiento + RAFA + Lagunas Facultativas + Humedales Artificiales (1)
Pretratamiento + RAFA + Lagunas Facultativas (1)
RAFA + Sedimentación (1)

Lombrifiltros

Número de PTAR: 3

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
2.000 - 5.000	3	100%

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Lombrifiltros + Radiación UV (3)

Humedales Artificiales

Número de PTAR: 1

Reparto por rango poblacional:

Población (habitantes)	Número de instalaciones	Porcentaje respecto al total (%)
< 1.000	1	100%

Diagramas de flujo implantados:

Pretratamiento + Cámara de Gravas¹ + Tanque Séptico + Humedales Artificiales (1)

¹Se ha respetado la denominación de las tecnologías de tratamiento que aparece en la Base Consolidada.

A modo de resumen, la Tabla 2.11 recoge la distribución de tecnologías en las PTAR analizadas y su reparto por zonas ecológicas, respectivamente.

Tabla 2.11. Distribución de las PTAR por tipos de tecnologías y zonas ecológicas.

	Altiplano	Valles	Llanos	Número de instalaciones
Lagunas de Estabilización	11	13	31	55
Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)	7	4	6	17
Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA/RALF)	-	4	9	13
Lombrifiltros	-	2	3	5
Humedales Artificiales	1	1	2	4
Filtros Percoladores	-	2	-	2

Se observa un gran predominio de las Lagunas de Estabilización, seguidas de los tratamientos anaerobios, y una muy escasa presencia de los tratamientos intensivos de tipo aerobio.

Cabe destacar la presencia de los FAFA en el Altiplano, donde las bajas temperaturas reinantes no aconsejarían la construcción de tratamientos anaerobios. De hecho, en esta zona ecológica no se cuenta con reactores RAFA/RALF.

2.2.6 Gestión de los residuos

La gestión de residuos sólidos urbanos tiene una influencia notoria en el servicio de saneamiento, ya que en situaciones en las que el servicio de recolección de residuos sea deficiente, es muy probable que los residuos acaben en la red de alcantarillado.

En Bolivia la mayor cobertura del servicio de recolección de residuos se da en el área urbana, presentando esta cobertura en las ciudades capitales un porcentaje promedio del 80%, que disminuye al 78% en el caso de los municipios de mayor entidad, para descender al 63% y 42%, en los municipios intermedios y menores, respectivamente.

En la operación de las PTAR se generan una serie de residuos/subproductos que precisan ser gestionados adecuadamente. Entre estos residuos se encuentran los que se extraen de las aguas residuales en la etapa del pretratamiento (objetos de tamaño mediano-grande, arenas y grasas) y, entre los subproductos, principalmente, los lodos resultantes del tratamiento de este tipo de aguas. El destino típico de este tipo de residuos son los rellenos sanitarios. A este respecto, la Tabla 2.13 muestra la distribución en el territorio boliviano de los rellenos sanitarios existentes, junto a su capacidad diaria de recepción de residuos (t/d), a fecha 2015 (VAPSB-DGGIRS, 2016).

Tabla 2.12. Distribución y características de los rellenos sanitarios en Bolivia.

Municipio	Tipo de instalación	Estado	Capacidad (t/d) (t/día)
Tarabuco	Manual	En operación	1,4
Villa Abecia	Manual	En operación	1,4
La Paz	Mecanizado	En operación	570,6
Achacachi	Manual	En operación	4,1
Tiahuanacu	Manual	En operación	1,7
Desaguadero	Manual	Mal operado	1,1
Coroico	Manual	En operación	1,2
Copacabana	Manual	En abandono	3,6
San Pedro de Tiquina	Manual	En abandono	2,6
Sacaba	Mecanizado	En operación	98,3
Pazña	Manual	En abandono	2,2
Antequera	Manual	Mal operado	1,2
Huanuni	Manual	En operación	11,5
Machacamarca	Manual	En abandono	1,3
Uyuni	Semi mecanizado	En operación	10,0
Villazón	Semi mecanizado	En operación	20,0
Santa Cruz de la Sierra	Mecanizado	En operación	1.358,9
Roboré	Manual	En abandono	6,0

En lo referente a la gestión de los lodos que se generan en las PTAR, como se comentó con anterioridad, el RMCH en su artículo 68 establece que: *los fangos o lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales que hayan sido secados en lagunas de evaporación, lechos de secado o por medios mecánicos, serán analizados y en caso de que satisfagan lo establecido para el uso agrícola, deberán ser estabilizados antes de su uso o disposición final, todo bajo control de la Prefectura (actualmente Gobernación).*

En general, en la actualidad no se lleva a cabo una gestión ordenada de los lodos que se generan en las PTAR bolivianas. A este respecto, la ENTAR recoge que: *"la gestión adecuada de lodos en el país es casi nula, ya que sólo el 29% de lodos producidos tiene algún tipo de disposición final, pero no se conoce el grado de estabilización"*.

Otra carencia importante en esta materia está relacionada con la disposición final de los vaciados de los sistemas de tratamiento individuales, dado que actualmente esta actividad no está regulada, ni controlada/supervisada.

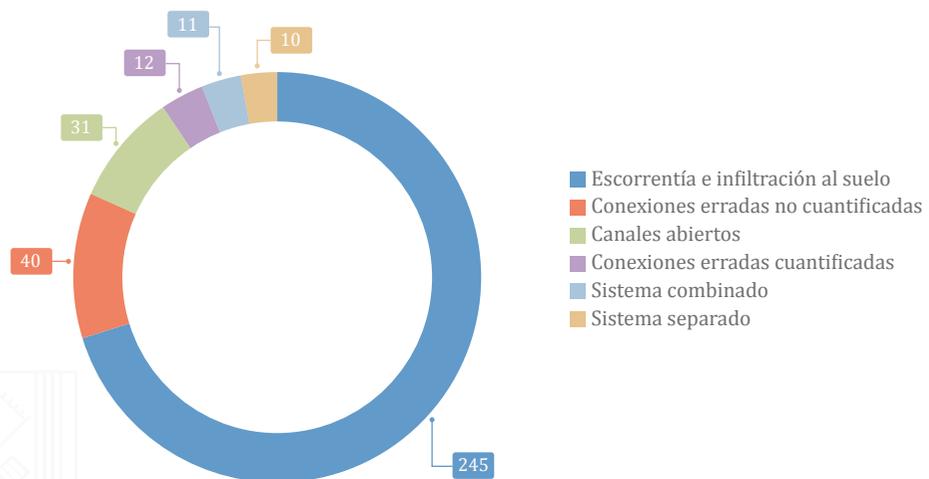
Dentro de los objetivos a alcanzar con la construcción de la ENTAR, en lo referente a los lodos, se encuentra el Resultado 3, que preconiza el uso de los lodos tratados para contribuir al desarrollo de la agricultura orgánica.

2.2.7 Gestión de las aguas pluviales

De acuerdo con la información recopilada en el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, un gran número de poblaciones bolivianas aún no han planificado el drenaje pluvial en sus comunidades y la gran mayoría descarga las aguas pluviales por escorrentía natural e infiltración en el suelo, detectándose además una gran cantidad de comunidades donde se reportan conexiones erradas de las aguas pluviales al sistema de alcantarillado sanitario.

