Valoración del potencial y requerimientos para el fomento de sistemas descentralizados e infraestructura verde en el manejo del agua en zonas urbanas del Municipio de Puebla

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

El presente trabajo fue elaborado por: Dr. Jürgen Baumann, Consultor y por encargo de la: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable en México (GIZ) En el marco de la cooperación bilateral entre México y Alemania

©Todos los derechos reservados pertenecen a la GIZ. Toda reproducción total o parcial de este documento deberá tener la previa autorización de GIZ.

Contenido

Prólogo 8

I. Estrategias y opciones de aplicación de sistemas descentralizados e infraestructura verde en zonas urbanas dentro de un concepto integrado de la gestión del agua 9

1. Introducción 10
2. La Gestión Integrada de Aguas Urbanas (GIAU) 11
   - 2.1. El ciclo hidrológico en zonas urbanas 13
   - 2.2. El concepto tradicional de la infraestructura hídrica urbana 14
   - 2.3. Elementos de componentes alternativos de infraestructura urbana 15
   - 2.4. Barreras para la adopción de tecnologías innovadoras 17
   - 2.5. Sistemas descentralizados e infraestructura verde para la gestión del agua urbana 18
   - 2.6. Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para los Municipios Mexicanos 20
3. Medidas descentralizadas para el manejo de agua pluvial a diferente escala 22
   - 3.1. Revisión del estado del arte en la implementación de sistemas descentralizados e infraestructura verde en el sector hídrico en zonas urbanas. 25
   - 3.2. Proyectos seleccionados de manejo de agua urbana en México 27
   - 3.3. Programas Municipales para el manejo integrado del agua en zonas urbanas… 29
4. Consideraciones generales 31
5. Referencias 32

II. Guía que establece los requerimientos técnicos y normativos para garantizar una operación sustentable de sistemas descentralizados en zonas urbanas. 35

1. Introducción 36
2. Definición de Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales 37
   - 2.1. Marco de aplicación 38
   - 2.2. Escala de aplicación de sistemas descentralizados 39
   - 2.3. Ventajas de sistemas descentralizados de tratamiento 40
   - 2.4. Clasificación de sistemas descentralizados de acuerdo su capacidad de tratamiento 41
   - 2.5. Características del agua residual a tratar 42
   - 2.6. Calidad requerida del agua residual tratada 44

3. Requerimientos técnicos para sistemas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales 46
3.1. Componentes del tren de tratamiento de sistemas descentralizados 47
3.1.1. Pretratamiento 47
3.1.2. Tratamiento secundario 49
3.1.3. Desinfección del agua residual tratada 53
4. Requerimientos normativos para asegurar la operación sustentable de sistemas descentralizadas de tratamiento 57
4.1. Mecanismos para garantizar la operación de sistemas descentralizados en zonas urbanas y periurbanas. 58
5. Establecer una estrategia municipal para sistemas descentralizados de tratamiento. 61
5.1. Considerar el tratamiento descentralizado y reúso en el marco reglamentario municipal 62
6. Consideraciones generales 65
7. Referencias 66
III. Potencial de reúso para aumentar la eficiencia en el uso del agua y aguas residuales en la zona urbana del Municipio de Puebla. 68
1. Introducción 69
2. Revisión y documentación de algunos sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en el Municipio de Puebla 71
2.1. Documentación de sistemas descentralizados a través de visitas de campo.. 71
2.1.1. Plantas de tratamiento de la BUAP 72
2.1.2. Pequeños sistemas para el tratamiento y reúso de aguas residuales "*in-situ*" .. 74
2.1.3. Planta de tratamiento del Centro comercial Galerías Serdán 76
2.1.4. Planta de tratamiento del CISA 78
2.1.5. Planta de tratamiento del rastro municipal 79
2.2. Conocimiento de PTAR´s descentralizadas instaladas a través de encuestas.. 80
2.5. Información pública de las PTAR´s descentralizadas de Agua de Puebla para… .Todos 82
3. Opciones para el reúso de agua residual tratada en zonas urbanas 83
3.1. Superficie de parques, áreas verdes y camellones en la zona urbana de Puebla. 84
3.2. Riego de áreas verdes y jardines de zonas residenciales 86
3.2.1. Zonas potenciales con alto consumo de agua potable para riego de jardines privados en el municipio de Puebla 86

3.2.2. Requerimiento y consumo de agua para riego en áreas verdes 88
3.3. Nuevos desarrollos viviendas y fraccionamientos en la periferia 90
3.4. Estudio sobre oferta y demanda de agua en la zona urbana de Puebla 92
4. Potencial del reúso de aguas residuales tratadas 95
4.1. Estrategias de aprovechamiento del potencial de reúso 98
4.1.1. Efluente de PTAR´s centralizadas 99
4.1.2. Efluente de sistemas semicentralizados y satelitales 101
4.1.3. Sistemas descentralizados de tratamiento 101
5. Consideraciones generales 103
6. Referencias 105
Anexo 1: Guías y manuales para el manejo descentralizado de aguas pluviales 108
Anexo 2: Fichas técnicas de las PTAR,s BUAP_1, BUAP_2, BUAP_4, Casa Haras, Centro comercial Galerías Serdán 109
Anexo 3: Recomendaciones para el concepto de rehabilitación de la PTAR del rastro municipal 123
A.3.1 Generación de aguas residuales en el proceso del rastro 124
A.3.2 Planta tratadora de aguas residuales (PTAR) 125
A3.3 Comentarios y observaciones 131
A3.4 Recomendaciones de mejoramiento 133
A3.5 Propuesta de concepto de rehabilitación de la PTAR 134

Lista de tablas

Tabla 1: Comparación entre estrategias tradicionales y alternativos en el sector hídrico urbano 12
Tabla 2: Selección de medidas para el manejo de agua pluvial a diferente escala..... 23
Tabla 3: Selección de proyectos emblemáticos de infraestructura descentralizada..... 26
Tabla 4: Proyectos seleccionados de manejo del agua urbana en México..... 27
Tabla 5: Programas municipales para el manejo integrado del agua urbana..... 30
Tabla 6: Escalas de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales..... 42
Tabla 7: Niveles de concentarción de diferentes parametros en el agua residual doméstica 44
Tabla 8: Límites máximos permisibles de contaminantes de acuerdo con la NOM-003-Ecol-1997 45
Tabla 9: Criterios de calidad y requerimientos de procesos de tratamiento para el reúso urbano en Estados Unidos (EPA 2012). 45

Tabla 10: Caracteristicas de operación y calidad del efluente de diferentes tratamientos biológicos 50
Tabla 11: Ventajas y desventajas de diferentes sistemas de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales. 51
Tabla 12: Comparación de diferentes métodos y tecnologías de desinfección. 53
Tabla 13: Componentes del tren de tratamiento y su aptitud para sistemas descentralizados de tratamiento en zonas urbanas y periurbanas. 56
Tabla 14: Contenido de contratos de servicios y garantía de cumplimiento. 59
Tabla 15: Frecuencia y medidas del control propio de pequeñas plantas hasta 50 he. 60
Tabla 16: PTAR´s documentadas durante visitas técnicas. 72
Tabla 17: PTAR´s descentralizados en centro recreativos y universidades 80
Tabla 18: Aplicaciones para el reúso de aguas residuales tratadas en zonas urbanas. 83
Tabla 19: Clasificación preliminar de las áreas verdes del Municipio de Puebla en 2012 84
Tabla 20: Selección de parques y áreas verdes en la zona urbana del municipio de Puebla. 85
Tabla 21: Zonas residenciales 87
Tabla 22: Zonas residenciales y colonias nivel tarifario 5 y 6 87
Tabla 23: Requerimiento y consumo de agua para riego en áreas verdes 89
Tabla 24: Selección de variables para la aplicación del modelo Vensim para el establecimiento de escenarios de demanda y oferta de agua potable en la zona metropolitana de Puebla. 93
Tabla 25: Escenarios para equilibrar demanda y oferta de agua potable de acuerdo con Martínez Austria y Vargas Hidalgo (2017). 94
Tabla 26: Consumo de agua por tipo de uso en el acuífero Valle de Puebla 94
Tabla 27: Caudales de bombeo, perdidas y suminstro de agua 95
Tabla 28: Potencial de reúso en áreas verdes en la zona urbana de Puebla 96
Tabla 29: Caudal de PTAR´s descentralizadas y semicentralizadas para reúso 97

Lista de gráficas

Gráfica 1 (arriba): Comparación del ciclo de agua en terreno natural y zonas urbanas 14
Gráfica 2: Horizonte de planeación y tiempos de la adaptación de infraestructura de agua pluvia de Hamburgo (HSE y BUE, 2015). 18
Gráfica 3: Pasos principales de una metodología para implementar infraestructura verde a macro-escala 21
Gráfica 4: Tres niveles urbanos (edificio, barrio, sección alcantarillado) para la implementación de medidas para la gestión de agua pluvial. 22
Gráfica 5: Esquema hidráulico del proyecto Chapultepec (Conagua, 2018) 28
Gráfica 6: Comparación entre el sistema centralizado y sistemas descentralizados a diferente escala (lote, clúster y desarrollos urbanos) 38
Gráfica 7: Subsistemas descentralizados de tratamiento (Conagua, 2015) 40

Gráfica 8: Sustancias y contaminantes del agua residual cruda 43
Gráfica 9: Tanque séptico 47
Gráfica 10: Tanque multicámara (sistema Borda) 48
Gráfica 11: Tanque Imhoff 48
Gráfica 12: Tren de tratamiento de la PTAR del CISA 78

Lista de fotografías

Foto 1a – 1b: Zona agrícola y zona urbana en la cuenca del río Atoyac, Puebla..... 14
Foto 2: PTAR Parque Ecológico en la ciudad de Durango 39
Foto 3: Agua residual cruda y tratada biológicamente 43
Foto 4: Sistema descentralizado multibarrera en Tepepan, Ciudad de México..... 46
Foto 5: Sistema descentralizado de lodos activados SBR 49
Foto 6: Humedal artificial de flujo vertical de doble paso. 51
Foto 7: Centro de ensayo y prueba de pequeñas plantas de tratamiento en EU 57
Foto 8a – 8b: Planta de tratamiento de Casas BUAP (BUAP_2). 73
Foto 9a – 9d: Planta de tratamiento complejo universitario BUAP_3 74
Foto 10: PTAR Escuela de Artes BUAP 74
Foto 11a – 11c: PTAR Mira Atoyac 75
Foto 12: PTAR Casa particular Ciudad ecológica Haras con PTAR 76
Foto 13: Esquema del sistema de tratamiento Centro Comercial Galerías Serdán 77
Foto 14: Edificio del CISA y efluente de la PTAR piloto 79
Foto 15: PTAR del rastro municipal 79
Foto 16a – 16f: Centros con propios sistemas de tratamiento de aguas residuales sanitarias. 81
Foto 17a – 17c: Fraccionamiento La Vvista con PTAR a la orilla del río Atoyac. 81
Foto 18a – 18b: Fraccionamiento Galaxia La Calera y ubicación de su PTAR 82
Foto 19a – 19b: Fraccionamiento Bosques de Chapultepec y ubicación de su PTAR ... 82
Foto 20: Fraccionamiento de nivel tarifaria 6. 87
Foto 21: Dieciseis zonas de nivel tarifario 5 y 6 en la zona urbana de Puebla. 90
Foto 22: Zona de desarrollo Lomas de Angelopolis 3 91
Foto 23: Desarrollo Punta Cascatta con amplio parque de áreas verdes y lagos 91
Foto 24 Fraccionamientos Jardines de la Montaña en la periferia 92
Foto 25a – 25b: Suministro de agua residual tratada de las PTAR´s Galaxia La Calera y Bosques de Chapultepec al Parque Estatal Flor del Bosque. 98
Foto 26a – 26c: PTAR Ecoparque y zonas de reúso 98
Foto 27a – 27d: Suministro de agua potable y agua residual tratada para riego..... 99
Foto 28a – 28d: Zonas propuestas para el reúso de aguas residuales tratadas. Izquierda PTAR Atoyac Sur y PTAR Barranca El Conde, arriba derecha PTAR San Francisco, abajo derecha PTAR Alseseca Sur. 100

Prólogo

En apoyo a las actividades de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Sustentabilidad (SDUS) del Municipio de Puebla para la implementación del Plan Rector de Saneamiento del río Atoyac, la Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable en México (GIZ) encargó al Programa de Gestión Ambiental Urbano Industrial (PGAUI II) el estudio sobre la "*Valoración del potencial y requerimientos para el fomento de sistemas descentralizados e infraestructura verde en el manejo del agua en zonas urbanas del Municipio de Puebla*", que consiste en tres partes, cada una con un enfoque temático específico, y los cuales pueden utilizarse de manera independiente:

■ Propuesta de estrategias y opciones de aplicación de sistemas descentralizados e infraestructura verde en zonas urbanas dentro de un concepto integrado de la gestión del agua urbana.

■ Guía que establece los requerimientos técnicos y normativos para garantizar una operación sustentable de sistemas descentralizados en zonas urbanas.

■ Potencial de reúso para aumentar la eficiencia en el uso del agua y aguas residuales en la zona urbana del Municipio de Puebla.

En la primera parte del trabajo se hace énfasis en las estrategias y opciones de aplicación de sistemas descentralizados dentro de un concepto integrado de la gestión del agua urbana. Se presenta una revisión del estado del arte en la implementación de proyectos y programas de infraestructura verde en el sector hídrico, y se complementa con la evaluación y presentación de tecnologías descentralizadas e infraestructura verde para el manejo del agua y aguas residuales en zonas urbanas.

La segunda parte se deriva de una revisión sobre la consideración de sistemas descentralizados de tratamiento en el marco técnico normativo en México, y de elementos claves que se tomaron en cuenta en la guía para sistemas descentralizados en zonas urbanas, valorando las condiciones específicas en México. También se hace énfasis en las experiencias internacionales con sistemas descentralizados de tratamiento, destacando su papel importante dentro de las diferentes estrategias nacionales de saneamiento, en el análisis de los marcos normativos y los requisitos de certificación y aprobación de sistemas descentralizados en Europa con especial énfasis en Alemania y Estados Unidos.

La tercera parte está enfocada específicamente a la situación del Municipio de Puebla y la zona metropolitana, con la documentación de algunos sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales existentes en la zona, así como al análisis del potencial de reúso como una componente importante dentro de la gestión integrada de aguas urbanas

Parte I

I. Estrategias y opciones de aplicación de sistemas descentralizados e infraestructura verde en zonas urbanas dentro de un concepto integrado de la gestión del agua

1. Introducción

El rápido crecimiento de la población urbana es una tendencia a nivel global, que implica enormes retos sociales, económicos, administrativos y de planeación para el uso sustentable de los recursos y para garantizar el bienestar de la gente en las urbes.

Para el año 2050 se espera que la población de México alcance los 152 millones de habitantes, de los cuales 134 vivirán en centros urbanos y la mayoría en las grandes ciudades y zonas metropolitanas, principalmente en la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Puebla, Querétaro, Toluca, Tijuana y en la zona fronteriza de Tamaulipas (Martínez Austria y Vargas Hidalgo, 2016).

En la mayoría de las ciudades, la presión sobre el recurso hídrico ya es grande, lo que se refleja en una sobreexplotación de los acuíferos, así como en deficiencias en los servicios de agua y saneamiento.

De acuerdo con el WWF (2016) queda una brecha corta de tiempo para tomar decisiones sobre el camino de las ciudades hacia el futuro y las medidas adecuadas para la adaptación a un entorno y un clima cambiante. En este contexto, uno de los desafíos es la búsqueda de estrategias adecuadas para garantizar la seguridad hídrica en las zonas metropolitanas. Por ejemplo, basado en un detallado análisis sobre la situación del agua en el Valle de México, el Banco Mundial (2013) propuso un "*camino verde*" que entre otro hace énfasis en el concepto de la *gestión integral de aguas urbanas* (GIAU), reconociendo el potencial de beneficio mutuo de abordar la gestión del agua y del desarrollo urbano coordinadamente.

En el caso del Valle de México el Banco Mundial señala, entre otras, las oportunidades ofrecidas por:

i) el aprovechamiento de aguas pluviales en nuevas urbanizaciones y la limitación del consumo de agua;

ii) la integración de la protección de las cuencas y áreas de recargas en la planificación urbana.

iii) la planificación conjunta de espacios verdes recreativos y plantas de tratamiento de aguas residuales para facilitar el reúso.

iv) la revalorización de los cuerpos de agua existentes tanto como elementos estructurales urbanos, como de medidas de control de inundación o recarga de acuíferos, y

v) la inclusión en los planes de desarrollo urbano de una visión integral del ciclo urbano del agua, incluyendo la prestación de los varios servicios públicos relacionados con el agua, así como de los cuerpos de agua existentes o futuros y sus diversas funciones (ecológicas, económicas, de regulación, de recreación etc.).

Desde mediados de la primera década del siglo 21 los conceptos descentralizados para el manejo del agua urbana han sido integrados en varias ciudades alrededor del mundo. Iniciando con proyectos a nivel piloto, hasta el desarrollo y la implementación de programas municipales ambiciosos, con un enfoque a largo plazo para lograr una mejor gestión de las aguas en las zonas urbanas.

En México, aúnque la adopción de los conceptos descentralizados es incipiente, se cuenta con ejemplos exitosos, la mayoría a nivel de proyectos. Los proyectos que destacan se han realizado principalmente en la Ciudad de México y, recientemente en Hermosillo, Sonora. Estas experiencias adquiridas están creando una base prometedora para que los conceptos de sistemas descentralizadas y de infraestructura verde para el manejo de las aguas pluviales se implementen a mayor ritmo en México. Además, dada la problemática de una creciente presión sobre los recursos hídricos en las zonas urbanas, se puede observar un mayor interés en el tema.

La presente consultoría se realiza con el fin de proporcionar bases técnicas, normativas y de planeación para integrar elementos del concepto de la *Gestión Integrada de Aguas Urbanas* (GIAU) en el proceso de la planeación hídrica urbana y el desarrollo urbano sustentable, con enfoque al manejo de las aguas pluviales, a través de infraestructura verde, así como a sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales y su reúso.

2. La Gestión Integrada de Aguas Urbanas (GIAU)

El concepto de la Gestión Integrada de Aguas Urbanas (GIAU), se basa en un enfoque para el diseño del sistema hídrico urbano ante la incertidumbre y las presiones asociadas, tanto por el crecimiento de la población, como por el cambio climático. Se destaca que las ciudades necesitan sistemas hídricos más flexibles que sean capaces de adaptarse a los nuevos retos. Dentro de las estrategias de la GIAU se consideran elementos de sistemas de tratamiento descentralizado y la reutilización de aguas residuales tratadas *in situ*, como un complemento para el tratamiento centralizado (Banco Mundial, 2012).

La GIAU se entiende como la gestión mejorada y eficiente de las distintas cantidades y calidades de agua para diferentes propósitos dentro del área urbana. Esta comprende las fuentes hídricas convencionales y alternativas: agua dulce (aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas de lluvia), aguas residuales y escorrentía de las aguas pluviales dentro del área urbana (Bahri, A. 2012).

Además, debido al aumento de la superficie impermeabilizada en las zonas de crecimiento urbano y periurbano, se muestran los límites para el desalojo de cada vez mayores volúmenes de agua pluvial y de escurrimiento. Esto ha fomentado el desarrollo de alternativas, como los sistemas sustentables de drenaje urbano (SUDS, *siglas en inglés: sustainable urban drainage systems*), diseño urbano sensitivo al agua

(LIUDD, siglas en inglés: low impact urban drainage design), así como la infraestructura verde (GI, *siglas en inglés: green infrastructure*).

La meta principal de todos los conceptos es, reintroducir un estado más natural de las condiciones hidrológicas de la "cuenca urbana". Todos estos conceptos dentro de la GIAU integran un elemento fuerte de implementación de medidas descentralizadas y de un horizonte largo de planeación (Larsen et. al., 2016).

Debido a que la GIAU y las acciones relacionadas como el fomento del reúso de aguas residuales tratadas, y el enfoque a la descentralización, también tienen inmerso un importante aspecto de adaptación a los impactos del cambio climático en zonas urbanas, para mejorar el clima urbano (mitigar las islas de calor), la reducción de escurrimientos durante lluvias torrenciales, así como fomentar la infiltración y renovación de acuíferos.

En la tabla 1 se muestra una comparación del enfoque tradicional con los conceptos de la GIAU respecto a las estrategias para atender los múltiples retos de la gestión del agua y el saneamiento en las zonas urbanas (Banco Mundial, 2012).

Tabla 1: Comparación entre estrategias tradicionales y alternativos en el sector hídrico urbano.

Servicios/ impactos Ciudad	Retos	Enfoque tradicional	Enfoque de la Gestión Integral de Aguas Urbanas
Deficiencias en el suministro de agua	■ Falta de recursos hídricos debido a las condiciones climáticas, uso excesivo o contaminación. ■ Falta de cobertura. ■ Grandes pérdidas de agua.	■ Se identifican y conectan nuevas fuentes al sistema, enfocándose en el tratamiento del agua para problemas de contaminación.	■ Protección de recursos hídricos existentes para mantener la calidad y cantidad del agua. ■ Gestión de demanda: medición individual, uso de incentivos económicos para la reducción del uso de agua. ■ Incentivos por reutilización del agua
Falta de saneamiento	■ Falta de conexión a la red de alcantarillado municipal. ■ Falta de plantas de tratamiento de aguas residuales. ■ Descargas ilegales.	■ Se prefiere la implementación de grandes sistemas centralizados de tratamiento y recolección, sin considerar la eficiencia en la recolección, y con altos costos de implementación y mantenimiento.	■ Consideración de saneamiento *in situ* y tratamiento descentralizado y sistemas de reutilización, como una alternativa para el tratamiento descentralizado. ■ Reciclado de aguas residuales tratadas para su potencial reutilización dentro o fuera de la ciudad. ■ Incentivos para fomentar soluciones a nivel doméstico.
Agua pluvial	■ Excesiva impermeabili-dad con el consecuente incremento de flujos máximos. ■ Mala calidad del agua	■ Canales, tuberías y otras medidas estructurales construidas para eliminar agua de inundación lo más rápido posible;	■ Se prefieren medidas preventivas a medidas correctivas – por ejemplo, medidas en la obra de filtración y prácticas de infraestructura verde. ■ Considerar el manejo de las aguas

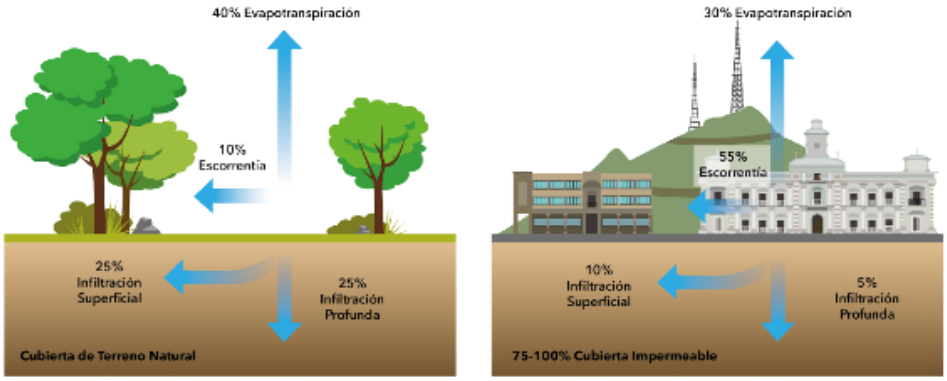
	debido a que la mayor velocidad tiene una mayor capacidad de portar contaminantes, sedimentos y residuos sólidos.	■ Las medidas y estructuras de ingeniería civil son las dominantes.	pluviales como un elemento importante dentro del desarrollo y la planificación urbana.
Desarrollo urbano / Uso del suelo	■ Falta de integración de planificación urbana con problemas medioambientales y sanitarios. ■ Las inversiones necesarias para mejorar los asenta-mientos informales son altas.	■ La planificación urbana no considera impactos en sistemas de aguas pluviales. ■ La planificación urbana no considera la carga en los sistemas de agua y saneamiento en nuevas áreas de desarrollo.	■ Planificación urbana y planificación de espacios verdes coordinadas con la planificación de sistemas hídricos y paisajismo sensibles al clima. ■ Desarrollo de cuerpos de agua como parte del paisaje urbano con diversas funciones (regeneración medioambiental, recreación, prevención de inundaciones, etc.)

2.1. El ciclo hidrológico en zonas urbanas

Es importante entender algunos aspectos básicos sobre la diferencia del ciclo del agua en zonas urbanas en comparación con terrenos naturales, porqué el crecimiento de las zonas urbanas tiene amplias implicaciones en el ciclo hidrológico, que generan grandes retos para el manejo del agua.

Por las amplias superficies selladas e impermeables en las zonas urbanas, el ciclo hidrológico y los flujos de agua y de energía, varían considerablemente del ciclo hidrológico de un paisaje natural. En las zonas urbanas se aumenta drásticamente la escorrentía superficial debido a que las lluvias no pueden infiltrarse a un suelo natural. Como muestra la gráfica 1(IMPLAN Hermosillo 2017), la infiltración se reduce hasta por 35% en comparación al terreno natural, y paralelamente se reduce la evapotranspiración, lo que tiene un efecto importante al clima intraurbano, a través de los flujos de energía.

Por las superficies reducidas de vegetación y áreas verdes en las zonas urbanas, se generan "islas de calor", con un aumento de temperatura y una reducción de humedad ambiental. Debido a que la infraestructura hídrica urbana tradicional está diseñada para eliminar y desalojar rápidamente las precipitaciones y escurrimientos, no se puede aprovechar para crear "estructuras refrescantes" en el entorno urbano.



Gráfica 1 (arriba): Comparación del ciclo de agua en terreno natural y zonas urbanas

Foto 1a – 1b: Zona agrícola y zona urbana en la cuenca del río Atoyac, Puebla

Otro aspecto que se debe considerar es, que los escurrimientos superficiales de zonas urbanas llevan una alta carga de contaminantes y presentan una fuente importante de contaminación difusa que afectan la calidad de las aguas superficiales y bajo ciertas condiciones el agua subterránea.

Por lo tanto, el manejo del agua pluvial y de la escorrentía es una tarea cada vez con más importancia.

2.2. El concepto tradicional de la infraestructura hídrica urbana

De acuerdo con Scheele (2010), existe una discusión creciente sobre sistemas sustentables de agua para centros urbanos, que no solamente contribuyen al mejoramiento del clima urbano, sino que aumentan al mismo tiempo la capacidad de adaptación al cambio climático en las zonas urbanas. En comparación con los sistemas de infraestructura convencional, estos sistemas nuevos consideran elementos descentralizados, modulares y flexibles, integrados en los ecosistemas urbanos locales.

La gestión del agua a lo largo del tiempo se ha basado en sistemas centralizados de suministro de agua y tratamiento de aguas residuales. En zonas urbanas de alta y

mediana densidad poblacional en los países industrializados, los sistemas centralizados han tenido ventajas técnicas y económicas en comparación a los sistemas descentralizados o semi-centralizados, debido a un alto grado de conexión, una alta calidad del agua y la seguridad de suministro.

No obstante, los sistemas tradicionales tienen características de monopolios naturales, con un alto requerimiento de capital, y dependen de una planeación, de un financiamiento y una gestión que tienen un enfoque a largo plazo. Por lo regular tienen una orientación a la oferta, con elevado consumo energético, y al mismo tiempo consideran al agua residual como desecho y no como un recurso valioso.

La presión sobre los sistemas de infraestructura hídrica resulta por el alto requerimiento de inversiones para la rehabilitación, renovación y la ampliación, lo que ha generado una nueva discusión sobre la sustentabilidad de los sistemas convencionales, y sobre el rol del sector ante el tema de adaptación al cambio climático.

Además, el crecimiento poblacional aumenta la demanda y la presión sobre los recursos del agua subterránea y acuíferos, llevando a un creciente desequilibrio entre oferta y demanda de agua potable, con retos particulares para las empresas de agua.

2.3. Elementos de componentes alternativos de infraestructura urbana

El desarrollo tecnológico y el avance de nuevas tecnologías fomentan la discusión sobre alternativas o la combinación de sistemas, abriendo cada vez más "*ventanas de oportunidad*" para la integración de elementos de infraestructura verde y sistemas descentralizados en la gestión del agua urbana.

Los sistemas descentralizados y semicentralizados forman una parte esencial de un nuevo modelo de infraestructura y de un manejo integrado del agua urbana. Otra componente importante es la combinación de sistemas de agua y energía, así como la integración de conceptos de reciclaje y reúso, y sistemas duales para agua potable y otros usos (agua de reúso).

Además, los modelos integrados de gestión de agua a nivel local incluyen el saneamiento, la protección contra inundaciones, y el manejo de agua pluvial, considerando:

- La integración de servicios de ecosistemas en los conceptos de suministro y saneamiento.
- El agua residual como fuente valiosa de recursos (recuperación de energía y nutrientes).
- La minimización de la "huella de carbono".
- El reforzamiento de la participación y un rol activo de los consumidores.

Un nuevo enfoque de la infraestructura urbana del agua incluye una combinación de módulos tecnológicos para el manejo de agua pluvial, agua gris y agua negra, así como de generación de energía, parcialmente de flujos separados de aguas residuales. La combinación resultará en una diversificación del sistema convencional central, con elementos semi-centralizados y descentralizados a escalas inferiores como a nivel de comunidades urbanas, barrios y hasta el nivel más pequeño de casa habitación (Schramm et. al. 2017).

Aún no se cuenta con un cambio de paradigma. No obstante, hay indicios de cuestionar los sistemas convencionales y una erosión incipiente desde la periferia, con la combinación de sistemas centralizados y sistemas semi- o descentralizados.

Además, los nuevos actores en el mercado que sustentan conceptos alternativos, como empresas de tecnologías innovadoras, empresas con consumo eficiente de agua, así como estándares de sustentabilidad, juegan un papel importante para que salgan estos conceptos de sus "*nichos verdes*" (Londres, Nueva York, Berlín etc.).

También en México, la discusión sobre alternativas a los sistemas tradicionales centralizados está creciendo y tomando mayor importancia (De Anda Sánchez, 2017).

Debido a los problemas relacionados con los sistemas convencionales (Conagua, 2014), por parte del BID, así como De La Peña et. al (2013) destacan que los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales deben considerarse como una forma alternativa y a la vez integral para superar los problemas que surgen por los sistemas convencionales y centralizados.

Noyola et. al (2013) argumentan que los nuevos sistemas administrativos, sociales y tecnológicos deberán considerar las limitaciones y posibilidades propias de cada región, con una alta dosis de innovación y adaptación, deslindándose en muchos casos de las soluciones convencionales.

De acuerdo con Massoud et al. (2009), el reto cada vez mayor es, proporcionar servicios de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales de forma confiable y asequible en zonas urbanas, periurbanas y rurales.

2.4. Barreras para la adopción de tecnologías innovadoras

Estudios recientes en Alemania (Schramm et. al., 2017), así como en Inglaterra y Estados Unidos (Speight, 2015) analizaron los obstáculos que existen para la adopción de nuevas tecnologías y la implementación de nuevos conceptos en el sector hídrico urbano por parte de las empresas de agua y saneamiento.

Los resultados mostraron que intervienen un conjunto de diferentes factores, de los cuales destacan:

- Restricciones legales e incertidumbre.
- Dependencia de administraciones políticas.
- Incertidumbre financiera y económica.
- Incertidumbre respecto al diseño ideal de la infraestructura futura.
- Una cultura corporativa que se detiene a implementar conceptos innovadores.
- Conflictos de intereses.
- Barreras mentales, como el miedo de perder poder y competencia.
- Ausencia de una urgencia de promover cambios.

De acuerdo con Speight (2015), uno de los factores importantes que puede fomentar la adopción de nuevas tecnologías y conceptos son ajustes en el marco regulatorio y normativo.

Y O´Donnell et. al. (2017) destacan que independientemente de las ventajas probadas de infraestructura azul-verde (*Blue-Green Infrastructure, BGI**), la implementación está obstaculizada por la incertidumbre de acuerdo con su eficacia hídrica y la calidad de servicios; así como por la falta de confianza de los tomadores de decisión para que acepten nuevos conceptos de infraestructura.

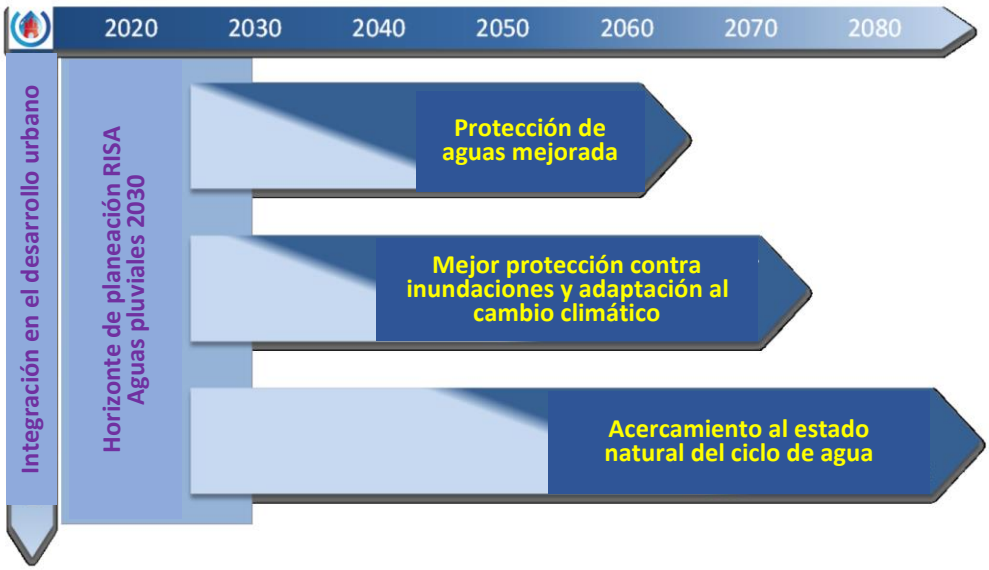
Se ha clasificado una amplia gama de barreras, tales como las tecnológicas, institucionales, legales, políticas, de gestión, monetarias y sociales. No obstante, los obstáculos de índole social-institucional parecen tener una mayor influencia (O´Donnell et. al., 2017) y para lograr una mayor aceptación, se requiere una cooperación y colaboración entre todos los involucrados, comunidades, agencias gubernamentales, académicos y otros actores. Además, se requiere la demostración a través de ejemplos reales, proyectos piloto y comunidades de demostración.

* *BGI (Blue Green Infrastructure) representa un cambio de paradigma que reconoce la importancia y el valor de incluir el papel de la hidrología urbana en la gestión del agua urbana. El "Azul" reconoce la importancia de la fisicalidad del agua en sí, mientras que el "Verde" conecta las funciones hidrológicas urbanas con los sistemas de vegetación en el diseño del paisaje urbano. El BGI resultante tiene beneficios socioeconómicos generales que son mayores que la suma de los componentes individuales.*

2.5. Sistemas descentralizados e infraestructura verde para la gestión del agua urbana

El fomento de sistemas descentralizados y de infraestructura verde para integrar a los sistemas convencionales de infraestructura hídrica requiere crear condiciones que permiten su aceptación tanto a nivel político – administrativo, como a nivel social.

Independientemente de las ventajas que se han mostrado, los procesos de cambio son lentos, y se requiere de una visión y una planeación estratégica a largo plazo para inducir un cambio paulatino con enfoque hacia el futuro. Por ejemplo, el horizonte de planeación de la ciudad de Hamburgo para el manejo de las aguas urbanas llega hasta el 2080 en diferentes etapas con metas ambiciosas (Gráfica 2).



Gráfica 2: Horizonte de planeación y tiempos de la adaptación de infraestructura de agua pluvia de Hamburgo (HSE y BUE, 2015).

De acuerdo con Cook et. al. (2009) los "*Sistemas descentralizados son sistemas que proporcionan servicios para el tratamiento de agua, agua residual y escurrimientos a nivel de lotes, agrupaciones de viviendas (clúster) y desarrollos urbanos (development scale), los cuales utilizan fuentes alternativas de agua, incluyendo agua pluvial, aguas residuales y escurrimientos superficiales*".

Es una definición que integra ampliamente diferentes aspectos de sistemas descentralizados, considerando no solamente el tratamiento descentralizado de aguas residuales con fines de reúso, sino también el manejo del agua pluvial y de las escorrentías a través de estructuras descentralizadas.

De acuerdo con Narbona (2016), la infraestructura verde urbana es "*la red interconectada de elementos naturales y seminaturales como espacios verdes, ríos, bosques y lagos que se intercalan y conectan núcleos urbanos, que mantienen las funciones ecológicas y ofrecen beneficios a la población*".

Respecto al manejo del agua y su relación con la infraestructura verde, la Comisión Europea dentro de su "Estrategia de Infraestructura verde", destaca:

"La infraestructura verde es un instrumento importante, para lograr y mantener ecosistemas hídricos sanos, ofreciendo múltiples beneficios para el sector agua, a través de: proporcionar una regulación de los flujos de agua, la retención del agua para usos posteriores, la purificación y provisión de agua, la protección de especies, fomento de la biodiversidad, mitigación de efectos del cambio climático, así como prevención y mitigación de inundaciones" (European Commission, 2014).

Entre algunas medidas de infraestructura verde respecto al manejo del agua urbana, destacan: Captación de agua, áreas verdes, techos verdes, pavimentos permeables, protección de riberas de ríos, etc. (UNEP, 2014).

Por lo tanto, la infraestructura verde incluye medidas de retención de agua natural, que son medidas multifuncionales para mejorar y preservar el estado de los acuíferos. Además, tienen un enfoque al manejo descentralizado de las aguas pluviales y de los escurrimientos superficiales, con enfoque al aumento de la infiltración y recarga de acuíferos, así como a la reducción de las fuentes difusas de contaminación.

En relación con el potencial de infraestructura verde, se requiere una estrategia para aprovechar el agua pluvial para mejorar el balance hídrico de las zonas metropolitanas y como una medida adicional para garantizar la seguridad hídrica en el futuro. Las medidas de infraestructura verde contribuyen a mejorar esta situación, con múltiples beneficios a la vez, como en el manejo del agua urbana, la renovación de acuíferos, la reducción de la contaminación de aguas superficiales, así como en el mejoramiento del clima urbano.

De acuerdo con la guía de Hamburgo para la gestión y el manejo de las aguas pluviales, la planeación de medidas descentralizadas debe considerar y evaluar diferentes factores para valorar su factibilidad de implementación (Freie und Hansestadt Hamburg, 2006).

En estricto sentido, los elementos verdes son aquellos que garantizan de manera inmediata la evaporación, la infiltración al subsuelo, o el desalojo retrasado del agua pluvial a arroyos o ríos, con los siguientes beneficios:

■ A través de la infiltración del agua pluvial al suelo, se reduce considerablemente el escurrimiento superficial. Al mismo tiempo se aumenta la evapotranspiración, así como la regeneración del agua subterránea. En consecuencia, se mejora el clima local.

■ A través de la renovación del agua subterránea, se reduce el riesgo de secamiento de las aguas superficiales en temporada de estiaje. Además, se reducen las cargas hidráulicas pico, lo que amortigua también el estrés de la flora y fauna acuática. Otro aspecto importante es la reducción del ingreso de contaminantes a las aguas superficiales.

■ En los sistemas de alcantarillado se reducen las inundaciones, lo que al mismo tiempo amortigua el impacto a las aguas superficiales.

2.6. Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para los Municipios Mexicanos

La documentación de diferentes modelos de gestión para la implementación de infraestructura verde a nivel municipal, realizada por IMPLAN Hermosillo y COCEF (2017), muestra los elementos importantes que requiere una estrategia de fomento e implementación de infraestructura verde en el desarrollo urbano sustentable.

Desde el 2014 el municipio de Hermosillo, con apoyo de la COCEF ha impulsado y desarrollado una estrategia municipal para fomentar la implementación de infraestructura verde en la planeación urbana y en el desarrollo de proyectos, con el objetivo de "*mejorar la calidad de vida, competitividad y sustentabilidad mediante la provisión de servicios ecosistémicos, sociales y culturales asociados a una red de Infraestructura Verde (I.V.) que capture, infiltre y aproveche las escorrentías pluviales, disminuya el riesgo de inundaciones y el efecto "isla de calor", y mejore la imagen urbana*" (IMPLAN y COCEF, 2017).

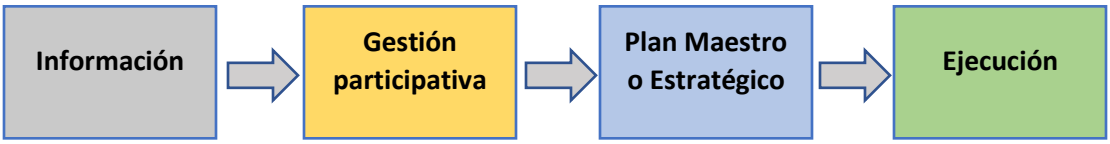
La meta principal es la "*adopción del modelo de "Calle Completa con I.V." para toda nueva vialidad en la ciudad, y la adecuación de las vialidades existentes en un 30% para 2030*".

En 2016 se incorporó la estrategia de infraestructura verde en el Programa de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo (PDMH), la realización de proyectos piloto por parte del municipio, así como la elaboración del "**Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para los Municipios Mexicanos**".

El enfoque de la estrategia es la implementación de infraestructura verde a nivel de macro-escala, y establecer las bases metodológicas en el diseño y planeación de la infraestructura verde a escala de cuencas y subcuencas urbanas, barrios y ciudad, a través de planeación estratégica, gestión participativa y adecuación a condiciones ecosistémicas locales, así como elaborar recomendaciones generales para incorporar a la infraestructura verde en el marco jurídico municipal.

Se destaca que una metodología para implementar infraestructura verde a escala de ciudad debe incorporar todos los elementos necesarios para llevar a cabo la planeación y la programación de acciones que permitan desarrollar las técnicas de infraestructura verde, así como la conservación y reforzamiento de espacios verdes.

La metodología para la implementación de infraestructura verde a macro-escala abarca cuatro pasos principales (gráfica 3):



Gráfica 3: Pasos principales de una metodología para implementar infraestructura verde a macro-escala

- La integración de la información necesaria para un diagnóstico: Características físicas, clima y cambio climático, hidrología, suelos, topografía, infraestructura vial, riesgos naturales y vulnerabilidad, superficies impermeable y permeable, etc.

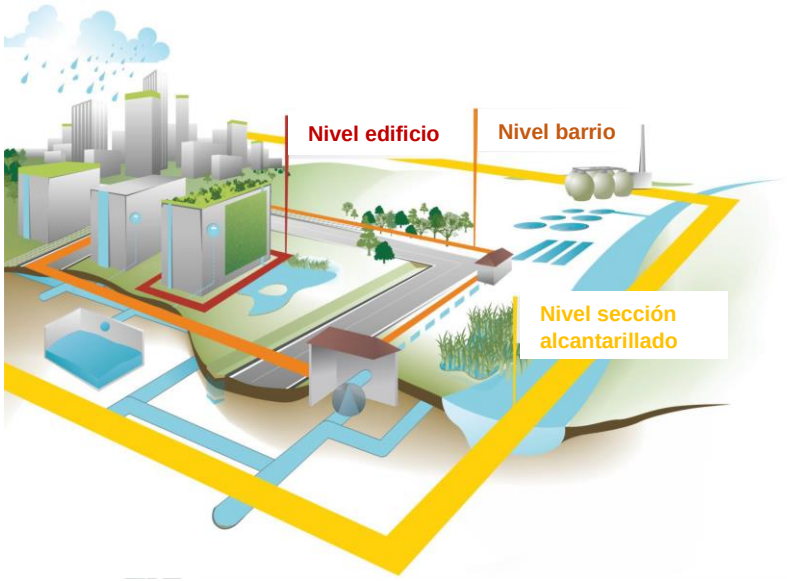
- Gestión participativa: Integrar un grupo de trabajo para la definicion de las estrategias y acciones que se realizaran para la implementacion de I.V; Establecer enlaces de apoyo e integracion del grupo consultivo en las áreas de intervención; Procesar la informacion producto del taller para la identificación de retos y oportunidades de implementación de infraestructura verde; Análisis FODA, entre otros.

- Plan Maestro o Estratégico: Instrumento de planeación normativo y operativo para la implementación de infraestructura verde. Como instrumento normativo debe considerar los plazos de ejecución, instancias involucradas, presupuesto, ubicación por unidad territorial y tipo de infraestructura verde, entre otros.

- Ejecución de obras de infraestructura verde: Determinar los sitios para la ubicación de las acciones demostrativas tácticas (piloto), para cada tipo de técnicas o tipologías urbanas, difusión y fomentar la apropiación por parte de la sociedad, generar un banco de proyectos para su ejecución, y difusión de las técnicas de entre los profesionales especializados, vigilar la correcta aplicación de los criterios de diseño en proyectos y obra ejecutada; seguimiento, monitoreo y evaluación.

3. Medidas descentralizadas para el manejo de agua pluvial a diferente escala

Las medidas de manejo del agua pluvial pueden amortiguar los problemas de zonas urbanas, tal como el impacto por escurrimientos torrenciales e inundaciones, las islas de calor, la contaminación de cuerpos de agua superficial y al mismo tiempo mejoran la diversidad biológica y la calidad de espacios urbanos. No obstante, para aprovechar este potencial, se ha comprobado en dos barrios de Berlín dentro del proyecto KURAS, que la combinación de medidas a diferente escala, desde el edificio y barrio hasta a nivel del sistema de alcantarillado, aumenta considerablemente los efectos positivos tanto para el medio ambiente como para los habitantes (gráfica 4).



Gráfica 4: Tres niveles urbanos (edificio, barrio, sección alcantarillado) para la implementación de medidas para la gestión de agua pluvial.

El concepto abarca un total de 27 medidas para el manejo de aguas pluviales (tabla 11). Cada medida fue evaluada y cuantificada para los mismos parámetros de rendimiento, basados en análisis de literatura, monitoreo y medición directa en los proyectos piloto, así como a través de modelos de simulación. Los parámetros analizados fueron (Matzinger et. al. 2016):

i) potencial de ahorro de agua y energía
ii) mejoramiento de la calidad del paisaje urbano

iii) aumento de la biodiversidad
iv) reducción del efecto de la isla de calor
v) mejoramiento de renovación de aguas subterráneas
vi) reducción de impactos negativos a los cuerpos de agua
vii) uso indirecto de recursos y costos directos

Con los resultados se elaboró la guía "Planeación dirigida a la meta de medidas para la gestión de aguas pluviales – resultados del proyecto KURAS", que incluye también una matriz de medición beneficio/costo para apoyar la definición de mejores combinaciones. Actualmente se está probando su aplicación en un proyecto de investigación enfocado a una planeación urbana sustentable en Berlín (Matzinger et. al. 2017).

Tabla 2: Selección de medidas para el manejo de agua pluvial a diferente escala.

Medidas a nivel de edificios		
Azoteas verdes extensivas e intensivas	Extensivo: Peso de carga entre 90 a 180 kg/m^2(de acuerdo con el sustrato Substratdicke) Intensivo: Peso de carga mayor a 180 kg/m^2	
Fachadas verdes	Se distingue entre sistemas convencionales de plantación a nivel tierra, y sistemas fijadas en la fachada (Living Walls).	
Aprovechamiento de agua pluvial	Reúso dentro de edificios o riego de áreas verdes. Aprovechamiento para sistemas de aire acondicionada	
Medidas a nivel de barrio		

Desellamiento	El desellamiento de superficies impermeables es una medida eficiente para reducir los escurrimientos superficiales y fomentar la infiltración "in situ" del agua pluvial	
Medidas de infiltración	■ Infiltración superficial ■ Cunetas de filtración ■ Filtración en depresión - cuneta combinada ■ Filtración por una cuneta con tubería. ■ Sistemas de depresion-cuneta-bancal (forma especial de depresión-cuneta, "street garden", o rain garden)	
Cuerpos artificiales de agua (lagos y zanjas)	Por lo regular se somete el agua almacenada en lagos artificiales a un tratamiento previo, sea natural o técnico. Para garantizar la separación del sistema de alcantarillado, se combina los cuerpos artificiales de agua parcialmente con sistemas de infiltración.	
Medidas a nivel de sistema de alcantarillado		
Sistemas de limpieza del escurrimiento de calles	Los sistemas descentralizados de limpieza de escurrimientos de calles se enfocan principalmente a la retención de partículas. Se utilizan tecnologías físicas de sedimentación o filtración. Las medidas se pueden aplicar directamnte en la coladera o en pozos de recolección. Su aplicación solamente tiene sentido en el sistema de alcantarillado separado.	
Filtro de suelo de retención	El agua de vertederos de demasías de los sistemas de alcantarrillado combinado contiene a parte del agua pluvial, agua residual que muestra concentraciones altas de DBO o amonio, generando impactos fuertemente negativos en las aguas superficiales.	

3.1. Revisión del estado del arte en la implementación de sistemas descentralizados e infraestructura verde en el sector hídrico en zonas urbanas.

En la última década, se ha fomentado la implementación y la integración de sistemas descentralizados y de infraestructura verde alrededor del mundo en el sector hídrico urbano.

En Europa destacan ejemplos exitosos en Alemania, Holanda, Inglaterra y Suecia entre otros, donde se han integrado conceptos descentralizados y medidas de infraestructura verde en el desarrollo urbano sustentable (p.ej. RISA en Hamburgo), o en proyectos de urbanizaciones nuevas de mayor escala, el manejo descentralizado de aguas residuales (p.ej. proyecto Lanxmeer en Utrecht, Holanda).

En Bejing, China, en 2008 se introdujo dentro de la ley de planeación municipal la obligación a los hoteles internacionales con edificios altos, que traten sus aguas residuales "*in situ*", para reutilizarlo dentro de sus instalaciones. Esto, además, indujo el desarrollo de empresas locales que están atendiendo actualmente el mercado creciente de las tecnologías descentralizadas (Binz et al., 2014 y 2016).

Otro de los múltiples ejemplos de China es el caso de la ciudad de Shenyang (4.6 millones de habitantes), donde se integran en nuevos desarrollos urbanos conceptos descentralizados, como en una zona habitacional satelital, infraestructura verde para el tratamiento de aguas residuales y manejo del agua pluvial.

Múltiples casos y ejemplos exitosos se reportan de Estados Unidos, Australia y Asia, tanto en el tema de tratamiento descentralizado de aguas residuales con fines de reúso y bajo el concepto de "*Zero Liquid Discharge - ZLD*" (Cero descargas de líquido), como en la captación y en el manejo de agua de lluvia y de escurrimientos superficiales.

Los ejemplos a nivel de proyectos emblemáticos son múltiples a nivel mundial, por lo cual se hace referencia a los que han sido reconocidos y discutidos ampliamente en la literatura. Muchos de ellos son a nivel piloto, otros conceptos están adaptados a nivel municipal y por las empresas de agua y saneamiento. En la siguiente tabla, se presenta una selección de varios proyectos emblemáticos realizados en diferentes países, incluyendo ejemplos de México, que recientemente se han implementado (tabla 3).

Tabla 3: Selección de proyectos emblemáticos de infraestructura descentralizada

País	Proyecto	Concepto	Fuente
Alemania	Kronsberg	Barrio ecológico construido sobre 1200 hectáreas en las orillas de la ciudad de Hannover. La ubicación representa la última área disponible en Hanover apto para un proyecto de vivienda a gran escala	GIZ and ICLEI, 2014
	Jenfelder Au, Hamburgo	Tratamiento y aprovechamiento energético de agua residual en zonas urbanas. El concepto técnico llamado *HAMBURG WATER Cycle®*, se está implementando para tratar el agua residual de 770 casas y departamentos y, al mismo tiempo transformar el biogás a través de una microturbina en energía, para suministrar hasta un 50% el consumo energético del barrio.	Hamburg Wasser
Holanda	Leidsche Rijn	Unidad habitacional con nuevos conceptos de suministro de agua y tratamiento de aguas residuales, y manejo de agua pluvial	Scheele, U. (2010)
	Lanxmeer	Zona urbana con nuevos conceptos de suministro de agua y tratamiento de aguas residuales, y manejo de agua pluvial	Scheele, U. (2010)
Japón	Fukuoka City	Sistemas descentralizados de agua y saneamiento	
Estados Unidos	North Kingstown, Rhode Island	Sistemas descentralizados de tratamiento. Análisis de costos mostraron la conveniencia; Las incertidumbres futuras (cambio climático, tecnologías, aspectos económicos, crecimiento poblacional) fueron un factor importante para la decisión del cambio. La empresa de agua y saneamiento desarrollo un software llamado Carmody, con el cual monitorean 10,000 sistema individuales de tratamiento.	Miller, J. (2013)
	Seattle	Concepto de infraestructura verde para reducir el escurrimiento de calles y carreteras, a través de sistemas de infiltración, evaporación, así como a través de "roadside rain gardens". La meta principal es la recarga de acuíferos, así como el mejoramiento del clima urbano local.	Corum, L. 2015

3.2. Proyectos seleccionados de manejo de agua urbana en México

En México destacan algunos proyectos, que se han realizado principalmente en la Ciudad de México a diferente escala. El proyecto "La Quebradora" está creando un parque hidrológico en la Delegación Iztapalapa que beneficia de manera directa a una población de 35,487 habitantes, en un área de 141 ha. Está creando áreas verdes que aumentan la relación de m^2 de espacio abierto por habitante de 0,25m^2 a 1,38m^2. El manejo del agua prevé la captación de agua pluvial para su reutilización (5,600 m^3) y escorrentías para su infiltración al acuífero. Además, un área de 1,410,260 m^2 será beneficiada por mitigación de inundaciones (Perló Cohen, M. y L. Castro Reguera, 2018).

En la colonia San Miguel Chapultepec se han construido jardines de lluvia para el manejo del escurrimiento superficial, con el fin de infiltrar el agua captada hacia al subsuelo. Por parte de la Comisión de Cuenca de los ríos Amecameca y Compañía se reporta el proyecto del fraccionamiento residencial ecológico "Cañadas del Lago" con el establecimiento del Sistema Integral de Abasto y Saneamiento de Agua con Descarga Cero (SIASA-0), para 240 viviendas (tabla 4).

Tabla 4: Proyectos seleccionados de manejo del agua urbana en México

Proyecto	Descripción y fuente
La Quebradora	Primer parque hidrológico de la CDMX en la delegación Iztapalapa http://www.agua.unam.mx/vi-encuentro/assets/pdf/ponencias/castro_loreta.pdf
Proyecto Manejo de escurrimiento de agua pluvial en San Miguel Chapultepec	Construcción de jardines infiltrantes para el manejo del escurrimiento superficial https://www.facebook.com/Xochitl.Galvez.R/videos/1821926121180544/
Tepepan, Xochimilco, Ciudad de México	Condominio Valle Escondido de Tepepan, por falta de drenaje, se conectan 31 casas, con grandes áreas verdes se desarrolla el Sistema Integral de Reciclamiento de Desechos Orgánicos (SIRDO), con separación de aguas grises y Negras y desechos orgánicos (Lahera Ramón, V. 2010).
Cañadas del Lago	Fraccionamiento residencial ecológico, 240 viviendas, Sistema Integral de Abasto y Saneamiento de Agua con Descarga Cero (SIASA-0), separación de aguas grises y de aguas Negras, captación de agua de lluvia. http://comisiondelacuenca.org/infraestructura-sustentable-las-plantas-tratamiento-aguas-residuales/
Proyecto Pluvial y de Recarga de Acuífero Picacho-Ajusco	hidropluviales.com/pozos-contra-inundaciones-agua-del-futuro/ Soluciones hidro pluviales SA de CV

El proyecto más reciente de gran impacto en la Ciudad de México se refiere al Esquema integral de saneamiento de los lagos y reúso del agua residual tratada en el Bosque de Chapultepec, con el objetivo de restituir el volumen y la calidad del agua residual tratada para el uso recreativo de los lagos, el riego de áreas verdes y la recarga al acuífero de la CDMX.

Por su tamaño es un proyecto de tipo "semi-centralizado", con una capacidad de 170 l/s de la planta de tratamiento biológico con remoción de nutrientes, así como 80 l/s de capacidad de la planta de pulimiento, con el fin de alimentar el acuífero de la Ciudad de México. No obstante, el agua residual se deriva de la red de alcantarillado para conducir hasta 100 l/s de agua residual desde la Planta de Bombeo en la calle Montes Camerún a la nueva PTAR Chapultepec. El proyecto tiene altos beneficios ambientales y sociales, con 27,000 habitantes beneficiados directos.

Gráfica 5: Esquema hidráulico del proyecto Chapultepec (Conagua, 2018)

3.3. Programas Municipales para el manejo integrado del agua en zonas urbanas

Con el enfoque a un manejo integrado y sustentable del agua urbana se han desarrollado programas ambiciosos en múltiples ciudades alrededor del mundo, especialmente en Europa, Estados Unidos, Australia y Asia. Principalmente son programas para el manejo de las aguas pluviales, con el fin de retener, disminuir, captar, aprovechar e infiltrar los escurrimientos provocados por las lluvias. Todos los programas tienen un fuerte componente de tecnologías verdes a diferente escala, y a veces la combinación entre tecnologías verdes y grises.

Además, tienen un enfoque multipropósito, que incluye mejorar la seguridad hídrica a través del aprovechamiento de agua pluvial y el enriquecimiento de acuíferos, la reducción y amortiguamiento de inundaciones ante los retos del cambio climático, así como el mejoramiento del clima local urbano, o también la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua superficial.

Por ejemplo, la meta principal del Plan de Acción de un Drenaje Sustentable de Londres se enfoca a la reducción de 1% cada año durante 25 años de los escurrimientos superficiales que lleguen al drenaje municipal, a través de tecnologías descentralizadas, lo que resultaría en una reducción del 25% hasta el 2040. De esta manera, Londres logrará manejar de manera sustentable las aguas de lluvia, mejorando la seguridad hídrica, y generando beneficios para la población, el medio ambiente y la economía (Greater London Authority, 2015).

Otro programa ambicioso se ha implementado en Nueva York. Dentro del *Green Infrastructure Program*, se tiene un componente fuerte de manejo de las aguas pluviales (p.ej. programa raingardens – jardines de lluvia). Por parte del Departamento de Protección Ambiental (DEP), se ha implementado un sistema de información geográfica con la ubicación e información detallada de cada medida construida de infraestructura verde para el manejo de las aguas pluviales. El programa que fue lanzado en 2010 cuenta con una inversión de 1.5 billones de dólares hasta el 2030. Por lo que en 2011 se creó el Departamente de Infraestructura Verde, para su implementación del programa.

Tabla 5: Programas municipales para el manejo integrado del agua urbana.

País	Ciudad	Programa	Responsable
Alemania	Hamburgo	RISA – Adaptación de infraestructura pluvial" Regen-InfraStruktur-Anpassung	http://www.risa-hamburg.de/startseite/
	Berlin	Programa "Almacenes de agua", y "Ciudad esponja" http://www.bwb.de/content/language1/html/1052.php	Agua de Berlín
Holanda	Amsterdam	Amsterdam Rainproof program https://urbanland.uli.org/industry-sectors/infrastructure-transit/every-drop-counts-making-amsterdam-rainproof/	Empresa de agua Waternet
Inglaterra	Lóndres	The Sustainable Drainage Action Plan https://www.london.gov.uk/sites/default/files/lsdap_final.pdf	Ciudad de Londres
EU	Nueva York	Programa raingardens – jardines de lluvia http://www.nyc.gov/html/dep/html/stormwater/rain-gardens.shtml https://www.youtube.com/watch?v=zrhw2cMTpJs https://www.youtube.com/watch?v=ATNy-valPXI	Departamento de Protección Ambiental DEP
	Portland	Innovative Wet Weather Program Green Street Program https://www.portlandoregon.gov/bes/34598 https://www.portlandoregon.gov/bes/45386 https://www.portlandoregon.gov/bes/66562	The City of Portland
Dinamarca	Copenhague	Cloudburst management plan https://international.kk.dk/sites/international.kk.dk/files/uploaded-files/Cloudburst%20Management%20plan%202010.pdf	The City of Copenhague
Australia	Melbourne	Total Watermark program Water Sensitive Urban Design (WSUD) https://www.melbourne.vic.gov.au/SiteCollectionDocuments/wsud-full-guidelines.pdf	Melbourne Water

En el anexo 1 se muestran los link a las guías y manuals para la implementación de medidas de infraestructura verde para el manejo de las aguas pluviales y escurrimientos en zona surbanas, que se han derivado de los diferentes programas municipals.

4. Consideraciones generales

■ La gestión integral del agua urbana (GIAU) ofrece múltiples nuevos enfoques para el manejo del agua ante los retos que enfrentan cada vez más los ayuntamientos y empresas de agua y saneamiento. Entre ellos, el cambio climático con sus impactos al régimen hídrico urbano, el aumento de eventos torrenciales, escurrimientos, y el aumento de la temperatura con su efecto al clima urbano, requiere implementar medidas de adaptación.

■ El concepto tradicional de la infraestructura hídrica urbana tiene la función de desalojar rápidamente los escurrimientos superficiales y aguas residuales, sin ningún aprovechamiento. Sin embargo, ante la necesidad de aprovechar de una manera eficiente los recursos hídricos se deben considerar los escurrimientos y aguas residuales tratadas como fuentes complementarias de agua, y la planeación hídrica urbana debe estar enfocada a la implementación de medidas de captación, retención, almacenamiento, infiltración y aprovechamiento de las aguas pluviales y escurrimientos superficiales.

■ Con el crecimiento de las zonas urbanas se aumentan considerablemente los volúmenes de agua que se deben manejar, sea para el suministro de agua potable, el tratamiento de las aguas residuales y los escurrimientos superficiales que generan enormes volúmenes de agua, por lo que a menudo la capacidad de la infraestructura existente queda rebasada.

■ Además, los costos de la ampliación de la infraestructura son altos, y agregado a los costos de mantenimiento de la infraestructura existente, rebasan muchas veces las capacidades económicas del municipio y de las empresas municipales.

■ En lugar de ampliar y completar las redes de alcantarillado y drenaje a las zonas de crecimiento y periferias de los centros urbanos, se aprovechan los elementos naturales de barrancas, cauces de arroyos y ríos para el desalojo de los escurrimiento y aguas residuales. En este sentido, los ríos contaminados cumplen una función importante para la sociedad.