Tal y como se observa en la Figura 2.7:

Figura 2.7. Estado de la recolección de aguas pluviales.



- 245 comunidades (de las 349 visitadas), reportaron que el agua pluvial se evacuaba directamente por escorrentía y posterior infiltración en el suelo, sin tenerse una planificación de drenaje pluvial en las comunidades.
- 40 comunidades reportaron que el agua pluvial se pierde parcialmente por infiltración, pero además se constatan conexiones erradas no cuantificadas.
- 31 comunidades cuentan con canales abiertos para el manejo de aguas pluviales, aunque muchas de ellas tienen además conexiones erradas, en un porcentaje no estimado.
- 12 comunidades reportaron un número aproximado de conexiones erradas, que van desde el 5 al 80%, en el caso más crítico.
- 11 comunidades contaban con un sistema combinado (parcialmente) para la recolección de aguas pluviales.
- 5 comunidades contaban con un sistema separado y otras 5 con un sistema separado parcial.

Referencias bibliográficas

AQUASTAT (2015). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/BOL/indexesp.stm

Aquainteg SRL (2016). Diagnóstico analítico y propositivo de la oferta formativa en el sector agua y medioambiente a nivel nacional.

CAF (2017). Agua y saneamiento en el Estado Plurinacional de Bolivia. Vicepresidencia de Desarrollo Social del Banco de Desarrollo de América Latina.

ENTAR (2019). Estrategia Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales.

Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. (2012). Diagnóstico del agua en las Américas. ISBN: 978-607-9217-04-4

IGM. CNPV-INE (2012). Documento País Bolivia 2012. VII Plan de Acción DIPECHO.

INE (2012). Instituto Nacional de de Estadística, Bolivia.

INE (2014). Instituto Nacional de de Estadística, Bolivia. Revisión 2014.
https://www.ine.gob.bo/subtemas_cuadros/demografia_html/PC20106.htm

MMAyA (2011). Guía Técnica de Diseño y Ejecución de Proyectos de Agua y Saneamiento con Tecnologías Alternativas.

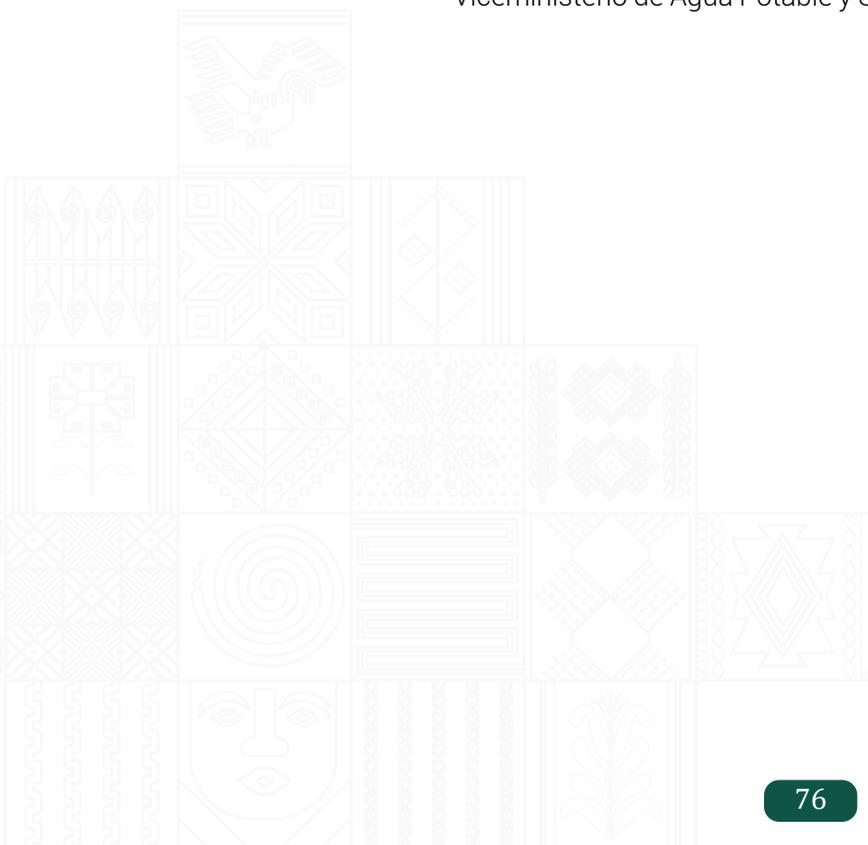
MMAyA (2012). Enfoque sectorial amplio para agua y saneamiento en áreas rurales con población menor a 2.000 habitantes. Tomo 1: Diagnóstico. La Paz.
http://www.unicef.org/bolivia/ESA_Rural_enfoque_agua_saneamiento_tomo_1.

MMAyA (2016). Memoria Institucional 2015-2016. Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

MMAyA (2017) .Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

Senamhi Bolivia. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.www.senami.gob.bo

VAPSB-DGGIRS (2016). Programa plurinacional de gestión integral de residuos sólidos 2017-2020. Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos, Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico.



Capítulo 3

La contaminación de las aguas y su tratamiento



Capítulo 3

La contaminación de las aguas y su tratamiento

En este capítulo se analizan los principales contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas (materia en suspensión, materia orgánica, nutrientes y organismos patógenos), describiendo su origen y presentando sus concentraciones habituales en este tipo de vertidos.

Posteriormente, se definen las aguas residuales urbanas y se especifican los objetivos de su tratamiento, exponiéndose el esquema básico de una PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales), indicándose las distintas etapas que lo componen y analizando los diferentes procesos involucrados en ellas.

Finalmente, se muestran los mecanismos para la eliminación de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas.

En el caso concreto de la eliminación de los nutrientes y de los organismos patógenos, en este capítulo tan sólo se tratan someramente, pues ambas son objeto de un estudio más profundo en los Capítulos 8 y 9, respectivamente, de la presente guía.

3.1 La contaminación de las aguas

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) (1995), que desarrolla la Ley del Medio Ambiente Nº 1333 de abril de 1992, en lo referente a la prevención y control de la contaminación hídrica, define la contaminación de las aguas como: *"alteración de las propiedades fisicoquímicas y/o biológicas del agua por sustancias ajenas, por encima o debajo de los límites máximos o mínimos permisibles, de modo que produzcan daños a la salud del hombre, deteriorando su bienestar o su medio ambiente"*.

Por otro lado, las aguas residuales urbanas pueden definirse como: "*las aguas residuales domésticas, o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial*". De estas tres posibles componentes, la doméstica (fruto del metabolismo humano y de sus actividades domiciliarias) siempre se encontrará presente, mientras que el componente industrial tendrá mayor o menor relevancia en función de la cuantía de los vertidos de actividades industriales en la red de alcantarillado municipal. Por último, el componente pluvial será relevante en los periodos de lluvia y en los casos en los que la red de saneamiento sea de tipo combinado o, cuando siendo del tipo separado, el número de conexiones erradas, o el grado de infiltración, sean elevados.

En relación con las aguas residuales procedentes de actividades industriales, además de posibles sustancias similares a las de las aguas domésticas, en las mismas aparecerán otros contaminantes propios de cada actividad industrial.

En el caso de Bolivia, es frecuente que las aguas residuales industriales, procedentes de los sectores de la obtención de hidrocarburos (gas y petróleo) y minería, afecten y alteren las características de las aguas residuales urbanas.

La industria petrolera genera vertidos tanto en la etapa inicial de extracción, como en la posterior de refinado. Estos vertidos presentan una fuerte contaminación por hidrocarburos, altas concentraciones de materia en suspensión, DBO₅ y DQO, aceites y grasas, fenoles, sulfuros, mercaptanos y metales pesados, presentando valores de pH tanto ácidos como alcalinos (Marín, R., 2016).

En el caso de la minería, la generación de aguas ácidas constituye uno de sus principales vertidos contaminantes. Aparte de la afectación al pH, estas aguas ácidas aportan cantidades importantes de metales pesados (Al, As, Cd, Cu, Fe, Pb, Mn, Ni, Zn) y del anión sulfato (Escalera, R., 2007).

El control de la contaminación por aguas ácidas mineras puede llevarse a cabo en las siguientes tres etapas (Escalera, R., 2007):

- Control del proceso de generación de las aguas ácidas (prevención e inhibición en origen).
- Control de la migración de las aguas ácidas.
- Recolección y tratamiento de las aguas ácidas mineras.

3.2 Los principales contaminantes de las aguas residuales

Los principales contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: materia en suspensión, materia orgánica, nutrientes y organismos patógenos.

Materia en suspensión: está constituida por partículas insolubles presentes en el seno del agua. De acuerdo con el tamaño de estas partículas, se distingue entre las que pueden formar suspensiones estables en el seno del agua en reposo (partículas coloidales y no sedimentables), y las que sólo se encuentran en suspensión cuando el agua se encuentra en movimiento (partículas sedimentables).

También puede definirse la materia en suspensión, desde un punto de vista analítico, como la materia que queda retenida tras hacer pasar las aguas residuales a través de un filtro de 1,5 micras de tamaño de poro.

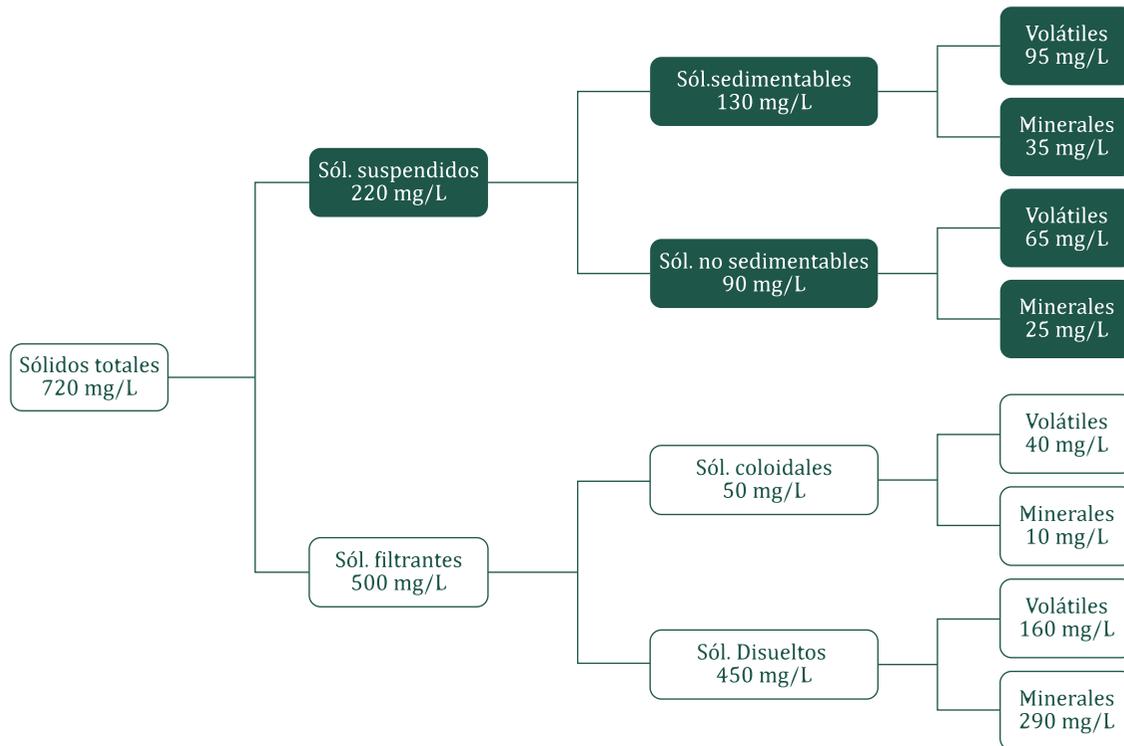
La Figura 3.1 muestra la ubicación de la materia en suspensión dentro de los sólidos totales y cuantifica el reparto de los diferentes tipos de sólidos presentes en un agua residual urbana de contaminación media (*Metcalf&Eddy, 1998 y elaboración propia*).

Materia orgánica: se estima que aproximadamente el 75% de los sólidos en suspensión y el 40% de los sólidos disueltos presentes en las aguas residuales son de naturaleza orgánica, principalmente en forma de proteínas (40-60%), hidratos de carbono (25-50%) y grasas y aceites (10%).

Entre los métodos de medida de la contaminación orgánica se encuentran los que miden la demanda de oxígeno (DBO_5 y DQO), que son los más habituales, y los que determinan el contenido en carbono orgánico (COT).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO_5) evalúa la materia orgánica biodegradable, mediante un proceso bioquímico aerobio, y puede definirse como la cantidad de oxígeno, medida en mg/L, consumida por los microorganismos en el transcurso de 5 días, para la oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual.

Figura 3.1. Distribución de los sólidos en un agua residual de contaminación media.



Por su parte, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mide la cantidad de oxígeno (mg/L) necesaria para la oxidación de los contaminantes presentes en las aguas, mediante reacciones de oxidación química.

La relación DBO_5/DQO de un agua residual dada aporta información muy útil sobre su biodegradabilidad y, por tanto, sobre si es susceptible o no de ser tratada mediante la aplicación de procesos biológicos.

Aguas residuales que presenten valores de la relación DBO_5/DQO iguales o superiores a 0,4, son aguas muy biodegradables, entre 0,2 y 0,4 son aguas biodegradables, mientras que si la relación es inferior a 0,2 las aguas son muy poco biodegradables, por lo que no es adecuado utilizar procesos biológicos para su tratamiento, siendo necesario recurrir, generalmente, a la aplicación de procesos fisicoquímicos. En las aguas residuales típicamente urbanas, la relación DBO_5/DQO suele ser del orden de 0,4.