■ Los obstáculos para introducir nuevos conceptos de infraestructura urbana son fuertes y se basan en diferentes factores. No obstante, para fomentar su aceptación, como la infraestructura verde y sistemas descentralizados, es importante iniciar con proyectos piloto a pequeña escala que muestren la eficiencia, las ventajas ecológicas y económicas, así como la adaptabilidad a las condiciones locales.

■ Como los cambios de un paradigma son lentos, el desarrollo y la implementación de nuevos conceptos debe basarse en una estrategia a largo plazo y considerar diferentes etapas y metas parciales alcanzables.

■ La revisión del estado de arte en la implementación de elementos del concepto de la gestión integral de aguas urbanas, como la infraestructura verde y sistemas descentralizados ha mostrado un fuerte adelanto en múltiples ciudades y regiones del

mundo en comparación a México. Los programas ambiciosos que se han implementado en ciudades importantes tanto en Europa, como en Estados Unidos, Canadá y Asia muestran, que se está viendo un cambio de paradigma en los conceptos y la planeación hídrica urbana.

■ La integración de infraestructura verde para el manejo de las aguas pluviales y escurrimientos, así como elementos descentralizados para el tratamiento y reúso de aguas residuales tratadas hoy en día no son solamente una opción o una alternativa, sino una necesidad para lograr un aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos urbanos.

5. Referencias

Bahri, A. 2009. Managing the other side of the water cycle: Making wastewater an asset. Global Water Partnership (GWP) Technical Committee (TEC) Background Paper No 13. Global Water Partnership, Stockholm.

Banco Mundial (2013). Agua urbana en el Valle de México: ¿Un camino verde para mañana?, pp. 91, México.

Banco Mundial (2012). Gestión Integral de Aguas Urbanas – Una síntesis. Water Partnership Program y Programa de Agua y Saneamiento WSP.

Binz, C., Truffer, B., Coenen, L., 2014. Why space matters in technological innovation systems – Mapping global knowledge dynamics of membrane bioreactor technology. Research Policy 43, 138-155.

Binz, C., Truffer, B., Coenen, L., 2016b. Path creation as a process of resource alignment and anchoring – Industry formation for on-site water recycling in Beijing. Economic Geography 92, 172-200.

Conagua (2014). Diagnóstico del programa U031 operación y mantenimiento en plantas de tratamiento de aguas residuales 2014. México: Comisión Nacional del Agua / Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento / Gerencia de Potabilización y Saneamiento.

Cook, S., G. Tjandraatmadja, A. Ho and A. Sharma (2009). Definition of Decentralized Systems in the South-East Queensland Context. Urban Water Security Research Alliance Technical Report No. 12.

De Anda Sánchez, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. Sociedad y Ambiente, año 5, núm. 14, julio-octubre de 2017, pp. 119-143.

De la Peña, M.E.; Ducci, J., y V. Zamora (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo-Sector de Infraestructura y Medio Ambiente. Nota Técnica # IDB-TN-521, 42 pp.

European Commission (2014). Green Infrastructure and the Water sector.

GIZ and ICLEI (2014). Urban NEXUS Case Study 2014 - 04, Hannover, Germany.

Greater London Authority (2015). London sustainable drainage action plan – draft for public consultation. www.london.gov.uk

HSE y BUE (2015). Strukturplan Regenwasser 2030. Ergebnisbericht des Projektes RISA – RegenInfraStrukturAnpassung. Hamburger Stadtentwässerung AöR (HSE) und Behörde für Umwelt und Energie (BUE). (Plan de estructuras agua pluvial 20130. Informe de resultados del proyecto RISA – Adaptación de estructuras para aguas pluviales).

IMPLAN Hermosillo (2017). Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos. Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo. COCEF/BECC e IMPLAN.

Lahera Ramón, V. (2010). Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuals. Quivera, vol. 12, núm. 2, 2010, pp. 58-69 Universidad Autónoma del Estado de México Toluca, México.

Larsen, T.A., Hoffmann, S., Lüthi, Ch., Truffer, B. and M. Maurer (2016). Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. SCIENCE, Special Section: Urban Planet, Vol. 352, 928-933.

Martínez-Austria, P. F., & Vargas-Hidalgo, A. (2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. Tecnología y Ciencias del Agua, 7(4), 139-154.

Massoud, M., Tarhini, A., & Joumana, N. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. Journal of Environmental Management, 90, 652–659.

Matzinger, A., M. Riechel, C. Remy, H. Schwarzmüller, P. Rouault, M. Schmidt, M. Offermann, C. Strehl, D. Nickel, M. Pallasch, H. Sieker, M. Köhler, D. Kaiser, C. Möller, B. Büter, D. Leßmann, R. von Tils, I. Säumel, L. Pille, A. Winkler, H. Bartel, S. Heise, B. Heinzmann, K. Joswig, M. Rehfeld-Klein, B. Reichmann (2017). Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung. KURAS-Leitfaden.

Matzinger, A. et.al (2016). Quantification of multiple benefits and cost of stormwater management. Novatech 2016.

Miller, J. (2013). Examples of Decentralized Communities. https://glenholm.wordpress.com/2013/01/08/examples-of-decentralized-communities/

Narbona, R. (2016). La infraestructura verde urbana. (http://www.greeninfrastructurezaragoza.com/resource/posters/1-infraestructura-verde-urbana.pdf)

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J.M. y Güereca, L.P. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales - Guía de apoyo para ciudades medianas y pequeñas. Instituto de Ingeniería, UNAM.

O'Donnell, E.C., Lamond, J.E. & C. R. Thorne (2017): Recognizing barriers to implementation of Blue-Green Infrastructure: a Newcastle case study, Urban Water Journal, DOI: 10.1080/1573062X.2017.1279190

Perló Cohen, M. y L. Castro Reguera (2018). Parque hídrico La Quebradora. Propuesta general.

Scheele, U. (2010). Nachhaltige Infrastrukturkonzepte im urbanen Raum: Die Rolle der "urban green infrastructure". netWORKS project.

Schramm, E., H. Kerber, J. H. Trapp, M. Zimmermann and M. Winker (2017): Novel urban water systems in Germany: governance structures to encourage transformation, Urban Water Journal, DOI: 10.1080/1573062X.2017.1293694

Speight, V. L. (2015). Innovation in the water industry: barriers and opportunities for US and UK utilities. WIREs Water 2015, 2:301–313. doi: 10.1002/wat2.1082.

WWF (2016). The Urban Green: https://www.youtube.com/watch?v=o86Ut6kAEMQ

Parte 2

II. Guía que establece los requerimientos técnicos y normativos para garantizar una operación sustentable de sistemas descentralizados en zonas urbanas.

Integración de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en la gestión del agua urbana

1. Introducción

De la misma manera como la infraestructura verde y elementos descenralizados para el manejo de las aguas pluviales y escurrimientos, los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales son un elemento importante dentro del marco de la Gestión Integral del Agua Urbana (GIAU). Debido al crecimiento poblacional de las ciudades y sus periferias y, aunado a los impactos del cambio climático la presión sobre los recursos hídricos está creciendo en múltiples centros urbanos del país. Una de las medidas para aumentar la eficiencia del uso del agua es el reúso de las aguas residuales tratadas en las múltiples aplicaciones que no requieren una calidad de agua potable.

El potencial del reúso en el ámbito urbano se aumenta con la descentralización del tratamiento de las aguas residuales, debido a la cercanía entre fuente y receptor del agua residual tratada.

Reconociendo la importancia del tema, en el borrador del articulado para el proyecto de la iniciativa "Ley General de Aguas" de febrero 2018, se prevé en la propuesta del artículo 228, párrafo VI, "*que corresponde a los consejos municipales: proponer al presidente municipal o a los prestadores de servicios el uso de tecnologías apropiadas para el ahorro del agua, para el aprovechamiento de aguas pluviales y reúso de las residuales, y para sistemas descentralizados de saneamiento*".

Los sistemas descentralizados operan como sistemas aislados o sistemas satelitales, integrados a servicios centralizados. Los principales impulsores para integrar sistemas descentralizados son los crecientes costos de la infraestructura centralizada, impactos ecológicos, así como un aumento de situaciones de escasez de agua y la necesidad de reúso (Sapkota, M. et. al. 2015). El crecimiento de los centros urbanos y periurbanos con una dispersión en la ocupación del territorio, por un lado, requiere altas inversiones en infraestructura y equipamiento para llevar servicios básicos, y al mismo tiempo genera un elevado impacto sobre los recursos naturales y ecosistemas, afectando la calidad ambiental.

De acuerdo con el "World Water Assessment Programme" (WWAP 2017), el reúso de aguas residuales tratadas en zonas urbanas esta rápidamente creciendo a nivel mundial, debido a sus múltiples posibilidades de reutilización lo que da un impulso fuerte a la implementación de sistemas descentralizados.

La guía está estructurada de la siguiente manera: Partiendo de la definición de "sistemas descentralizados", se hace énfasis en los diferentes criterios de aplicación y una clasificación de acuerdo con la capacidad de tratamiento. Luego se enfoca en los requerimientos técnicos de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales, presentando y comparando diferentes tecnologías de tratamiento respecto a sus características de operación y eficiencia, para el cumplimiento con la calidad de agua residual tratada requerida para fines de reúso. Finalmente, se hace énfasis en

los elementos normativos requeridos que puedan garantizar una operación adecuada y sustentable de los sistemas descentralizados implementados.

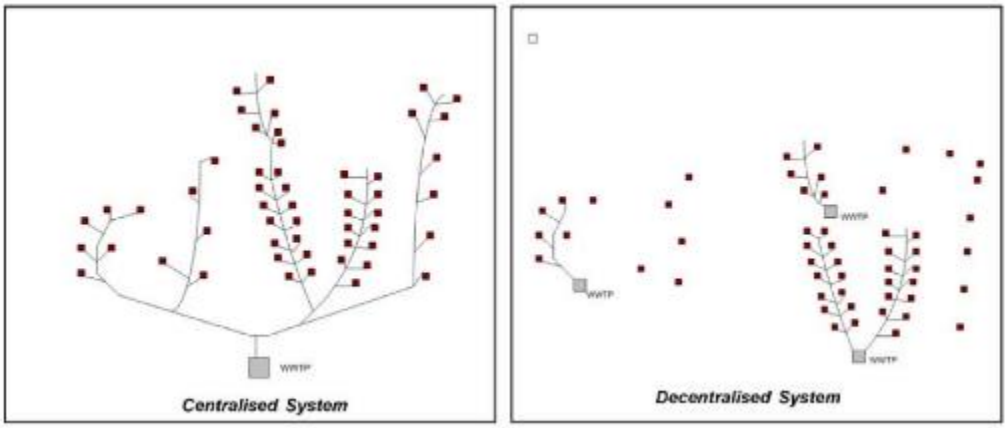
2. Definición de Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales

Los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales son sistemas con las cuales el agua residual es manejada, recolectada, tratada y dispuesta o reusada en o cerca del punto de su generación. Es decir, que son sistemas de manejo de aguas residuales "*in situ*", y se diseñan para diferentes escalas: casa habitación, áreas residenciales, fraccionamientos, edificios públicos, centros comerciales, colonias o barrios y nuevos desarrollos urbanos. Los sistemas descentralizados permiten incrementar la reutilización y el reúso del agua residual tratada, debido a más oportunidades de reúso "*in situ*" (Conagua 2015).

De acuerdo con Crites and Tchobanoglous (1998), "la gestión descentralizada de aguas residuales se puede definir como *la colección, el tratamiento y el desalojo/reúso de aguas residuales de casas individuales, agrupaciones de casas, comunidades aisladas, industrias o instalaciones institucionales y comerciales, así como de barrios, existentes cerca de la fuente de generación*".

Una definición más integral se ha desarrollado por Cook et. al. (2009), para tomar en cuenta las realidades en Australia: "*Sistemas descentralizados son sistemas que proporcionan servicios para el tratamiento de agua, agua residual y escurrimientos a nivel de lotes, agrupaciones de viviendas (clúster) y desarrollos urbanos (development scale), los cuales utilizan fuentes alternativas de agua, incluyendo agua pluvial, aguas residuales y escurrimientos superficiales, basado en un concepto "adecuados para sus fines" (fit for purpose). Estos sistemas se pueden manejar como sistemas independientes o integrados en los sistemas centralizados. Los flujos de agua residual están utilizados por completo o parcialmente en o cerca del sitio de su generación (Gráfica 2).*

Todas las definiciones tienen en común que un tratamiento descentralizado significa que el agua residual se trata en o cerca del lugar de su origen, para posteriormente reusarla, infiltrarla al subsuelo o desalojarla a un receptor natural o artificial.



Gráfica 6: Comparación entre el sistema centralizado y sistemas descentralizados a diferente escala (lote, clúster y desarrollos urbanos)

2.1. Marco de aplicación

Existen múltiples criterios que deben tomarse en cuenta para decidir a favor o en contra de un sistema descentralizado de tratamiento. Entre ellos se encuentran criterios técnicos, ecológicos y económicos. No obstante, las opciones de aplicación de sistemas descentralizados de tratamiento son múltiples y a diferentes niveles. Para resumir, se destacan las siguientes condiciones donde puede ser evaluada la conveniencia de su aplicación:

■ En el caso de que la topografía no permite una conexión a la red de alcantarillado municipal por gravedad, o por la distancia a la red de alcantarillado se dificulta una conexión a corto plazo y/o los costos para la conexión se elevan considerablemente, se debe considerar la instalación de un sistema descentralizado de tratamiento.

■ Para desarrollos nuevos de vivienda sin conexión a la red pública de drenaje.

■ Zonas urbanas, suburbanas o conurbadas que requieren una solución inmediata de su situación sanitaria. Los sistemas descentralizados ofrecen la posibilidad de mejorar significativamente la situación sanitaria en corto tiempo y con una inversión moderada a nivel local.

■ En establecimientos que tienen un alto consumo de agua para aplicaciones de segundo uso, como el riego de áreas verdes, los sistemas descentralizados permiten la sustitución de agua potable por el reúso de las aguas residuales tratadas in situ.

■ Las condiciones del suelo y subsuelo no permiten una infiltración segura de agua residual pretratada, creando un riesgo de contaminación del agua subterránea.

■ Para aumentar la seguridad de suministro. Las zonas urbanas y ciudades con riesgo de escasez de agua, sea temporal o prolongada, están dispuestos a que se restringa o prohíba el uso de agua potable para ciertos usos. El establecimiento de sistemas descentralizados a diferentes niveles desde zonas residenciales, barrios, establecimientos comerciales, puede ser una medida adecuada para amortiguar y mitigar este riesgo, porque se dispone de una fuente segura de agua.

■ Para proporcionar agua residual tratada para el riego de parques y lagos artificiales en centros urbanos. Existen varios ejemplos en México donde se redirecciona un cierto volumen de caudal de agua residual del alcantarillado público a pequeñas plantas descentralizadas de tratamiento para usos recreativos y para mejorar la calidad ambiental dentro de centros urbanos (foto 1).

Foto 2: PTAR Parque Ecológico en la ciudad de Durango

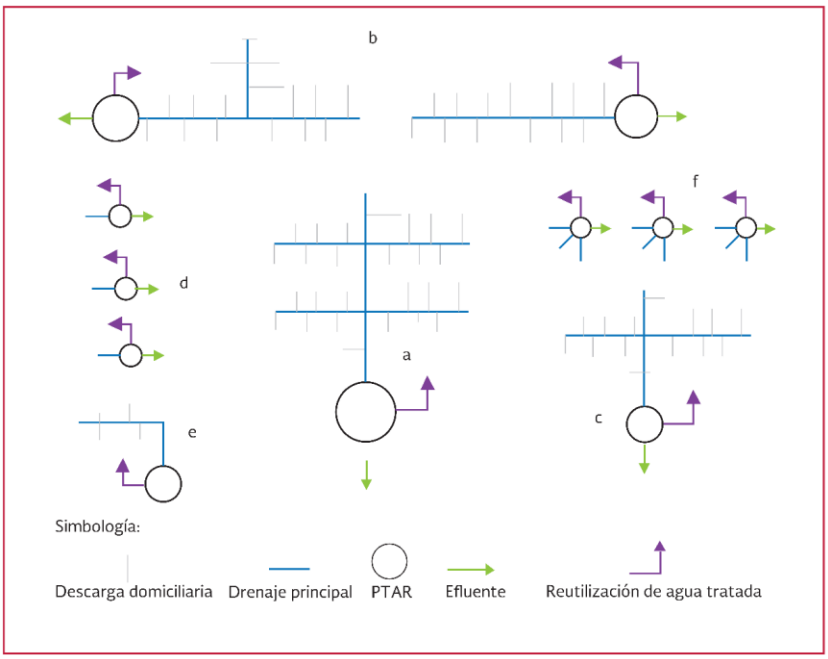
2.2. Escala de aplicación de sistemas descentralizados

Basado en las diferentes definiciones, criterios propuestos y aplicaciones realizadas, se pueden considerar diferentes escalas de aplicación de sistemas descentralizados.

De acuerdo con Conagua (2015) los sistemas descentralizados se diseñan para diferentes escalas:

- casas habitación
- condominios
- vecindarios
- edificios públicos
- áreas y centros comerciales
- nuevos desarrollos de viviendas
- pequeñas porciones de grandes comunidades.
- parques industriales

Además, se pueden incluir los desarrollos ecoturísticos y ciertas zonas periurbanas que aún no cuentan con programas de saneamiento (gráfica 2).



Gráfica 7: Subsistemas descentralizados de tratamiento (Conagua, 2015).

a) subsistema para residencias y centros comerciales, b) subsistema para áreas residenciales, c) subsistema para desarrollos industriales, d) subsistema para residencias, e) Subsistema para nuevos desarrollos, f) Subsistema para establecimientos y condominios o casas.

2.3. Ventajas de sistemas descentralizados de tratamiento

Es importante destacar las ventajas y beneficios potenciales de los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales dentro de la GIAU, específicamente con enfoque al reúso de las aguas residuales tratadas:

■ Los sistemas descentralizados permiten el reúso local "*in situ*", aumentando de esta manera la productividad del agua. Además, ofrecen más oportunidades de reúso.

■ De acuerdo con la necesidad puedan ser instalados en tiempo muy corto, sin el requerimiento de inversiones en la ampliación de la red de drenaje y alcantarillado municipal.

■ Se reducen costos por la eliminación de una gran infraestructura de recolección o drenaje, lo que se complementa con el uso de tuberías de diámetro reducido y menores estaciones de bombeo (Conagua, 2015).

■ Debido a que los caudales que se manejan en los sistemas descentralizados son menores, el tratamiento y el reúso se pueden diseñar a la medida de las necesidades de cada descarga.

■ El uso de los lodos producidos en los sistemas de tratamiento descentralizados es más seguro ambientalmente, debido a que su calidad, tanto sanitaria como de contenido de tóxicos, es menor (Conagua, 2015).

■ Debido a que los sistemas descentralizados son modulares, pueden ser implementados por etapas gradualmente, lo que reduce la necesidad de una inversión inmediata, en comparación a sistemas centralizados (Conagua, 2015).

■ La fuente del agua residual por lo regular es del tipo doméstico que permite un tratamiento biológico con alta eficiencia, proporcionando una calidad de agua residual tratada apta para una amplia gama de reúsos (Wette, 2013).

■ Los sistemas descentralizados requieren una menor infraestructura complementaria (p.ej. laboratorios, instalaciones sanitarias).

■ En los sistemas descentralizados que operan sin el ingreso de aguas pluviales en la temporada de lluvias, la carga hidráulica y la carga orgánica son más homogéneas. De esta manera se evitan las desventajas de un sistema de alcantarillado combinado. Esto tiene implicaciones positivas en el dimensionamiento de la planta.

2.4. Clasificación de sistemas descentralizados de acuerdo su capacidad de tratamiento

La clasificación de los sistemas descentralizados se basa principalmente en aspectos técnicos y administrativos, así como en criterios para la operación y manteimiento que deben ser considerados de acuerdo con la escala y capacidad de tratamiento.

En los sistemas internacionales que regulan los sistemas descentralizados de tratamiento y se han clasificado de acuerdo con su capacidad de tratamiento y tamaño, considerando como parámetros el volumen máximo de agua residual a tratar por día, así como su equivalente en habitantes conectados.

Un criterio importante es, que a menor escala y menor volumen de agua residual a tratar se ofrecen más opciones tecnológicas, entre ellos diferentes sistemas de humedales artificiales que se caracterizan por su robustez y estabilidad de proceso, su eficiencia energética y bajos requerimientos en operación y mantenimiento.

Los nuevos desarrollos en sistemas naturales de humedales artificiales han ampliado considerablemente su potencial de aplicación también en las zonas urbanas (Dou et.

al. 2017). Además, un menor caudal a tratar reduce los requerimientos en operación y mantenimiento.

Para los pequeños sistemas domésticos los rangos varian entre 5000 l/día en Australia (10,000 l/d propuestos), 5,700 l/día en Estados Unidos y Canadá, y 8000 l/día en la Unión Europea.

En México se parte en zonas urbanas de un consumo de agua per cápita de aproximadamente 200 litros por día. Bajo este criterio, p.ej. 50 habitantes equivalentes conectadas al tratamiento corresponderían a un volumen a tratar de 10 m^3 aproximadamente, lo que ofrece un criterio base para la clasificación (tabla 6).

Tabla 6: Escalas de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales.

Habitantes	m^3/día	l/s	Ejemplos de aplicación
1 - 50	0,2 -10	0,11	Casa habitación, albuerges, etc.
51 - 500	10,2 - 100	0,12 – 1,15	Hoteles, unidades habitac., comercios
501 - 2500	100,2 - 500	1,16 – 5,7	Fraccionamientos, campus universitarios, zonas comerciales, centros recreativos etc.
2501 - 5000	500,2 - 1000	5,8 – 11,6	Barrios, desarrollos urbanos nuevos
> 5000	>1000	>11,6	Sistemas semi-centralizados

*Escala de acuerdo con el número de habitantes conectadas al sistema descentralizado de tratamiento.

2.5. Características del agua residual a tratar

Debido a sus principales áreas de aplicación, el agua residual que entra como afluente a los sistemas descentralizados básicamente es de tipo doméstica, sin influencia de aguas residuales industriales. Esto garantiza una mayor uniformidad del agua residual a tratar.

Si se cuenta con la influencia de comercios, p.ej. en nuevos desarrollos urbanos, las aguas residuales pueden tener una composición más compleja, por lo que en ciertos casos se requiere un pretratamiento específico (p.ej. trampas de grasa, separadores de aceites y gasolinas).

Sin embargo, el agua residual cruda de tipo doméstica por lo regular es biológicamente degradable y tiene las siguientes características:

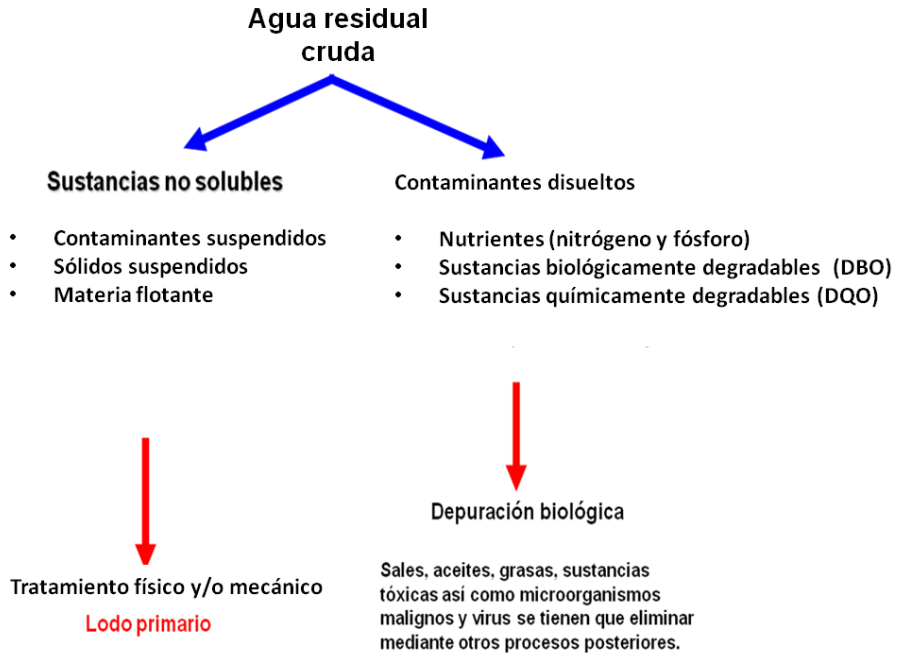
- Color: café-gris
- Turbidez: fuerte

- Olor: putrefacto, no desagradable
- pH: 6.5 a 7.5 (neutro)
- Temperatura: 10 a 20 °C

Aproximadamente 2/3 de los contaminates están en solución y 1/3 son sólidos sedimentables gruesos. Un color negro-gris y un olor putrefacto son signos de escasez de oxígeno disuelto, p.ej. cuando el agua ha permanecido un tiempo prolongado estancado. Un agua residual bien tratada es casi libre de olores o huele solo ligeramente a tierra, prácticamente no contiene sólidos sedimentables y además es transparente. Un ligero color amarillo que proviene de ácidos húmicos no es inusual (Foto 2).

Foto 3: Agua residual cruda y tratada biológicamente

La Gráfica 8 muestra las sustancias que contiene el agua residual cruda.



Gráfica 8: Sustancias y contaminantes del agua residual cruda

El agua residual tipo doméstica contiene sustancias orgánicas que son biológicamente degradables. No obstante, el contenido de contaminantes y la composición del agua residual pueden variar en un cierto rango, determinando su grado de dilución o concentración (tabla 7).

La Materia orgánica biodegradable como proteínas, carbohidratos y grasas se miden como DBO_5 o DQO (Demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno).

Tabla 7: Niveles de concentarción de diferentes parametros en el agua residual doméstica

Parámetro		**Tipo de agua residual**			
	Unidad	concentrado	moderado	diluido	muy diluido
DBO_5	mg O_2/l	350	250	150	100
DQO	mg O_2/l	740	530	320	210
TOC	g C/m^3	250	180	110	70
SS	g SS/m^3	450	300	190	120
Conductividad	mS/m **	120	100	80	70
Nt	g N/m^3	80	50	30	20

Las características microbiológicas se expresan a través del contenido y nivel de bacterias de coliformes. Como parámetros se utilizan la cantidad total de coliformes o como indicador guía el contenido de la bacteria Escherichia coli (E. coli). Los niveles de coliformes en el agua residual cruda tipo doméstica varían en un rango de 10^6 – 10^8. (entre un millón a cien millones).

La eliminación de las bacterias y una calidad de agua residual tratada microbiológicamente apta para fines de reúso se logra con una desinfección posterior al tratamiento biológico.

2.6. Calidad requerida del agua residual tratada

El principal reto para los sistemas descentralizados con fines de reúso en el ámbito urbano es proporcionar una alta calidad de efluente que no genere ningún riesgo a la salud pública e individual.

Se debe cumplir estrictamente con las normas de calidad del agua residual tratada requerida de acuerdo con el tipo de reúso, sea indirecto o directo. Como reúso en servicios al público con contacto directo se entiende que el usuario pueda estar expuesto o en contacto directo con el agua residual tratada, como por ejemplo en el lavado de vehículos o el riego de parques y jardines.

En México, la Norma oficial NOM-003-Ecol-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objetivo de proteger el medio ambiente y la salud de los usuarios (tabla 8).

Tabla 8: Límites máximos permisibles de contaminantes de acuerdo con la NOM-003-Ecol-1997.

Tipo de reúso	**Parámetro/Promedio mensual**				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO_5 mg/l	SST mg/l
Servicios al público con contacto directo	240	<1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	<5	15	30	30

Mientras que en México la norma solamente especifica criterios para la calidad del efluente, en Estados Unidos (EPA, 2012) y Australia se han establecido para el reúso sin restricción en zonas urbanas o áreas públicas, adicionalmente requerimientos específicos para el tren de tratamiento, considerando no solamente un tratamiento biológico secundario con una desinfección posterior, sino un tratamiento terciario, a través de una filtración por medios de filtros de arena o antracita, o por microfiltros de membrana (tabla 9).

Tabla 9: Criterios de calidad y requerimientos de procesos de tratamiento para el reúso urbano en Estados Unidos (EPA 2012).

Reúso urbano	Tratamiento	Calidad del agua recuperada
no restringido	Secundario Filtración Desinfección	pH = 6.0-9.0 ≤ 10 mg/l DBO_5 ≤ 2 NTU Coliformes fecales no detectables/100 ml
restringido	Secundario Desinfección	pH = 6.0-9.0 ≤ 30 mg/l DBO ≤ 30 mg/l TSS Colif. fecales <200/100 ml

Procesos secundarios de tratamiento incluyen procesos de lodos activados, filtros percoladores, así como sistemas de lagunas de estabilización. El tratamiento secundario debe producir un efluente en el cual tanto la DBO5 como los SS no excedan 30mg/l.

Los sistemas "multibarrera" con un tren de tratamiento que considera un tratamiento secundario, terciario y una posterior desinfección proporcionan una alta estabilidad y resiliencia en su proceso y operación, y una alta seguridad para la calidad requerida del efluente. Proporcionan un efluente de alta calidad, que se refleja también en una muy baja turbidez, que aumenta a la vez la eficiencia y estabilidad de una posterior desinfección con rayos ultravioleta (foto 4).

Foto 4: Sistema descentralizado multibarrera en Tepepan, Ciudad de México.

3. Requerimientos técnicos para sistemas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales

El rápido desarrollo tecnológico de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales ha sido un impulsor importante para la creciente aplicación e implementación en las zonas urbanas y periuebanas.

Debido a que los efluentes de los sistemas descentralizados se vierten directamente a un cuerpo receptor, se infiltran al subsuelo, o se destinan al reúso, los sistemas descentralizados independientemente de su tamaño y/o capacidad de tratamiento tienen que lograr un alto nivel de depuración que garantice el cumplimiento con las normas aplicables.

Para los sistemas descentralizados es recomendable que se caractericen por una alta estabilidad del proceso de tratamiento y una alta eficiencia energética, y mientras más pequeña la planta de tratamiento, más robusta y menos compleja debe ser la

operación, con el menor grado posible de mecanización. No obstante, debe cumplir con los mismos requerimientos de eficiencia de depuración.

Los sistemas descentralizados hoy en día logran la misma o una mayor eficiencia de depuración que plantas municipales de tratamiento centralizados. Ya existe una amplia gama de diferentes tecnologías que ofrecen soluciones adecuadas para las circunstancias y requerimientos del tratamiento "*in situ*", tanto en tamaño y volumen a tratar, como en cuanto al cumplimiento de la calidad requerida del efluente.

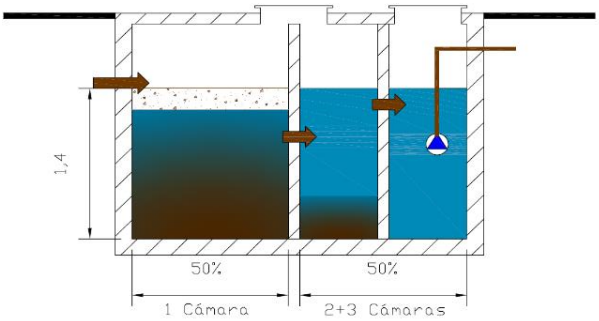
Desde sistemas naturales intensificados de alta eficiencia que permiten reducir considerablemente la superficie requerida (*humedales artificiales aireados*), hasta tecnologías de reactores biológicos con membranas aireadas (*Biorreactores con membrana BRM o MBR sus siglas en inglés*) que son sistemas compactos, con una alta calidad del efluente para el reúso, las múltiples opciones permiten seleccionar un sistema adecuado para cada situación o cada aplicación específica.