La relación DBO_5/COT suele ser del orden de 1,4, mientras que la relación DQO/COT se suele situar en 3,1.

Nutrientes: bajo el epígrafe de nutrientes se engloban las distintas formas químicas en las que el nitrógeno y el fósforo se encuentran presentes en las aguas residuales urbanas. Ambos elementos son esenciales para el crecimiento de la biomasa responsable del tratamiento de estas aguas, pero en exceso son los causantes de los fenómenos de eutrofización, que se dan en las masas de agua por un crecimiento desmedido del fitoplancton.

El contenido total en nitrógeno (N_T) se compone de la suma de las concentraciones de las formas químicas siguientes: nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal y nitrógeno en forma de nitratos y nitritos. Mientras que el Nitrógeno Kjeldhal mide la suma de las dos primeras de estas formas y generalmente su concentración está en torno a la quinta parte de la concentración de la DBO_5 .

De las distintas formas en las que se encuentra el nitrógeno en las aguas residuales urbanas, las formas amoniacaes son tóxicas para la vida piscícola.

En lo referente al fósforo, su contenido total (P_T), es la suma de las concentraciones de sus formas orgánica e inorgánica (esta última principalmente como ortofosfatos). El ratio típico DBO_5/P_T suele ser del orden de 27.

Organismos patógenos: proceden de los desechos del metabolismo humano o animal, que están infectados, o que son portadores de una enfermedad determinada.

Entre los principales organismos patógenos presentes en las aguas residuales urbanas se encuentran: bacterias, virus, protozoos y helmintos.

En el caso de las aguas residuales urbanas se recurre al uso de organismos indicadores de contaminación fecal, generalmente *Coliformes (totales y fecales)*, dado que su presencia es más numerosa y fácil de comprobar. La presencia de estos organismos en las aguas residuales se relaciona, de forma indirecta, con la presencia de otros organismos patógenos.

La Tabla 3.1 muestra los parámetros empleados para cuantificar los cuatro tipos de contaminantes descritos, junto a sus concentraciones habituales, según se trate de aguas residuales urbanas de contaminación fuerte, media o débil (Metcalf&Eddy, 1998 y elaboración propia).

Además de los cuatro grupos principales de contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas, existen otros que también merecen atención: los objetos gruesos y las arenas (cuya presencia en las aguas residuales es muy variable), y las grasas que se encuentran en concentraciones de 50-150 mg/L.

Últimamente, también empiezan a requerir atención creciente los denominados contaminantes emergentes. Como contaminante emergente se entiende todo contaminante previamente desconocido, o no reconocido como tal, cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero sí lo es la preocupación por las posibles consecuencias de la misma. La detección de estos contaminantes en el medio hídrico ha sido posible sólo recientemente, gracias al desarrollo de nuevas y más sensibles técnicas analíticas.

Entre los contaminantes emergentes presentes en las aguas residuales urbanas caben destacar: fármacos y sus metabolitos, compuestos perfluorados, hormonas, drogas de abuso y productos de cuidado y de higiene personal.

Tabla 3.1. Características de las aguas residuales urbanas.

	Contaminación fuerte	Contaminación media	Contaminación débil
Sólidos en suspensión (mg/L)	350	220	100
DBO ₅ (mg/L)	400	220	110
DQO (mg/L)	1.000	500	250
COT (mg/L)	290	160	80
N _T (mg N/L)	85	40	20
N _{orgánico} (mg N/L)	35	15	8
N _{amoniaco} (mg N/L)	50	25	12
P _T (mg P/L)	15	8	4
P _{orgánico} (mg P/L)	5	3	1
P _{inorgánico} (mg P/L)	10	5	3
Coliformes totales (NMP/100 mL)	10 ⁷ - 10 ⁹	10 ⁷ - 10 ⁸	10 ⁶ - 10 ⁷
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	10 ⁶ - 10 ⁸	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁵ - 10 ⁶

Materia en suspensión
 Nutrientes
 Materia orgánica
 Organismos patógenos

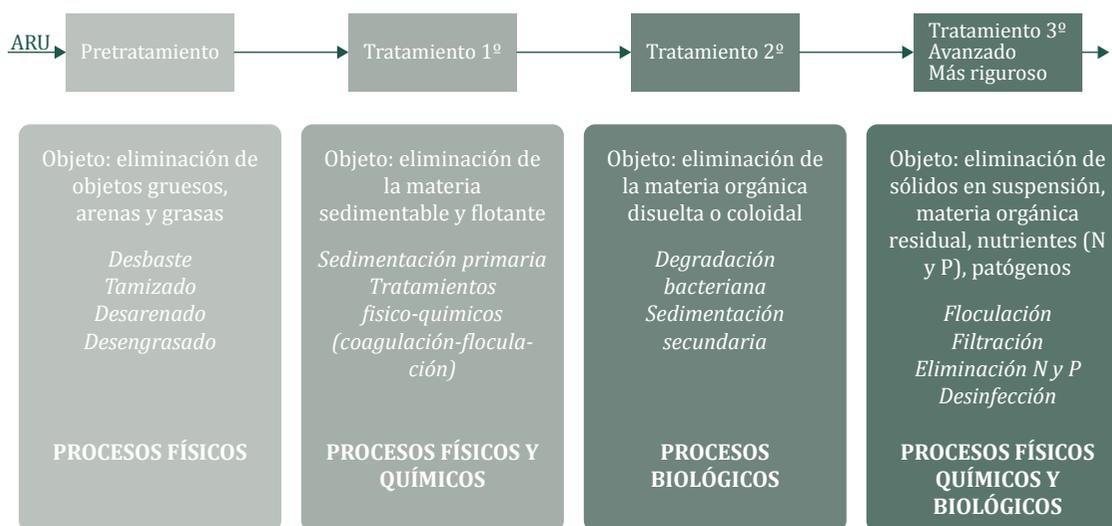
3.3 El tratamiento de las aguas residuales urbanas

El tratamiento de las aguas residuales urbanas tiene como objetivo básico: "transformar el agua residual bruta en un efluente tratado, que cumpla la legislación vigente que permite su vertido a cauce receptor, con un mínimo costo económico y ambiental".

En las PTAR se somete a las aguas residuales a una serie de tratamientos concatenados, que tienen por objeto reducir las concentraciones de los contaminantes englobados en los cuatro grupos básicos, descritos anteriormente, por debajo de los límites de vertido recogidos en la normativa medioambiental vigente.

En la Figura 3.2 se representan las distintas etapas que comprende el tratamiento más común de las aguas residuales, indicándose en cada una de ellas el objeto, procesos y naturaleza de los mismos (elaboración propia).

Figura 3.2. Esquema de las etapas incluidas en el tratamiento de las aguas residuales urbanas.



Se detallan a continuación los mecanismos por los que se eliminan en las PTAR los principales contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas.

3.1.1 Mecanismos de eliminación de los contaminantes

3.3.1.1 Eliminación de la materia en suspensión

La eliminación de la materia en suspensión constituye el objetivo básico de los tratamientos primarios y abarca tanto a la materia en suspensión sedimentable, como a la no sedimentable.