3.1. Componentes del tren de tratamiento de sistemas descentralizados

Igual que las plantas municipales, el tren de tratamiento de los sistemas descentralizados se integra de los siguientes pasos: Pretratamiento, tratamiento biológico secundario y desinfección.

3.1.1. Pretratamiento

El dimensionamiento y la selección del pretratamiento es un aspecto importante del tratamiento. Un pretratamiento adecuadamente dimensionado y construido es básico para el paso posterior del tratamiento secundario biológico.



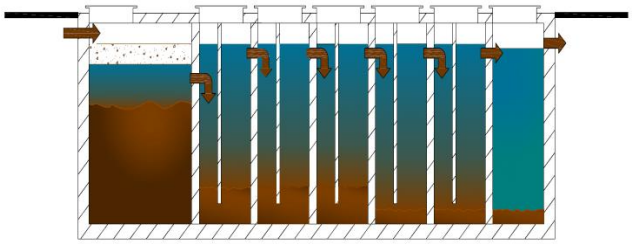
Gráfica 9: Tanque séptico

■ El tanque séptico es el componente más utilizado para los tratamientos descentralizados en las aguas residuales de tipo doméstico, generadas por 4 hasta 500 habitantes.

El tanque séptico se compone de dos o tres cámaras, que están conectas entre sí, permitiendo la sedimentación de sólidos de las aguas residuales, a través del paso por las diferentes cámaras.

La sedimentación con una degradación parcial anaeróbica de los lodos tiene como resultado una reducción del 30% de la carga orgánica (DBO_5). Los lodos almacenados deben ser retirados según el tamaño de la aplicación una vez al año.

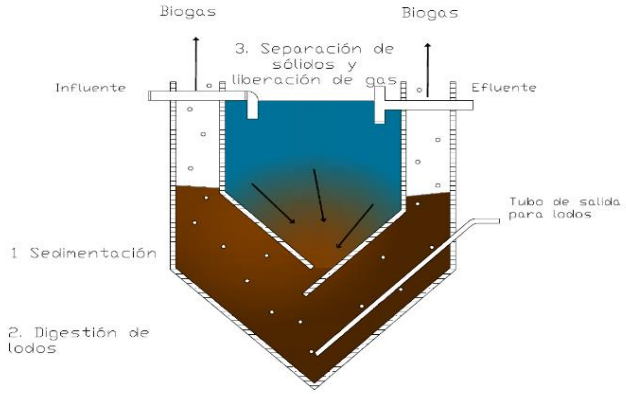
■ El tanque Baffled (sistema BORDA) o tanque séptico multicámara tiene 4 a 6 cámaras en lugar de 2 o 3, por lo cual el tiempo de retención total es superior al de un tanque séptico. Se aplica generalmente para tratamientos de aguas residuales de 500 hasta 2500 habitantes.



Gráfica 10: Tanque multicámara (sistema Borda)

La carga orgánica del efluente de la salida del pretratamiento es reducida en un 40% en climas fríos y un 60% en climas cálidos. En consecuencia, la producción del biogás es mayor que en los tanques sépticos y el biogás debe ser quemado. Los lodos son estabilizados anaeróbicamente y pueden ser utilizados en trabajos de paisajismo o en la agricultura. Cuando más eficiente sea el pretratamiento, más económico será el tratamiento secundario.

■ El tanque Imhoff es un sistema compacto y eficiente para tratamiento de aguas residuales municipales de 500 hasta 5000 habitantes. Reduce entre un 30 a un 40% de la materia orgánica de las aguas residuales crudas. El lodo es anaeróbicamente estabilizado y puede ser utilizado posteriormente en el paisajismo o en la agricultura. Es un sistema séptico de dos etapas, donde el lodo es digerido en un compartimiento separado y no es mezclado con las aguas residuales de entrada. Este sistema es apto también para climas fríos y alturas arriba de 2000 metros sobre el nivel del mar.



Gráfica 11: Tanque Imhoff

3.1.2. Tratamiento secundario

Debido a que los sistemas anaerobios, como reactores UASB o RAFA no pueden lograr por sí mismos la calidad requerida de agua residual tratada para fines de reúso, sino solamente en combinación con un sistema aerobio posterior (sistemas combinados), se consideran para el tratamiento secundario biológico solamente sistemas con procesos aerobios. Los sistemas tecnológicos se distuingen según su tipo de proceso y del tipo de biomasa, con microorganismos sésiles o con la biomasa en suspensión (lodos activados).

Sistemas comunes con la biomasa en suspensión son los sistemas de lodos activados con aireación extendida, con el tratamiento de aguas residuales por lotes (SBR, Sequencing Batch Reactor), o los biorreactores con membrana.

Foto 5: Sistema descentralizado de lodos activados SBR

Entre los sistemas con microbiología sésil se ubican los biofiltros, o filtros percoladores con diferentes materiales para los cuerpos de filtro en los cuales los microorganismos forman una biopelícula. Otro sistema con microbiología sésil que es apto para la aplicación a diferentes escalas son los biodíscos. Pero también los humedales artificiales se ubican entre los sistemas con una microbiología sésil que se establece principalmente en la zona de enraizamiento.

Una comparación de los diferentes tratamientos biológicos secundarios respecto a diferentes parámetros de operación (grado de mecanización, robustez, estabilidad de proceso), así como de la calidad de efluente que se pueda lograr, se muestra en la tabla 5. Destacan por ejemplo las características de los biorreactores de membrana por su calidad del efluente, así como las características de los humedales artificiales por su robustez y calidad del efluente.

Tabla 10: Caracteristicas de operación y calidad del efluente de diferentes tratamientos biológicos

Tratamiento secundario biológico	Operación de la planta de tratamiento						
	Operación			Calidad del efluente			
	Grado mecanización	Robustez	Estabilidad del proceso	Eliminac. DQO/ DBO5	Reducción de patógenos		Color/ turbidez
					virus	bacteria	
Lodos activados aireación extendida	alto	alta	alto	alto	baja	baja	baja
Biorreactor de membrana MBR	alto	media	alto	muy alto	muy alta	muy alta	muy baja
Lodos activados SBR	alto	media	alto	alto		media	baja
Filtro percolador	medio	alta	alto	alto	Baja	baja	media
Biodiscos	medio	alta	alto	alto	baja	baja	baja
Humedales artificiales	muy bajo	muy alta	muy alto	alto	media	media	muy baja

positivo + **No favorable -** **intermedia +/-**

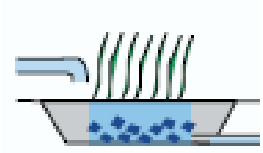
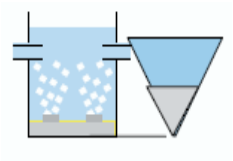
Debido a su robustez y eficiencia de depuración, así como por su alta eficiencia energética y versatilidad para diferentes escalas de aplicación, los humedales artificiales o construidos, ofrecen una tecnología importante para fomentar la descentralización del tratamiento de aguas residuales. Especialmente un mantenimiento y una operación sencilla y de bajo costo, son factores importantes que los favorecen. La desventaja son el mayor requerimiento de superficie en comparación a los sistemas tecnológicos.

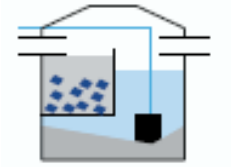
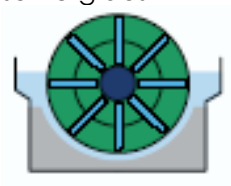
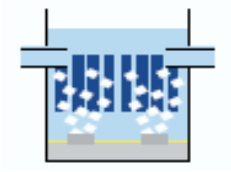
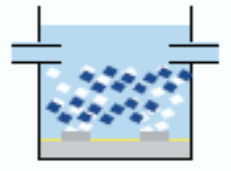
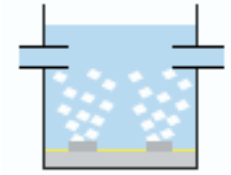
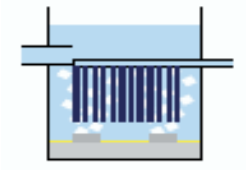
Recientemente por parte de la Asociación Alemana para la Economía de Agua, Agua residual y Residuos sólidos (*Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.* - DWA), se publicó la nueva guía "*Bases para el dimensionamiento, construcción y operación de plantas de tratamiento con filtros de suelo sin y con vegetación*" (DWA 2017), que incluye los actuales conocimientos científicos-técnicos y la experiencia empírica adquirida en cientos de proyectos realizados en los últimos diez años. Abarca las reglas técnicas para el diseño de pequeños sistemas hasta 50 habitantes equivalentes, así como humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales municipales. También Dou et. al. (2017) hacen énfasis en los nuevos desarrollos tecnológicos de humedales artificiales y su rol prometedor para el fomento de sistemas descentralizados con fines de reúso en el contexto urbano y periurbano.

Foto 6: Humedal artificial de flujo vertical de doble paso.

Existe una amplia varidad de pequeños sistemas de tratamiento de aguas residuales. Los sistemas tecnológicos se distinguen según su tipo de proceso y del tipo de biomasa (microorganismos sésiles o lodos activados). Cada sistema se caracteriza por tener ciertas ventajas y desventajas (tabla 11).

Tabla 11: Ventajas y desventajas de diferentes sistemas de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales.

Sistema	Ventajas	Desventajas
Humedales artificiales 	Bajo consumo de energía. Poco requerimiento de mantenimiento. Generan muy poco lodo. Clarificación del agua tratada. No contienen sustancias filtrables en la salida. Higienización parcial del agua tratada.	Alto requerimiento en superficie Proceso de denitrificación no controlable Altos costos de inversión
Aireación extendida 	Posible denitrificación con componentes tecnológicos adicionales. No afecta el ingreso de lodos por el tanque del pretratamiento.	Sensible contra una sobrecarga hidráulica. Bajo volumen biológico Lodos flotantes en el tanque de clarificación (decantación) Se requiere alto ingreso de aire trabajando sin mezclador
Biofiltros	Operación y eficacia de depuración estables. Poco volumen biológico requerido. Bajo consumo de energía.	Proceso de denitrificación no controlable. Instalación complicada. Alto costo en obra civil del tanque.

	Cuerpos en base de plásticos o tezontle para el establecimiento de los microorganismos sésiles (bio-película).	Afecta la entrada de lodos provenientes del pretratamiento.
Discos rotatorios sumergidos 	Operación y eficacia de depuración estables Bajo consumo energético Bajo requerimiento en mantenimiento Ingreso de agua residual a la biología mediante estación de bombeo	- Alto requerimiento tecnológico - Altos costos de inversión - Control de procesos de denitrificacón no es posible - Instalación complicada
Reactores de lechos fijos 	Bajo volumen biológico requerido.	Alto consumo de energía. Posible entrada de lodos desde del pretratamiento. Reparación laboreosa en caso de taponamiento. Posible crecimiento elevado de la pelicula biológica.
Reactores de lechos fluidizados 	Bajo volumen biológico requerido.	Posible entrada de lodos desde el pretratamiento. Reparación complicada en caso de taponamiento
Sistema SBR con pre-tratamiento 	Elevado nivel de depuración. Bajo consumo energético. Bajo requerimiento en mantenimiento. No requiere un tanque adicional de clarificación.	Perdida de lodo activado en caso de inundación. Se requiere mayor sofisticación en el sistema controles.
Membranas aireadas 	Logra un muy alto nivel de depuración (calidad de agua para baño). Sin sólidos en la salida Poco desarrollo de lodos. Bajo volumen de biomasa requerida.	Altos costos de inversión. Alto consumo energético. Alto requerimiento en mantenimiento.

3.1.3. Desinfección del agua residual tratada

La meta de una desinfección del agua residual tratada es la eliminación, o inactivación de patógenos de tal grado que ya no presenten ningún riesgo para la salud. Para aguas residuales municipales o domésticas esto significa por lo regular una reducción de los patógenos de 4 a 5 unidades logarítmicas.

La cantidad de organismos patógenos en el agua residual doméstica es elevada. Como organismos indicadores y parámetros de contaminación se usan las bacterias de la familia de los Coliformes y Estreptococos. El nivel de los Coliformes totales en el agua residual doméstica varía en un rango amplio entre 10.000.000 a 100.000.000 ($10x10^6 – 10x10^7$).

Considerando las normas que regulan la calidad microbiológica del agua residual tratada para su reúso, los valores máximos permisibles, dependiendo del tipo de reúso, varían entre 0 y 10000 coliformes. Por ejemplo, una disminución de 45.000.000 ($4.5 x10^7$) Coliformes totales en el agua residual cruda a 240 Coliformes totales, valor máximo permisible que establece la NOM-003-ECOL-1997 para el reúso de agua residual tratada en servicios al público con contacto directo (lavado de vehículos, riego de parques y jardines), se requiere una reducción de por 99.99947% o 5.273 unidades logarítmicas. Para lograr estos niveles de reducción, el sistema de tratamiento tiene que ser altamente eficaz, considerando un proceso de desinfección posterior.

Existen para la desinfección de aguas residuales diferentes tecnologías basadas en procesos químicos y físicos que varían en su eficiencia y que muestran un amplio rango de ventajas y desventajas, Jacangeloy y Trusell (2001) presentan la siguiente lista comparativa (tabla 12).

Tabla 12: Comparación de diferentes métodos y tecnologías de desinfección.

Medio de desinfección	Bacterias	Virus	Protozoo	Valoración total
Gas cloro	+++	+++	+/-	++
Dióxido de Cloro	++/+++	++/+++	+	++
Ozono	+++	+++	++/+++	++/+++
Rayos UV	++/+++	+	++	++
Ultrafiltración	+++	+++	+++	+++

+++ muy bien, ++ bien, + adecuado, - mal, -- muy mal

■ **Cloración:** El cloro es el desinfectante dominante que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales porque es una tecnología bien establecida que puede proporcionar una desinfección efectiva de aguas residuales. Además, proporciona un residuo que puede mantenerse. Sin embargo, hay varias desventajas. La cloración de aguas residuales causa la formación de trihalometanos y otros hidrocarburos clorados. Los compuestos orgánicos volátiles de cloro también pueden ser liberados.

Ventajas de una desinfección mediante cloración:

- buen potencial de eliminación de gérmenes
- efecto residual en el depósito

Desventajas de la cloración:

- Formación de subproductos dañinos a la salud
- Formación de compuestos orgánicos volátiles

■ **Ozonificación:** El potencial desinfectante se basa en las reacciones de oxidación con las células de los microorganismos. El oxígeno triatómico (O_3) con un potencial redox de +2,7 es la sustancia de oxidación más fuerte después del flúor. La generación de ozono es una reacción endotérmica, la cual requiere en aplicaciones técnicas una gran cantidad de energía. Por la pérdida de calor se puede aprovechar solamente entre 4 y 10% de la energía requerida. El ozono rápidamente se desintegra, por lo cual se tiene que generar en el lugar donde se pretende aplicar. La producción de ozono es costosa y requiere altas medidas de seguridad.

Ventajas de una desinfección mediante ozonificación:

- buen potencial de eliminación de gérmenes
- se descomponen también otras sustancias no deseadas
- no se forman residuos secundarios

Desventajas de la ozonificación:

- Ausencia de un efecto residual en el depósito y riesgo de una re-contaminación con gérmenes patógenos
- Formación de Bromato
- El ozono es una sustancia tóxica
- Alto consumo energético para su producción
- Alto requerimiento en aparatos y tecnología

■ **Rayos UV:** Es un proceso físico para la reducción de gérmenes, el cual está reconocido desde hace más de cien años. La inactivación de los microorganismos se logra mediante la adsorción de los rayos UV por las proteínas y ácidos nucleidos. Las alteraciones que resultan en las células reducen su potencial de reproducción. Otro efecto dañino para las células es la formación de radicales en las mismas.

Ventajas de la desinfección con UV:

- No se generan sustancias secundarias no deseadas
- Buen potencial de reducción de todos los gérmenes
- Apto para combinar con otras tecnologías de desinfección
- Poca influencia de temperatura
- Bajos costos de inversión y operación

Las desventajas de desinfección UV:

- Ausencia de un efecto de depósito, existe el riesgo de una re-contaminación
- Requiere agua residual pretratada con muy baja turbidez
- Formación de láminas (placas) en la superficie de los tubos de protección
- Falta de una medición practicable de la dosificación
- Falta de conocimiento sobre los procesos de reactivación

Los virus/bacterias y los huevos de helmintos adsorbidos requieren una alta intensidad de radiación. El uso del sistema de rayos UV es altamente recomendable cuando se pueda garantizar que los sólidos suspendidos y la mayor parte de las sustancias orgánicas en el agua residual tratada estén eliminados. Un método adecuado podría ser la instalación previa de filtros de arena para garantizar una baja turbidez del agua que pasa por el sistema UV.

■ **Filtración por membranas** (Microfiltración/ Ultrafiltración): La filtración por membranas para la desinfección de agua potable está reconocido y ya se aplica ampliamente. Respecto al tamaño de los poros se considera como un diámetro de 0,2µm adecuado para una desinfección segura. Este diámetro se ubica en el rango de microfiltración. La desinfección se realiza mediante una separación física de las bacterias y de huevos de helmintos en la membrana. La gran parte de los virus con un diámetro mayor de 0,2µm también se retiene en la membrana. La filtración por una membrana entonces es un método de "eliminación de gérmenes", la cual también retiene microorganismos muertos o inactivados.

Ventajas de la filtración por membranas:

- Un método meramente físico
- No se requieren químicos adicionales para la desinfección
- No genera ningún producto residual no deseado
- Se logra prácticamente una eliminación total de gérmenes
- Se puede combinar con sistemas de lodos activados (Biorreactores de membrana MBR)

Desventajas de la filtración por membranas:

- Altos costos de inversión y de operación (energéticos)
- Alto requerimiento en mantenimiento

En la tabla 13 se muestran diversas opciones de trenes de tratamiento y su aptitud de acuerdo con el tamaño y la capacidad de tratamiento.

Tabla 13: Componentes del tren de tratamiento y su aptitud para sistemas descentralizados de tratamiento en zonas urbanas y periurbanas.

	Habitantes conectadas	**4-50**	**51 - 500**	**500 - 2500**	**> 2500**
Tratamiento Primario	Tanque separador	XXX	XX	n.i.	n.i.
	Tanque séptico multicámara	X	XXX	XXX	n.i.
	Cribado y desarenado	n.i.	X	XXX	XXX
	Sedimentador primario	n.i.	XX	XX	XXX
	Mecanizado	n.i.	XX	XXX	XXX
	Tanque Imhoff	n.i.	XX	XXX	XXX
Tratamiento secundario	Lodos activados aireación extendida	XX	XX	XX	XXX
	Lodos activados MBR	XX	XXX	XXX	XX
	Lodos activados SBR	XXX	XXX	XXX	XXX
	Biodiscos (BD)	XX	XX	XXX	XXX
	Biofiltros (BF)	X	X	XX	XX
	Humedales artificiales (HA)	XXX	XXX	XX	X
Desinfección	Ozono	n.i.	n.i.	X	X
	Cloración	X	X	X	XX
	Ultravioleta	XXX	XXX	XXX	XX
	Lagunas de maduración	XX	X	X	X
Tratami-ento de lodos	Lechos de secado Humedales de lodos	x	x	x	x

X apto XX bien XXX muy bien n.i. no indicado

4. Requerimientos normativos para asegurar la operación sustentable de sistemas descentralizadas de tratamiento

Los sistemas descentralizados operan bajo diferentes condiciones que las plantas municipales centralizadas. Para asegurar una operación y un mantenimiento que garantice la calidad de agua residual tratada requerida se deben establecer mecanismos de diferente índole, con responsabilidades compartidas entre el instalador de los sistemas, los usuarios, así como de las autoridades competentes.

Para los sistemas descentralizados más pequeños con una capacidad máxima de tratamiento de 50 habitantes equivalentes (8 a 10m^3/día), se han establecido tanto en Europa como Estados Unidos y Canadá normas y reglamentos con requerimientos estrictos, que incluyen por ejemplo la prueba de los sistemas de tratamiento en centros de ensayo con un procedimiento estandarizado. Todos los sistemas y tecnologías deben contar con un certificado expedido por organismos autorizado lo que le da seguridad tanto al usuario como a las autoridades competentes sobre la capacidad, confiabilidad y eficiencia del sistema de tratamiento.

Foto 7: Centro de ensayo y prueba de pequeñas plantas de tratamiento en EU

Debido a que un monitoreo sistemático de múltiples pequeñas plantas de tratamiento por parte de las autoridades competentes no es posible o viable, los mecanismos para garantizar la operación y el mantenimiento prevén entre otros, reglas de control propio para los usuarios, así como contratos de mantenimiento que por lo regular el propietario debe firmar con una empresa competente.

En las estrategias internacionales destacan los siguientes requerimientos y mecanismos:

- Certificación de pequeños sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- Organismos autorizados y laboratorios de prueba. .
- Procedimiento de ensayo.
- Calidad de agua residual tratada y límites máximos permisibles del efluente.
- Reglamentos estatales.
- Control propio.

- Frecuencia y tipo de medidas de monitoreo.
- Portal de registro
- Licencia general de construcción
- Contrato de mantenimiento con un servicio competente
- Certificación de personal del servicio competente
- Informe de mantenimiento
- Lista de tecnologías apropiadas y disponibles actualmente
- Estudios de impacto ambiental (EIA)

Un servicio eficiente de operación y mantenmiento (OyM) tiene que considerar diferentes tamaños de los sistemas descentralizados de tratamiento, debido a los distintos niveles de requerimiento, p.ej. de la capacidad técnica y personal calificado.

4.1. Mecanismos para garantizar la operación de sistemas descentralizados en zonas urbanas y periurbanas.

Aunque en México no exista un marco regulatorio propio para sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales, ni una estructura de certificación de pequeñas plantas de tratamiento, se deben considerar diferentes mecanismos para integrar en el marco regulatorio municipal, con el fin de garantizar la eficiencia y seguridad de operación de las plantas descentralizadas de tratamiento. Además, un monitoreo sistemático de múltiples pequeñas plantas de tratamiento por parte de las autoridades competentes no es posible o viable. Entre los mecanismos destacan:

- **Garantía de cumplimiento**

Para dar seguridad a los propietarios de sistemas descentralizados de tratamiento y a las autoridades municipales se debe exigir al instalador del sistema de tratamiento o a la empresa responsable una garantía de que el sistema proporciona la calidad requerida del efluente de acuerdo con las normas aplicables.

- **Contrato entre usuario y empresa responsable**

Entre el usuario y la empresa responsable o el instalador se debe establecer un contrato que regule la frecuencia y el tipo de servicios, como mantenimientos preventivos y correctivos, los entregables como la memoria de cálculo del sistema de tratamiento, el manual de operación, así como el control propio por parte del usuario.

Tabla 14: Contenido de contratos de servicios y garantía de cumplimiento.

Contenido	Empresa responsable o instalador	Propietario
Garantía de cumplimiento con la norma aplicable.	Da la garantía que la tecnología proporciona un efluente que cumple con la calidad requerida de acuerdo con la norma aplicable	Seguridad para el propietario de la planta de tratamiento ante las autoridades competentes.
Entrega de la memoria de cálculo de la planta de tratamiento.	Especifica los datos básicos y condiciones sobre los cuales se dimensionó el sistema, y los valores de los parámetros de dimensionamiento y del diseño.	Documentación importante para el usuario y requisito ante la autoridad competente.
Estabilización del sistema de tratamiento biológico.	Tiene el compromiso de determinar el momento de estabilización de la planta de tratamiento para la entrega al usuario.	Le da seguridad de recibir un sistema en condiciones de operación que garantiza el cumplimiento con la norma aplicable.
Capacitación del usuario	Da al usuario una capacitación sobre el funcionamiento y la operación de la planta de tratamiento.	Obtiene los conocimientos básicos para poder cumplir con el control propio del tratamiento.
Manual de operación	Compromiso de entregar al usuario un manual de operación, que le permiten reconocer a detalle el funcionamiento del sistema de tratamiento.	Documento de revisión para familiarizarse con el funcionamiento, la operación y el mantenimiento del tratamiento, y para
Control propio del usuario	Proporcionar al usuario un formato de bitácora, para el registro de información y observaciones	Compromiso de realizar verificaciones visuales de operación del sistema de tratamiento y llevar una bitácora.
Verificación y mantenimiento preventivo	Realizar la verificación del tratamiento y los trabajos de mantenimiento preventivo en una frecuencia adecuada.	

■ Evidencia documental de la plata de tratamiento

El instalador o la empresa responsable debe entregar al propietario la memoría de cálculo del sistema de tratamiento que especifique con base en los datos de cálculo (habitantes conectadas, volumen de agua residual a tratar, carga contaminante), el

dimensionamiento de la planta, la eficiencia del proceso, la remoción de contaminantes, y el consumo energético del sistema.

La evidencia documental incluye un manual de la planta que especifica a detalle los componentes del sistema, su función y funcionamiento, la operación y el mantenimiento.

■ **Obligaciones por parte del instalador**

El instalador del sistema descentralizada se responsabiliza de la toma en operación de la planta de tratamiento y su estabilización hasta que cumpla con la calidad requerida del efluente.

Además, debe proporcionar al propietario y/o a la persona que se designe una capacitación sobre los componentes del sistema de tratamiento, su función y funcionamiento, como realizar una supervisión visual, y que fallas se puedan presentar.

■ **Alcance de monitoreo y mantenimiento**

El alcance de monitoreo y mantenimiento depende del tamaño o de la capacidad de la planta de tratamiento, y del grado de mecanización.

Para los pequeños sistemas domésticos hasta 50 habitantes equivalentes, se reduce el número y la frecuencia del monitoreo y los mantenimientos preventivos por parte de la empresa responsable con la que se tiene establecido el contrato a 2, máximo 3 veces al año. No obstante, la responsabilidad del propietario sería el control propio del sistema de acuerdo con las medidas establecidas que se muestran en la tabla 15.

Tabla 15: Frecuencia y medidas del control propio de pequeñas plantas hasta 50 he.

Frecuencia	Tipo de medida
diario	Control del funcionamiento
semanal	Tomar la lectura del registro de control de operación
	Control visual de la funcionabilidad de la planta (niveles de agua, sistema de vertido de afluente, salida y efluente, así como el aspecto de las burbujas en plantas aireadas)
mensual	Control visual de todos los agregados, incluyendo pretratamiento y tratamiento posterior, posible apariencia de lodo flotante o salida de lodos
	Control visual del punto de desalojo al receptor
De acuerdo con la necesidad	Extracción y recogida de lodos a través del aviso al servicio correspondiente

La supervisión y el mantenimiento a través del servicio competente debe incluir:

- La revisión de la bitácora de control propio del usuario.
- La revisión si la documentación está completa.
- El control de las condiciones físicas de la construcción de la planta, control de funcionamiento de todos los agregados y componentes técnicos de la planta, mantenimiento de todos los componentes técnicos, del control y del sistema de alarma.
- El ajuste óptimo de los parámetros de operación.
- Realizar los trabajos de limpieza general.
- Medición de la cantidad y de los niveles de lodo.
- Medición de la DQO, Sólidos suspendidos totales.

Con mayor tamaño del sistema crecen los requerimientos respecto a la operación y mantenimiento. Sistemas arriba de 500 habitantes equivalentes y dependiendo del grado de automatización por lo regular requieren una persona que supervise diario la operación de la planta.

■ **Portal de registro de sistemas descentralizados**

Es importante que por parte de las autoridades competentes o responsables a nivel municipal se integre un registro sobre los sistemas descentralizados que operan en su entorno administrativo. El registro contendrá información sobre la ubicación y la capacidad del sistema de tratamiento instalado, la tecnología aplicada, el instalador y/o la empresa responsable, la norma aplicable, así como el destino del efluente.

5. Establecer una estrategia municipal para sistemas descentralizados de tratamiento

Para establecer una estrategia municipal para fomentar y regular la integración de sistemas descentralizados para el tratamiento de aguas residuales con enfque al reúso, se recomienda seguir los siguientes pasos:

■ <u>Identificar, analizar, evaluar y documentar sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales existentes.</u>

En prácticamente todas las zonas urbanas y periurbanas existen algunos sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales a diferentes escalas. Un análisis detallado proporcionará información muy valiosa sobre las tecnologías aplicadas, sus condiciones de operación, la eficiencia de depuración, así como los problemas de diferente índole que presentan.

■ Establecer y promover proyectos piloto a diferente escala.

Es importante mostrar la viabilidad de aplicación de sistemas descentralizados en las condiciones de diferentes situaciones específicas (diferente escala, nivel social, etc.). La aceptación de conceptos, sistemas y tecnologías nuevas depende en gran parte de que comprueben su funcionabilidad y eficiencia, y que cumplan con las expectativas y resultados esperados. Además, los proyectos piloto permitirían evaluar costos y beneficios y definir con mayor precisión las condiciones para su aplicación idónea dentro de un concepto integral de manejo del agua urbana.

■ Proporcionar un marco legal municipal adecuado

La integración de cualquier elemento novedoso en un marco normativo requiere conocer previamente la particularidad legal del municipio, y el panorama general de la regulación municipal en materia de agua, construcción, desarrollo sustentable etc. Partiendo de este análisis se diseñarán los ajustes necesarios para proporcionar un marco regulador sólido para la implementación de sistemas descentralizados.

■ Establecer lineamientos técnicos.

Es recomendable que a nivel municipal se establezcan o se adecuen los lineamientos técnicos para los sistemas descentralizados, de acuerdo con las condiciones específicas del entorno biofísico, ambiental y socioeconómico, así como para fomentar el reúso de las aguas residuales tratadas.

■ Fomentar la cooperación con el sector académico y privado.

La cooperación con universidades y centros de investigación, así como con el sector privado puede generar un alto valor agregado, p.ej. en la evaluación e introducción de nuevas tecnologías, el monitoreo de proyectos piloto, la capacitación de personal técnico, y la difusión de resultados.

5.1. Considerar el tratamiento descentralizado y reúso en el marco reglamentario municipal

Para fomentar el tratamiento descentralizado y el reúso del agua residual a nivel municipal se deben establecer y definir las condiciones y requerimientos para los sistemas descentralizados en las Leyes y los Reglamentos Municipales.

Se recomienda definir las diferentes condiciones que requerirán el establecimiento de un sistema descentralizado de tratamiento, como por falta de conexión a la red de drenaje municipal, condiciones topográficas difíciles o para sustituir el uso de agua potable por agua residual tratada en aplicaciones que no requieren la calidad de agua de primer uso.

Además, se debe especificar:

■ El requerimiento de trámite de permisos y presentación de proyectos.

■ La determinación de responsabilidades para el mantenimiento y la operación de los sistemas descentralizados por cuenta de los usuarios.

■ La garantía que las descargas de los sistemas de tratamiento descentralizados cumplen con las normas aplicables, incluyendo para el reúso.