Dentro de estos tratamientos, la Sedimentación Primaria recurre a la acción exclusiva de la gravedad para la separación de los sólidos sedimentables y no sedimentables presentes en las aguas residuales urbanas, alcanzado rendimientos de eliminación del orden del 50-60%. Para mejorar estos rendimientos se recurre a los tratamientos fisicoquímicos que, mediante la adición de reactivos consiguen, además, la eliminación de sólidos coloidales, al incrementar el tamaño de los mismos mediante procesos de coagulación-floculación.

Dentro de los tratamientos primarios se engloban también los procesos de decantación-digestión, en los que los sólidos orgánicos decantados experimentan procesos de degradación anaerobia (Tanques Sépticos y Tanques Imhoff).

En el Capítulo 6 de esta guía se describen con detalle los fundamentos y el diseño de los Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Sedimentadores Primarios.

3.3.1.2 Eliminación de la materia orgánica

La materia orgánica presente en las aguas residuales urbanas, que no se elimina por sedimentación, suele eliminarse mediante procesos biológicos. Esta eliminación constituye el objetivo básico de los tratamientos secundarios.

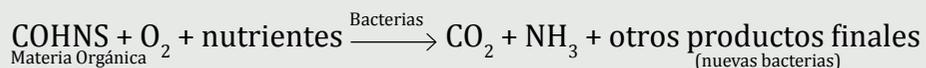
Se distinguen dos tipos de procesos diferenciados para la eliminación de la materia orgánica presente en las aguas residuales: los procesos aerobios y los anaerobios.

Procesos aerobios

Los procesos aerobios buscan generar un cultivo biológico, que permita captar la materia orgánica. Parte de la materia orgánica pasa a formar parte de este cultivo, eliminándose posteriormente por sedimentación (lodos) principalmente y, en menor medida, por oxidación a anhídrido carbónico y agua.

En los procesos de tratamiento aerobio tienen lugar dos tipos de reacciones: las de *oxidación y síntesis* y las de *respiración endógena*.

Oxidación y síntesis



Respiración endógena



Los principales factores que intervienen en estas reacciones biológicas son los siguientes:

- *Características del agua residual*: el grado de biodegradabilidad es un aspecto fundamental para establecer el rendimiento de los procesos biológicos. Como se indicó con anterioridad, relaciones $\text{DBO}_5/\text{DQO} \geq 0,2$ indican una buena biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas.
- *Nutrientes*: los principales nutrientes inorgánicos necesarios para el correcto desarrollo de los microorganismos aerobios son: N, P, S, K, Mg, Ca, Fe, Na y Cl, mientras que entre los nutrientes de menor importancia se encuentran: Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni, V y W.
 - Basándose en una composición media del tejido celular microbiano representada como $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$, se precisa del orden de un 12,4% de nitrógeno (en peso). En lo referente a las necesidades de fósforo, se estima que estas son del orden de una quinta parte de las necesidades de nitrógeno.
 - Los requisitos nitrógeno y el fósforo en los procesos aerobios se estiman en 43 g de N y 6 g de P por cada kg de DBO_5 eliminado.
 - En relación con la DBO_5 de las aguas residuales, las necesarias proporciones de nutrientes, vienen dada por la expresión: $\text{DBO}_5/\text{N}/\text{P} = 100/5/1$.

- Generalmente, las aguas residuales urbanas contienen todos los nutrientes necesarios para el adecuado crecimiento bacteriano y, tan sólo en casos especiales (vertidos industriales importantes), será necesaria su dosificación.
- *Aporte de oxígeno*: para el correcto desarrollo de las reacciones de síntesis y de respiración endógena, en los procesos aerobios es necesario el aporte de oxígeno. En los reactores aerobios se suele trabajar con concentraciones de oxígeno disuelto del orden de 1-2 mg/L.
- *Temperatura*: la velocidad de las reacciones biológicas se incrementa con la temperatura, hasta alcanzar los 37 °C, a partir de la cual la velocidad desciende bruscamente, al producirse la desnaturalización del protoplasma celular. La velocidad de reacción y la temperatura se relacionan de acuerdo con la ecuación:

$$k_T = k_{20} * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

k_T : velocidad de reacción a la temperatura T (T en °C)

k_{20} : velocidad de reacción a 20 °C

θ : coeficiente de actividad-temperatura. Para el proceso de Lodos Activados $\theta = 1,00-1,04$.

T: temperatura (°C)

Este parámetro adquiere gran relevancia a la hora del diseño del tratamiento aerobio de las aguas residuales generadas en las distintas zonas ecológicas que se contemplan en la presente guía (Altiplano, Valles y Llanos), en las que se registran temperaturas muy diferentes.

- *Salinidad*: a partir de 5 g/L de sales en las aguas residuales a tratar comienzan a registrarse distorsiones importantes en los procesos de depuración con biomasa en suspensión. En el caso de procesos con la biomasa adherida la salinidad comienza a afectar a concentraciones superiores a 15 g/L (Ortega, E., 2016).
- *Presencia de tóxicos o inhibidores*: ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas a partir de ciertas concentraciones inhiben, o impiden, el desarrollo de los procesos biológicos aerobios. La Tabla 3.2 muestra los valores

límites de las concentraciones de ciertos contaminantes que inhiben los procesos aerobios de biomasa en suspensión (EPA-430/9-76-017).

Tabla 3.2. Concentraciones de contaminantes que inhiben los procesos aerobios de biomasa en suspensión.

Contaminante	Concentración (mg/L)	Contaminante	Concentración (mg/L)
Amoniaco	480	Cianuro	0,1 - 5
Arsénico	0,1	Hierro	1.000
Boro	0,05 - 100	Plomo	0,1
Cadmio	10 - 100	Manganeso	10
Calcio	2.500	Mercurio	0,1 - 5
Cromo hexavalente	1 - 10	Níquel	1 - 2,5
Cromo trivalente	50	Plata	5
Cobre	1	Zinc	0,08 - 10

En función del tipo de biomasa, los procesos aerobios se clasifican en procesos de biomasa en suspensión y procesos de biomasa fija.