■ La obligación de que el instalador de la planta descentralizada de tratamiento debe garantizar que el sistema de tratamiento cumple con la calidad de efluente requerido de acuerdo con la normatividad mexicana.

La obligación de precisar y especificar todos los detalles en un contrato que se establecerá entre el instalador del sistema o de la empresa responsable con el propietario.

Falta de conexión al drenaje municipal

■ En el caso de casa habitación aislada, albergues, centros recreativos y otras instalaciones que generan aguas residuales de tipo doméstico que no cuentan con la factibilidad de descarga de sus aguas residuales a un sistema municipal, el propietario debería implementar una pequeña planta descentralizada de tratamiento de agua residual de acuerdo con las condiciones de su descarga, previo permiso tramitado ante la autoridad correspondiente.

Es importante, no restringir el tratamiento a un sistema anaerobio o una "fosa séptica", sino considerar el establecimiento de "pequeñas plantas descentralizadas de tratamiento", tomando en cuenta que las tecnologías descentralizadas aerobias de alta eficiencia disponibles hoy en día ofrecen múltiples posibilidades de su aplicación en el ámbito urbano y periurbano para garantizar una calidad de agua residual tratada (efluente) que permite su desalojo directo a cuerpos receptores, o su reúso.

■ También en el caso de un proyecto de desarrollo urbano habitacional, edificio público o privado, o industrial que no cuente con la factibilidad de descarga de sus aguas residuales a un sistema municipal, los responsables deberían presentar ante la autoridad correspondiente un proyecto de planta de tratamiento, adecuado para la depuración de las descargas y aguas residuales que se generan.

■ El instalador de la planta descentralizada de tratamiento debe garantizar (certificar) a los propietarios que el tratamiento cumple con la calidad requerida del efluente de acuerdo con las normas oficiales aplicables. Una copia de esta garantía se debe

anexar a la solicitud de descarga de aguas residuales que se presenta a la autoridad municipal competente de gestión del agua.

■ Se especificará que la operación de los sistemas descentralizados será por cuenta de los usuarios, siendo responsabilidad del o de los responsables, precisar los mecanismos para garantizar una operación sustentable y el cumplimiento con las normas. Los mecanismos se detallarán en los contratos que por esta razón se deben establecer entre el instalador o empresa competente y el o los propietarios.

■ El mantenimiento y desazolve de los lodos de las pequeñas plantas descentralizadas de tratamiento será por cuenta del o de los propietarios.

■ El instalador de la planta descentralizada de tratamiento deberá garantizar que las descargas o el efluente para su reúso reúna las características de la NOM aplicable o de las condiciones particulares de descarga que se le fijen por la entidad normativa correspondiente.

Condiciones topográficas

Frecuentemente es muy difícil (*topografía, distancias*, etc.) lograr la conexión de todas las comunidades, barrios, unidades habitacionales y viviendas a un sistema de alcantarillado troncal y un tratamiento centralizado. A menudo es más conveniente realizar el tratamiento por cuadras, lotes, barrios o microcuencas, lo que significa sectorizar la zona y tratar pequeños volúmenes de agua residual, para disminuir los costos de recolección y de bombeo a una planta de tratamiento convencional centralizada.

■ En caso de que en la zona urbana en que se ubique el fraccionamiento tenga condiciones topográficas difíciles de superar por su alto costo de construcción, la autoridad competente podrá eximir al fraccionador de su obligación de establecer una conexión a la red principal de alcantarillado sanitario, y en su lugar autorizar sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales sanitarias.

Fomentar el Reúso

Es altamente recomendable definir en los Reglamentos Municipales las condiciones para el reúso de las aguas residuales tratadas, y establecer obligaciones para diferentes usos públicos urbanos del agua, así como para el ámbito particular.

■ Se podría establecer que será obligatorio utilizar agua residual tratada en los usos urbanos públicos siguientes: para riego de áreas verdes, limpieza y conservación de transporte, lavado y mantenimiento de vialidades y banquetas y supresión de polvos, servicios sanitarios, monumentos, fuentes públicas, parques y jardines públicos, para

conservación y mantenimiento de camellones, riego y mantenimiento de cementerios, limpieza exterior de inmuebles y zoológicos entre otros.

■ Para el ámbito privado, se podrían establecer obligaciones de utilizar agua residual tratada para el riego de terrenos particulares como campos de golf, canchas deportivas, jardines, lavado de autos, mezcla de concretos y pistas de hielo por mencionar algunos.

■ Los propietarios podrán establecer sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales, o contratar el servicio privado para el suministro de agua residual tratada.

6. Consideraciones generales

■ Los múltiples sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales instalados muestran su amplia gama de posibles aplicaciones a diferentes escalas.

■ El constante aumento de los sistemas instalados ha fomentado el desarrollo tecnológico, por lo que se cuenta con tecnologías y sistemas de tratamiento altamente eficientes, que proporcionan una calidad de efluente que garantizan el cumplimiento con los requerimientos ecológicos y normativos.

■ Los sistemas descentralizados actualmente forman una componente importante para el desarrollo urbano y que deben estar debidamente consideradas en las estrategias y en la planeación hídrica urbana. Aumentan los "grados de libertad" en la planeación urbana, debido a que ofrecen opciones de integración a la infraestructura hídrica tradicional.

■ No obstante, el establecimiento de las reglas y condiciones para su aplicación en el marco regulatorio municipal es un factor decisivo para su integración en la planeación hídrica urbana y para su correcta aplicación.

7. Referencias

Conagua (2016). Lineamientos técnicos: Sistema de tratamiento de aguas residuales a nivel vivienda en zona rural. Programas de agua potable, alcantarillado, saneamiento, y tratamiento de aguas residuales. Versión 1.0.

Conagua (2015). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas Rurales, Periurbanas y Desarrollos Ecoturísticos. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México.

Cook, S., G. Tjandraatmadja, A. Ho and A. Sharma (2009). Definition of Decentralized Systems in the South-East Queensland Context. Urban Water Security Research Alliance Technical Report No. 12.

De Anda Sánchez, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. Sociedad y Ambiente, año 5, núm. 14, julio-octubre de 2017, pp. 119-143.

DWA-A 262E (2017). Principles for Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted and Unplanted Filters for Treatment of Domestic and Municipal Wastewater.

Dou, T., Troesch, T., Petitjean, A., Gábor, P.T. and D. Esser (2017). Wastewater and rainwater management in urban áreas: A role for constructed wetlands. International conference – Green urbanism. Procedia Environmental Sciences 37, 535-541.

Jacangelo, J.G. y Trussell, R.R. (2001) International Report Water and Wastewater Disinfection: Trends, Issues and Practices, Preprints 2nd World water congress in Berlin, October 2001.

NOM-006-Conagua-1997. Fosas sépticas prefabricadas - Especificaciones y métodos de prueba. SEMARNAT. Norma Oficial Mexicana NOM-006-CONAGUA-1997. Diario Oficial 29 de enero de 1999

Sapkota, M., Arora, M., Malano, H., Moglia, M., Sharma, A., George, B. and F. Pamminger (2015). An Overview of Hybrid Water Supply Systems in the Context of Urban Water Management: Challenges and Opportunities. Water 2015, 7, 153-174; doi:10.3390/w7010153.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2017. The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource. Paris, UNESCO.

De la Peña, M.E.; Ducci, J., y V. Zamora (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo-Sector de Infraestructura y Medio Ambiente. Nota Técnica # IDB-TN-521, 42 pp.

EPA (2012). Guidelines for Water Reuse. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Wastewater Management, Office of Water, Washington, D.C.

Jacangelo, J. and R. Trussell (2001). International report water and wastewater disinfection: trends, issues and practices.
file:///C:/Users/TEMP/Documents/Literatur/Reuso/IR_Disinfection.pdf

Parte 3

III. Potencial de reúso para aumentar la eficiencia en el uso del agua y aguas residuales en la zona urbana del Municipio de Puebla.

1. Introducción

Debido al crecimiento poblacional y de las actividades industriales en la cuenca del Alto Atoyac, la presión sobre los recursos hídricos ha aumentado drásticamente en las últimas décadas. El acuífero del Valle de Puebla es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la zona metropolitana de Puebla. Datos de Conagua muestran un déficit anual de recarga natural por 28,2 millones de metros cúbicos (DOF: 09/02/2016) y, debido a los altos niveles de contaminación, el río Atoyac no representa una fuente complementaria para el suministro de agua potable.

Ante la importancia de los recursos hídricos para el bienestar de la población y el desarrollo económico en la región se han realizado diversos estudios que analizan las opciones para garantizar la seguridad hídrica en la cuenca y para la zona metropolitana de Puebla en el futuro. En 2015 Martínez Morales y colegas (Martínez Morales et. al. 2015) presentaron los resultados de la simulación de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos del acuífero de Puebla-Atoyac, y en el 2016 Martínez Austria y Vargas Hidalgo analizaron la situación para la zona metropolitana de Puebla con un modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano.

Ambos estudios concluyeron que el reúso de las aguas residuales tratadas es una de las estrategias importantes para reducir la brecha entre oferta y demanda del agua. Para lograr hasta el 2030 un equilibro entre demanda y oferta se deberían de aprovechar alrededor de 1.7 m^3/s de agua residual tratada para fines de reúso, y al mismo tiempo reducir las perdidas por fugas de 1,2 m^3/s a solo 0,5 m^3/s (Martínez Austria y Vargas Hidalgo, 2016).

Para aprovechar los volúmenes de agua residual tratada en las zonas urbanas, se debe desarrollar una estrategia que considere aspectos técnicos, normativos y administrativos, así como sociales. Se tendrían que tomar en cuenta diferentes escalas tanto de tratamiento de aguas residuales como de reúso.

El aprovechamiento de los volúmenes generados en los sistemas centralizados de tratamiento para el reúso en el ámbito urbano requiere el establecimiento de una infraestructura amplia de distribución, sea una red de tuberías (*línea morada*), una logística de transporte en pipa, o una combinación de ambos. La infraestructura centralizada a menudo hace el reúso complejo (Wett, 2013).

Ante la creciente importancia y la necesidad de aguas residuales tratadas para el reúso urbano se han desarrollado programas ambiciosos en múltiples ciudades alrededor del mundo (IWA 2018).

La Organización Internacional de Estandarización (International Organization for Standardization ISO) recientemente ha establecido estándares para el reúso de agua en zonas urbanas, tanto para sistemas centralizados (ISO 20760-1, 2018; ISO 20761, 2018; ISO 20760-2, 2017), como para sistemas descentralizados (ISO/NP 23056, en desarrollo),

lo que fomentará las iniciativas y el desarrollo de proyectos y programas de reúso en el ámbito urbano.

Dependiendo del tipo de las aguas residuales a tratar y de los sistemas centralizados de tratamiento instalados puede haber limitaciones debido a que las aguas residuales tratadas no cumplen con la calidad para el reúso. En el caso de Puebla, la alta contaminación de las aguas residuales por las industrias y las plantas de tratamiento con un sistema primario avanzado, limitan el reúso de las aguas residuales tratadas.

Tomando en cuenta ciertas limitaciones de los sistemas centralizados y para aumentar la flexibilidad y las opciones de reúso, en los programas y proyectos se están considerando varias escalas y la integración de sistemas descentralizados a diferente nivel.

Una reseña amplia sobre los retos y las oportunidades de la combinación de sistemas descentralizados con la infraestructura centralizada existente y sistemas "hibridos" se presenta en Sapkota et. al. (2015) y Meenakshi et.al. (2015), destacando que pueden aumentar considerablemente la resiliencia de las zonas urbanas ante los retos del cambio climático y del estrés hídrico (Schäfer y Scheele, 2017).

Se revisaron y documentaron diferentes sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales existentes en el Municipio de Puebla. Cuatro de las plantas de tratamiento revisadas pertenecen a diferentes instalaciones de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), una al Centro Mira Atoyac, otra a un particular en la Ciudad Ecológica Haras. Además, se documentó la PTAR del Centro comercial Galerías Serdán, la del Centro de Investigación y Saneamiento del Río Atoyac y la del Rastro Municipal.

Además, se realizaron encuestas telefónicas con diversos centros recreativos y fraccionamientos sobre la existencia de sistemas descentralizados de tratamiento en sus instalaciones y el uso de las aguas residuales tratadas.

El enfoque al análisis del potencial de reúso como un componente importante dentro del manejo del agua en la zona urbana de Puebla, abarca entre otro un análisis de la superficie de parques, áreas verdes y camellones, así como la detección de zonas residenciales de alto nivel tarifario con alto consumo de agua potable.

Con énfasis a una estrategia para el aprocvechmiento del potencial de reúso, se consideraron las diferentes escalas de tratamiento, desde sistemas centralizados, semicentralizados y descentralizados.

2. Revisión y documentación de algunos sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en el Municipio de Puebla

En el Municipio de Puebla existen múltiples sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales a diferente escala. La documentación de dichos sistemas se realizó con visitas técnicas de campo, a través de entrevistas telefónicas y con el análisis de la información públicamente disponible.

2.1. Documentación de sistemas descentralizados a través de visitas de campo

A través de visitas de campo se documentaron nueve plantas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales en el municipio de Puebla.

Cuatro sistemas descentralizados de tratamiento se visitaron en diferentes campus de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), con capacidades que variaron entre 0,3 a 15 l/s o equivalente de 170 a 8600 habitantes conectadas (150 litros de consumo de agua per cápita por día) (tabla 16).

Se reconocieron físicamente dos sistemas descentralizados a nivel doméstico. El primero, un pequeño sistema demostrativo que trata las aguas residuales de las instalaciones sanitarias de los pabellones del MIRA Atoyac (Módulo de Información del Río Atoyac) del centro de cultura del agua, ubicado en la Reserva Territorial Atlixcáyotl de Puebla, y el segundo sistema doméstico trata las aguas residuales de una residencia particular ubicada en el fraccionamiento ciudad ecológica Haras.

También se documentó la PTAR del Centro comercial Galerías Serdán, con una capacidad instalada de 4 l/s y un reúso múltiple.

Como casos especiales se documentaron la PTAR del Centro de Investigación y Saneamiento del Río Atoyac (CISA), instalada como planta piloto para tratar un pequeño caudal del agua residual proveniente de la Central de abastos, así como la PTAR del rastro municipal.

En la tabla 16 se muestran las PTAR´s que fueron visitadas y documentadas en campo.

Tabla 16: PTAR´s documentadas durante visitas técnicas.

PTAR	Volumen que tratar/ Capacidad	Sistema	Afluente	Efluente	Destino vertido
			DBO_5 mg/l		
BUAP_1 Facult. Arquitect.	6-8/15 l/s	LA	256	16-23	Reúso Recreativo
BUAP_2 Frac. Casas BUAP	0.3-1.0 l/s	LA	100	33	Presa Valsequillo
BUAP_3 Compl. cultural	nd	LA	nd	nd	río Atoyac
BUAP_4 Escuela de artes	1.0-1.5 l/s	TI	nd	45	Reúso área verde/Atoyac
Mira Atoyac	300 l/d	LA	nd	nd	Infiltración suelo
Haras	2400 l/d	LA SBR	nd	nd	Infiltración suelo
Galerías Serdán	1.7 – 4.0 l/s	LA SBR	150	<20	Reúso instalac. sanitarias y riego
CISA	2 l/s	Primario avanzado	nd	nd	Barranca honda
Rastro municipal	1 l/s	UASB	nd	nd	Alcantarillado

LA: Lodos activados, TI: Tanque Imhoff, LA SBR: Lodos activados SBR, UASB: reactor anaerobio de flujo ascendente (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanke)

2.1.1. Plantas de tratamiento de la BUAP

Tres plantas descentralizadas que se documentaron en la BUAP son sistemas de lodos activados (BUAP_1, BUAP_2, BUAP_3), mientras una PTAR consiste solamente en un pretratamiento con tanques Imhof (Escuela de artes BUAP_4).

La de mayor capacidad de las PTAR´s es el sistema ubicado junto a la Facultad de Arquitectura en Ciudad Universitaria (BUAP_1), que actualmente trata un volumen de 6 a 8 l/s, con la finalidad de alimentar la laguna natural ubicada en el campus, y de esta manera proporcionar un espacio de recreación a la comunidad universitaria (reúso recreativo). El agua residual tratada de la PTAR BUAP_1 cumple con la calidad requerida para el reúso con contacto directo de acuerdo con la NOM-003-1997-ECOI, y ha permitido rescatar la laguna para desarrollar un espacio recreativo dentro de zona universitaria. (http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/wb/comunic/paseo_del_lago_universitario_nuevo_espacio_para_la). Las características de la PTAR_1 se muestran en la ficha 1 del anexo 2.

La PTAR_2 se estableció para tratar las aguas residuales del fraccionamiento de las casas BUAP, ubicadas por el Bulevar "El Carolino", en las orillas de la Presa del Valsequillo (fotos 8a y 8b). El sistema fue rehabilitado en 2014 en base a la infraestructura de una planta de tratamiento existente.

El fraccionamiento de Casas BUAP no cuenta con una conexión al sistema de alcantarillado municipal, debido a la distancia al colector principal (aprox. 1.5 km). Actualmente se tratan entre 0,3 – 1.5 l/s de agua residual sanitaria proveniente de las casas del fraccionamiento. La capacidad de tratamiento aún es mayor, sin embargo, por el suministro de agua potable a la unidad habitacional solamente dos días de la semana, el consumo de agua se reduce considerablemente.

El afluente que entra a la PTAR_2 por lo regular es muy diluido (DBO_5 alrededor de 100 mg/l), y el efluente que muestra valores de la DBO_5 alrededor de 30 mg/l se vierte a la presa del Valsequillo, cumpliendo con la NOM-001-1996-ECOL. Antes de tomar en operación la planta por parte de la BUAP se vertían las aguas residuales del fraccionamiento a la presa directamente sin tratamiento.

La PTAR BUAP_2 es un sistema de lodos activados con aireación extendida por difusores de platillo de burbuja fina. El consumo de energía es alto debido a que solamente se cuenta con 220 V monofásica, y que una conexión para corriente trifásica se encuentra a 1,5 km de distancia. Además, los difusores de platillos requieren mucho mantenimiento. En el anexo 1 se muestra en la ficha 2 la información obtenida del sistema de tratamiento BUAP_2.

Foto 8a – 8b: Planta de tratamiento de Casas BUAP (BUAP_2).

Otro sistema de tratamiento que se ha establecido para las instalaciones de la BUAP es la PTAR para el Complejo cultural universitario (BUAP_3), ubicado por Cúmulo de Virgo. Desafortunadamente no se cuenta con más información sobre el sistema, debido a que es operado por una empresa particular. El efluente tiene un buen aspecto y se vierte directamente al río Atoyac (fotos 9a -9d).

Foto 9a – 9d: Planta de tratamiento complejo universitario BUAP_3

Un cuarto sistema de tratamiento que la BUAP rehabilitó y puso en marcha es la planta de tratamiento de aguas residuales de la Escuela de artes (BUAP_4), con lo que la Institución contribuye al cuidado del medio ambiente al evitar la contaminación del río Atoyac.

La PTAR_4 capta el agua residual de los tres edificios de la Escuela de artes, con una capacidad de tratamiento entre 1.0 – 1.5 l/s. El sistema consiste en un canal de cribas y un canal desarenador como pretratamiento, luego las aguas residuales pasan a un distribuidor que las canaliza de manera equitativa en tres Tanques Imhoff, que funcionan como sedimentadores y tratamiento primario. Está en construcción como paso secundario el establecimiento de un biofiltro con una posterior cloración. Los detalles del sistema BUAP_4 se muestra en la ficha 3 del anexo 2.

Foto 10: PTAR Escuela de Artes BUAP

2.1.2. Pequeños sistemas para el tratamiento y reúso de aguas residuales "*in-situ*"

Se reconocieron físicamente dos pequeños sistemas de tratamiento de aguas residuales sanitarias. El primero se ubica en las instalaciones exteriores del centro de cultura del agua Mira Atoyac (https://corazondepuebla.com.mx/mira_atoyac.html). La pequeña planta trata las aguas residuales de los sanitarios de tres pabellones que

integran el centro. Es un sistema de lodos activados de aireación extendida y el efluente se infiltra subsuperficial en las áreas verdes. Tiene un carácter demostrativo y educativo para fomentar la cultura del agua (fotos 11a – 11c).

Foto 11a – 11c: PTAR Mira Atoyac

El segundo sistema de tratamiento de agua residual doméstico que se documentó, se encuentra instalada en una casa particular en la ciudad ecológica "Haras", un desarrollo de gran extensión de nivel social alto en la periferia en el suroriente de la ciudad de Puebla (http://www.haras.com.mx/index.html#top).

Haras está ubicada en una de las pocas zonas arboladas de Puebla. No se cuenta con ningún sistema de drenaje y alcantarillado. Todas las residencias requieren un manejo propio de sus aguas residuales. En más del 95% se instalan fosas sépticas o biodigestores con una posterior infiltración al subsuelo del agua residual "pretratada".

Dentro de este contexto y enfocado al reúso "*in situ*" es importante considerar que "*la fosa séptica efectúa solamente un proceso preparatorio en la depuración de las aguas residuales domésticas, por lo tanto, el efluente no posee las características físico-químicas ni microbiológicas adecuadas para ser descargado directamente a un cuerpo receptor", y que "por esta razón, es necesario proporcionar un tratamiento al efluente, con el propósito de disminuir los riesgos de contaminación y de perjuicio a la salud pública*" (NOM-006-CONAGUA-1997).

Por lo tanto, una de las desventajas de las fosas sépticas o sistemas anaerobias es que el efluente no cumple con la calidad para el reúso, ni para el riego de jardines y áreas verdes o el lavado de vehículos. Además, si los sistemas posteriores de infiltración no están debidamente calculados, diseñados e instalados, la infiltración del efluente presenta un riesgo de contaminación del subsuelo. Con el enfoque al reúso, los sistemas aerobios son la solución indicada.

No obstante, existen casas particulares que tienen instaladas pequeñas plantas de tratamiento biológico de lodos activados de sus aguas residuales domésticas, y el agua residual tratada se reutiliza para el riego de las áreas verdes.

Más detalles del sistema de tratamiento doméstico se encuentran en la ficha 4 del anexo 1.

Foto 12: PTAR Casa particular Ciudad ecológica Haras con PTAR

2.1.3. Planta de tratamiento del Centro comercial Galerías Serdán

La PTAR del Centro comercial Galerías Serdán es un buen ejemplo de las opciones de tratamiento descentralizado en el sector comercial urbano, que se caracteriza por un alto consumo de agua en pequeñas áreas y sitios puntuales (centros comerciales, hoteles, edificios corporativos, oficinas).

En promedio, la PTAR del Centro comercial trata diariamente un volumen de agua residual de 150 m^3, equivalente a un caudal de 1,7 l/s, o 1000 habitantes conectadas. El agua residual tratada se reutiliza en las instalaciones sanitarias (WC), así como en el

riego de 5000m^2 de áreas verdes del complejo. Con el reúso del agua residual tratada se reduce entre 50% y 55% el consumo de agua potable, lo que tiene un efecto ecológico importante por el ahorro de agua potable. Esto coincide con los datos que reportan Mesta Chacón et. al. (2000) del Centro de Entretenimiento y Compras Mundo "E" en el Municipio de Tlalnepantla.

No obstante, durante la temporada de lluvias se cuenta con un exeso de agua residual tratada que se vierte al alcantarillado municipal. Esto, debido a que se reduce el requerimiento para el riego d elas áreas verdes durante la temporada de lluvias.

Debido a la fluctuación, tanto de caudales como de carga orgánica, acordes a los horarios de actividad del centro comercial, se decidió instalar un sistema de lodos activados basado en el proceso SBR (tratamiento secuencial por lotes, por sus siglas en inglés: Sequencing Batch Reactor), que se caracteriza por su capacidad de amortiguar los picos en el volumen del agua residual generada. Además, es un proceso que proporciona una alta calidad de efluente.

Independientemente de los aspectos ecológicos, la sustitución de más del 50% de consumo de agua potable del Centro comercial significa un ahorro económico muy considerable. Por ejemplo, los datos del Centro comercial Mundo E. en Tlalnepantla indicaron que deduciendo los costos de operación y mantenimiento de la PTAR se puede lograr una amortización del costo de la inversión en un período máximo de cinco años y mínimo de tres años.

Los detalles de la PTAR se presentan la ficha 5 del anexo 2.

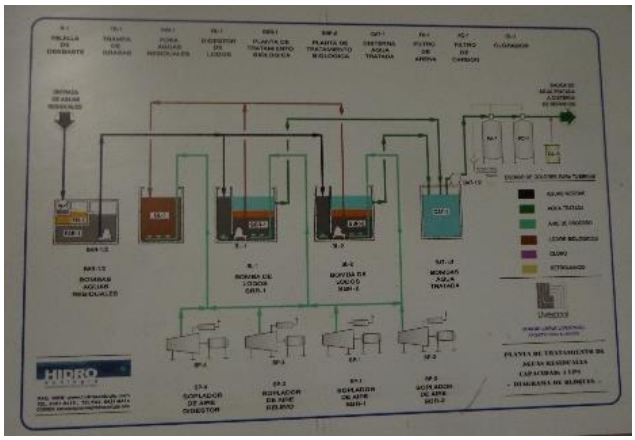


Foto 13: Esquema del sistema de tratamiento Centro Comercial Galerías Serdán

2.1.4. Planta de tratamiento del CISA

La PTAR está diseñada para un flujo de 3.5 l/s para dar tratamiento a las aguas residuales provenientes de la Central de abastos. La red de drenaje de la Central de abastos va directa hacia la PTAR en donde son descargadas a una caja derivadora, la cual permite controlar el volumen de agua residual que ingresa a la PTAR.

Actualmente la PTAR está limitada en su capacidad diseñada de tratamiento, y operando solamente con un caudal máximo entre 1,5 a 2 l/s.

El tren de tratamiento consiste en un pretratamiento con desarenador, rejillas, un tamiz mecanizado, así como dos trampas de grasas y aceites. En lugar de un proceso biológico para el tratamiento secundario, se cuenta como etapa principal con un tratamiento primario avanzado con procesos físicos-químicos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración (gráfica 12).

Gráfica 12: Tren de tratamiento de la PTAR del CISA

De acuerdo con la información proporcionada por el personal operador, en promedio se trata un flujo de aguas residuales crudas de 1.5 l/s con una DQO del afluente de 1,200 mg/l. La PTAR opera de manera continua 10 horas por día y el efluente muestra en promedio una DQO de 700 mg/l, equivalente a una remoción en el DQO del 46%.

Los niveles de la DQO y de la remoción aún no permiten el reúso de las aguas residuales tratadas y del efluente.

Foto 14: Edificio del CISA y efluente de la PTAR piloto

2.1.5. Planta de tratamiento del rastro municipal

Como un sistema descentralizado especial se revisó la planta de tratamiento de las aguas residuales del rastro municipal. A nivel municipal, los rastros juegan un papel importante debido a la generación de aguas residuales con alta cargas orgánicas.

La evaluación de la PTAR en campo mostró ciertas deficiencias del sistema de tratamiento, así como en la operación, por lo cual se seleccionó esta planta para desarrollar un concepto de rehabilitación. Basado en las observaciones de campo se derivaron varias recomendaciones enfocadas al desarrollo del concepto de rehabilitación de la PTAR. Los detalles se presentan en el anexo 3.

Foto 15: PTAR del rastro municipal

2.2. Conocimiento de PTAR´s descentralizadas instaladas a través de encuestas

A través de las encuestas telefónicas se obtuvo conocimiento de varias plantas descentralizadas de tratamiento de aguas residuales en diversos centros recreativos y universidades que cuentan con superficies y áreas verdes considerables (tabla 17).

El agua residual tratada de las PTAR´s en Parque España, Club Alpha 2 y Club Britania La Calera se reutiliza para el riego de sus áreas verdes, mientras que en el Club de Golf Las Fuentes y en el Club deportivo familia Volkswagen, el agua residual tratada se vierte sin utilizar al drenaje público. Sin embargo, por parte de la administración del Club deportivo Volkswagen se está pensando utilizar el agua residual tratada para el riego de áreas verdes.

Desafortunadamente, en las encuestas no se obtuvo información más detallada sobre los sistemas de tratamiento instalados, como volúmenes tratados o las condiciones de operación y mantenimiento.

Tabla 17: PTAR´s descentralizados en centro recreativos y universidades

PTAR	PTAR	Destino de aguas residuales tratdas	Información adicional
Parque España	Si	Reúso en áreas verdes	Zona tarifaria 5
Club de golf Las Fuentes	Si	Descargas al drenaje	Riego de áreas verdes con agua potable de pozo, zona tarifaria 6
Club Alpha 2	Si	Reúso en áreas verdes	Zona tarifaria 5
Club deportivo Familia Volkswagen	Si	Drenaje	Agua potable para riego de áreas verdes Zona tarifaria 4
Club Britannia La Calera	Si	Reúso en áreas verdes	Zona tarifaria 2
Parque España 2			
Fraccionamiento La Vista	Si	Sin información	Zona tarifaria 6

Foto 16a – 16f: Centros con propios sistemas de tratamiento de aguas residuales sanitarias.
Arriba de izquierda a derecha: Club español, Club de golf Las Fuentes, Club Alpha 2, Abajo de izquierda a derecha: Club deportivo Familia Volkswagen, Club Britannia La Caldera, Club español 2.

Foto 17a – 17c: Fraccionamiento La Vvista con PTAR a la orilla del río Atoyac.

2.5. Información pública de las PTAR´s descentralizadas de Agua de Puebla para Todos

De acuerdo con fuentes de prensa Agua de Puebla para todos opera tres sistemas que proporcionan una calidad de efluente apto para fines de reúso, (http://www.e-consulta.com/nota/2018-07-16/ciudad/con-7-plantas-tratadoras-agua-de-puebla-atiende-saneamiento).

La PTAR Parque Ecológico es un sistema semicentralizado con una capacidad de tratamiento entre 50 a 80 l/s. También opera dos sistemas descentralizados, las PTAR´s Bosques de Chapultepec y Galaxia La Calera, que generan agua con calidad de reúso que sirve para riego de parques, jardines y relleno de lagos artificiales.

Actualmente está en proceso de estabilización la PTAR Galaxia La Calera tratando un promedio entre 10 y 15 l/s, equivalente a 4300 a 6500 habitantes. No obstante, está diseñada para tratar un caudal máximo de 35 l/s, lo que equivale a aproximadamente 15 000 habitantes (fotos 18a-18b).

Foto 18a – 18b: Fraccionamiento Galaxia La Calera y ubicación de su PTAR

Foto 19a – 19b: Fraccionamiento Bosques de Chapultepec y ubicación de su PTAR

3. Opciones para el reúso de agua residual tratada en zonas urbanas

En las zonas urbanas existen múltiples opciones de reúso de aguas residuales tratadas para fines que no requieren una calidad de agua potable, en la tabla 18 se muestran las diferentes aplicaciones comunes.

Una de las demandas importantes de agua residual tratada con potencial de reúso es para el riego de áreas verdes y parques. Un estudio detallado de las opciones de tratamiento y reúso de aguas residuales en la zona metropolitana de Lima, Perú, mostró el alto potencial de sustituir el uso de agua potable (pozos) por aguas residuales tratadas, siempre y cuando se garantice la calidad del agua residual tratada (Moscoso Cavallini, 2011).

Tabla 18: Aplicaciones para el reúso de aguas residuales tratadas en zonas urbanas.

	Tipo reúso	Distribución
Parques y Jardines públicos	Paisaje urbano	Linea morada, In-situ (SD), Pipa
Campos de Golf	Paisaje urbano	Linea morada, In-situ (SD)
Camellones	Paisaje urbano	Pipa
Lagos y lagunas	Recreativo	Linea morada, In-situ
Estanques	Recreativo	In-situ (SD)
Fuentes Ornamentales	Recreativo	In-situ (SD), Pipa
Jardines privados	Urbano ambiental	In-situ (SD)
Lavado de autos	Urbano ambiental	Pipa, In-situ (SD)
Lavado de Camiones de Basura	Urbano ambiental	Pipa
Lavado de Calles y Banquetas	Urbano ambiental	Pipa
Supresión de Polvo	Urbano ambiental	Pipa
Cisternas Control de Incendios	Urbano ambiental	Pipa
Baños Públicos, WC y Mingitorios	Urbano ambiental	In-situ (SD)
Cementerios	Urbano ambiental	Pipa

Específicamente en México, en el capítulo 39 "del drenaje, alcantarillado, saneamiento y reúso" del Código Reglamentario del Municipio de Puebla COREMUN, el artículo 2412 sobre "*Servicio de Reúso*", especifica: "***Será obligatorio utilizar agua tratada en los usos urbanos siguientes:*** *para riego de áreas verdes, riego de terrenos particulares, limpieza y conservación de transporte, lavado y mantenimiento de vialidades y banquetas y supresión de polvos, servicios sanitarios, monumentos, fuentes públicas, parques y jardines, para conservación y mantenimiento de camellones, riego de campos de golf, riego y mantenimiento de cementerios y limpieza exterior de inmuebles, canchas deportivas, zoológicos y pistas de hielo*".

Con este artículo el COREMUN, define una amplia gama de diferentes usos públicos urbanos que no requieren una calidad de agua de primer uso, y para los cuales el reúso de agua residual tratada sería oblgatorio.

3.1. Superficie de parques, áreas verdes y camellones en la zona urbana de Puebla.

Con énfasis al potencial de reúso en las zonas urbanas, es importante conocer las superficies de parques y áreas verdes.

En 2012 la entonces Secretaría de Medio Ambiente y Servicios Públicos del Municipio de Puebla realizó un primer análisis de datos de áreas verdes de la zona urbana, lo cual permitió conocer el número de parques y jardines, así como sus superficies para determinar el valor de superficie de área verde por habitante, como un indicador importante para la calidad de las zonas urbanas. Se integraron 374 registros, obteniendo un panorama preliminar de las áreas verdes existentes. La información fue incluida en el Plan de Gestión Ambiental Municipal (2013) en su apartado "V.11 Áreas Verdes" y en total se contabilizaron 116.58 Hectáreas de áreas verdes y parques (SDUS 2016).

El mayor número de áreas verdes (193 unidades) se ubicó en la clase de áreas pequeñas que abarca superficies entre 1001 m^2 a 5000 m^2 (tabla 19). De las 335 unidades registradas, 76 fueron clasificadas como parques con una superficie total de 168,665 m^2, y con un rango de la superficie entre 700 m^2 mínimo y 12578 m^2 máximo.

Tabla 19: Clasificación preliminar de las áreas verdes del Municipio de Puebla en 2012

Clasificación áreas	Superficie m^2	No. de áreas	Clase %	m^2 aprox
Micro	< 1000	80	23.9	34,651
Pequenás	1001 – 5000	193	57.6	397,127
Medianas	5000 - 10000	41	12.2	293,403
Grandes	>10000	21	6.3	440,659
Total		**335**	**100**	**1,165,840**

Para completar este análisis preliminar, en 2015 se realizó el "Primer Inventario Municipal de Áreas Verdes (IMAV)", con el objetivo de contar con "*un instrumento que integre información cuantitativa y cualitativa acerca de las áreas verdes del municipio de Puebla para orientar las acciones institucionales de conservación e incremento de dichas áreas en el presente y para el futuro*". (SDUS 2016).

También se establecieron las bases conceptuales que sustentan el IMAV, y las definiciones que permitieron determinar los parámetros de clasificación de las áreas verdes urbanas para el Municipio de Puebla, tales como:

Área Verde.- *Las áreas verdes son aquellas superficies o áreas urbanas a cargo del Municipio cubiertas por vegetación natural o inducida, las cuales tienen la finalidad de proporcionar a la ciudadanía en general de espacios públicos dignos que les permitan descansar, recrearse y divertirse en lugares limpios y seguros, al mismo tiempo, cada*

uno de esos espacios, independientemente de la superficie que tengan, aportan calidad de vida a la ciudad,……..”

Camellones.- *La franja comprendida entre los carriles de sentidos opuestos sobre cualquier vialidad y los que separan los carriles centrales de los laterales, que por lo general cuentan con dimensiones hasta de 2 m, mayores a 2 m y mayores a 3 m.*

Parques*.- Los espacios urbanos más grandes de la ciudad y se diferencian de las plazas por el componente natural. Generalmente, su gran extensión territorial presenta vegetación, veredas y cuerpos de agua. Representan áreas de recreación, paseo o de retiro.*

Parque metropolitano. - *El espacio destinado al desarrollo de actividades recreativas, que posee valores paisajísticos y ambientales. Asimismo, se caracteriza por grandes extensiones territoriales y que tiene influencia directa en la ciudad y da servicio a la zona metropolitana.*

Con el IMAV se aumentó el número de registros por más de 1500 unidades, con una superficie adicional de áreas verdes de 1,903,353 m^2 (190 ha), llegando a un total de 3,069,192 m^2 (307 ha).

Cabe destacar que de los 1500 registros nuevos se clasificaron 179 unidades como parques y áreas verdes, con una superficie de 1,228,021m^2 (123 ha), mientras que aproximadamente 1300 unidades fueron clasificados como camellones, integrando una superficie total de 675,332 m^2 (67 ha), y con un promedio por camellón de 530m^2.

Por su superficie destacan entre los parques y las áreas verdes las siguientes unidades que se muestran en la tabla 20.

Tabla 20: Selección de parques y áreas verdes en la zona urbana del municipio de Puebla.

No.	Denominación	Especificación	Superficie m^2
91	Fraccionamiento Lomas del Marmol area 1, Calle Travertino s/n	Área verde	14361
91	Fraccionamiento Lomas del Marmol area 1, Calle Onix s/n	Área verde	18495
1512	Bioparque La Calera, Pedregal la Calera,	Área protegida	93516
1512	Bioparque La Calera, Pedregal la Calera,	Área protegida	548251
1505	U. habitacional Agua Santa entre 119 poniente y 9 a sur, Infonavit Agua Santa.	Parque	43718
1441	El Taco, Calzada Ignacio Zaragoza y autopista mexico- puebla, zona de asignacion de nombre de colonia 10	Área verde	14440
1406	San Francisco paseo, Boulevard 5 de Mayo entre 20 Oriente y boulevard del Alto	Parque	13146

San Jerónimo Caleras, Camino Real a Tlaxcala y Flores Magón, San Jerónimo c Caleras	Parque deportivo	11862
U.H. La Margarita, Avenida 34 sur y 57 Oriente, Infonavit La Margarita,	Área verde	12977

3.2. Riego de áreas verdes y jardines de zonas residenciales

Las zonas de alto nivel social a menudo muestran un consumo de agua potable per cápita elevado, entre otro por el riego de las áreas verdes residenciales. Para analizar la contribución del riego de las áreas verdes y jardines al consumo total de agua potable en las zonas de alto nivel económico al consumo, se han llevado a cabo estudios en varias ciudades a nivel mundial.

Un estudio de Morote y Hernández (2016) sobre el uso y consumo de agua en los jardines de las viviendas particulares en España, ha mostrado que el consumo para el riego de los jardines varía en un rango amplio, dependiendo de múltiples factores, como superficie a regar, densidad de la vegetación y tipología del jardín. El volumen de agua para el riego de jardines varió entre el 29% al 47% del consumo total doméstico. Los mismos niveles reportan Domene y Saurí (2003) para el área Metropolitana de Barcelona, donde en las zonas de alto nivel social se destina para regar el jardín el 48,8% del consumo total de agua. Estas cifras aún se superan en las regiones semiáridas y áridas del oeste de Estados Unidos y de Australia, p.ej. en los jardines unifamiliares en Perth, llegando a 56% del consumo total doméstico.

Para la Ciudad de México, Barrios (2004) estima que, a través del tratamiento de las aguas residuales y del reúso descentralizado, a nivel doméstico se puede ahorrar entre 40% y 50% del consumo doméstico, lo que coincide con las cifras que se reportan de España y Estados Unidos.

La sustitución de agua potable por agua residual tratada en el riego de áreas verdes y jardines particulares ofrece un potencial considerable de reúso.

3.2.1. Zonas potenciales con alto consumo de agua potable para riego de jardines privados en el municipio de Puebla

Con base en la clasificación del SOAPAP de las zonas tarifarias (estratos), se identificaron las zonas y fraccionamientos de nivel de tarifa 5 y 6 (tabla 21), que por lo regular tienen un alto consumo de agua potable y a menudo jardines privados con

superficies considerables. Se identificaron 15 zonas con un total de 61 colonias (tabla 22), para los cuales se asume que el riego de áreas verdes y jardines particulares contribuye a un alto consumo de agua.

Tabla 21: Zonas residenciales

Total de Zonas	15
Total de colonias	61
Nivel tarifario	5 y 6
Costos $/m^3 de agua potable	23.88 y 25.42

Foto 20: Fraccionamiento de nivel tarifaria 6.

Tabla 22: Zonas residenciales y colonias nivel tarifario 5 y 6

Zona	**Colonia**	**Zona tarifaria**
Zona Las Fuentes	Club de golf las fuentes	6
	Campestre del bosque	6
	Residencial las Alamedas	5
Zona Moratilla	Fuentes de Moratilla	5
	Fracc. Moratilla	6
Rincón del Bosque	Rincón del bosque	5
Zona Zavaleta	Campestre el paraíso	6
	Cipreses Zavaleta	6
Zona Zavaleta	Fracc. Zavaleta	6
	La Concepción	6
	Villa Zavaleta	6
	Estrella del Sur	5
	Flor de nieve	5

	Arcos del Sur	5
Zona Las Animas	La providencia	6
	Fracc. Santa Anita	5
	Cortijo La Herradura	5
Zona Angelópolis	Rivera de Atoyac	5
	Bosques de Angelópolis	5
	Cortijo Angelópolis	5
	Puerta Paraíso	6
	Fuentes de Angelópolis	5
Arboledas de San Ignacio	Arboledas de San Ignacio	5
Zona La Calera	Bosques La Calera	5
	El mirador la calera	5
	Rincones de la calera	5
	Villa Satélite la calera	5
	La calera	5
	Lomas San Alfonzo	5
	Lomas del Angel	5
Zona La Vista	Fraccionamiento la Vista	6
Lomas Angelópolis	28 colonias	6
Zona Martinito	San Martinito	5
	Cortijo San Martinito	5

Cabe mencionar que dos de las zonas cuentan con su propia planta descentralizada de tratamiento: El fraccionamiento La Vista, así como el Club de Golf Las Fuentes (ver capítulo 2.3).

3.2.2. Requerimiento y consumo de agua para riego en áreas verdes

De acuerdo con Parés et. al. (2013) los jardines privados se han convertido en uno de los elementos del exterior del hogar que más recursos hídricos consumen, como consecuencia de la instalación de jardines de césped que muestran muy altos niveles de evapotranspiración.

En la tabla 23 se muestran en resumen los resultados de estudios realizados por Domene Gómez y Saurí Pujol (2003) sobre el consumo de agua para el riego de jardines privados en la región metropolitana de Barcelona. En verano en zonas de alto nivel social se consume entre 3 a 5,5 l/m^2/día, lo que significa para una superficie de 350m^2 un volumen de agua de 1050 a 1925 litros diario. No obstante, el promedio anual se reduce a un rango de 1,2 a 2,2 l/m^2 x día, equivalente a un volumen diario de 420 a 770 litros. En consecuencia, el riego de los jardines privados lleva a niveles altos de consumo per capita en las zonas y fraccionamiento de renta alta.

Tabla 23: Requerimiento y consumo de agua para riego en áreas verdes

	Zona renta media	Zona renta alta
Característica de la vivienda		
Superficie jardín	33%	42%
Superficie media del jardín	235,5 ± 148,6 m^2	464,4 ± 1168,8 m^2
Necesidades hídricas del jardín		
Verano	2,6 ± 1,3 l/m^2 x día	4,3 ± 1,2 l/m^2 x día
Anual	0,9 ± 0,5 l/m^2 x día	1,5 ± 0,5 l/m^2 x día
Características de riego		
Sistema de riego predominante	Manguera (60%)	Riego localizado (69%)
Origen de agua de riego	Red general (70%)	Red general (85%)
Aportaciones medias en riego		
Verano	2,7 ± 1,7 l/m^2 x día	4,2 ± 1,3 l/m^2 x día
Anual	1,1 ± 0,8 l/m^2 x día	1,7 ± o,5 l/m^2 x día
Consumo agua doméstico per capita		
Verano	323,0 ± 252,8 l/pers x día	409,0 ± 1484,4 l/pers. x día
Anual	247,1 ± 156,5 l/pers x día	290,8 ± 761,2 l/pers. x día
Consumo de agua doméstico por vivienda anual	667,3 ± 87,3 l/día	1053,6 ± 352.6 l/día

Ejemplo de cálculo: Un consumo de 2 l/m^2/día para el riego de una superficie de áreas verdes de 250m^2, es equivalente a un gasto adicional de 500 litros/día. Para satisfacer el riego de jardines y áreas verdes de 5000 residencias con este volumen adicional en promedio, se requeriría un caudal de 29 l/s de agua residual tratada.

Es importante avanzar en el conocimiento de las características y las necesidades hídricas de estas zonas urbanas debido a su presión sobre la demanda de agua. Además, el acelerado crecimiento de las zonas urbanas lleva consigo un aumento considerable de las zonas de alto nivel económico con un elevado consumo de agua.

Hof and Wolf (2014) estimaron el consumo de agua en zonas de áreas verdes privadas en España, aplicando imágenes satelitales de alta resolución (WorldView-2) en combinación con el requerimiento hídrico para el riego y la estimación de la evaporación. Mostraron que el establecimiento de áreas verdes y jardines privados no está limitado por la disponibilidad de agua o de los costos. Desafortunadamente no se cuenta con estudios similares en México. No obstante, los estudios internacionales permiten deducir algunas conclusiones generales:

Si los costos del agua no proporcionan un mecanismo adecuado en las zonas de alto nivel económico para reducir los consumos de agua, se deben buscar medidas alternativas, como el requerimiento de sustituir agua potable por agua residual tratada para el riego de áreas verdes y jardines privados.

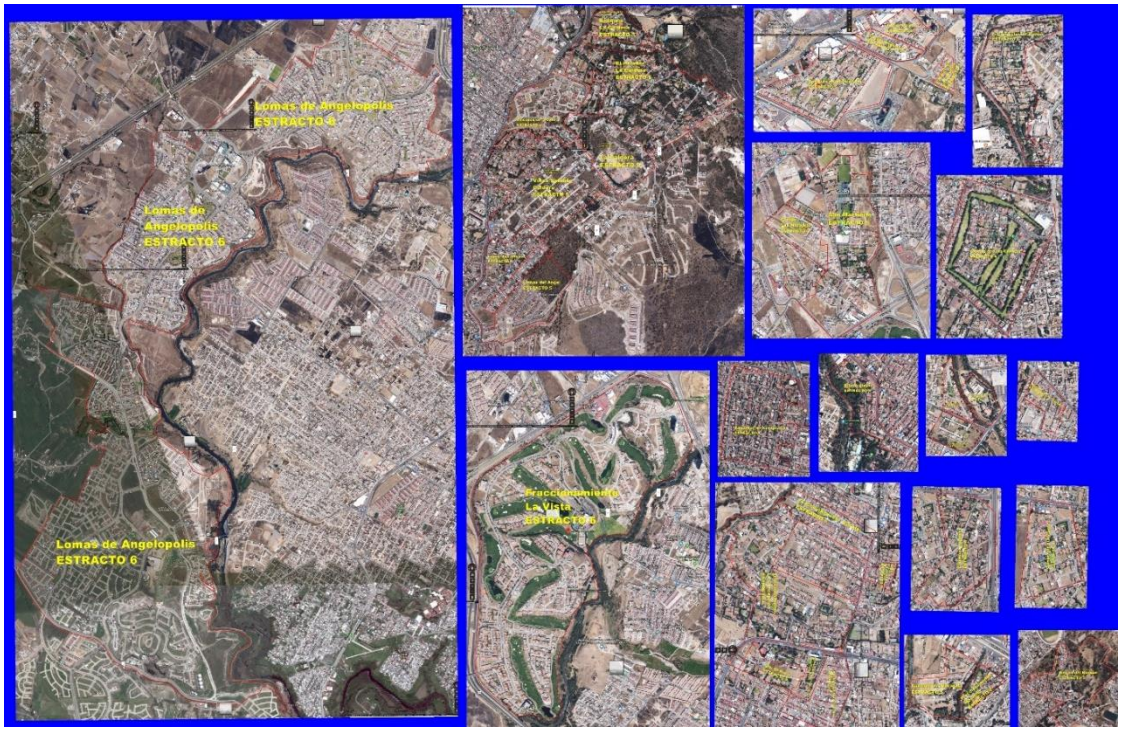


Foto 21: Dieciseis zonas de nivel tarifario 5 y 6 en la zona urbana de Puebla.

3.3. Nuevos desarrollos viviendas y fraccionamientos en la periferia

El crecimiento de la zona urbana de Puebla ha sido acelerado en las últimas tres décadas. Según Jaime Zambrano (2015) la zona metropolitana de Puebla creció en los últimos 35 años 12 veces y la población aumentó 2.46 veces. La extensión de la mancha urbana ha sido un proceso descontrolado, por lo cual en varias zonas se presentan problemas como la carencia de servicios básicos de suministro de agua potable, drenaje y saneamiento.

Una de las zonas problemáticas es la de Angelópolis y los municipios conurbados que presentan parcialmente problemas de carencia de servicios. Como señala Flores Hidalgo *"Uno de los problemas consiste en que las viviendas se están construyendo en las zonas limítrofes, sitios en donde no existen los servicios necesarios. Puebla se caracteriza por un repunte en la creación de infraestructura carretera, sin embargo, faltan servicios en la periferia"* (Jaime Zambrano, 2015).

Actualmente grandes desarrollos de vivienda en la perieria de Puebla son la zona de Lomas de Angelopolis 3, con el desarrollo Punta Cascatta y el Fraccionamiento Jardines de la Montaña, entre otros (Fotos 22 a 24).

Foto 22: Zona de desarrollo Lomas de Angelopolis 3

Uno de los cuatro proyectos inmobiliarios en Lomas de Angelópolis III es el proyecto Punta Cascatta con mil cuatrocientos departamentos en torres verticales habitacionales, que incluye un parque de 5.5 hectáreas de lagos y áreas verdes (foto 15). De acuerdo con la planeación, está previsto que terminen en agosto 2018 las dos primeras torres.

Todos los desarrollos en esta zona prevén amplias áreas verdes, que consumirían en el futuro volúmenes considerables de agua, por lo que serían proyectos potenciales para la integración de sistemas descentralizados de tratamiento para el reúso *in-situ*.

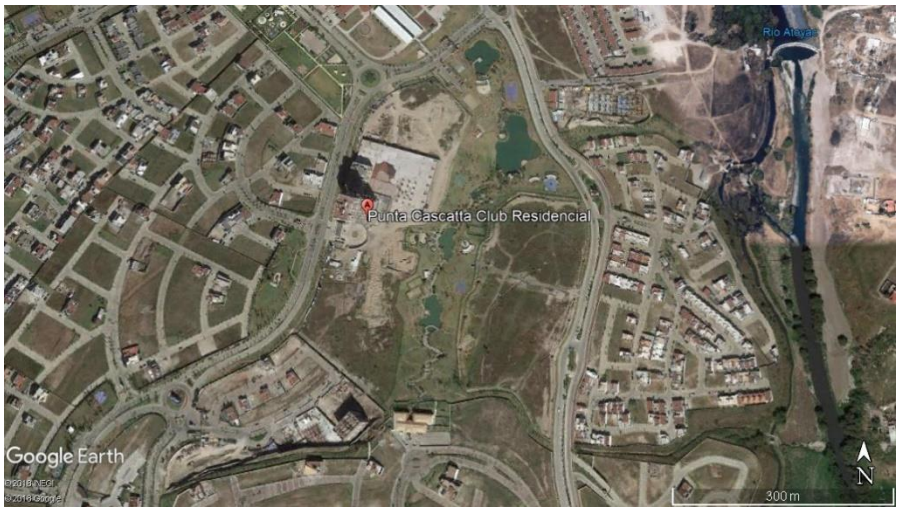


Foto 23: Desarrollo Punta Cascatta con amplio parque de áreas verdes y lagos

Foto 24 Fraccionamientos Jardines de la Montaña en la periferia

Para nuevos desarrollos de vivienda y fraccionamientos en la periferia de la zona urbana de Puebla que no cuentan con una conexión a la red pública de alcantarillado se debe considerar un estudio previo sobre la factibilidad de establecer un sistema descentralizado de tratamiento, incluyendo la estimación del potencial de reúso del agua residual tratada.

3.4. Estudio sobre oferta y demanda de agua en la zona urbana de Puebla

En una modelación dinámica de la gestión del agua urbana para la zona metropolitana de Puebla, considerando el área de servicio de Agua de Puebla, Martínez Austria y Vargas Hidalgo (2016), aplicaron el modelo Vensim para analizar diferentes escenarios a fin de lograr un equilibrio en la oferta y demanda de agua hasta el 2030. Algunos de los parámetros que alimentaron el modelo se muestra en la tabla 24.

Tabla 24: Selección de variables para la aplicación del modelo Vensim para el establecimiento de escenarios de demanda y oferta de agua potable en la zona metropolitana de Puebla.

Variable	Unidad	Descripción y fuente de información	Valor en el modelo
Coeficiente de perdidas	adimensional	SOAPAP para 2011 reporta un coeficiente de perdidas de 37,4%	37,38 %
Dotación	l/hab/día	Dotación proporcinada 184.62 l/hab/d	184,62
Población	habitantes	Población atendida por SOAPAP en 2015	1,841,500
Tasa de crecimiento industrial	adimensional	Valor estimado de 4 %, obtenido de los datos económicos del estado de Puebla	4 %
Industrial		No. de industrias, de: "Diagnóstico respecto de la Contaminación por descargas al Atoyac". Semarnat-Conagua, marzo de 2011	307
Tasa de crecimiento comercial	adimensional	Valor estimado a partir de los datos económicos del estado de Puebla	4 %
Comercial	adimensional	No. inicial de establecimientos comerciales. Valor estimado, datos de organismos operadores de la zona	13 312
Tasa de crecimiento de áreas verdes	ha	Valor estimado del Plan Municipal de Desarrollo, 2002-2005	806
Coeficiente de riego en jardines	$l/m^2/d$	Consumo de agua para riego de jardines. CECSA, 1995	3

El estudio consideró un crecimiento poblacional de 1 842 000 habitantes en el año 2015 a 1 930 000 habitantes en 2030, y una reducción del caudal de bombeo por el abatimiento de los pozos de 3.65 m3/s en 2015 a 3.267 m^3/s en 2030 (tabla 27).

El estudio partió de un déficit de abasto actual de 1.855 m^3/s como diferencia entre el consumo real de agua potable en 2015 de 171 l/hab/d y el recomendado per cápita para una clase socioeconómica media con un clima templado de 195 l/hab/d de acuerdo con Conagua (1994).

Bajo este escenario la dotación en 2030 estará 25% por debajo de lo recomendado, con un déficit de abasto de 2,564 m^3/s, con un impactando negativo en la salud de la población, y en el desarrollo económico y social de la zona metropolitana (tabla 25).

El modelo arroja que los principales componentes para cerrar la brecha entre demanda y oferta son la reducción del consumo de agua potable a través de la disminución de perdidas por fugas, del aprovechamiento del agua residual tratada en

diferentes reúsos, así como en menor dimensión, con la captación de aguas pluviales (tabla 25).

Tabla 25: Escenarios para equilibrar demanda y oferta de agua potable de acuerdo con Martínez Austria y Vargas Hidalgo (2017).

	Escenario 1		Escenario 2		Comentario
	2015	2030	2015	2030	
Caudal bombeo l/s	3650	3260			
Consumo real per capita Litros/hab/día	171	146			
Déficit de abasto l/s	-1855	-2564			
Reducir pérdida por fugas l/s			1490	500	Iniciar 2017 y aumentar hasta el 2022
Reúso de aguas residuales tratadas l/s			0	1700	Iniciar 2017 y alcanzar hasta 2022 un 50% reúso
Captación de agua pluvial				19	

En 2014 Conagua determinó la disponibilidad de agua y la demanda en el acuífero del Valle de Puebla (2104) que es la fuente para el suministro de agua potable para la zona metropolitana de Puebla, diferenciando entre los tipos de uso que se muestran en la tabla 26. El estudio muestra que más de la mitad del agua extraída (55.4%) se destina al uso público urbano. Agregando el uso doméstico se llega a un 62% o 202,3 millones de metros cúbicos que se extraen para los usos urbanos. Para el 2030 se estima que para el uso público y urbano se requerirán 245.1 millones m^3 anuales, lo cual representa 41,8 millones de m^3 más de los utilizados en el año 2013, considerando que la población urbana para el año 2030 llegará a 2'616,048 habitantes, 414,341 habitantes más de los que había en el año 2010, mientras que la población total pasará de 2'301,261 habitantes en 2010 a 2'711,369 habitantes al final del año 2030 (DOF 09/02/2016). Las cifras muestran, que la presión sobre los recursos hídricos en la zona sigue en un constante aumento, lo que demanda el desarrollo de una estrategia integral a nivel de la cuenca del Alto Atoyac.

Tabla 26: Consumo de agua por tipo de uso en el acuífero Valle de Puebla

Tipo de uso	Millones de m^3/año	%
Uso público urbano	181,6	55,4
Uso doméstico	21,7	6,6
Uso agrícola	77,5	23,7
Uso industrial	42,0	12,8
Servicios y pecuario	4,9	1,5
Total usos/volumen extraido	327,7	100

La distribución de los diferentes tipos de uso de agua muestra, que un alto potencial tanto de ahorro como de sustitución de agua potable por agua residual tratada se encuentra en el uso público urbano (incluyendo el doméstico), así como en menor proporción en la industria. No obstante, la gestión del agua en la industria es de alta importancia debido al potencial contaminador.

4. Potencial del reúso de aguas residuales tratadas

El potencial de reúso de aguas residuales tratadas se deriva del volumen de agua que puede sustituir el volumen de agua potable de primera calidad utilizado en usos secundarios, como el riego de áreas verdes, lavado de coches, etc.

El caudal de agua potable suministrado por Agua de Puebla a los diferentes usuarios (público, doméstico, comercial, industrial) es alrededor de 2300 l/s (Caudal de bombeo menos pérdida, tabla 27).

Si se asume que del caudal de agua potable suministrado se reusa un máximo de 50% en usos secundarios que no requieren la calidad de agua de primera, el potencial total para la zona urbana de la Ciudad de Puebla sería equivalente a aproximadamente de1150 l/s. Sin embargo, estos valores solamente consideran las zonas atendidas por SOAPAP y Agua de Puebla, y no contabilizan los consumos de agua potable en las Juntas Auxiliares.

Tabla 27: Caudales de bombeo, perdidas y suminstro de agua

Parametro	Valor	Población equivalente*
Caudal de bombeo l/s	3650	1,844,210
Porcentaje de pérdidas %	37	----
Caudal de pérdida l/s	1350	682,105
Caudal suministrado l/s	2300	1,162,105
Potencial reúso (50 %) l/s	1150	581,052

*En base a un consumo de 171 l/habitante/día

Un potencial importante de reúso se presenta en el riego de áreas verdes. La superficie de áreas verdes en la zona urbana de Puebla varía entre 307 ha, registradas en el Inventario Municipal de Áreas Verdes públicas (SDUS, 2016) y 806 ha, estimadas por Martínez Austria y Vargas Hidalgo (2016), incluyendo también áreas verdes de clubes y parques privados.

Considerando un requerimiento de riego entre 2 – 5 litros por m²/día en la temporada seca (Moscoso Cavallini, 2011), el consumo de agua varía entre 71 l/s a 178 l/s, y 187 a 466 l/s, respectivamente (tabla 28). No obstante, como valor de referencia se podría tomar el promedio de 279 l/s partiendo de la superficie estimada por Martínez Austria y Vargas Hidalgo.

Tabla 28: Potencial de reúso en áreas verdes en la zona urbana de Puebla

Potencial reúso	Superficie	Rango de demanda* l/s	Promedio de demanda** l/s
Áreas verdes municipales	307 ha	71 – 178	89
Áreas verdes, valor estimado (Martínez A. y Vargas H., 2016)	806 ha	187 – 466	279

*Consumo entre 2 – 5 l/m²/día, **Consumo 3 l/m²/día

Para los demás usos secundarios, como por ejemplo la limpieza y conservación de transporte, lavado y mantenimiento de vialidades y banquetas y supresión de polvos, limpieza exterior de inmuebles, canchas deportivas, zoológico, etc., es difícil estimar el potencial de reúso, debido a que no existen estudios, datos o registros al respecto.

No obstante, la sustitución de agua potable por agua residual tratada o directamente reciclada, utilizada en los lavados de auto, parece ser un potencial importante de reúso. Según datos de la entonces Asamblea Legislativa del Distrito Federal (ALDF), los aproximadamente 900 negocios de lavado de autos gastan alrededor de 3 mil millones de litros de agua anuales, lo que es equivalente a un caudal de 95 l/s, considerando solamente un 10% de este consumo para la Ciudad de Puebla, se gastarían 9,5 l/s con este fin. Debido a la importancia del consumo de agua potable en este giro, en 2016 se emitió por la ALDF un dictamen que obliga a los servicios de lavado de autos a utilizar agua reciclada o residual tratada para el lavado.

Respecto a la oferta de agua residual tratada para usos público-urbanos en Puebla, se puede partir en un primer paso de los caudales generados por las PTAR´s que cumplen con la calidad requerida del efluente.

En la tabla 29 se muestran los caudales generados de las tres PTAR´s que están operadas por Agua de Puebla (PTAR Ecoparque, PTAR Galaxia La Calera, Bosque de Chapultepec), tres PTAR´s de la BUAP, así como la PTAR del Centro comercial Galerías Serdán. En total suma un caudal de 93,4 l/s.

Tabla 29: Caudal de PTAR´s descentralizadas y semicentralizadas para reúso

Oferta	Oferta l/s	Destino de caudal para reúso
PTAR Ecoparque	55	Ecoparque, Empresa Paseo de San Francisco, Parque Estatal Flor del Bosque, otros parques, jardines y relleno de lagos artificiales.
Galaxia La Calera	15	
B. de Chapultepec	10	
BUAP_1	8	Lago artificial, riego de áreas verdes
BUAP_2	1.0	
BUAP_4	1,5	Infiltración
CC Galerías Serdán	4	Sanitaria (WC), riego áreas verdes
	93,5	

A este volumen se sumarán los caudales de las PTAR´s que están operando en los centros recreativos, clubes, fraccionamientos y universidades, como son las PTAR´s en: Parque España, Club Alpha 2, Club Britania La Calera, Fraccionamiento La vista con PTAR, Club de golf Las Fuentes, ITESM. Desafortunadamente no se dispone de datos exactos sobre las capacidades y caudales generados por estas plantas descentralizadas de tratamiento.