Las tecnologías incluidas en la presente guía, que se analizan con detalle en el Capítulo 7, se engloban en estas dos categorías de procesos aerobios de la siguiente forma:

- Procesos de biomasa en suspensión: *Aireación Extendida y Lagunas Facultativas y de Maduración.*
- Procesos de biomasa fija: *Filtros Percoladores, Contactores Biológicos Rotativos (CBR), Humedales Artificiales y Lombrifiltros.*

Procesos anaerobios

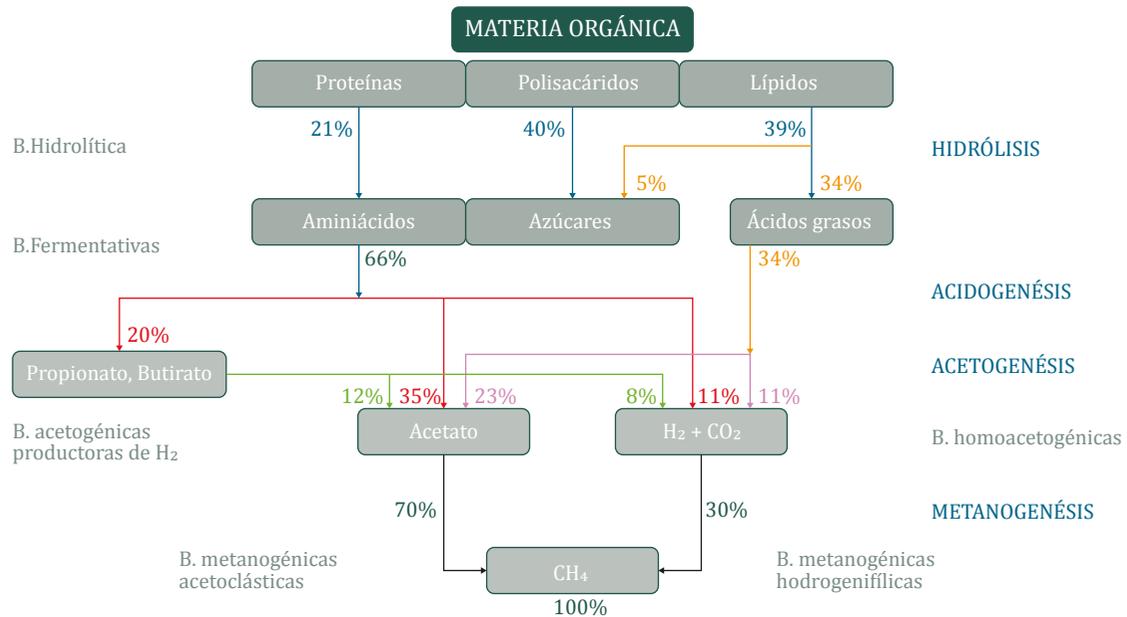
En este tipo de procesos, el principal mecanismo de eliminación de la materia orgánica es su transformación en biogás (metano y anhídrido carbónico, principalmente), que escapa del sistema.

En los procesos de tratamiento anaerobios tiene lugar la reacción:



El proceso transcurre en etapas concatenadas, en las que intervienen distintas especies bacterianas (Figura 3.3).

Figura 3.3. Etapas de los procesos anaerobios.



Estas etapas son (van Haandel y Lettinga, 1994):

- **Hidrólisis:** los principales componentes de las aguas residuales (proteínas, hidratos de carbono, aceites y grasas), se transforman en compuestos orgánicos disueltos de menor peso molecular, gracias a la acción de exoenzimas excretadas por bacterias fermentativas.
- **Acidogénesis:** los productos generados en la etapa anterior son transformados en ácidos grasos volátiles (propiónico, butírico, valérico, etc.).
- **Acetogénesis:** los productos obtenidos de la acidogénesis se transforman en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono (precursores de la formación de metano).
- **Metanogénesis:** a partir principalmente del acetato (70%) y también del CO₂ e H₂ producidos en la anterior etapa, se genera biogás, mezcla fundamentalmente de CH₄ y de CO₂, y de otros gases en menor cuantía (H₂S, H₂, N₂). Esta es la etapa más delicada de la digestión anaerobia, al ser las bacterias metanogénicas las más susceptibles a variaciones

en su entorno (pH, temperatura, carga orgánica, etc.). Ante variaciones acusadas de estos parámetros, la población metanogénica se ve afectada, y al no poderse convertir los ácidos formados en metano, el pH decae, por lo que si no se toman medidas oportunas se produce el colapso del sistema.

Los principales factores que intervienen en las reacciones biológicas anaerobias son los siguientes:

- **Nutrientes:** el correcto desarrollo del proceso requiere tanto de macronutrientes (N, P, S), como de micronutrientes (Fe, Zn, Co, etc.), que suelen encontrarse en cantidades suficientes en las aguas residuales urbanas. La Tabla 3.3 muestra los requisitos de nutrientes (expresados en mg/g de DBO_5), para el correcto desarrollo de los procesos anaerobios (Fernández Polanco, 2016).

Tabla 3.3. Requisitos nutricionales para el desarrollo de los procesos anaerobios.

Nutriente	(mg/g DBO_5)	Nutriente	(mg/g DBO_5)
Macronutrientes		Zinc	0,02
Nitrógeno	5 - 15	Cobre	0,004
Fósforo	0,8 - 2,5	Manganeso	0,004
Azufre	1 - 3	Molibdeno	0,004
Micronutrientes		Selenio	0,004
Hierro	0,03	Wolframio	0,004
Cobalto	0,003	Boro	0,004
Níquel	0,004		

En relación con la DBO_5 de las aguas residuales, las necesarias proporciones de nutrientes vienen dadas por la expresión: $DBO_5/N/P = 100/0,5/0,1$. Se constata que los requisitos de nutrientes en los procesos anaerobios son diez veces menores en el caso de los procesos anaerobios que en los aerobios (100/0,5/0,1 frente a 100/5/1). Estos menores requisitos nutricionales tienen su reflejo en una menor producción de lodos en los procesos anaerobios.

- **Temperatura:** influye tanto en el propio metabolismo de las bacterias, como en la solubilidad de los sustratos. Se distinguen tres rangos de temperatura de operación: psicrófilo (<20 °C), mesófilo (20-40 °C) y termófilo (>40 °C), siendo lo habitual trabajar en los dos primeros.

La mayoría de las bacterias metanogénicas conocidas son mesófilas y tienen una temperatura de operación óptima alrededor de los 35 °C. Al igual que en el caso de los procesos aerobios, tal como se comentó con anterioridad, la temperatura adquiere gran relevancia a la hora del diseño del tratamiento anaerobio de las aguas residuales generadas en las distintas zonas ecológicas que se contemplan en la presente guía (Altiplano, Valles y Llanos), en las que se registran temperaturas muy diferentes y, que el caso de las temperaturas mínimas, si estas son muy bajas, pueden llegar a desaconsejar la aplicación de este tipo de tratamientos.

- *pH*: para que no se inhiba la etapa metanogénica se precisa trabajar en el rango de 6,0-8,0 de pH, siendo el rango óptimo de 6,8-7,5.
- *Alcalinidad*: juega un papel importante al ejercer un efecto tampón frente a las variaciones de pH. Para tener suficiente capacidad tampón, y conseguir que la operación de un digestor anaerobio sea estable, se precisan valores de alcalinidad superiores a 1.000 mg CaCO₃/L, si bien, para tener mayor seguridad se suele trabajar en el intervalo 2.000-5.000 mg CaCO₃/L (Wagner, 2016).

La alcalinidad, junto con el pH y la concentración de ácidos grasos volátiles, constituyen los principales parámetros de control de los reactores anaerobios

- *Presencia de tóxicos o inhibidores*: ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas, a partir de ciertas concentraciones, inhiben el desarrollo de los procesos biológicos anaerobios. Entre estos tóxicos o inhibidores se encuentran:
 - *Oxígeno disuelto*: la entrada de oxígeno en gran cantidad a los reactores anaerobios inhibe el proceso, que vuelve a recuperarse cuando se elimina este oxígeno. La entrada de pequeñas cantidades de oxígeno (por defectos en los bombeos de la alimentación, cierres defectuosos, etc.), no plantean en general problemas, porque los microorganismos que inician la degradación orgánica son facultativos, que van consumiendo previamente este oxígeno.

Para evitar la entrada de oxígeno a los reactores anaerobios, estos suelen trabajar con una sobrepresión de 10-20 cm.c.a.

- **Ácidos grasos volátiles (AGV):** la acumulación de AGV en los reactores anaerobios provoca una caída del pH, con los efectos secundarios correspondientes.

Los AGV en su forma disociada no son tóxicos, pues no pueden atravesar la membrana celular, cosa que sí hacen las formas no disociadas de estos ácidos. Por lo tanto, la acumulación de AGV en los reactores anaerobios provoca el doble efecto negativo de la acidificación y de la toxicidad de los propios ácidos.

Se recomienda que la relación entre la concentración de AGV y la alcalinidad total (AT) no supere el valor de 0,3-0,4, para evitar que se acidifique el reactor.

- **H₂S:** la presencia de sulfuro de hidrógeno, generado por las bacterias sulfatorreductoras, a partir del sulfato presente en la corriente de alimentación a los reactores anaerobios, tiene efectos inhibitorios sobre este tipo de procesos.

De todas las distintas formas en las que se puede encontrar el ion sulfuro en los reactores anaerobios, la forma H₂S es la que provoca problemas de toxicidad e inhibición.

La presencia de sulfatos en las aguas a tratar, más que originar una inhibición formal, lo que da lugar es a una disminución de la actividad metanogénica, debido a la competencia por el sustrato necesario para sintetizar CH₄ o H₂S.

En la práctica, los microorganismos metanogénicos se inhiben cuando la relación DQO/SO₄²⁻ es inferior a 7, pero ello viene influido en gran medida por el pH del medio (*Chernicharo, 2007*).

- **Amoniaco:** el pH juega un papel clave en el equilibrio de disociación amoniaco/amonio, ($NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$). La forma NH₃ ocasiona graves problemas de toxicidad en los reactores anaerobios, por lo que es preciso que este equilibrio esté desplazado a la derecha. Con bacterias bien aclimatadas es posible operar con concentraciones de hasta 4 g NH₄⁺/L (pH = 8) (*Fernández Polanco, 2016*).

- *Otros tóxicos*: otros compuestos tóxicos para los procesos anaerobios son los siguientes (Fernández Polanco, M., 2016):
 - Los cationes alcalinos y alcalinotérreos: no obstante, la tolerancia a ellos de los microorganismos anaerobios es relativamente importante (hasta 10 g/L en el caso del sodio).
 - Los metales pesados: si bien la presencia de sulfuro de hidrógeno provoca la eliminación de estos metales en forma de sulfuros insolubles, la concentración de los mismos no debe superar 0,5 g/L.
 - Los compuestos clorados (CHCl_3 , CCl_4 , CCl_3CH_3 , etc.): son tóxicos incluso a concentraciones de 1 $\mu\text{g/L}$.
 - Los cianuros: son tóxicos a niveles de 1 $\mu\text{g/L}$.

En lo referente a la producción de metano, esta se eleva a 0,35 Nm^3 por cada kilogramo de DQO eliminado, presentando el biogás concentraciones habituales del metano del 55-70%.

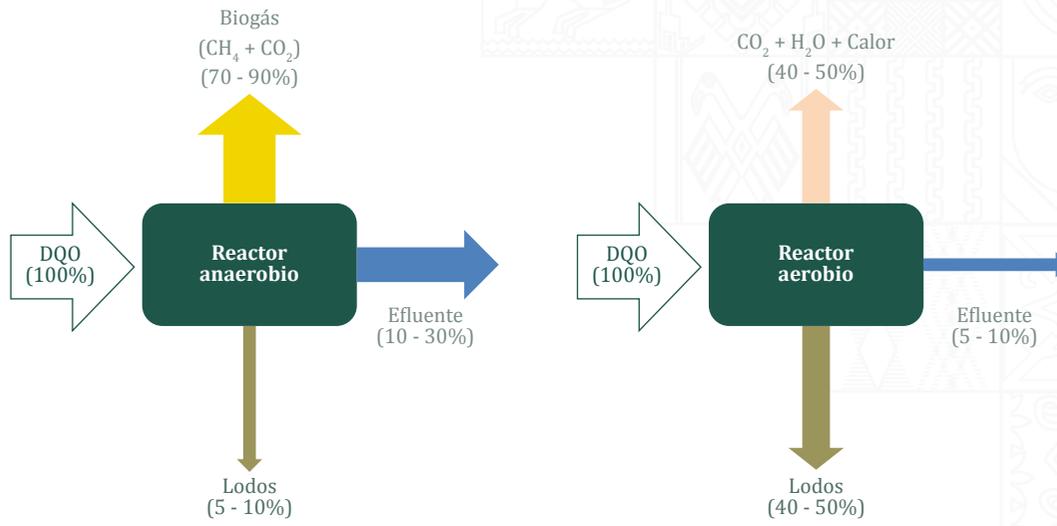
Finalmente, la Figura 3.4 compara el balance de la DQO presente en las aguas residuales urbanas para los procesos anaerobios y aerobios (Wagner, 2016).

Se observa que:

- Los procesos aerobios son más eficientes a la hora de eliminar DQO, llegando al 90-95% de eliminación, frente al 70-90% de los procesos anaerobios.
- La generación de lodos es mucho menor en los procesos anaerobios.
- El balance energético es positivo en los procesos anaerobios.

En el Capítulo 7 de la presente guía se abordan los tratamientos anaerobios de las aguas residuales urbanas, dedicando una especial atención a los *Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA)*, *Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA)* y *Lagunas Anaerobias*.

Figura 3.4. Balance de DQO para los procesos anaerobios y aerobios.



3.3.1.3 Eliminación de nutrientes

Como se comentó con anterioridad, bajo el epígrafe de nutrientes se engloban las distintas formas químicas en las que el nitrógeno y el fósforo se encuentran presentes en las aguas residuales urbanas.

El nitrógeno es uno de los elementos esenciales para la vida, pero en exceso puede ser muy perjudicial, puesto que su vertido en un curso de agua produce los siguientes efectos nocivos:

- En forma amoniacal:
 - Consume oxígeno para pasar al estado oxidado de nitrato. Para ello, cada gramo de N-NH_4 precisa 4,57 g de oxígeno.
 - Es tóxico para la vida piscícola, que es sensible al NH_3 que puede generar el amonio en condiciones alcalinas.
 - Plantea dificultades en el tratamiento de potabilización.

- En forma de nitratos:
 - Contribuye a la eutrofización de las masas de agua.
 - Puede ser perjudicial para la salud humana al pasar al agua potable.