Sin embargo, debido a su área de aplicación se podría asumir que en promedio no superan una capacidad de 3 l/s, con excepción de la PTAR del Fraccionamiento La Vista.

Con esta primera aproximación, se podría estimar un caudal de 110 a 130 l/s de aguas residuales tratadas que están reusadas principalmente con fines de riego de áreas verdes y fines recreativos, lo que significa alrededor del 40 al 45 % del consumo potencial para riego de áreas verdes (parques, jardines, camellones etc.) en la ciudad de Puebla.

De las PTAR´s Bosques de Chapultepec y Galaxia La Calera, se está llevando agua residual tratada para el reúso al Parque Flor del Bosque, al Parque Centro Cívico 5 de mayo y al Parque la Constancia (fotos 25 - 26).

Un elevado caudal de agua residual tratada se genera con las cuatro Macroplantas que opera Agua de Puebla, las cuales son las PTAR´s: San Francisco, Alseseca Sur, Atoyac Sur y Barranca del Conde, con una capacidad total instalada de 3600 l/s. Sin embargo, de acuerdo con un estudio de la UNAM (2014) las cuatro PTAR´s operan con un caudal real de 1692 l/s. Desafortunadamente, los efluentes no cumplen con la calidad requerida para un reúso en aplicaciones urbanas, por lo que es un potencial teórico que no pueda ser aprovechado por el momento.

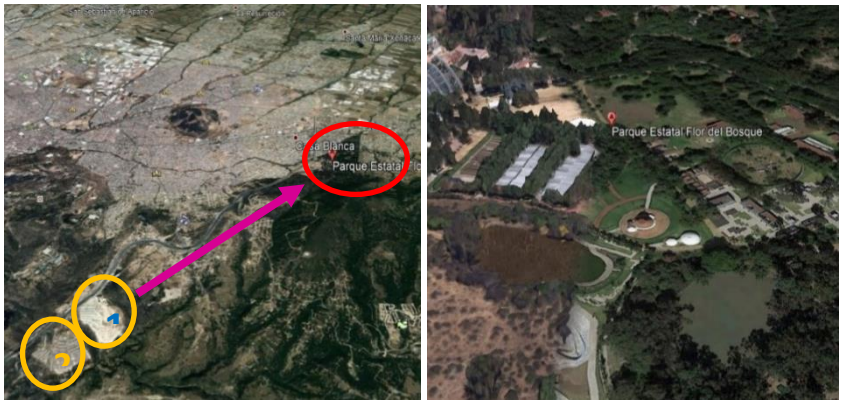
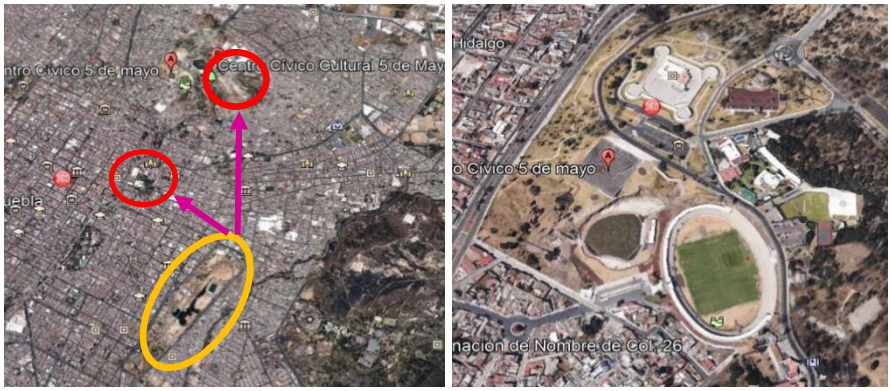


Foto 25a – 25b: Suministro de agua residual tratada de las PTAR´s Galaxia La Calera y Bosques de Chapultepec al Parque Estatal Flor del Bosque.



Ubicación de la PTAR Ecoparque y sitios de suministro de agua residual tratada al Parque Centro Cívico 5 de Mayo (arriba a la derecha, reúso recreativo y en área verde) y a la fábrica Paseo San Francisco (izquierda). http://www.unionpuebla.mx/articulo/2018/07/18/gobierno/agua-de-puebla-realiza-saneamiento-de-agua-residual

Foto 26a – 26c: PTAR Ecoparque y zonas de reúso

4.1. Estrategias de aprovechamiento del potencial de reúso

El desarrollo de una estrategia para el reúso urbano es una medida importante dentro de un concepto de gestión integrada de aguas urbanas para la zona metropolitana de Puebla.

El desarrollo de una estrategia para aprovechar el potencial de reúso debe considerar los tres niveles de tratamiento de aguas residuales: centralizado, semicentralizado y descentralizado.

4.1.1. Efluente de PTAR´s centralizadas

De acuerdo con el estudio de la UNAM (2014), las cuatro macroplantas de tratamiento que operan Agua de Puebla y SOAPAP generan un efluente de agua residual tratada de 1700 l/s, que potencialmente podría ser aprovechado si cumpliera con la calidad requerida de acuerdo con las normas aplicables para el reúso. Este volumen sería suficiente para cerrar la brecha entre la creciente demanda y oferta de agua potable hasta el 2030. No obstante, el reto es explotar el potencial de sustitución de agua potable por agua residual tratada en el ámbito urbano. Otro aspecto importante es el establecimiento de la logística de distribución. A partir del sitio de descarga del agua residual tratada existen principalmente dos vías de repartición del agua residual tratada a los lugares de reúso:

- Instalación de una red de tubería de distribución, conocida como "línea morada"
- Distribución con pipas de agua

Por lo regular se utilizan ambas formas de distribución, surtiendo el agua residual tratada a diferentes usuarios finales, sean públicos, privados e industriales.

La distribución por pipa es la manera más flexible, repartiendo volúmenes relativamente pequeños de agua residual tratada. Algunos tipos de reúso para el suministro del agua tratada con pipa son el riego de camellones, la supresión de polvo, la construcción de carreteras y caminos, las fuentes ornamentales, el lavado de camiones, entre otros (foto 27a – 27d).

Foto 27a – 27d: Suministro de agua potable y agua residual tratada para riego.

Por ejemplo, para regar los camellones en la zona urbana de Puebla con una superficie equivalente a 67 hectáreas, se requerirán 2,010,000 litros de agua diario, considerando un requerimiento de riego de 3 l/m^2 de camellon, lo que equivale a 200 pipas con 10 m^3 de capacidad de almacenamiento.

No obstante, hay que considerar que el movimiento de grandes volúmenes de agua residual tratada en pipa requiere una capacidad elevada de transporte.

Dentro de su estudio, la UNAM (2014) delimitó como propuesta zonas potenciales para el reúso de los efluentes de las cuatro macroplantas de tratamiento en la zona urbana de Puebla (fotos 28a – 28d). Para la PTAR Atoyac Sur se considera la zona de Angelópolis como área potencial para recibir aguas residuales tratadas, mientras que para el efluente de la PTAR Barranca El Conde se consideran para el reúso cuatro diferentes áreas en los alrededores, entre ellas el Fraccionamiento La Vista, que ya cuenta con su propio sistema de tratamiento.

Las zonas potenciales para el reúso de las PTAR,s San Francisco y Alseseca Sur son principalmente áreas agrícolas y en el caso de la PTAR San Francisco también el Club de Golf Las Fuentes. Sin embargo, en el caso de las áreas agrícolas hay que considerar que, debido al crecimiento poblacional, que estás zonas están sometidas a un alto riesgo de cambio de uso de suelo y de que se conviertan en zonas habitacionales.

No obstante, el estudio integra el reúso de los efluentes como una componente importante en la planeación hídrica urbana.

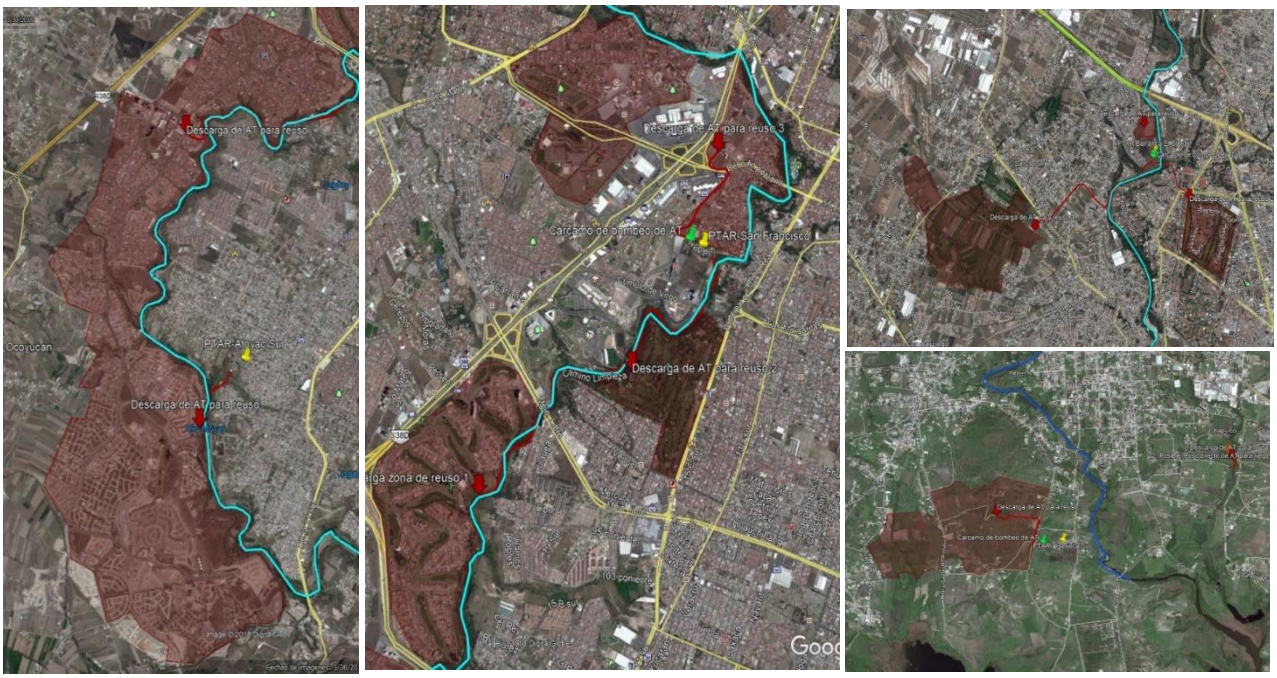


Foto 28a – 28d: Zonas propuestas para el reúso de aguas residuales tratadas. Izquierda PTAR Atoyac Sur y PTAR Barranca El Conde, arriba derecha PTAR San Francisco, abajo derecha PTAR Alseseca Sur.

4.1.2. Efluente de sistemas semicentralizados y satelitales

La PTAR Ecoparque es un buen ejemplo de un sistema semicentralizado de tratamiento, que debido a su menor caudal de agua residual tratada aumenta las posibilidades de reusar un mayor porcentaje del efluente en sus alrededores.

Thoren et. al. (2012) analizaron, a través de la aplicación de un modelo optimizado y utilizando un sistema de información geográfica, la localización estratégica de plantas satelitales (semi centralizadas) de tratamiento para aumentar el potencial de reúso en las zonas urbanas. La estrategia incluyó la identificación y contabilización de las fuentes de aguas residuales, así como los potenciales usuarios para el reúso. El establecimiento de sistemas semicentralizdas estratégicamente ubicados aumentó considerablemente el potencial de reúso.

La implementación de plantas "satelitales" de tratamiento más cerca de los puntos de reúso permite suministrar a un mayor número de usuarios un flujo de agua residual tratada constante. Sin embargo, esto significa el establecimiento de una infraestructura de distribución adecuada.

"*Cambiando el paradigma en el tratamiento de aguas residuales de plantas centralizadas que utilizan el tratamiento estilo "al final de la tubería" hacia plantas de tratamiento "satelital" puede aumentar enormemente el potencial de reúso del agua, aumentar la aceptación pública, preparar el camino para futuros proyectos de reúso del agua, y consolidar el lugar de Vancouver como una de las ciudades más verdes del mundo*" (Thoren et. al., 2012).

Con la finalidad de destinar más agua potable a sus clientes, Agua de Puebla promueve el reúso del agua residual después de ser tratada en sus plantas, para riego de áreas verdes y relleno de cuerpos artificiales de agua.

Una prueba de la calidad del trabajo que realiza Agua de Puebla para Todos al tratar el agua residual es la variedad de especies que habitan en los lagos del Parque Ecológico "Revolución Mexicana", ya que diariamente son abastecidos de agua residual tratada que proviene de dicha planta propiciando la proliferación de vida acuática sana.

4.1.3. Sistemas descentralizados de tratamiento

Los sistemas descentralizados son la escala de tratamiento que ofrece el reúso *in-situ* de las aguas residuales tratadas. La documentación de algunos de los sistemas descentralizados que existen en el municipio de Puebla ha mostrado una gama de diferentes situaciones en las cuales su instalación es apta o indicada.

En la documentación de las plantas de tratamiento visitadas y del análisis de los sistemas ubicados destacan tres principales circunstancias que fueron decisivas para el establecimiento de un sistema descentralizado de tratamiento:

1. La falta de drenaje y/o la conexión a la red de alcantarrillado.
2. El aprovechamiento del agua residual tratada para fines recreativos
3. El aprovechamiento del agua residual tratada para el riego de áreas verdes

El caso 1 está representado por las PTAR´s de las Casas BUAP, el pequeño sistema de tratamiento de la casa particular en Haras, así como de las PTAR´s Galaxia La Calera y El Bosque de Chapultepec que opera Agua de Puebla para Todos. En los cuatro casos una conexión a un drenaje y/o sistema de alcantarrillado no existe o no es viable.

La PTAR_2 de Casas BUAP mejora las condiciones sanitarias del fraccionamiento y evita vertir aguas residuales crudas de manera directa a la presa Valsequillo, lo que le da un alto valor ecológico al sistema de tratamiento.

El caso Haras es un ejemplo de un pequeño sistema de tratamiento doméstico que muestra que con pequeños sistemas aerobios de lodos activados se puede proporcionar una calidad de efluente que permite el reúso directamente *in-situ*, lo que presenta una alternativa a las fosas sépticas y biodigestores que comúnmente se utilizan a este nivel doméstico.

Las PTAR´s Galaxia La Calera y El Bosque de Chapultepec muestran la opción de instalar sistemas a nivel de fraccionamientos en la periferia de la zona urbana, y dar servicio a un número considerable de personas.

Una de las ventajas de los sistemas descentralizados a este nivel de capacidad es, que la calidad del agua residual cruda en la mayoría de los casos es homogénea y no se mezcla dentro del alcantarillado con aguas residuales que llevan componentes tóxicos provenientes de diferentes giros industriales y que son difícilmente tratables.

La PTAR de la Facultad de Arquitectura de la BUAP en Ciudad Universitaria (PTAR BUAP_1) fue el elemento clave para recuperar la laguna de la Ciudad Universitaria con el efluente de la planta de tratamiento que proporciona un volumen importante para alimentar la laguna con agua depurada. El cuerpo de agua se ha convertido en un espacio con un alto valor recreativo, ecológico y ambiental que mejora considerablemente el microclima de la zona.

El riego de áreas y espacios verdes con agua residual tratada ha sido un factor importante en el establecimiento de diferentes sistemas descentralizadis de tratmiento de aguas residuales. Destacan las PTAR´s en diversos centros recreativos y fraccionamientos de alto nivel socioeconómico que disponen de áreas verdes

amplias. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales proporcionan una fuente permanente para el riego de estas superficies. Por un lado, sustituyen volúmenes de agua potable por agua residual tratada, y por otro lado aumentan la seguridad de suministro para el riego.

5. Consideraciones generales

El aprovechamiento y el reúso del agua residual tratada debe ser un componente importante en la estrategia de gestión del agua para la ciudad de Puebla y la zona metropolitana, considerando la combinación de las tres diferentes escalas de tratamiento: centralizado, semicentralizado y descentralizado.

El volumen del agua residual generada en la zona urbana y metropolitana podría cerrar la brecha entre una creciente demanda y oferta hasta el 2030, siempre y cuando se logren establecer las condiciones y requisitos para aprovechar este potencial:

- Un tratamiento adecuado que garantice una calidad de efluente que cumpla con los requerimientos para diferentes tipos de reúso.

- La identificación de los usuarios potenciales del agua residual tratada y establecer el balance entre oferta de agua residual tratada para reúso y los volúmenes/demanda requeridos del agua residual tratada en el uso público-urbano, industria, recreativo, comercial, etc.

- El establecimiento de un marco regulatorio municipal o metropolitano que garantice la operación y el mantenimiento de sistemas descentralizados de tratamiento.

Las opciones de aprovechamiento de los efluentes de las plantas centralizadas para el reúso dependen mucho de las opciones que ofrecen las zonas alrededores, p.ej. la cercanía de terrenos agrícolas o parques industriales e industrias que son usuarios potenciales para el reúso y aprovechamiento de volúmenes mayores de aguas residuales tratadas. se requiere establecer una infraestructura adecuada de distribución y analizar posibles zonas de infiltración para la recarga del acuífero, y aprovechar los volúmenes generados.

A nivel semicentralizados se aumentan las opciones de reúso debido al mayor número de usuarios potenciales. Para el establecimiento estratégico de estos sistemas dentro de las zonas urbanas se deben aprovechar herramientas como sistemas de información geográfica (SIG).

La revisión y documentación de los sistemas descentralizados de tratamiento en campo ha mostrado que generan múltiples beneficios con el reúso de su efluente para diferentes tipos de reúso, y que ofrecen soluciones adecuadas en caso de ausencia de una infraestructura municipal centralizada. Por lo cual, las plantas descentralizadas de tratamiento de las aguas residuales ya presentan elementos importantes para mejorar la situación sanitaria en condiciones particulares, así como para fomentar el reúso dentro del municipio de Puebla.

Los sistemas descentralizados tienen la ventaja de que reciben un agua residual en su mayoría de tipo doméstico, lo que facilita su tratamiento. Existe una amplia gama de diferentes tecnologías que puedan garantizar una alta calidad del efluente que cumple con las normas para un reúso no restringido en múltiples aplicaciones. Por un lado, son sistemas tecnológicos aerobios avanzados, por ejemplo, biorreactores compactos de membranas (MBR) o sistemas de lodos activados SBR (Wett 2013) y, por otro lado, nuevos desarrollos en sistemas naturales de humedales artificiales que han ampliado considerablemente su potencial de aplicación también en las zonas urbanas (Dou et. al. 2017).

El estudio y los casos analizados también permiten sustentar las premisas preliminares de una clasificación de los sistemas descentralizados de acuerdo con su capacidad de tratamiento (ver capítulo 4.1, parte 2, GIZ 2018 b). Especialmente, en las primeras dos clases propuestas de pequeños sistemas de tratamiento de hasta 500 habitantes, las opciones tecnológicas son muy amplias, incluyendo los sistemas naturales de tratamiento que ofrecen soluciones de alta eficiencia energética y bajos costos de operación y mantenimiento.

En el presente estudio no se ha analizado la situación de las plantas de tratamiento a nivel de comercios e industrias. De acuerdo con la normatividad vigente y especificada en el dictamen del cabildo del municipio de Puebla de septiembre 2017 sobre la *"Prevención y Control de la Contaminación del Agua Residual del Municipio de Puebla"*, las empresas deben tratar sus aguas residuales de proceso para poder cumplir con los requerimientos respecto a la calidad de efluente requerida para verter al alcantarillado público (Periódico Oficial del Estado de Puebla, 2017).

Respecto al potencial de reúso de las industrias se deben tomar en cuenta dos aspectos importantes: Por un lado, el consumo industrial de agua potable en relación con el consumo público-urbano y doméstico es considerablemente menor. Mientras el consumo público-urbano representa el 62% del volumen extraído del acuífero Valle de Puebla, el consumo industrial solamente contabiliza el 12.8 % (ver tabla 13, capítulo 4). Por otro lado, las industrias tienen un alto potencial de recuperación de su consumo de agua potable debido al tratamiento que requieren por norma. Por lo tanto, existen buenas precondiciones para el tratamiento descentralizado y el establecimiento de pequeños ciclos de agua "*in-situ*" con el reúso.

Considerando el acelerado crecimiento del municipio de Puebla en su periferia y de los municipios colindantes que forman la zona metropolitana, el fomento del reúso y el establecimiento de las condiciones adecuadas debe ser un tema de interés común para la zona, con el fin de asegurar la seguridad hídrica al largo plazo en la región.

6. Referencias

Arora, M.; Malano, H.; Davidson, B.; Nelson, R.; George, B. (2015). Interactions between centralized and decentralized water systems in urban context: A review. Wiley Interdiscip. Rev. Water 2015, 2, 623–634.

Barrios, J.E. (2004). Guía para la identificación de proyectos de reúso del agua. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Programación, Organización Meteorológica Mundial. Programa Nacional de Saneamiento y Reúso del Agua. OMM-PROMMA, PNSR.

Conagua (2014). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Puebla (2104), estado de Puebla. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.

Conagua (1994). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México, DF: Subdirección General Técnica, Comisión Nacional del Agua.

DOF: 09/02/2016: Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle de Puebla, clave 2104, en el Estado de Puebla, Región Hidrológico-Administrativa Balsas.

DOF: 29/01/1999: Norma Oficial Mexicana NOM-006-CONAGUA-1997. Fosas sépticas prefabricadas - Especificaciones y métodos de prueba.

Domene Gómez, E. y D. Saurí Pujol (2003). Modelos Urbanos y consumo de agua. El riego de jardines privados en la región metropolitana de Barcelona. Investigaciones Geográficas (Esp), núm. 32, 2003, pp. 5-17.

Dou, T., Troesch, T., Petitjean, A., Gábor, P.T. and D. Esser (2017). Wastewater and rainwater management in urban áreas: A role for constructed wetlands. International conference – Green urbanism. Procedia Environmental Sciences 37, 535-541.

GIZ (2018b). Valoración del potencial y requerimientos para el fomento de sistemas descentralizados e infraestructura verde en el manejo del agua en zonas urbanas del Municipio de Puebla. Parte 2: Propuesta de guía para establecer los requerimientos técnicos y normativos para garantizar una operación sustentable de sistemas descentralizados en zonas urbanas.

Hof, A. and N. Wolf (2014). Estimating potential outdoor water consumption in private urban landscapes by coupling high-resolution image analysis, irrigation water needs

and evaporation estimation in Spain. Landscape and Urban Planning, Volume 123, March 2014, pp. 61-72

ISO 20760-1 (2018): Water reuse in urban areas — Guidelines for centralized water reuse system. Part 1: Design principle of a centralized water reuse system.

ISO 20761 (2018): Water reuse in urban areas -- Guidelines for water reuse safety evaluation -- Assessment parameters and methods.

ISO 20760-2 (2017): Water reuse in urban areas -- Guidelines for centralized water reuse system -- Part 2: Management of a centralized water reuse system

ISO/NP 23056 [Under development]: Water reuse in urban areas - Guidelines for decentralized/onsite water reuse system - Design principle of a decentralized/onsite system.

Martínez-Austria, P. y A. Vargas-Hidalgo (2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 4, julio-agosto de 2016, pp. 139-154

Mesta Chacón, V.M., Soto Larios, J. y Enciso (2000). Establecimiento del sistema de tratamiento y reuso de las aguas residuales de un centro comercial de usos multiples, aplicando la NOM-003-ECOL-1997.

Moscoso Cavallini, J.C. (2011). Estudio de opciones de tratamiento y reúso de aguas residuales en Lima metropolitana. Universidad de Stuttgart, Alemania. Fomentado por el Ministerio de Educación e Investigación (BMBF).

Parés, M., March, H. and Sauri, D. (2013): Atlantic gardens in Mediterranean climates: Understanding the production of suburban natures, International Journal of Urban and Regional Research, n°37(1), 328-347.

Parés, M., March, H. and Sauri, D. (2006): Evaluating the environmental performance of urban parles in Mediterranean cities: an example from the Barcelona metropolitan region, Environmental Management, n°38 (5), 750-759.

Periodico Oficial del Estado de Puebla (2017). Prevención y Control de la Contaminación del Agua Residual del Municipio de Puebla. Gobierno Municipal, H. Ayuntamiento del Municipio de Puebla. Jueves, 5 de octubre 2017.

Schäfer, E. and U. Scheele (2017). Making Infrastructure Climate Resilient: Bridging the Transformation Gap with "Living Labs"?, Urban Regions Now & Tomorrow, 10.1007/978-3-658-16759-2_10, (219-253).

SDUS (2016). Inventario municipal de áreas verdes (IMAV). H. Ayuntamiento del Municipio de Puebla, Secretaría de Desarrollo Urbano y Sustentabilidad, Dirección de Medio Ambiente.

Thoren, R., Atwater, J. and P. Berube (2012). A model for analyzing water reuse and resource recovery potential in urban areas. Can. J. Civ. Eng. 39: 1202–1209.

UNAM (2014). ESQUEMA DE SANEAMIENTO INTEGRAL DE LA PRESA MANUEL ÁVILA CAMACHO "VALSEQUILLO", Instituto de Ingeniería, Informe Final presentado a la Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.

Wett, M. (2013). Waste water treatment – New approaches for centralized and decentralized solutions. International Conference on "Integrated Resource Management in Asian cities: the urban Nexus" Visions, best practice, experience sharing. Bangkok, 24.-26. June 2013.

Zambrano, J. (2015) Aumento urbano en Puebla afecta a la población. http://www.milenio.com/estados/aumento-urbano-en-puebla-afecta-a-la-poblacion

Anexo 1: Guías y manuales para el manejo descentralizado de aguas pluviales

■ New York State (2015). Stormwater Management Design Manual. New York State Department of Environmental Conservation

https://www.dec.ny.gov/docs/water_pdf/swdm2015entire.pdf

■ Melbourne Water (2015). WSUD Guidelines Applying the Model WSUD Guidelines. An Initiative of the Inner Melbourne Action Plan. City of Melbourne

https://www.melbourne.vic.gov.au/SiteCollectionDocuments/wsud-full-guidelines.pdf

■ Neil Armitage, Michael Vice, Lloyd Fisher-Jeffes, Kevin Winter Andrew Spiegel & Jessica Dunstan (2013). Alternative Technology for Stormwater Management. The South African Guidelines for Sustainable Drainage Systems

http://www.wrc.org.za/Knowledge%20Hub%20Documents/Research%20Reports/TT%20558-13.pdf

■ NYC (2012). Guidelines for the Design and Construction of Stormwater Management Systems. Developed by the New York City Department of Environmental Protection in consultation with the New York City Department of Buildings, July 2012-

http://www.nyc.gov/html/dep/pdf/green_infrastructure/stormwater_guidelines_2012_final.pdf

■ City of Tuscon (2015). Low impact development and green infrastructure guidance manual. Pima County.
https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server_6/File/Government/Flood%20Control/Floodplain%20Management/Low%20Impact%20Development/li-gi-manual-20150311.pdf

■ COCEF Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios Mexicanos

http://www.cocef.org/desarrollo-de-capacidades/publicaciones-e-informes/manual-de-lineamientos-de-diseno-de-infraestructura-verde-para-municipios-mexicanos#.WpMil0xFzIU

■ Watershed Management Group (2012). Infraestructura verde para comunidades del desierto Sonorense

http://www.harvestingrainwater.com/wp-content/uploads/2012/01/Infraestructura-Verde-Para-Comunidades-Del-Desierto-Sonorense.pdf

■ City of Philadelphia (2014). Green Streets Design Manual.

http://www.phillywatersheds.org/img/GSDM/GSDM_FINAL_20140211.pdf

■ Wyoming Department of Environmental Quality (2013). Urban Best Management Practice Manual. Conservation Practices to Protect Surface and Ground Water.

http://deq.wyoming.gov/media/attachments/Water%20Quality/Nonpoint%20Source/Reports%20%26%20Documents/2013_wqd-wpp-Nonpoint-Source_Urban-Best-Management-Practice-Manual.pdf

Anexo 2: Fichas técnicas de las PTAR,s BUAP_1, BUAP_2, BUAP_4, Casa Haras, Centro comercial Galerías Serdán

Ficha 1

PTAR Complejo Universitario, BUAP_1

Propietario		**BUAP**
Ubicación		Boulevard Valsequillo y 14 Sur
Inicio de operación (mes/año)		2014 rehabilitación de infraestructura de una planta de tratamiento existente
Origen del agua residual a tratar		Sanitaria, edificios de las facultades de docencia e investigación
Volumen que tratar (l/s, m3/d)		6-8 l/s PTAR principal, 1 – 1.5 l/s PTAR pequeña
Capacidad de tratamiento (l/s, m3/d, habitantes equivalentes)		15 l/s
Características del afluente		DBO_5: 256 mg/l
Conexión al alcantarillado		
Descripción del sistema de tratamiento		
Tratamiento Primario	Cribado y desarenado	Rejillas
	Sedimentación primaria	
	Tanques Imhoff	
Tratamiento seunadrio	RAFA	
	Filtro percolador	
	Biodiscos	
	Lodos activados	Sistema de lodos activados, aireación extendida, 5 reactores/pilas aireadas, 1er sedimentador secundario, regreso de lodos
	Reactores de lechos fijos	

	Reactores de lechos fluidizados	
	Humedales construidos	
D I	Cloro, UV	Cloración del efluente
Tratam. de lodos	Lechos de secado Humedales de lodos	Lecho de secado de lodos
Operación y mantenimiento		
A cargo de:		BUAP, Dirección de Infraestructura Educativa
Personal de operación		Quim. Fabiola Robles Meza, Ing. amb. Maribel Cruz
Contrato de mantenimiento		no
Frecuencia de mantenimiento preventivo		Cada 6 meses cambio de bandas del compresor, 1 vez al año pruebas de vibración y cambio de aceite de sopladores (se contrata servicio).
Mantenimiento correctivo		
Consumo energético		no hay información
Costos de operación y mantenimiento		se desconoce
Calidad del efluente y eficiencia de depuración		
Frecuencia de análisis		Efluente cada tres meses por un laboratorio certificado, control y mediciones internas cada semana
DBO5 (mg/l)		15.8 – 23 mg/l
DQO (mg/l)		no se mide
SST (mg/l)		--
Nitrogeno		--
Fósforo		--
NOM-001-ECOL-1996		
Reúso del agua residual tratada		
Tipo de reúso		Recreativo – alimentación de la laguna, riego de las áreas verdes alrededor, superficie total 4-5 hectáreas
NOM-003-ECOL-1997		
Información adicional Planta de tratamiento diseñada e instalada por Grupo Pisari S.A. de C.V., Puebla.		

Documentación fotográfica PTAR BUAP_1

Pretratamiento con rejillas (izquierda) y cárcamo de bombeo (derecha)

Tanques de aireación con lodos activados, retorno de lodo

Tanque para biofiltro (izquierda), composteo de lodos (derecha)

Ficha 2

PTAR Casas BUAP, PTAR BUAP_2

Propietario		**BUAP**
Ubicación		Prolongación a el "Carolino" y Calle "Casa de la Reyna" Poniente
Inicio de operación (mes/año)		2014 rehabilitación de infraestructura de una planta de tratamiento existente
Origen del agua residual a tratar		Sanitaria, edificios de Casas BUAP
Volumen que tratar (l/s, m3/d)		0,3 – 1.5 l/s PTAR (suministro de aguas potable a la unidad habitacional solamente los martes y jueves)
Capacidad de tratamiento (l/s, m3/d, habitantes equivalentes)		mayor
Características del afluente		DBO_5: alrededor de 100 mg/l, muy diluido
Conexión al alcantarillado		No, Infraestructura municipal de drenaje muy retirada (aprox. 1,5 km)
Descripción del sistema de tratamiento		
Tratamiento Primario	Cribado y desarenado	Rejillas
	Sedimentación primaria	
	Tanques Imhoff	
Tratamiento seunadrio	RAFA	
	Filtro percolador	
	Biodiscos	
	Lodos activados	Sistema de lodos activados, aireación extendida por difusores de platillo de burbuja fina (144 platos en 6 líneas) Algunas zonas muertas, 1,5 – 2,0 mg O_2 disuelto, 150 ml/l de lodo activado
	Reactores de lechos fijos	
	Reactores de lechos fluidizados	

	Humedales construidos	
D I	Cloro, UV	Cloración del efluente
Tratam. de lodos	Lechos de secado Humedales de lodos	Lecho de secado de lodos
Operación y mantenimiento		
A cargo de:		BUAP, Dirección de Infraestructura Educativa
Personal de operación		Ing. amb. Jazmín Aguirre y Víctor Guaya
Contrato de mantenimiento		no
Frecuencia de mantenimiento preventivo		Difusores de platos requieren mucho mantenimiento
Mantenimiento correctivo		
Consumo energético		
Costos de operación y mantenimiento		se desconoce
Calidad del efluente y eficiencia de depuración		
Frecuencia de análisis		Control y mediciones internas cada semana
DBO5 (mg/l)		33 mg/l
DQO (mg/l)		no se mide
SST (mg/l)		--
Nitrogeno		--
Fósforo		--
NOM-001-ECOL-1996		Aplica
Reúso del agua residual tratada		
Tipo de reúso		Ambiental, efluente se vierte a la presa del Valsequillo. Antes de tomar en operación la planta, se vertía sin tratamiento.
NOM-003-ECOL-1997		No aplica
Información adicional Problema eléctrico: Solamente se cuenta con 220 V monofásica, alto consumo de 25 a 26 Amperes, conexión para trifásica a 1,5 km de distancia.		

Documentación fotográfica PTAR BUAP_2

Ficha 3

PTAR BUAP_4, Colegio de Artes

Propietario		**BUAP (Colegio de Artes)**
Ubicación		Avenida Cúmulo de Virgo
Inicio de operación (mes/año)		
Origen del agua residual a tratar		
Volumen que tratar (l/s, m3/d)		1.0 – 1.5 l/s
Capacidad de tratamiento (l/s, m3/d, habitantes equivalentes)		
Características del afluente		Alta concentración de nitrógeno
Conexión al alcantarillado		
Descripción del sistema de tratamiento		
Tratamiento Primario	Cribado y desarenado	
	Sedimentación primaria	
	Tanques Imhoff	Sistema Imhoff con tres tanques paralelos
Tratamiento seunadrio	RAFA	
	Filtro percolador	
	Biodiscos	
	Lodos activados	
	Reactores de lechos fijos	
	Reactores de lechos fluidizados	
	Humedales construidos	
D I	Cloro, UV	

Tratam. de lodos	Lechos de secado Humedales de lodos	Lecho de secado
Operación y mantenimiento		
A cargo de:		BUAP, Dirección de Infraestructura Educativa
Personal de operación		
Contrato de mantenimiento		
Frecuencia de mantenimiento preventivo		
Mantenimiento correctivo		
Consumo energético		
Costos de operación y mantenimiento		
Calidad del efluente y eficiencia de depuración		
Frecuencia de análisis		
DBO5 (mg/l)		45 mg/l
DQO (mg/l)		
SST (mg/l)		
Nitrogeno		
Fósforo		
NOM-001-ECOL-1996		
Reúso del agua residual tratada		
Tipo de reúso		
NOM-003-ECOL-1997		
Información adicional		

Documentación fotográfica PTAR BUAP_4 Colegio de Artes

Pretratamiento, personal técnico operador de BUAP

Purga de lodos y lecho de secado

Ficha 4

Casa particular en Ciudad Ecológica Haras

Propietario		**Particular**
Ubicación		Zona Residencial HARAS
Inicio de operación (mes/año)		Marzo 2017
Origen del agua residual a tratar		Domésticas
Volumen que tratar (l/s, m3/d)		0.6 m^3/d
Capacidad de tratamiento (l/s, m3/d, habitantes equivalentes)		1.2 m^3/d
Características del afluente		250 DBO_5
Conexión al alcantarillado		No
Descripción del sistema de tratamiento		
Tratamiento Primario	Cribado y desarenado	
	Sedimentación primaria	Si
	Tanques Imhoff	
Tratamiento seunadrio	RAFA	
	Filtro percolador	
	Biodiscos	
	Lodos activados	Reactor secuencial por lotes, flujo discontinuo, aireación intermitente con 2 difusores tubulares (80 cm longitud). Sedimentación secundaria en el mismo reactor.
	Reactores de lechos fijos	
	Reactores de lechos fluidizados	

	Humedales construidos	
D I	Cloro, UV	
Tratam. de lodos	Lechos de secado Humedales de lodos	Retiro de lodos con bacter cada 1,5 – 2 años
Operación y mantenimiento		
A cargo de:		Cliente
Personal de operación		
Contrato de mantenimiento		Si
Frecuencia de mantenimiento preventivo		1 año
Mantenimiento correctivo		5 años
Consumo energético		0.85 $/día
Costos de operación y mantenimiento		700 $/anual
Calidad del efluente y eficiencia de depuración		
Frecuencia de análisis		
DBO5 (mg/l)		
DQO (mg/l)		
SST (mg/l)		
Nitrógeno		
Fósforo		
NOM-001-ECOL-1996		
Reúso del agua residual tratada		
Tipo de reúso		Riego de área verde, sistema subsuperficial
NOM-003-ECOL-1997		No información
Información adicional Excelente calidad visual y olfatoria del efluente, planta de tratamiento ubicada en la entrada de la residencia, se tuvo que garantizar que no emita ningún olor. No existe un sistema de desinfección (cloro, UV), debido a que el agua residual tratada se vierte directamente a la zona de raíces del césped		

Ficha 5

PTAR Centro comercial Galerías Serdán

Propietario		**Galerías Serdán**
Ubicación		Blvd. Hermanos Serdán No. 270 Col. Rancho Posadas C.P. 72062 Puebla de Zaragoza
Inicio de operación (mes/año)		2014
Origen del agua residual a tratar		Restaurantes, sanitaria, limpieza de inmueble
Volumen que tratar (l/s, m3/d)		Promedio 1.7 lps
Capacidad de tratamiento (l/s, m3/d, habitantes equivalentes)		4 lps
Características del afluente		DBO_5: 150 mg/l
Conexión al alcantarillado		Sí
Descripción del sistema de tratamiento		
Tratamiento Primario	Cribado y desarenado	Rejillas, trampas de grasas y aceites
	Sedimentación primaria	Tanque sedimentador
	Tanques Imhoff	
Tratamiento seunadrio	RAFA	
	Filtro percolador	
	Biodiscos	
	Lodos activados	Sistema de lodos activados proceso SBR
	Reactores de lechos fijos	
	Reactores de lechos fluidizados	

	Humedales construidos	
D I	Cloro, UV	Filtración (arena y carbón activado) y Cloración del efluente
Tratam. de lodos	Lechos de secado Humedales de lodos	Digestión aerobia
Operación y mantenimiento		
A cargo de:		Galerías Serdán
Personal de operación		Ing. Francisco Rodríguez Rodríguez
Contrato de mantenimiento		No, personal propio de operación
Frecuencia de mantenimiento preventivo		
Mantenimiento correctivo		
Consumo energético		
Costos de operación y mantenimiento		25 $/m^3 tratado
Calidad del efluente y eficiencia de depuración		
Frecuencia de análisis		Efluente cada mes por un laboratorio certificado
DBO_5 (mg/l)		20 mg/l
DQO (mg/l)		--
SST (mg/l)		--
Nitrogeno		--
Fósforo		--
NOM-001-ECOL-1996		
Reúso del agua residual tratada		
Tipo de reúso		Sanitarios y riego de áreas verdes
NOM-003-ECOL-1997		aplica
Información adicional En temporada de lluvias se genera un exceso de agua residual tratada, el cual se ingresa a la red de drenaje municipal. Se cuenta con variaciones altas de volumen de agua residual tratada por día. El proceso SBR se ha mostrado muy eficiente para amortiguar los picos.		

Documentación fotográfica

Dos reactores biológicos de lodos activados con proceso SBR

Fase de aireación en el reactor SBR

Filtración y cloración del agua residual tratada

Agua residual tratada

Anexo 3: Recomendaciones para el concepto de rehabilitación de la PTAR del rastro municipal

Evaluación de la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la Industrial de Abastos de Puebla (rastro)

A.3.1 Generación de aguas residuales en el proceso del rastro

La Industrial de Abastos de Puebla se encuentra ubicado en Axoxocatl 2, San Jerónimo Caleras, 72100 Puebla, Puebla. El rastro cuenta con dos líneas de proceso de matadero bobino y porcino con certificado TIF. Actualmente solo se encuentra en función la línea de porcino teniendo un promedio de procesamiento de 500 porcinos a la semana. Las etapas de la línea de proceso son: Lavado en pie – Sacrificio – Desangrado – Rasurado – Flameado – Separación de vísceras – Lavado de vísceras - Preparación de canal – Cámara de refrigeración.

Arriba de izq. A la derecha: Rasurado, flameado, separación de vísceras,

Abajo: lavado vísceras, preparación de canal.

Casi en todo el proceso de producción, desde el lugar de entrega de los animales, el sacrificado, hasta la llegada a las salas de almacenamiento y refrigeración, se producen aguas residuales.

Perdida de sangre y canales de desalojo

Generación de las aguas residuales

Las primeras aguas residuales se generan en el área de espera en el exterior de las instalaciones de producción durante el lavado de los animales, así como de las superficies del área.

Para el manejo de las aguas residuales del proceso, el rastro cuenta con drenaje exclusivo del área en donde se captan las aguas residuales generadas por los lavados de las siguientes etapas: Lavado en pie – sacrificio – desangrado – rasurado – flameado – separación de vísceras – lavado de vísceras - preparación de canal.

Cabe mencionar que en cada etapa del proceso son implementadas actividades de separación de residuos como sangre, pelaje y vísceras, reduciendo el ingreso de estos residuos a la PTAR a un 90%. Sin embargo, el 10% restante es arrastrado por los lavados, captados en el drenaje y dirigidos hacia la PTAR.

Debido al alto valor de la DBO_5 de más de 140 g/l de sangre, las inevitables pérdidas por goteo contribuyen a una alta carga contaminante de las aguas residuales.

Las instalaciones de producción se limpian o desinfectan, por lo que, según el proceso de limpieza y desinfección aplicado, las aguas residuales también contienen sustancias tensioactivas y desinfectantes.

El agua residual de los rastros es un buen caldo de cultivo para gérmenes, por lo que a menudo contiene también patógenos. Además, tiende a descomponerse rápidamente, lo que debe considerarse en su transporte y tratamiento (ATV-DVWK, 1992).

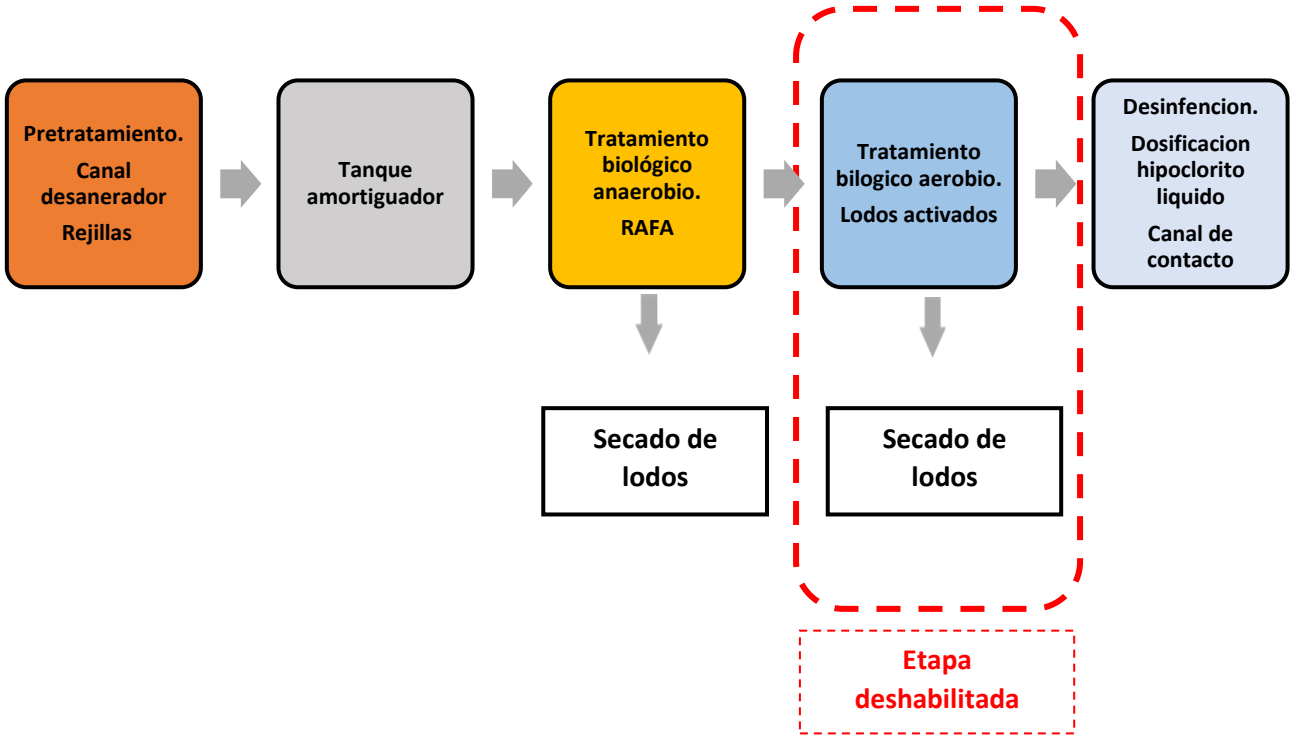
Cabe mencionar que el rastro opera sin conexión a la red pública de agua potable, de manera que, para cubrir la demanda de agua potable para el procesamiento y servicios de sanitarios se abastecen por medio de pipas. En promedio se suministran en 88 m^3/día (dos pipas, 44 m^3/pipa).

A.3.2 Planta tratadora de aguas residuales (PTAR)

Aproximadamente a unos 250 metros de la línea de porcinos se encuentra ubicada la PTAR en donde son descargadas las aguas residuales captadas por el drenaje. la cual es operada y monitoreada por tres personas.

Durante la visita se observaron componentes sin funcionamiento y de acuerdo con los operadores pertenecen a una etapa del tratamiento que esta fuera de operación. La etapa deshabilitada corresponde a un proceso biológico aerobio de lodos activados, por lo que se asume que fue deshabilitada por costos de operación.

Se asume que el tren de tratamiento del diseño inicial fue el siguiente:



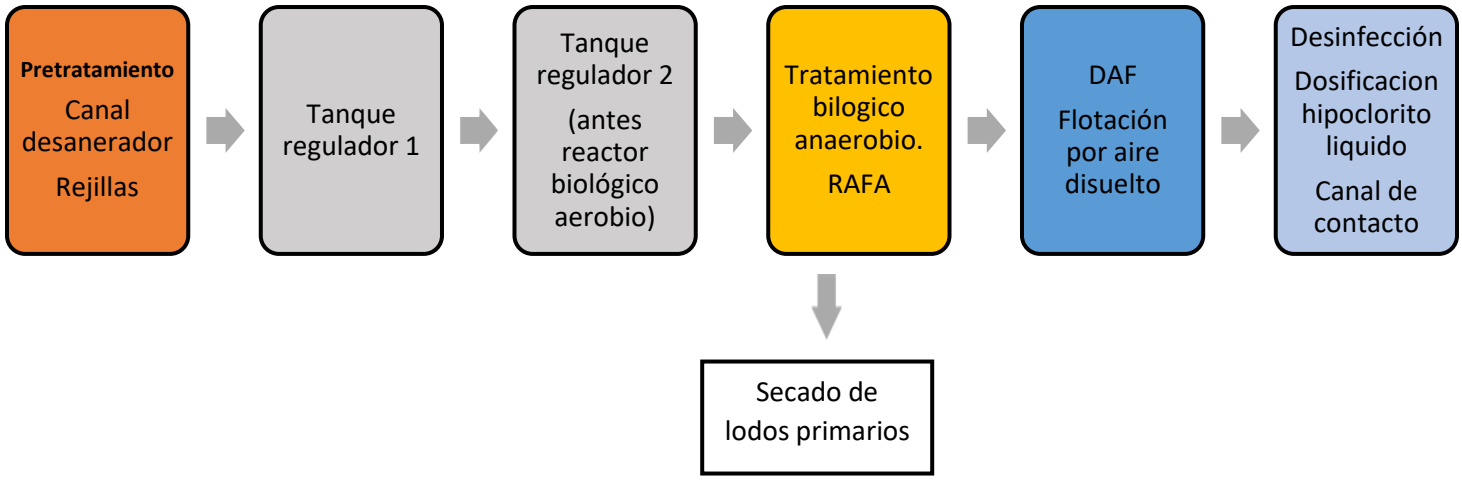
Diseño original del tren de tratamiento.

Reactor de tratamiento biológico aerobio

Equipos de aireación Compresores de aire

Filtro prensa, tratamiento de lodos

Posterior a la deshabilitación de la etapa aerobia en el tren de tratamiento, se instaló un nuevo "Sistema de Flotación por Aire Disuelto", conocido como DAF (siglas en inglés: dissolved air flotation). Con este reemplazo el tren de tratamiento actual integra las etapas como se indican en la siguiente gráfica:



Tren de tratamiento actualmente en operación

Bajo este tren de tratamiento se está operando la PTAR en dos turnos por día, en los cuales está en funcionamiento continuo aproximadamente por 8 horas.

Descripción del tren de tratamiento

■ **Pretratamiento.** Las aguas residuales ingresan por gravedad al pretratamiento que consiste en 2 canales desarenadores con compuertas de control cada uno y rejillas. Se separan del agua residual las arenas y sólidos gruesos (restos de pelaje, heces fecales de animales, etc.)

Compuertas, canales desarenadores y rejillas

Canales saturados, solidos separados a un costado y tambos para el retiro de solidos

Herramienta para retiro de sólidos retenidos en pretratamiento

Grúa para traslado tambos con sólidos del pretratamiento hacia la superficie para su disposición final

■ **Tanque amortiguador.** Con dimensiones de 19 m de largo, 6 metros de ancho y una altura útil de 4 m. Recibe las aguas residuales por gravedad provenientes del pretratamiento, su función es igualar las condiciones del agua residuales en descargas picos de volumen de agua y cargas orgánicas.

Superficie de tanque igualador. Tapa de acero y tuberías para distribución de aguas.

■ **Tanque regulador.** Con dimensiones de 25 m de largo, 6 metros de ancho y altura útil aproximada de 7 m. El tanque del anterior tratamiento aerobio de lodos activados fue habilitado para un amortiguamiento adicional para el volumen de agua en descargas picos. Las aguas residuales llegan por bombeo provenientes del tanque igualador.

Superficie de tanque regulador al momento de llenado por bombeo

■ **Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)**

En el RAFA se lleva acabo el tratamiento biológico anaerobio. Las aguas residuales son descargadas por medio de bombeo provenientes del tanque regulador.

Arriba: Reactor Anaerobio de Flujo ascendente (RAFA).

A la izquierda: Válvulas de control para la purga de lodos, regulan los niveles de lodos dentro del RAFA

■ **DAF.** Por gravedad se descarga el efluente del RAFA al sistema DAF. En esta etapa se lleva a cabo un tratamiento físico – químico con el apoyo de dosificaciones de químicos mezclados (coagulantes y floculantes) en el agua residual y la separación de solidos por medio de flotación por aire disuelto.

Los sólidos retenidos se llevan a un tanque almacenador. En el proceso de flotación existe el riesgo de formación de espuma en exceso. Si ocurre esto durante el proceso, se agregan sustancias antiespumantes (foto x).

Tanque almacenador de sólidos de la etapa DAF

■ **Desinfección.** A esta etapa final llegan por gravedad las aguas residuales provenientes del DAF. Para la desinfección del efluente se dosifica hipoclorito de sodio líquido y la mezcla se traslada por un canal en diferentes direcciones para aumentar el tiempo d contacto, antes de que el efluente sea descargado al alcantarillado.

Dosificación de químico y descarga de agua residual tratada

Canal de contacto.

A3.3 Comentarios y observaciones

La PTAR se encuentra en un estado general descuidado en su infraestructura: edificios, tanques de almacenamiento de aguas, tuberías hidráulicas, pasillos y barandales de tanques, registros de drenajes (sin tapaderas o tapaderas oxidadas), debido a que no se han realizado programas de manteamientos preventivos y correctivos. Lo anterior origina una zona de alto riesgo de trabajo para los operadores de la PTAR.

Como la PTAR no cuenta con ningún sistema de automatización de paro – arranque de los componentes electromecánicos, los operadores están obligados a estar permanentemente en las diferentes etapas del tren de tratamiento.

Cabe mencionar que los operadores no conocen con certeza los volúmenes (flujos) de las aguas residuales que se descargan en la PTAR, ni los niveles de contaminación. Estas dos variables son esenciales para llevar a cabo una operación de manera eficiente.

Sin embargo, y bajo las condiciones antes mencionadas, los operadores realizan un gran esfuerzo para que la PTAR se encuentre operando y que el agua reciba un tratamiento.

Por una avería en las tuberías hidráulicas de entrada al tanque RAFA, el día de la visita se encontraba fuera de operación la etapa anaerobia, y las aguas residuales eran

desviadas directamente hacia el DAF, teniendo por consiguiente solo el tratamiento físico – químico.

Respecto al tren de tratamiento y la secuencia de las etapas llama la atención lo siguiente:

Sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF):

1. Normalmente en una PTAR de aguas residuales con altas cargas orgánicas y sólidos, el sistema DAF es una de las primeras etapas del tren de tratamiento y es usada para las separaciones de solidos suspendidos, grasas y aceites. Por lo tanto, la ubicación del DAF posterior al tratamiento anaerobio no es congruente.

2. Con este arreglo, el DAF está retirando los sólidos suspendidos provenientes del RAFA, solidos que no deberían trasladarse en el agua residual a la salida del RAFA y en dado caso que sucediera (por mal funcionamiento) estos pueden ser retirados con un sedimentador cónico. Se asume que el sedimentador deshabilitado del RAFA se usaba para este objetivo.

3. La operación del DAF como etapa posterior al sistema anaerobio genera costos innecesarios de consumibles de químicos y electricidad.

Tanques amortiguadores:

1. Se tiene un gran volumen para el almacenamiento, y en la operación son indeterminables los tiempos de residencia del agua en ellos debido a que se desconoce el flujo real del agua residual que se genera.

2. No se tiene control de los almacenamientos de lodos primarios en cada tanque. Por tal razón no se determina un periodo de extracción de lodos en estos dos tanques.

3. Debido a la acumulación de lodos, se pueden tener deficiencias en los procesos de depuración y generaciones de fuertes olores fétidos.

4. Por las grandes capacidades de almacenamiento de los tanques combinado con el traslado del agua de uno a otro, de alguna manera se genera un proceso de separación de solidos suspendidos, grasas y aceites. Quedando estos almacenados en los tanques.

Tanques amortiguadores (ATV-DVWK, 1992):

Para compensar las fluctuaciones considerables de flujo de volumen y de concentración de las aguas residuales, se pueden instalar tanques de almacenamiento y mezcla. Las aguas residuales de los rastros se descomponen rápidamente, por lo que es recomendable airear los tanques de almacenamiento.

Los sistemas y tanques de ecualización solo deben proporcionarse si son inevitables y si mejoran los procesos de las siguientes etapas.

A3.4 Recomendaciones de mejoramiento

Con el objetivo de mejorar las condiciones generales de la PTAR, tener medios de trabajo sin altos riesgos y alcanzar una operación eficiente de cada una de las etapas actuales se recomienda lo siguiente:

1. Determinar flujos actuales (mínimos, máximos y promedio), así como las concentraciones de contaminantes de las aguas residuales crudas generadas del procesado de matanza de porcinos. Para tal efecto, se puede contratar un laboratorio certificado el cual puede realizar un aforo de los flujos y análisis de aguas residuales.
2. Establecer y ejecutar un programa de mantenimientos correctivo y preventivo a: infraestructuras (tanques, escaleras, tapas de registros, barandales, etc.), componentes eléctricos – electromecánicos, tuberías hidráulicas.
3. Retiro de infraestructuras y componentes deshabilitados (tanques prefabricados, tuberías, compresores, estructuras, etc.)
4. Capacitación integral a operadores de las funciones y objetivos de cada etapa de tratamiento.
5. Establecer cronogramas de actividades para la operación y monitoreo de cada etapa del tren de tratamiento.
6. Proveer instrumentos de mediciones para análisis de campos y base a ellos realizar bitácoras para monitoreos de eficiencias de remociones de contaminantes.
7. Proveer a los operadores de equipos de seguridad adecuados (cascos, mascarillas, guantes uso industrial, gafas protectoras, etc.) para la ejecución de actividades en operación y monitoreos.

8. Establecer y aplicar códigos de colores e indicaciones de flujos en tuberías hidráulicas, eléctricas y neumáticas.

9. Previo a evaluación, considerar cambio de secuencia del sistema DAF para obtener la adecuada operación. Así como, deshabilitación del tanque de regulación para mejor regulación de tiempos de estancia de las aguas residuales crudas.

Una vez conociendo las condiciones reales de las aguas residuales crudas y alcanzar los niveles máximos de remoción de cada etapa de tratamiento. No sea suficiente para el cumplimiento de la norma, se debería de realizar un proyecto de rehabilitación de PTAR.

A3.5 Propuesta de concepto de rehabilitación de la PTAR

Debido a las características de las aguas residuales que se generan en procesos agroindustriales, como rastros, queserías, beneficios de café y otros, con altos contenidos de sólidos orgánicos, grasas y aceites, es de suma importancia por un lado hacer arreglos eficientes de retención de residuos y separación de los diferentes flujos durante el proceso de producción, así como el diseño de un pretratamiento adecuado, que permita posteriormente un tratamiento biológico eficaz para lograr la calidad requerida del agua residual tratada.

Pretratamiento:

El pretratamiento actualmente existente es ineficiente. Para mejorar considerablemente la eficiencia del pretratamiento en el rastro municipal de Puebla se propone el siguiente concepto:

■ Establecer un sistema de separación de solidos de las aguas residuales de lavado del área de llegada y espera (colador mecanizado).

■ Implementar un pretratamiento mecanizado para el flujo del agua residual del proceso de rastro (criba mecanizada).

Mientras que los tamices fijos y cribas de tambor tienen pérdidas de pendiente relativamente altas, las cribas finas y los tamices de banda pueden evitar esta desventaja al ser instaladas directamente en los canales de desalojo (ATV-DVWK, 1992).

Ambas líneas de agua residual se juntarían posteriormente primero en un tanque amortiguador.

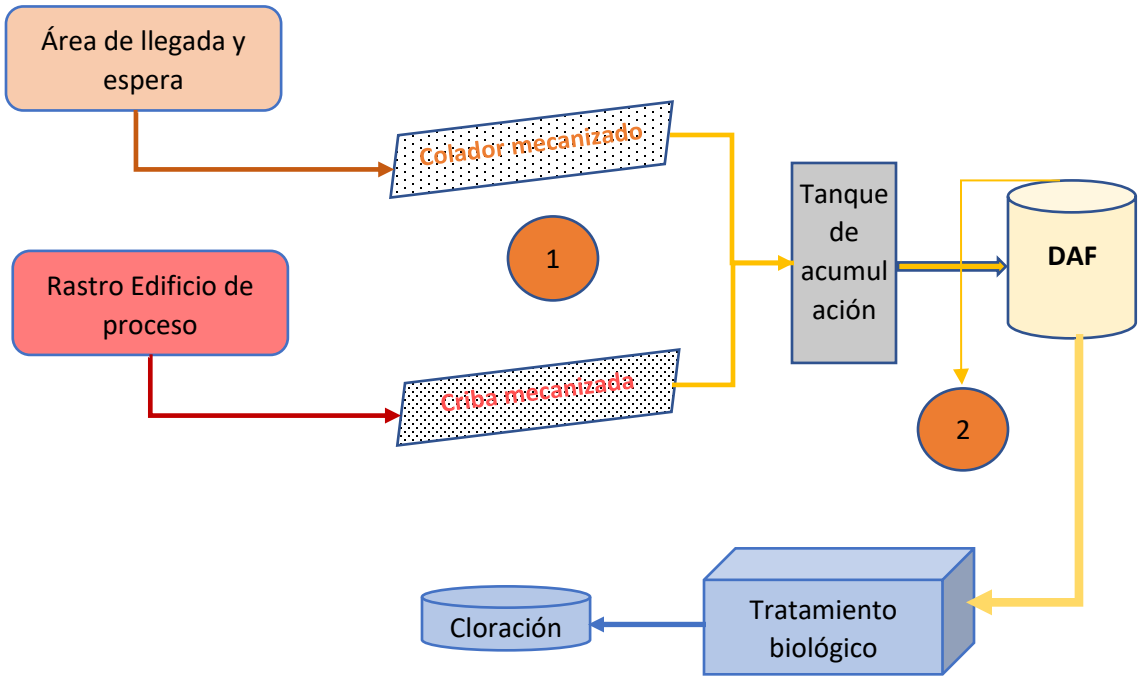
Para separar los aceites y grasas, que están presentes en forma no disuelta en las aguas residuales, se seguiría utilizando el sistema de flotación (DAF) existente,

incluyendo la adición de floculantes para fomentar la floculación de las sustancias emulsionadas o disueltas coloidalmente, con el fin de aumentar la eficiencia del DAF.

Tratamiento biológico

La selección del sistema de tratamiento biológico depende de las características del agua residual pretratada (DBO5, DQO) y la calidad del efluente que se debe lograr. Lo ideal sería si se pudiera mantener el reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA). No obstante, el RAFA elimina bajo condiciones óptimas de operación máximo un 75% de la DBO_5 del afluente.

La alternativa sería el establecimiento de un sistema aerobio de lodos activados (MBR o SBR), aprovechando la infraestructura del reactor existente.



1 depósito de solidos, 2 depósito de lodos de flotación

Gráfica: Concepto de rehabilitación y tren de tratamiento

ATV-DVWK (1992). Abwasser aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben, ATV-M 767. (Agus residuales de rastros y carnicerías).