En el caso del fósforo, las investigaciones evidencian que de los principales nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo), es este último el elemento más limitante y, por tanto, controlador de la población fitoplanctónica. Estos estudios se basan en que, mientras para otros nutrientes existen fuentes atmosféricas (el CO_2 y N_2 están presentes en el aire) y mecanismos físicos (turbulencia e intercambio de gases) y biológicos (fijación del nitrógeno por las algas verde-azuladas), para corregir sus deficiencias, el fósforo carece de estas fuentes externas y de estos mecanismos físicos de corrección. Por tanto, los resultados netos son que la población estable de fitoplancton está muy correlacionada con la cantidad total de fósforo presente en el agua. Cualquier vertido rico en este elemento romperá dicha estabilidad y disparará el crecimiento algal, trayendo como consecuencia los problemas de eutrofización en los medios receptores.

Otra acción importante de los fosfatos es la influencia en el transporte y retención de los metales en el agua, debido al fenómeno de complejación (reacciones en las que un metal se une con sustancias denominadas ligandos).

En las PTAR la eliminación de nitrógeno se suele acometer a través de procesos biológicos (pasando por etapas sucesivas de nitrificación y desnitrificación), mientras que para la eliminación de fósforo se recurre tanto a procesos biológicos, como fisicoquímicos.

En el Capítulo 8 de la presente guía se trata con detalle la eliminación de nutrientes en las aguas residuales urbanas.

3.3.1.4 Eliminación de organismos patógenos

Desde el punto de vista de la salud, la desinfección es potencialmente la etapa más importante del tratamiento de las aguas residuales urbanas, ya que sus objetivos son la prevención de enfermedades y proteger los abastecimientos de agua potable, playas, zonas recreativas y zonas de cultivo de especies acuáticas, así como posibilitar el reúso de las aguas tratadas.

El objetivo específico de la desinfección es la eliminación, de forma selectiva, de aquellos microorganismos susceptibles de causar enfermedades. No hablamos pues de esterilización, que hace referencia a la destrucción de la totalidad de los organismos.

Los principales organismos patógenos presentes en las aguas residuales urbanas son: *bacterias*, *virus*, *protozoos* y *helmintos*.

En el campo de tratamiento de las aguas, la desinfección se lleva a cabo, principalmente, mediante el empleo de agentes químicos y físicos, que hacen usos de los siguientes mecanismos de actuación:

- Daño de la pared celular.
- Alteración de la permeabilidad de las células.
- Alteración de la naturaleza del protoplasma.
- Inhibición de la actividad enzimática.

Por su parte, los factores que influyen en la acción de los agentes desinfectantes son:

- Tiempo de contacto desinfectante/agua: para una concentración de desinfectante, la mortalidad de patógenos se incrementa al aumentar el tiempo de contacto.
- Temperatura: el aumento de la temperatura produce un incremento de la tasa de mortalidad.
- Tipo y concentración del agente químico.
- Intensidad y naturaleza del agente físico.
- Número de organismos patógenos: a mayor concentración de organismos patógenos, mayor será el tiempo de contacto necesario para lograr una determinada mortalidad.
- Tipo de organismos patógenos: las células bacterianas de crecimiento viable se destruyen fácilmente, mientras que las esporas bacterianas son extremadamente resistentes.

- Naturaleza del medio líquido en el que se encuentran los organismos patógenos: la materia orgánica presente en el agua a tratar reduce la eficacia de los agentes oxidantes, ya que reaccionan con ellos y, en forma particulada, ofrece protección a los patógenos atrapados en ella.

Un factor importante a tener en cuenta es que la desinfección garantice la calidad sanitaria del agua durante un periodo largo de tiempo. En este sentido, los agentes químicos que posibilitan una cantidad de desinfectante remanente (activo) en las aguas son los más usados. Esto se debe a que es necesario considerar que un agua residual, incluso después de ser tratada, no deja de ser un excelente caldo de cultivo para el desarrollo de microorganismos. Es por ello, que se debe impedir la reactivación biológica tras el proceso de desinfección, y esto sólo lo asegura el uso de un agente químico que permanezca de forma activa en las aguas.

Entre los *agentes químicos* empleados en la desinfección de las aguas residuales urbanas se encuentran los productos oxidantes, como el cloro y sus derivados y el ozono.

Entre los *agentes físicos* para la desinfección de las aguas residuales destaca la radiación ultravioleta (UV). La eficacia de este proceso depende de la penetración de los rayos en el agua. La geometría del contacto entre la fuente emisora de luz UV y el agua es de gran importancia, debido a que la materia en suspensión, las moléculas orgánicas disueltas y el propio agua, además de los propios microorganismos, absorberán parte de la radiación aplicada.

Los rayos UV forman parte del espectro electromagnético y presentan longitudes de onda (λ) comprendidas entre 150 y 400 nm. El rango de las radiaciones UV puede subdividirse de acuerdo con sus efectos biológicos, siendo la comprendida en el rango de corta longitud de onda, entre 200 y 280 nm (UV-C), la que presenta efecto germicida.

En los últimos años se ha potenciado el uso de la radiación UV en la desinfección de aguas residuales tratadas, ya no sólo por su elevado poder bactericida y virucida (ataca al ARN), sino también porque su aplicación no genera compuestos tóxicos.

En el Capítulo 9 de la presente guía se trata con detalle la desinfección de las aguas tratadas en las PTAR.

Referencias bibliográficas

Chernicharo, C. (2007). Anaerobic Reactors. Biological Wastewater Treatment Series, volume four. (IWA). ISBN: 1 84339-164-3.

EPA-430/9-76-017.

Escalera, R. (2007). Contaminación minera en Bolivia: alternativas de remediación de aguas ácidas. Investigación & Desarrollo, No. 7: 83 – 92 (2007). ISSN 1814-6333

Fernández Polanco, M. (2016). Depuración anaerobia de aguas residuales. Tratamiento integrado anaerobio/aerobio. XXXIV Curso "Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras" (CEDEX). Madrid 2016.

Marín, R. (2016). Características de los vertidos de aguas residuales y su incidencia en los sistemas de saneamiento. XXXIV Curso "Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras" (CEDEX). Madrid 2016.

Metcalf&Eddy (1998). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Mc Graw-Hill. ISBN: 84-481-1607-0.

Ortega, E. (2016). Tratamientos biológicos de Fangos Activados: aspectos generales y procesos convencionales. XXXIV Curso "Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras" (CEDEX). Madrid 2016.

van Haandel, A. y Lettinga, G. (1994). Tratamiento Anaeróbico de Esgotos. Editora EPGRAF. Campina Grande, Brasil.

Wagner, W. (2016). Reactores anaeróbicos para el tratamiento de aguas residuales urbanas. XXXIV Curso "Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras" (CEDEX). Madrid 2016.



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

VICEMINISTERIO DE AGUA POTABLE
Y SANEAMIENTO BÁSICO

Autoría:



FUNDACIÓN PÚBLICA ANDALUZA
CENTRO DE LAS NUEVAS
TECNOLOGÍAS DEL AGUA (CENTA)
Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible

Con la colaboración de:



MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

Con el apoyo de:

