



Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ZONA: XALAPA

**“Propuesta de tratamientos de aguas residuales
de tipo doméstico por métodos naturales para
la Congregación de Zoncuantla, Coatepec,
Veracruz, México”**

Que para obtener el diploma de:

**ESPECIALISTA EN
DIAGNÓSTICO Y GESTIÓN AMBIENTAL**

P r e s e n t a:

ROSA MARÍA LOZADA GRAJALES

Xalapa, Ver., a 10 de Julio de 2017



Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ZONA: XALAPA

“Propuesta de tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales para la Congregación de Zoncuantla, Coatepec, Veracruz, México”

Que para obtener el diploma de:

**ESPECIALISTA EN
DIAGNÓSTICO Y GESTIÓN AMBIENTAL**

P r e s e n t a

Rosa María Lozada Grajales

Director

Dra. María del Socorro Menchaca Dávila

Co-director

Dra. Bertha Rocío Hernández Suárez

Xalapa, Ver., a 10 de Julio de 2017



Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Químicas
Posgrados

Asunto: Autorización de impresión

A la C.
Rosa María Lozada Grajales
Presente

Lomas del Estado s/n
C.P. 91000
Xalapa-Enriquez,
Veracruz, México

Comunico a Usted que toda vez que ha sido revisado y aprobado su Trabajo de Tesis titulado: "Propuesta de tratamientos de aguas residuales de tipo domestico por métodos naturales para la congregación de Zoncuantla, Coatepec, Veracruz" y estando de acuerdo con los Catedráticos que integran el Jurado de la revisión escrita, de que es aceptable en forma y fondo para su correspondiente Examen de la Especialización en Diagnóstico y Gestión Ambiental (2016 – 2017) Campus Xalapa, autorizo que proceda la impresión de dicho trabajo.

Conmutador 01 (228) 842 17 00
Extensión 11033

Tel. Fax.
141 10 30

Correo electrónico
fraespinoza@uv.mx

ATENTAMENTE
"Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz"
Xalapa, Ver. a 03 de Julio de 2017


Dr. Francisco Espinosa Mejía
Coordinador

 FACULTAD DE
CIENCIAS QUÍMICAS
POSGRADOS
XALAPA, ENRIQUEZ, VER. 

AGRADECIMIENTOS

Con todo cariño para mis padres, que siempre han estado a mi lado para ayudarme a alcanzar cualquier meta. A mi hermano, que comienza una nueva etapa en sus estudios y de quien me siento orgullosa.

A mi familia, por sus consejos, su constante apoyo y su cercanía.

A Miguel, gracias por recorrer conmigo este camino.

A la Dra. Socorro Menchaca, por todas sus enseñanzas y por ser una guía durante la Especialización. Muchas gracias.

A la Dra. Bertha Rocío Hernández, por su apoyo y sus enseñanzas. Muchas gracias.

A mis maestros y compañeros de la Especialización, quienes han sido parte de esta nueva experiencia, les deseo lo mejor en su carrera profesional y en su vida.

RESUMEN

Los tratamientos por métodos naturales son tecnologías utilizadas para la depuración de aguas residuales, que han ganado terreno para su uso a nivel individual, para zonas rurales o comunidades con poco número de habitantes, y hasta en pequeñas plantas industriales o granjas. La falta de drenaje y de tratamientos en zonas rurales en ecosistemas de bosque mesófilo de montaña, permite la descarga directa de aguas residuales domésticas a cuerpos de agua naturales y al suelo. Tal es el caso de la Congregación de Zoncuantla, la cual pertenece a la zona baja de la microcuenca del río Pixquiac. Por lo anterior, se ha realizado una propuesta de tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales, la cual se ha dividido en dos secciones: tratamientos colectivos de aguas grises para la colonia Mariano Escobedo y tratamientos individuales para aguas residuales de tipo doméstico en áreas rurales de ecosistemas de bosque mesófilo de montaña.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	ix
Capítulo 1. Contexto general	10
1.1 Antecedentes	10
1.1.1 Nivel internacional	10
1.1.2 Nivel nacional	11
1.1.3 Nivel local	13
1.2 Planteamiento del problema.....	14
1.3 Objetivo.....	15
1.3.1 General.....	15
1.3.2 Específicos	15
1.4 Justificación	15
Capítulo 2. Agua: disponibilidad, contaminación y gestión	16
2.1 Importancia de los recursos hídricos	16
2.1.1 El ciclo hidrológico	17
2.1.2 Disponibilidad: cantidad y calidad del agua	19
2.1.3 Los recursos hídricos en México.....	21
2.1.4 Situación del agua en el Estado de Veracruz	23
2.1.5 Situación del agua en la microcuenca del río Pixquiac	24
2.2 Contaminación del agua.....	26
2.2.1 Principales fuentes de contaminación de agua: riesgos y amenazas	26
2.3 El agua, un recurso de interés social	28
Capítulo 3. Gestión y manejo de aguas residuales domésticas	32
3.1 Usuarios del agua: actividades domésticas.....	32
3.2 Las aguas residuales: definición y clasificación.....	33

3.2.1	Clasificación de las aguas residuales según su origen	35
3.3	Problemática de las aguas residuales en México	37
3.4	Problemática de las aguas residuales en el Estado de Veracruz	39
3.5	Importancia del tratamiento de las aguas residuales	40
3.5.1	Medio ambiente, sociedad y salud humana	41
3.6	Tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales 42	
Capítulo 4.	Metodología	46
4.1	Descripción de la zona de estudio.....	47
4.2	Primera parte del trabajo de campo:	49
4.2.1	Identificación del problema asociado a las descargas de aguas residuales de tipo doméstico en la Congregación de Zoncuantla	49
4.3	Segunda parte del trabajo de campo:.....	50
4.3.1	Reuniones con la Asociación Civil Pobladores	50
4.3.2	Identificación de los lugares donde se realizarán las propuestas para el tratamiento de aguas residuales domésticas	50
4.4	Revisión documental para la elaboración del marco teórico y revisión de las metodologías para la selección de métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas	51
4.5	Selección de los métodos naturales adecuados para el tratamiento de aguas residuales domésticas	52
4.6	Identificación de los criterios de diseño y desempeño de los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas.....	53
4.7	Obtención de los costos unitarios de los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas	54
4.8	Elaboración de la propuesta para el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante métodos naturales.....	54

Capítulo 5. Resultados	56
5.1 Identificación del problema asociado a las descargas de aguas residuales de tipo doméstico en la Congregación de Zoncuantla	56
5.2 Caracterización de los sitios seleccionados para la propuesta de tratamiento por métodos naturales para aguas residuales de tipo doméstico en la colonia Mariano Escobedo	60
Capítulo 6. Propuesta.....	65
6.1 Introducción	67
6.2 Los tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales: definición y análisis	67
6.3 Beneficios de los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales	69
6.4 Tratamiento de aguas residuales domésticas para zonas rurales	70
6.4.1 Tratamientos colectivos de aguas grises para la colonia Mariano Escobedo, en la Congregación de Zoncuantla, Coatepec, Ver.	71
6.4.2 Tratamientos individuales para aguas residuales de tipo doméstico en áreas rurales de ecosistemas de bosque mesófilo de montaña	84
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones	99
7.1 Conclusiones	99
7.2 Recomendaciones	100
Anexo.....	102
Desglose de costo de materiales y mano de obra para los tratamientos por métodos naturales de aguas residuales domésticas.....	102
Bibliografía	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Consumo doméstico per cápita de agua, según el tipo de clima y la clase socioeconómica	34
Tabla 3.2 El volumen de aguas residuales se obtiene según el tipo de vivienda que se esté analizando	34
Tabla 3.3 Consumo de agua según la actividad doméstica	35
Tabla 4.1 Población de las localidades de la Congregación de Zoncuantla, Coatepec	48
Tabla 4.2 Porcentaje de viviendas, por localidad, que no cuentan con drenaje	48
Tabla 5.1 Tipo de servicio para la recolección de aguas residuales domésticas y aplicación de tratamientos por métodos naturales en las viviendas de la Congregación de Zoncuantla	57
Tabla 5.2 Ubicación y superficie de los sitios seleccionados para la propuesta de tratamientos por métodos naturales de aguas grises de la colonia Mariano Escobedo	61
Tabla 5.3 Número de viviendas con descargas de aguas grises en la colonia Mariano Escobedo	63
Tabla 6.1 Especies emergentes más que pueden implementarse en el humedal artificial de flujo subsuperficial para la colonia Mariano Escobedo.	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Procedimiento desarrollado para la elaboración de la propuesta para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales	46
Figura 5.1 Escurrimiento de aguas grises en una de las calles de la Congregación de Zoncuantla	58
Figura 5.2 Tubo de salida de aguas grises de la calle Gardenias	58
Figura 5.3 Biodigestor de la calle Bugambilias en la colonia Mariano Escobedo ..	59
Figura 5.4 Tubería de salida de aguas grises de una vivienda en la colonia Mariano Escobedo	59

Figura 5.5 Ubicación de las descargas de aguas grises en la calle Gardenias y Privada de las Flores, en la colonia Mariano Escobedo	62
Figura 5.6 Ubicación de las descargas de aguas grises en la calle 10 de noviembre en la colonia Mariano Escobedo	63
Figura 6.1 Secciones de un entramado de raíces	72
Figura 6.2 Entramado de raíces para las aguas grises de una vivienda en Tepoztlán, México	76
Figura 6.3 Secciones de un humedal de flujo vertical.....	78
Figura 6.4 Humedal de flujo vertical en una vivienda en Kathmandú, Nepal	80
Figura 6.5 Diseño de una torre para aguas grises con sus medidas	85
Figura 6.6 Secciones de un fiiltro anaerobio de flujo ascendente de 4 cámaras ..	89
Figura 6.7 Tanques de plástico de 220 litros, se utilizan también como filtro anaerobio en Jordania	91
Figura 6.8 Esquema general de un tanque séptico de dos cámaras.	94
Figura 6.9 Distancia mínima requerida para la ubicación de un tanque séptico ...	96
Figura 6.10 Capacidad de trabajo de la fosa séptica en función del número de usuarios	97

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural fundamental para la vida en la Tierra, constituye uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza y cubre aproximadamente tres cuartas partes de la superficie terrestre (Castañeda & Flores, 2013). A pesar de su gran importancia, la calidad del agua se ha deteriorado como consecuencia de las actividades humanas y por ello, se ha convertido en motivo de preocupación a nivel internacional, nacional, estatal y local en muchos países. Vörösmarty y colaboradores (2010), afirman que dichas actividades amenazan directamente los cuerpos de agua dulce, ya que dañan a los ecosistemas y al ciclo hidrológico natural. El actual sistema de desarrollo, que implica el crecimiento económico y poblacional, así como “la ineficiencia en la aplicación de un marco regulatorio y en políticas públicas que protejan los ecosistemas y sus bienes y servicios ambientales, entre otros aspectos, están incidiendo en una degradación paulatina de las cuencas” (Menchaca *et al.*, 2015, p. 10). A nivel local, en la microcuenca del río Pixquiac, diferentes estudios, señalan que existe una problemática de contaminación de los recursos hídricos (Menchaca *et al.*, 2014), provocada por el crecimiento de la mancha urbana, la actividad industrial y las descargas directas de aguas residuales a las fuentes naturales de agua. Las bases de datos generadas por el Observatorio del Agua para el Estado de Veracruz, OABCC (Agua, Bosques, Cuencas y Costas), han sido obtenidas a través de la medición de los impactos ejercidos en la microcuenca, ocasionados por los diferentes usuarios del agua. Algunas de las actividades que realizan los usuarios del agua son: agrícola, pecuaria, forestal, acuicultura, industrial y doméstica. Debido a la falta de redes de drenaje, la recolección de las aguas residuales, generadas en los hogares, es difícil; aunado a lo anterior, el tratamiento de éstas es, casi siempre, inexistente. Al respecto, Bernal *et al.* (2004), propone como solución tanto para las pequeñas comunidades como para las zonas rurales, los tratamientos por métodos naturales para aguas residuales domésticas dada su alta eficiencia, bajos costos de operación y mantenimiento y fácil construcción.

Capítulo 1. Contexto general

1.1 Antecedentes

Los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas comenzaron a tomar relevancia en el siglo XIX, cuando el único método aceptado para tratar aguas residuales era la aplicación sobre el terreno (Crites *et al.*, 2006). Posteriormente, empezaron a resurgir distintos métodos naturales conforme la protección y recuperación del medio ambiente se volvió prioridad en los países. Es por ello que, el estudio y análisis de los métodos naturales ha sido más profundo, abarcando no solo aspectos técnicos, sino también sobre su repercusión social en aquellos sitios donde son instalados. Por este motivo, se presentan a continuación, los antecedentes a nivel internacional, nacional, estatal y local sobre el uso y aplicación de los tratamientos por métodos naturales para aguas residuales en pequeñas poblaciones y en áreas rurales.

1.1.1 Nivel internacional

La selección de alternativas de tratamiento por métodos naturales depende de los objetivos finales del tratamiento y de las posibilidades de la reutilización de las aguas tratadas. Es por ello que, son criterios claves para la selección de estos sistemas: la disponibilidad de espacio, las características generales del sitio, la topografía y las condiciones ambientales (Bernal *et al.*, 2004).

En Loja, Ecuador, en 2010, se publicó la “Guía de selección de tecnologías de depuración de aguas residuales por métodos naturales”. La ejecución de este proyecto fue un paso importante en el estudio de las tecnologías de tratamientos por métodos naturales, con datos reales de poblaciones pequeñas, es decir, la guía está dirigida a la búsqueda de tecnologías económicas, eficientes y ambientalmente sostenibles, esto es, que se adapten al medio y, que sean aplicables a pequeñas comunidades, cuyos vertidos sean aguas residuales de origen doméstico. Con base en lo anterior, los autores elaboraron una guía de selección para que otras

comunidades de Ecuador, que posean características similares, puedan seleccionar la tecnología que mejor se adapte a su entorno.

En Colombia, Bernal y colaboradores (2004) realizaron una investigación sobre los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales para pequeñas poblaciones. Los autores propusieron una guía de selección de tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, como son: lagunas de estabilización, sistemas de tratamiento en el terreno y sistemas de tratamiento con plantas macrófitas, como los humedales artificiales; llegando a establecer estándares de vertimiento, condiciones climáticas, características del terreno, disponibilidad de recursos, operación y mantenimiento, reúso, costos, capacidad y disponibilidad de pago.

En el caso de Chile, el trabajo de Pérez (2010), propuso un sistema de tratamiento de aguas residuales para la nueva ciudad de Chaitén, la cual fue reubicada en la localidad de Santa Bárbara, provincia de Palena, Región de los Lagos. La selección se realizó mediante una metodología de decisión multicriterio conocida como AHP (Proceso Jerárquico Analítico), para lo cual se generó un modelo de selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales, que se aplicó a la localidad de Santa Bárbara. Se estudiaron las características de la zona donde se instalaría la nueva ciudad, así como también las necesidades y aspectos más importantes de la antigua ciudad de Chaitén.

En lo referente al estudio de tecnologías relacionadas a la depuración de contaminantes presentes en el agua residual urbana por medios naturales, como es el suelo, Moreno (2003), describió un modelo experimental a escala real para la investigación de las aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno, esto es, mediante: infiltración rápida, escorrentía superficial, filtro verde, lechos de turba, entre otros métodos.

1.1.2 Nivel nacional

En los últimos 10 años, México ha incrementado la inversión en construcción de plantas medianas y grandes para el tratamiento de aguas residuales en ciudades industrializadas y densamente pobladas, como es el caso de Monterrey o Ciudad

de México. No obstante, el panorama para las pequeñas comunidades es muy diferente. En estas comunidades habita 30% de la población, normalmente éstas no se encuentran conectadas a sistemas centralizados de recolección y tratamiento de aguas residuales, por lo que fosas sépticas y pozos de infiltración han sido los sistemas más frecuentemente usados para la disposición local de sus aguas residuales (Báez, 2016). Por lo anterior, y dada la amplitud del problema, conviene estudiar el tratamiento de aguas residuales desde diversos panoramas y tomar en cuenta la diversidad de tratamientos (Díaz *et al.*, 2012).

Con estos antecedentes, el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) planteó la necesidad de desarrollar un novedoso sistema de tratamiento descentralizado para caudales de dos litros por segundo, ideal para comunidades con mil 500 habitantes, los cuales no cuenten con servicio de saneamiento (Báez, 2016). En México se han realizado diversos estudios, donde el desarrollo de tecnologías de saneamiento para comunidades rurales ha cobrado mayor énfasis. Como ejemplo tenemos a Romero *et al.* (2009), el cual menciona que, los humedales artificiales son una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes y al bajo costo de instalación y mantenimiento.

De igual forma, se han realizado estudios donde se han desarrollado metodologías para selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas, este es el caso del proyecto presentado por Díaz *et al.* (2012). El objetivo del documento, es proponer una técnica de tratamiento de aguas residuales para los asentamientos humanos aledaños a la laguna de San Miguel Almaya, en México. A partir de las características de la localidad y de los principios de desarrollo sostenible y, mediante la valoración de tres técnicas: los humedales, el Sistema de Unitario de Tratamiento, Nutrientes y Energía (SUTRANE), el Sistema Integral de Abasto y Saneamiento de Agua con descarga cero (SIASA).

En el trabajo de Castañeda & Flores (2013), se evaluaron tres tipos de plantas típicas de los humedales naturales en la región de Los Altos de Jalisco, en México: el carrizo común (*Phragmites australis*), el gladiolo (*Gladiolus spp.*) y la totora

(*Typha latifolia*). Mediante la medición de parámetros de calidad de agua contenidos en las normas oficiales mexicanas: NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997. En varios estados de la república mexicana como Michoacán, Colima, Nayarit, Chihuahua, el Estado de México, Oaxaca, Hidalgo, Tamaulipas, Tlaxcala y el Distrito Federal se han instalado sistemas de tratamiento natural basados en los tipos de plantas evaluado por Castañeda & Flores (2013), para el tratamiento de aguas residuales (CNA, 2007).

1.1.3 Nivel local

La colonia Mariano Escobedo, en la Congregación de Zoncuantla, pertenece a la zona baja de la microcuenca del río Pixquiac. En dicha colonia, se ha detectado el problema de las descargas de aguas residuales domésticas, debido a la falta de una red de drenaje y de un sistema de tratamiento para la zona, lo que permite que las aguas residuales lleguen al río Pixquiac. Además, la organización Global Water Watch, por medio de la asociación Vecinos del Pixquiac, han realizado el monitoreo de la calidad del agua del río Pixquiac desde el año 2006. Por lo anterior, la Asociación Civil Pobladores, junto con la comunidad, han trabajado en la colonia Mariano Escobedo, en la implementación de tratamientos de aguas residuales domésticas. Como resultado, en el año 2009, se logró la construcción del primer sistema colectivo de tratamiento de aguas residuales de tipo anaerobio, mediante el cual fueron beneficiadas 15 familias. Este sistema está conformado por un biodigestor, un entramado de raíces y una laguna con capacidad para diez mil litros de agua. De manera similar, los vecinos de la zona se han dado a la tarea de instalar tratamientos de aguas residuales en sus viviendas.

1.2 Planteamiento del problema

En la zona baja de la microcuenca del río Pixquiac la calidad del agua está siendo afectada por las descargas directas de aguas negras y grises provenientes de las áreas urbanas, es decir, no son tratadas antes de su vertimiento (Soares *et al.*, 2008); entre los motivos que permiten la descarga directa, está la falta de drenaje que, según datos del INEGI, del total de las viviendas en la microcuenca 16.23% no están conectadas a la red pública de drenaje. En la zona baja de la microcuenca del río Pixquiac se ha identificado la presencia de contaminantes microbiológicos (coliformes fecales y totales), químicos (fenoles y detergentes) y metales pesados (cadmio, plomo y arsénico), derivados de las actividades agrícolas, pecuarias, forestales, de acuacultura, domésticas e industriales (Uscanga, 2014). Lo anterior, establece la necesidad de desarrollar una propuesta dirigida a reducir el impacto de la actividad antropogénica sobre los recursos hídricos, lo que nos lleva a plantear la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son los tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales que pueden adecuarse a distintos tipos de vivienda, así como a las condiciones socio-económicas de los habitantes de la Congregación de Zoncuantla, Coatepec, Veracruz, México?

1.3 Objetivo

1.3.1 General

Desarrollar una propuesta para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales para distintos tipos de vivienda y condiciones socio-económicas de los habitantes de la Congregación de Zoncuantla, Coatepec, Veracruz, México.

1.3.2 Específicos

1. Identificar los problemas asociados a las descargas de aguas residuales de tipo doméstico en la Congregación de Zoncuantla.
2. Identificar los requerimientos de cada método natural para el tratamiento de aguas residuales domésticas para la selección de distintos métodos naturales para la Congregación de Zoncuantla.
3. Desarrollar una propuesta que incluya los diferentes tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales.

1.4 Justificación

Mediante la propuesta de tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales presentada en este trabajo recepcional, se reforzarán las bases establecidas con anterioridad por la Asociación Civil Pobladores y por los habitantes de la Congregación de Zoncuantla, respecto al manejo y protección de los recursos hídricos de la zona. Por lo anterior, esta propuesta podrá ser encaminada hacia el proceso de diseño e implementación, con lo cual se reduciría la carga de contaminantes que llegan directamente a los cuerpos de agua naturales y al suelo, producto de las aguas residuales de tipo doméstico. Además, aportará alternativas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, en zonas rurales dentro del ecosistema de bosque mesófilo de montaña, donde los métodos convencionales resultan, muchas veces, inoperantes debido al desconocimiento y a la baja capacidad local de manejo y sostenimiento.

Capítulo 2. Agua: disponibilidad, contaminación y gestión

2.1 Importancia de los recursos hídricos

El agua es una molécula conformada por dos elementos, dos de hidrógeno y uno de oxígeno, unidos por medio de un enlace covalente. Sus características físicas y químicas la convierten en un compuesto adecuado para toda forma de vida conocida en la Tierra. Es un soporte de vida y gracias a ella los organismos pueden llevar a cabo sus funciones básicas. Aun cuando existe un sinnúmero de estudios relacionados al agua, en la actualidad no se han comprendido del todo sus propiedades.

El agua, es el componente principal de toda la materia viva, ya que los organismos vivos están constituidos por un 50 a 90% de su masa. En las células, ya sea vegetal o animal, por ejemplo, actúa como disolvente para el transporte y descomposición de las sustancias que le proporcionan energía o que representan un peligro para su supervivencia. Gracias a su capacidad de ionización, un alto número de sustancias conocidas, son solubles en agua, por nada se le conoce como el disolvente universal. Además, puede actuar como catalizador en reacciones químicas importantes (Enciclopedia Medioambiental, 2015).

Es la única sustancia que, a temperaturas ordinarias de nuestro planeta está presente en estado sólido, líquido o gaseoso. En estado líquido, sabemos que la superficie del planeta está constituida por tres cuartas partes de agua en forma de océanos, lagos, arroyos, ríos, pantanos y mantos acuíferos. Como un gas, podemos encontrarlo en forma de niebla, vapor o formando las nubes. Y en estado sólido, los glaciares son un ejemplo claro. Además, está presente en la estructura de todos los suelos, conformando la porosidad del mismo, donde el agua y el aire se almacenan entre los espacios vacíos que dejan las partículas sólidas del suelo.

Como es sabido, el agua es indispensable, y no solo para los seres vivos, este compuesto desempeña un papel importante respecto a la determinación del clima, del cual es un componente esencial (Alvarado, 2010), un ejemplo claro es el vapor de agua, que funciona como un regulador de la temperatura en la tierra, ya que el agua en cualquiera de sus formas, absorbe y libera calor lentamente. No solo en el clima, ésta es una parte importante de todos los ecosistemas, sin ella la biodiversidad se perdería, disminuyen los medios de subsistencia disponibles y las fuentes de alimento se deteriorarían. La reducción del agua disponible, ya sea en cantidad, en calidad o en ambas, provoca efectos negativos sobre los ecosistemas (UN-HABITAT, 2003), los cuales dependen de ella para que sus componentes, como la vegetación, la fauna, el suelo o el clima puedan realizar los procesos naturales necesarios para el mantenimiento del mismo. Además, los ecosistemas brindan servicios ambientales, los cuales reciben directa o indirectamente los seres humanos (Menchaca, 2016).

El agua, no solo permite realizar actividades para obtener alimentos, para la construcción de casas o la producción de vestimentas, también forma parte del cuerpo humano y de sus procesos. Por tanto, pueblos antiguos se han asentado cerca de las fuentes de agua para satisfacer sus necesidades de consumo, limpieza e higiene personal desde tiempos remotos. Las sociedades actuales han concebido al agua como un elemento natural fundamental para el desarrollo económico y social, es decir, el agua es necesaria para que las personas tengan una vida digna, así como el mantenimiento y evolución de los ecosistemas y su biodiversidad (Ferrer & Ballester, 2015).

Desde los pequeños arroyos hasta los grandes océanos, que son como las arterias y venas del planeta, el agua se desplaza, pasando por los distintos almacenes del mundo, a través de un recorrido natural que finaliza y vuelve a comenzar interminablemente, denominado ciclo del agua o hidrológico.

2.1.1 El ciclo hidrológico

Como todo en este planeta, el agua sigue el curso natural de un ciclo, en el cual intervienen un sinnúmero de factores físicos, químicos y biológicos. Desde la temperatura

hasta el valor de la presión, el agua atraviesa por los diferentes estados de la materia (líquido, sólido, gaseoso), para cumplir con las funciones vitales de los microorganismos, plantas, animales y del ser humano. Como menciona Ordoñez (2011, p. 6), “el ciclo hidrológico se basa en el permanente movimiento o transferencia de las masas de agua, tanto de un punto del planeta al otro”, es decir, el agua no es un elemento que permanece estático, es dinámico dentro de un sistema natural definido.

En la actualidad, los conceptos que definen al ciclo hidrológico dan a conocer las características principales de éste, incluso pueden ser amplios e incorporar cada uno de los procesos físicos y químicos que se llevan a cabo en el ciclo hidrológico. En este trabajo se hace referencia a la definición presentada por Toledo (2006, p. 25), la cual integra a los principales procesos y transformaciones que sigue el agua: Es así como, el ciclo hidrológico “liga a los grandes sistemas de producción, transferencia y almacenamientos de energía y materiales del planeta. El ciclo determina los movimientos del agua en el sistema terrestre a través de tres procesos básicos: la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía. Regula procesos biofísicos críticos y funciones ambientales vitales de los ecosistemas”.

Como ya se mencionó anteriormente, el agua está en constante movimiento, ésta puede trasladarse desde la atmósfera hasta la biósfera (involucra a todos los organismos vivos), o de la criósfera (son las partes de la Tierra, donde el agua se encuentra en estado sólido) hacia la litósfera (relacionado al suelo). Es durante este movimiento, de un depósito a otro, que suceden diversos procesos, entre los cuales tenemos: evaporación, condensación, precipitación, sedimentación, escorrentía, infiltración, sublimación, transpiración, fusión y flujo de agua subterránea (Ordoñez, 2011).

Sin lugar a dudas, la masa principal de agua se encuentra en los océanos, los cuales cubren dos tercios de la superficie terrestre y son quienes suministran la mayor parte de agua como resultado de su evaporación. De lo evaporado, el 91% es devuelto al océano por medio de la precipitación. El restante 9% es transportado a las zonas continentales, donde los factores climatológicos inducen la precipitación (Ordoñez,

2011). Al caer el agua en las zonas continentales, ésta puede recorrer diferentes caminos, como el escurrimiento superficial que llega a los cauces de los ríos o directamente sobre lagos, presas, arroyos, entre otros, desde donde vuelve a evaporarse (Alvarado, 2010); o ser interceptada por las plantas o directamente al suelo donde se infiltra.

En total, el planeta está cubierto por agua en un 70%, mientras que solo 2.5% es representado por el agua dulce, de este porcentaje, aproximadamente, 490 km³ están disponibles en cuerpos de agua naturales como lagos, ríos, arroyos y presas de almacenamiento. Sin embargo, el agua dulce se ha convertido en un recurso escaso en el mundo como resultado de diversos factores, entre los más importantes está la contaminación y el manejo de residuos (Kulabako *et al.*, 2011).

Cabe resaltar que los depósitos en el mundo contienen alrededor de 1,386 millones de km³, de los cuales solo un 97.5% se encuentra contenido en los grandes océanos y el 2.5% restante lo representa el agua dulce, ya sea en forma de ríos, lagos o arroyos (Henry & Heinke, 1999). Sin embargo, Toledo (2006) indica, que de este pequeño monto de agua dulce, el 68.7% se encuentra en forma de hielo, lo que es aproximadamente 23, 800 millones de km³. Y otro 29% se halla en los mantos acuíferos en forma de aguas subterráneas, unos 10, 360 millones de km³. Solamente el restante 0.26%, unos 490 km³, está presente en cuerpos de agua como lagos, presas de almacenamiento y ríos.

2.1.2 Disponibilidad: cantidad y calidad del agua

La situación actual del entorno se encuentra amenazado, las actividades humanas han deteriorado el buen funcionamiento de los sistemas naturales e impiden su recuperación. Como resultado de este deterioro, será más difícil satisfacer las necesidades básicas de los seres humanos, como son el abastecimiento y el consumo de los recursos hídricos. Si tomamos en cuenta que aproximadamente el 71% del planeta está cubierto de agua, pero solo una mínima fracción lo representa el agua dulce, el recurso es aún más limitado para la población en crecimiento.

Se establece que en promedio cada persona utiliza 1, 240 m³ de agua por año; sin embargo, hay marcadas diferencias entre países; mientras que en Estados Unidos

utilizan 1, 280 m³ de agua al año por persona, en Europa utilizan 694 m³, en Asia alcanzan los 535 m³, en Sudamérica son 311 m³ y en África los 186 m³ per cápita al año (De la Peña, Ducci & Zamora, 2013). Sin embargo, estos datos podrían modificarse, ya que se espera que la demanda mundial de agua aumente considerablemente en las próximas décadas, según la UNESCO (2017), más que nada por el crecimiento mundial de la población; por ende, el sector agrícola extraerá una mayor cantidad de agua, junto con la producción industrial y la energética.

Al principio del tercer milenio de nuestra era, las aguas dulces del mundo se han convertido en un bien escaso, amenazado y en peligro (Toledo, 2006). La necesidad de satisfacer de agua limpia a las ciudades y comunidades; para el uso industrial, el riego de cultivos, así como otras actividades humanas, ejercen sus efectos negativos no solo sobre la cantidad disponible, sino también sobre su calidad. A pesar de lo anterior, el agua dulce, que está representada por una mínima fracción, su forma natural de almacenamiento y distribución ha sido modificada por el hombre. Mediante el surgimiento de nuevos métodos y tecnologías para su aprovechamiento, que ha beneficiado a miles de personas, el volumen y la distribución de agua dulce en el planeta ha cambiado considerablemente como resultado de los esfuerzos humanos por controlarlos y manejarlos para satisfacer sus necesidades y para beneficio de sus intereses económicos y políticos (Toledo, 2006)

Además, los escenarios de cambio climático prevén una modificación a la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones, las cuales tendrán repercusiones a nivel socioeconómico y medioambiental, como ejemplo, la modificación de las cuencas hidrográficas del mundo (UNESCO, 2017). Actualmente, en el mundo, existen unos 500 millones de personas que viven en regiones donde el consumo supera los recursos hídricos. La calidad del agua, ya sea superficial o subterránea, depende de factores naturales y la acción humana. En el caso de los primeros, ésta vendría determinada por la erosión del substrato mineral, los procesos atmosféricos de evapotranspiración y sedimentación de lodos y sales, la lixiviación natural de la materia orgánica y los nutrientes del suelo (UN-Water, 2011). La acción humana, en

cambio, se asocia al uso que se le da y como se devuelve ésta a los cuerpos de agua naturales. Para determinar el grado de calidad, las características químicas y físicas de una muestra son comparadas con estándares, lo que ayuda a diagnosticar la condición del recurso y si este es apto para sostener vida o para consumo humano. La calidad se encuentra intrínsecamente relacionada con la disponibilidad, ya que la modificación de sus características principales, la excluyen de muchos usos. El agua contaminada que no puede utilizarse para consumo, para baño, para la industria o la agricultura reduce de forma significativa la cantidad disponible en una determinada zona (PNUMA, ERCE & UNESCO, 2006).

El deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial con el crecimiento de la población humana, la expansión de la actividad industrial y agrícola y la amenaza del cambio climático como causa de importantes alteraciones en el ciclo hidrológico (UN-Water, 2011). La calidad del agua merece mayor atención junto con la cantidad en la gestión de los recursos (UN-Water 2011), ya que es esencial para el desarrollo, salud y bienestar de la población mundial. Cada país debe tomar en cuenta la administración de los recursos hídricos en sus normas y leyes, con el fin de mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Este es el caso de México, donde la disponibilidad natural media por persona ha disminuido drásticamente en la última mitad del siglo veinte y un 24% de las aguas superficiales están contaminadas.

2.1.3 Los recursos hídricos en México

En nuestro país el agua es un tema con diferentes contrastes dependiendo la ubicación, entre el sur y el norte, la disponibilidad varía enormemente debido al clima que impera en cada región. Se sabe que dos terceras partes del territorio se consideran áridas o semiáridas, con precipitaciones pluviales anuales menores a los 500 milímetros, mientras que el sureste es húmedo con precipitaciones promedio que superan los 2 mil mm por año (CONAGUA, 2015).

Aunque la diferencia entre ambas regiones sea grande, según datos del FCEA (2015), anualmente México recibe un aproximado de 1 millón y medio metros cúbicos de agua en forma de precipitación. Los mismos datos indican que 72.5% se

evapotranspira y regresa a la atmósfera, un 21.2% escurre por los ríos y arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. En México las principales fuentes de abastecimiento de agua para los diversos usos que se le da son las superficiales y las subterráneas. Las aguas subterráneas desempeñan un papel de creciente importancia en el desarrollo socioeconómico del país, gracias a sus características físicas que les permiten ser aprovechadas de manera versátil, pues funcionan como presas de almacenamiento y red de distribución. Para fines de administración del agua subterránea el país se divide en 653 acuíferos (CONAGUA, 2015). Los ríos y arroyos constituyen una red hidrográfica de 633, 000 km de longitud, en la que destacan 51 por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país (CONAGUA, 2011). El 26% de los ríos, lagos y embalses que monitorea la Comisión Nacional del Agua son de buena calidad, en tanto, el 74% restante tiene diferentes grados de contaminación. Los principales contaminantes de los cuerpos de agua son: materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y microorganismos; pero hay otros como los metales (arsénico, plomo, mercurio, etc.) y residuos de las industrias.

En México, la evaluación de la calidad del agua es realizada por CONAGUA a través de la Red Nacional de Monitoreo, que en 2014 contaba con 5, 000 sitios. En estos sitios, la evaluación se lleva a cabo utilizando tres indicadores: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) (Houbron, 2010). Los resultados de estas evaluaciones muestran las cuencas que tienen ríos alto grado de contaminación, entre ellos: el Lerma, Alto Balsas, Río Colorado y Alto Pánuco. En contraste, aquellos de menor grado son: Grijalva, el Usumacinta, el Medio y Bajo Pánuco, el Tehuantepec, el Soto la Marina, el Sonora y el Yaqui.

Una de las actividades que mayor consumo de agua tiene México es la agrícola, ésta ocupa el primer lugar en volumen consumido; a continuación, le sigue el abastecimiento público, el cual alcanzó un total de 11.96 mil millones de m^3 durante el 2013 (Gutiérrez, 2015). En promedio, cada mexicano consume 360 litros de agua por día; del total de agua dulce utilizada, este sector representa 14%; 77% se utiliza

en la agricultura, el 5% en las termoeléctricas y 4% en la industria (Gutiérrez, 2015). La inadecuada explotación del agua ha llevado a que la disponibilidad per cápita en México disminuyera de manera significativa en las últimas décadas; en 1950 era de 18, 035 m³ por habitante por año y en el 2013, pasó a 3, 982 m³, cifra calificada como baja por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (FCEA, 2015). Otra de las situaciones que señala Jiménez (2007), es que el volumen de agua con calidad excelente ha disminuido un 32%, la contaminada ha aumentado en 31% y la fuertemente contaminada se ha mantenido en la misma cantidad en México.

2.1.4 Situación del agua en el Estado de Veracruz

El estado de Veracruz, ubicado al oriente de México, es una de las entidades con mayor riqueza, no solo a nivel cultural o en diversidad natural, gracias a sus relieves, su cercanía con el mar y su clima, todo en conjunto, permite gozar al estado de una precipitación promedio anual del doble de la media nacional. Es por ello que se caracteriza por contar con una amplia disponibilidad aparente de agua. Sin embargo, su distribución espacial y la calidad del agua limitan el aprovechamiento en algunas regiones. La capacidad hídrica es de las más altas de México, ya que el volumen medio anual de escurrimiento superficial representa el 33% del total nacional (Paré, 2009), aunque es difícil de aprovechar plenamente debido a las condiciones topográficas del estado, ya que la mayor parte es descargada directamente al mar.

Los ríos que cruzan la entidad veracruzana aportan una gran cantidad de agua a los 212 municipios con sus más de 22 mil localidades, de hecho, muchos de estos ríos provocan inundaciones durante gran parte del año, como es el caso del Papaloapan (Sandoval, 2005). En el caso de Veracruz, existe una gran diferencia entre la cobertura de agua potable y saneamiento entre el mundo rural y el urbano, siendo uno de los estados con mayor rezago, ocupando el cuarto lugar en déficit de cobertura solo por encima de Guerrero, Oaxaca y Chiapas. El problema se ubica en la gestión del servicio público y en el acceso a las zonas rurales para dotarlas con la infraestructura tradicional (Domínguez, 2008).

El proveer servicios públicos relacionados al agua es de competencia municipal, pero muchos de ellos no dan prioridad a este ámbito. Por tanto, las obras públicas visibles comunes constituyen la pavimentación, construcción de caminos y puentes con una gran inversión municipal. Aun cuando uno de los elementos para superar la pobreza es el acceso al agua en calidad y cantidad, no se identifica como un problema ni se asignan recursos suficientes (Domínguez, 2008)

Domínguez (2008), afirma que, en Veracruz, “dos son los problemas principales a destacar: el acceso uniforme y equitativo al servicio público del agua, y los problemas de contaminación de los recursos hídricos”.

2.1.5 Situación del agua en la microcuenca del río Pixquiac

El término Pixquiac, proviene del náhuatl “Pixquitl” y “Atl” que significa “cosecha” y “agua” respectivamente, por lo que puede entenderse en su conjunto, como “cosecha de Agua” (Anaya & Rivera, 1999)

Como se mencionó anteriormente, México está cubierto por una gran extensión de redes hidrográficas, en total de 633 mil km, la cual está conformada por ríos y arroyos que atraviesan el país y por donde escurre el agua proveniente de las precipitaciones. Es por ello que el territorio nacional fue delimitado en cuencas hidrográficas, las cuales ofrecen un sinfín de bienes y servicios ambientales a los seres humanos, quienes pueden llevar a cabo actividades agropecuarias y comerciales, ya que gracias a las cuencas se tiene un suministro limpio de agua dulce y se regula la erosión de los suelos.

Para facilitar el manejo y gestión de los recursos en las cuencas hidrográficas, éstas se han subdivido en subcuencas y a su vez en microcuencas, que es donde ocurren interacciones entre los aspectos económicos, sociales y ambientales. En el estado de Veracruz, la cuenca del río La Antigua cubre una extensa área del centro, además de una pequeña porción en el estado de Puebla. Dentro de dicha cuenca, formando parte de la zona alta, se encuentra la microcuenca del río Pixquiac, su afluente principal (que lleva el mismo nombre), nace en el Cofre de Perote y atraviesa los municipios de Coatepec, Tlalnahuayocan, Acajete, Las Vigas de Ramírez y Perote (Menchaca *et al.*, 2015).

La microcuenca del río Pixquiac ha sido tema central de distintos grupos académicos y sociales, quienes han realizado investigaciones científicas, actividades culturales y económicas para lograr alcanzar el correcto manejo y gestión de los recursos naturales que ésta provee a las comunidades, y a los municipios de Xalapa y Coatepec. Uno de estos recursos, es el agua, que, si bien es fundamental para el desarrollo de Veracruz, los problemas relacionados a la disminución de su calidad no han recibido atención prioritaria.

La microcuenca del río Pixquiac se caracteriza por las altas precipitaciones que se presentan durante el periodo de mayo a octubre, anualmente recibe 216 millones de metros cúbicos de agua, del total una parte se evapotranspira, se infiltra a los acuíferos o escurre superficialmente (Menchaca *et al.*, 2015). Los escurrimientos derivados de estas precipitaciones, se traducen en una densa red de drenajes naturales, así como el afloro de manantiales en todo el territorio que aportan agua a los cauces incluso en época de estiaje (García, 2009). El volumen de agua que se captura a lo largo de la microcuenca depende de la presencia de vegetación, en este caso de los bosques, y de la estabilidad del suelo, que es de tipo andosol, caracterizados por retener agua siempre. La microcuenca está dividida en tres zonas, dependiendo de su altitud y el tipo de suelo predominante. La zona media capta 52% del total de agua lluvia, siendo ésta la que tiene mayor disponibilidad natural de agua (Menchaca *et al.*, 2015).

Para la ciudad de Xalapa, los municipios y localidades que abarca la microcuenca, el río Pixquiac es una de sus fuentes de abastecimiento. Por ejemplo, para Xalapa, los afluentes derivados del río, contribuyen con el 38% del total de agua de uso público urbano (Menchaca, 2016). La presión que ejercen los usuarios del agua sobre los recursos hídricos de la microcuenca es elevada, lo que la limita para el uso humano en las tres zonas (Menchaca, 2016). De hecho, la cantidad concesionada para uso público-urbano representa un 68.64% de un total de 32 millones de metros cúbicos que reporta el Registro Público de Derechos del Agua de CONAGUA, citado por Mechaca et al. (2015). A la presión ejercida por la extracción inmoderada de agua de la microcuenca, también se suma la disminución de la calidad de los recursos hídricos de la zona.

2.2 Contaminación del agua

Debido a la importancia que ha tomado la contaminación del agua a lo largo de los años, su definición se ha ampliado de acuerdo a la situación actual. Es así como, el Fondo Mundial para la Naturaleza (2017) ha definido a la contaminación del agua: La contaminación de los recursos hídricos ocurre cuando sustancias tóxicas penetran en los cuerpos de agua naturales, como son ríos, lagos, arroyos, océanos, entre otros; disolviéndose en ellos, permaneciendo suspendidos o depositándose en el fondo, degradando su calidad.

De igual forma, National Geographic (2017), nos ofrece una definición en la que puede involucrarse también las descargas de aguas residuales: Más allá de la contaminación con productos sintéticos, los cuerpos naturales de agua dulce representan el punto final para desechos en la forma de residuos humanos, excretas de animales, y en un alto contenido de nutrientes arrastrados por el agua de lluvia desde jardines, zonas de cultivo y granjas. La definición anterior nos ofrece una visión de lo que llega a los cuerpos de agua naturales cuando el vertimiento de industrias o las descargas y desechos de áreas urbanas no son controlados, lo que lleva a la degradación de este recurso.

El desarrollo y la industrialización de los países suponen un constante y mayor uso de agua, la cual es incluida en cualquier proceso productivo, de extracción, y en la vida cotidiana de zonas urbanas y rurales. Es por ello que, el uso doméstico, la producción agropecuaria, la industria minera, la industria alimentaria, la generación de energía, las prácticas forestales y otros factores, son capaces de alterar las características químicas, biológicas y físicas del agua de forma que, la integridad de los ecosistemas y la salud humana se ven amenazados (UN-Water, 2011). Por ejemplo, la presencia de patógenos en el agua, producto de la descarga de aguas residuales urbanas, puede provocar enfermedades gastrointestinales o de la piel en los seres humanos.

2.2.1 Principales fuentes de contaminación de agua: riesgos y amenazas

En la actualidad, no solo ha incrementado la preocupación por el rápido deterioro de las fuentes de abastecimiento de agua, la cantidad utilizable, es decir, la

disponibilidad disminuye rápidamente. Las causas de esta situación son muchas, pero la mayor parte de la contaminación tiene sus orígenes en la urbanización, la agricultura y el incremento de la población humana observada en el último siglo y medio (Goel, 2006), sin dejar de lado otro tipo de actividades antropogénicas.

Por una parte, la demanda de productos y servicios que satisfagan las necesidades básicas como es la alimentación, vestido, vivienda y salud, y por otra la creación de nuevos productos, como en el caso de la salud; los medicamentos conforman otra fuente de contaminantes, esto incluye: compuestos endocrinos, esteroides y hormonas, aditivos y agentes industriales, y aditivos de combustibles (UN-Water, 2011). Las fuentes de contaminación son muy variadas, tanto así, que algunas son sencillas de identificar, mientras otras no tienen un origen específico y requieren de mayor atención. Por lo anterior, el origen de las fuentes de contaminación se ha dividido en dos tipos según CEMDA, FEA & Presencia Ciudadana (2006):

- Contaminación puntual. La contaminación puntual se refiere a una fuente única e identificable y se encuentra en un área determinada desde donde se descargan los contaminantes. Por ejemplo, las aguas residuales provenientes de una vivienda.
- Contaminación no puntual o difusa. Este tipo de contaminación abarca grandes áreas geográficas, esto se debe a su sencilla capacidad de transporte; además, diferentes fuentes pueden aportar a la contaminación difusa. Como ejemplo, el escurrimiento de residuos agrícolas hacia un río desde distintas zonas de cultivo.

La mayor parte de la contaminación se origina en los usos urbano, industrial y agrícola, por tanto, se han agrupado en diferentes categorías para su fácil comprensión. Las fuentes de contaminación más comunes, según CEMDA, FEA & Presencia Ciudadana (2006), se describen a continuación:

- Origen doméstico. Son las descargas de residuos de viviendas, comercios u oficinas, así como de cualquier espacio de uso público. Éstas constituyen las aguas residuales municipales. Está relacionada con la cobertura de los

servicios de agua potable y alcantarillado, las cuales incrementan en los grandes asentamientos urbanos.

- Origen agrícola-ganadero. Los principales contaminantes son los residuos de pesticidas, llevados hasta los ríos por la lluvia y la erosión del suelo, estas partículas son arrastradas por las corrientes de agua hasta lugares más lejanos y pueden contaminarlos. Las aguas de retorno agrícola son una fuente de contaminación importante cuyo impacto se manifiesta en el alto porcentaje de cuerpos de agua que se encuentran en condiciones de eutrofización. Los efluentes de instalaciones dedicadas a la crianza y engorda de ganado mayor y menor también son una fuente de contaminación.
- Origen en la navegación. Los sitios asociados a cuerpos de agua que se destinan a la navegación para la atracción de turismo, como es el caso de lagos, lagunas o ríos; y las rutas marítimas de transporte de mercancías donde embarcaciones de todo tipo llevan y traen productos. En ambos casos, las embarcaciones que se utilizan pueden generar un impacto al agua, si no reciben el mantenimiento adecuado o al momento de sufrir un accidente, existe la posibilidad del derrame de aceites o combustibles.
- Origen industrial. Descargas generadas por las actividades de extracción y transformación de recursos naturales para bienes de consumo y servicio. Las descargas industriales contienen metales pesados y otras sustancias químicas tóxicas, que no se degradan fácilmente en condiciones naturales. De hecho, en México, el volumen de agua utilizada en la industria es de, aproximadamente, 6 km³/año. Del total se descargan cerca de 5.36 km³/año como aguas residuales, de las cuales son tratadas sólo el 15% (FEA, CEMDA & PCM, 2006). Entre las actividades más contaminantes destacan la industria azucarera, química, petrolera, metalúrgica y de papel y celulosa.

2.3 El agua, un recurso de interés social

El agua es uno de los recursos naturales que forma parte del desarrollo de cualquier país; es el compuesto químico más abundante del planeta y resulta indispensable para el desarrollo y sostenimiento de la vida (Romero *et al.*, 2009). En México, el

agua ha sido reconocida como un asunto estratégico y de seguridad nacional, y se ha convertido en elemento central de las actuales políticas ambientales y económicas, así como un factor clave del desarrollo social (De la Peña *et al.*, 2013). La gestión sostenible, las infraestructuras del agua y el acceso a un suministro seguro, fiable y asequible de agua y servicios de saneamiento adecuados mejoran el nivel de vida, expanden las economías locales y promueven la creación de puestos de trabajo más dignos y a una mayor inclusión social (UNESCO, 2016).

Contar con un recurso de calidad representa beneficios innumerables en el aspecto social; el trabajo que se ha realizado en México para la protección y aprovechamiento de este valioso elemento se refleja en sus leyes y normativas. Sin embargo, aún es necesario establecer un manejo apropiado de los recursos, para evitar un suministro irregular a la población, el desperdicio innecesario de agua por fugas y la contaminación de los cuerpos de aguas naturales.

Dentro del marco jurídico vigente, los ordenamientos con disposiciones en materia de agua ocupan un lugar importante. Como primer lugar, tenemos la ley máxima en México, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que su artículo 27, párrafos primero y quinto, establece que la nación es propietaria de las aguas dentro de su territorio nacional. Este derecho de propiedad es inalienable e imprescriptible, es decir que, el derecho sobre las aguas nacionales no puede transmitirse o perder vigencia en ningún caso, esto según el párrafo sexto. Mientras que, el derecho de beneficiarse de las aguas nacionales sólo será aquel que derive de una concesión otorgada por el Poder Ejecutivo Federal. Los servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición final de las aguas residuales está regulado por el artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en el que se establece que son de competencia municipal, con el apoyo de los gobiernos estatal y federal (FEA, CEMDA & PCM, 2006). Finalmente, en el artículo cuarto, párrafo quinto, cuando se habla sobre: “toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar”, se incluye implícitamente el derecho a acceder a recursos hídricos de calidad, ya que éste es un recurso natural que juega un papel importante en nuestro desarrollo.

En lo relativo a otras leyes, la que se ocupa propiamente de la materia es la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento. Dicha ley precisa los instrumentos normativos de los que dispone la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con lo cual formula, lleva a cabo y evalúa en materia hidráulica dentro del país, administrar y resguardar las aguas nacionales, así como la expedición de títulos de concesión y los permisos para descargas de aguas residuales (Alvarado, 2010). A través del Registro Público de Derechos de Agua, se registran los títulos y permisos de concesión y asignación, así como las operaciones de transferencia y se expiden certificados; lo que, en esencia, tiende a establecer una mayor certeza jurídica en este campo (FEA, CEMDA & PCM, 2006).

Por otra parte, dentro de las leyes, podemos mencionar también la Ley Federal de Derechos. Dentro de sus apartados, se establece el pago de derechos por el uso de aguas nacionales, y para el aprovechamiento de bienes de dominio público de la nación, como es el caso de los cuerpos receptores de aguas residuales (Alvarado, 2010). La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente de 1988, establece los criterios para prevenir y controlar la contaminación de los recursos hídricos, dentro de los cuales se incluye: la importancia ambiental del tema, las obligaciones del Estado en materia de agua y el tratamiento de las descargas de aguas residuales (FEA, CEMDA & PCM, 2006). Estos criterios deben considerarse en la expedición de nuevas normas; en el tipo de tratamiento que debe aplicarse a las aguas residuales; el establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o de reserva; en las concesiones, asignaciones y permisos; y en los trabajos hidrológicos en cuencas, cauces y aguas subterráneas. De acuerdo con la LGEEPA, corresponde a la SEMARNAT expedir las Normas Oficiales Mexicanas para prevenir y controlar la contaminación de las aguas nacionales.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), han sido creadas para controlar y regular, en este caso, los límites máximos permisibles de descargas. Entre las principales Normas Oficiales Mexicanas en materia de aguas residuales, podemos mencionar aquellas expedidas por SEMARNAT:

- NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales
- NOM-002-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- NOM-003-SEMARNAT-1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental –lodos y biosólidos- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Capítulo 3. Gestión y manejo de aguas residuales domésticas

3.1 Usuarios del agua: actividades domésticas

En un principio, los antiguos pueblos no requerían de obras ingenieriles que transportara el agua hasta sus viviendas, en cambio, el asentamiento de aldeas se realizaba cerca de las fuentes de agua para su aprovechamiento directo. Ahora, el agua se entuba y envía hasta los hogares, mediante el pago del suministro. Al llegar a su destino, ésta se envía a diferentes sectores y en el caso del uso doméstico, éste incluye: agua para beber, agua usada para servicios públicos, establecimientos de servicios comerciales, como los hoteles, y viviendas (Newman, 2006). Según los hábitos y el estilo de vida de las personas, los porcentajes consumidos dentro de una vivienda pueden variar, pero de forma general, la Fundación Vida Sostenible (2016), ha dividido el uso del agua por cada sección del hogar: en el cuarto de baño, donde se utilizan las dos terceras partes del total, un 35% está destinado a la higiene personal, en la ducha y lavabos; y 30% se va junto con las excretas y la orina en los retretes. En cambio, en la cocina, un 20% se usa para la preparación de alimentos y el lavado de trastes; mientras que 10% es utilizado en las lavadoras. En menor medida, 5%, para la limpieza de la casa y 0.5% en agua para beber. El riego de jardines u otras actividades relacionadas implica cantidades variables.

El agua que es utilizada en las actividades domésticas, y en cualquier otro tipo de actividad humana, ve modificada sus características originales al llevar consigo una elevada concentración de materia orgánica, microorganismos, aceites, detergente, entre otros. Las actividades de la población en su vida cotidiana, sin considerar la industria o la agricultura, genera, según Houbron (2010), una contaminación fácilmente biodegradable para los cuerpos de agua naturales, compuesta esencialmente por carbono, nitrógeno y fósforo. Sin embargo, una sobre carga de estos y otros contaminantes en el agua, ocasionados por las descargas de zonas urbanas y rurales, ha provocado que los cuerpos de agua naturales no puedan

biodegradar enseguida el alto contenido de nutrientes y materia orgánica presente. Se establece entonces que, es necesario conocer las nuevas características de estas aguas, para determinar la mejor solución.

3.2 Las aguas residuales: definición y clasificación

Como se mencionó en el apartado anterior, las actividades antropogénicas, no solo las domésticas, utilizan el agua que al final es un medio de desecho de un sinnúmero de sustancias que pueden ocasionar daños al medio ambiente. Según las Norma Oficial Mexicana 001, de 1996 de SEMARNAT, las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas, son conocidas comúnmente como aguas residuales.

En las últimas décadas, la disposición de las aguas residuales ha ganado relevancia, no solo en el ámbito de la salud humana, también para la salud del medio ambiente. Provocando un impacto significativo en los ecosistemas acuáticos, al dañar el ciclo de vida de las plantas y animales que lo conforman. En las zonas densamente pobladas y poblaciones rurales los vertidos a los ríos, lagos, mares o cualquier otro cuerpo de agua natural, son fácilmente identificables, los cuales no solo contaminan las fuentes de abastecimiento y consumo humano, también dañan la estética del paisaje. Por ese motivo, se ha trabajado en la mejora de sistemas para el tratamiento y reutilización de las aguas residuales a escala mundial. Mejorar la calidad depende también de que se empleen tratamientos efectivos para las aguas residuales que se vierten a los cuerpos de agua, para eliminar o reducir las sustancias o agentes biológicos contaminantes (Morel & Diener, 2006).

Con base en información real, procesada mediante cálculos estadísticos, se han establecido promedios teóricos del consumo doméstico de agua según el tipo de clima, la distribución de consumo de agua dentro de la vivienda y el caudal de aguas residuales de origen doméstico por habitante. Debido a su importancia, a continuación, se presentan los datos anteriormente mencionados:

TABLA 3.1 CONSUMO DOMÉSTICO PER CÁPITA DE AGUA, SEGÚN EL TIPO DE CLIMA Y LA CLASE SOCIOECONÓMICA.

FUENTE: MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO (CNA, 2007)

Clima	Consumo por clase socioeconómica (L/habitante/día)		
	Residencial	Media	Popular
Cálido	400	230	185
Semi-cálido	300	205	130
Templado	250	195	100

El consumo de agua en una vivienda, se mide por volumen consumido por un habitante en un día, y está relacionado con el tipo de clima en la zona, este dato se obtiene de la temperatura promedio anual y, el tipo de vivienda que es habitada, contiene un apartado donde se describen las características de cada una para elegir la categoría correcta.

TABLA 3.2 EL VOLUMEN DE AGUAS RESIDUALES SE OBTIENE SEGÚN EL TIPO DE VIVIENDA QUE SE ESTÉ ANALIZANDO. FUENTE: TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN PEQUEÑAS POBLACIONES (CRITES & TCHOBANOGLOUS, 2000)

Fuente	Unidad	Caudal (L/unidad/día)	
		Intervalo	Valor habitual
Vivienda nueva	Persona	170 – 340	170
Vivienda vieja	Persona	110 – 190	150

En este caso, la tabla anterior identifica el tipo de casa con base en su tiempo de construcción, de esto depende el volumen de aguas residuales generadas por número de habitante.

TABLA 3.3 CONSUMO DE AGUA SEGÚN LA ACTIVIDAD DOMÉSTICA. FUENTE: NATURAL TECHNOLOGIES OF WASTEWATER TREATMENT (ROZKOSNÝ ET AL., 2014)

Uso	Intervalo por persona (L/día)
Para consumo humano y cocina	4 - 8
Higiene personal	8 - 12
Baño / Ducha	30 - 60
Lavado de ropa	14 - 20
Lavado de platos	8 - 20
Baños	30 - 45
Otros	6 - 12

El volumen de aguas residuales de una vivienda depende también del consumo de agua en las actividades domésticas, se mencionan las más comunes en la tabla. El consumo se mide por litros, en un día.

Por último, FEA, CEMDA & PCM (2006), definen en pocas palabras lo que son las aguas residuales, esto es, cuando un producto de desecho se incorpora al agua, el líquido resultante recibe el nombre de agua residual. Este tipo de aguas tienen distintos orígenes, desde las viviendas, como origen doméstico, el industrial, de las actividades agrícolas y del arrastre de contaminantes producto de las precipitaciones. En el apartado siguiente se clasifican las aguas residuales de acuerdo a su origen.

3.2.1 Clasificación de las aguas residuales según su origen

Las aguas residuales se clasifican dependiendo de su origen, es decir, en que actividad fue utilizada el agua, por ejemplo: en los hogares, la industria, en actividades del campo o, simplemente, son de origen pluvial. A continuación, se presenta la clasificación de la OEFA (2014), este organismo las ha clasificado en tres tipos: doméstico, industrial y municipal.

- Agua residual doméstica: Se originan en zonas residenciales y comerciales, su contenido es principalmente de desechos fisiológicos, microorganismos, así como restos de jabón, detergente y grasas, provenientes de las

actividades humanas. Y deben ser dispuestas adecuadamente, como es el tratamiento en plantas de aguas municipales. Las aguas residuales domésticas son resultado de las actividades cotidianas de las personas.

- Agua residual industrial: Son aquellas que resultan del desarrollo de la producción o del procesamiento en fábricas, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agropecuaria, energética, agroindustrial, entre otras. Éstas pueden contener una variedad de productos y subproductos de la minería, de origen químico o animal. También es posible encontrar restos de antibióticos, ácidos, grasas y detergentes.
- Agua residual municipal: En este caso, las aguas residuales domésticas pueden estar mezcladas con el agua de lluvia, que se drena del escurrimiento en las calles o de los techos durante la precipitación; o con las aguas residuales industriales previamente tratadas en sistemas de alcantarillado combinado.

Sin embargo, en la literatura también puede encontrarse clasificaciones más extensas, las cuales no solo toman en cuenta la procedencia de las aguas residuales, sino también la composición. Es por ello que, Muñoz (2008), ha clasificado las aguas residuales de la siguiente manera:

- Aguas blancas: Están constituidas fundamentalmente por el agua de lluvia que escurre de las calles o techos. Debido a que las aguas pluviales son recolectadas en los sistemas de drenaje, éstas se mezclan con distintos componentes provenientes de las viviendas, de las calles o de la atmósfera, entre los que podemos mencionar.
 - Los elementos derivados de la contaminación atmosférica, como puede ser la deposición de partículas o restos de la lluvia ácida.
 - Aquellos elementos producto de las actividades humanas, como son los plásticos, las latas, los papeles, excrementos de animales de compañía, etcétera.
 - Los residuos de los automóviles, aquí encontramos los aceites, combustibles, refrigerantes, restos de vidrio o de llantas.

- Además, se incluye materiales como la tierra o arena, los restos vegetales de las podas, las partículas no solubles de las fumigaciones en áreas verdes, entre otros.
- Aguas negras: Las aguas negras provienen de las descargas de baños en las viviendas, aunque también tienen su origen en centros comerciales, oficinas, comercios, restaurantes, etc. De los componentes que pueden encontrarse en este tipo de aguas residuales, se mencionan unos pocos: microorganismos, urea, albúmina, bases jabonosas, sulfatos, fosfatos, nitratos.
- Aguas residuales industriales: Como su nombre lo indica, este tipo de aguas residuales tienen su origen en actividades que utilicen el agua en procesos de producción, transformación o manipulación de materias primas para la obtención de un producto. La composición de las aguas residuales industriales varía enormemente, ya que ésta, depende del tipo de proceso en que se utilice el agua o del tipo de industria. Es por ello que, no existe un sistema único para clasificar las aguas residuales industriales, más que nada por los distintos productos que se vierten al agua (Muñoz, 2008). Aunque si es posible clasificar algunas de estas industrias según sea el componente principal vertido al agua (Muñoz, 2008), tal y como se muestra enseguida:
 - Industrias con efluentes principalmente orgánicos: industrias de alimentos, papeleras, mataderos.
 - Industrias con efluentes principalmente inorgánicos: refinерías, petroquímicas, textiles.
 - Industrias con efluentes mixtos, es decir, orgánicos e inorgánicos: industrias mineras y de explotación salina, productos de limpieza.
 - Industrias con efluentes de materias en suspensión: corte y pulido de distintos tipos de minerales, laminación en caliente.
 - Industrias con efluentes de refrigeración: centrales nucleoelectricas.

3.3 Problemática de las aguas residuales en México

En las zonas urbanas donde existe red de alcantarillado el agua se dirige a las plantas de tratamiento para aguas residuales, donde se realiza un proceso de

limpieza y desinfección. El problema es cuando no existe drenaje, el agua utilizada en las casas llega directamente a lagunas, ríos o arroyos. Lo anterior sucede principalmente en áreas rurales. Las aguas residuales representan un problema serio, ya que pueden llegar a los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos, por ello, deben tratarse antes de ser vertidas.

Datos de CONAGUA indican que al cierre del 2014 se registraron 2, 337 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación en el país, con una capacidad de 151 mil litros por segundo. El caudal tratado alcanzó una cifra de 111 mil litros por segundo, cubriendo nacionalmente un 52.7% de las aguas residuales municipales tratadas. En comparación al 2013, el aumento de cobertura fue de 2.5% a nivel nacional.

Las estadísticas oficiales que existen en México, donde el sistema de saneamiento sólo contempla la red de alcantarillado y, en general el agua residual se vierte tal cual, en los cuerpos de agua, además que un poco más de la tercera parte de la población rural cuenta con una red de recolección y desalojo del agua residual, pero no necesariamente con un sistema de tratamiento. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, en 2009 las descargas residuales municipales se calcularon en 7.49 km³ anuales, equivalentes a 237.5 m³/s, de las cuales sólo se trataban 2.78 km³ por año, es decir 88.1 m³/s (CONAGUA, 2011). Cabe mencionar que en los centros urbanos de México los métodos de tratamiento que predominan son los lodos activados y las lagunas de estabilización.

Se estima que cerca de 17.5 millones de habitantes de las zonas rurales mexicanas no cuentan con alcantarillado y aún menos con algún tipo de tratamiento para el agua residual generada. Se ha esgrimido que un factor que propicia esta situación es la alta dispersión geográfica de las poblaciones rurales. Además, a la falta de sistemas de evacuación de excretas generalmente se suma la de suministros adecuados de agua, así como a un bajo nivel económico de la población rural (Collí, 2000).

3.4 Problemática de las aguas residuales en el Estado de Veracruz

Veracruz es un estado constituido por una enorme cantidad de arroyos, manantiales y ríos, cerca de 40, atraviesan la entidad y representan el 35% de las aguas superficiales del país (Escalón, 2006). La disponibilidad de agua es alta en el estado debido al promedio anual de precipitación que dobla al nacional, sin embargo, es de los estados que más aguas residuales arroja sus afluentes naturales. No es de sorprenderse, ya que Veracruz ocupa el tercer lugar a nivel nacional como una de las entidades con mayor número de habitantes, con un total de 8 millones de personas, según la Encuesta Intercensal del INEGI (2015). Una población grande significa una alta demanda de servicios, como abastecimiento de agua y sistemas de drenaje, lo que se traduce en la descarga de un elevado volumen de aguas residuales, de la cual sólo el 5% es procesada (Escalón, 2006). De hecho, el INEGI, da cuenta de un total de 2, 355 sitios de descarga de aguas negras, siendo, la Ciudad de México, Puebla y Veracruz las tres entidades que suman el 30% de estos sitios.

La mayor parte del estado de Veracruz pertenece a la región hidrológico administrativa X del Golfo Centro, y una menor parte al Golfo Norte, región IX (Houbron, 2010). El servicio de alcantarillado facilita el transporte de las aguas residuales hasta el lugar donde recibe el tratamiento para su posterior descarga. En la región X, Golfo Centro, una población de 2, 239, 026 carece del servicio formal de alcantarillado (Domínguez, 2008), lo que ocasiona problemas hídricos en las áreas donde no existe. A pesar que el número de plantas depuradoras, municipales e industriales, ha incrementado debido al aumento del volumen de agua residual generada, la baja cobertura del drenaje municipal y la baja tasa de crecimiento del caudal tratado ha provocado que en 30 años la carga de contaminantes proveniente de descargas puntuales y vertidas al ambiente haya aumentado un 42% (Jiménez, 2008). En cuanto al alcantarillado, la cobertura de Veracruz es de 78.1%, ocupando el lugar 26 a escala nacional. Los objetivos planteados a nivel regional se cumplieron de manera parcial, pues aún subsisten grandes déficit y poblaciones sin ningún tipo de acceso, la población beneficiada con el servicio de alcantarillado es

del orden de 1, 511, 991 habitantes (Domínguez, 2008). A diciembre de 2014, la Comisión Nacional de Agua indica que en Veracruz existen 101 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que están en operación.

3.5 Importancia del tratamiento de las aguas residuales

Se conoce como tratamiento de aguas residuales a los distintos procesos relacionados con la extracción y control sanitario de los productos de desecho arrastrados por el agua y procedentes de viviendas e industrias (OEFA, 2014). Estos procesos se llevan a cabo mediante técnicas físicas, químicas o biológicas dependiendo de la composición de las aguas residuales. Normalmente se inicia con un tratamiento preliminar, es decir, donde los sólidos más grandes como pedazos de madera, plásticos, llantas, envolturas, entre otros son separados del agua y dispuestos de forma correcta. A continuación, el tratamiento primario, que consiste en la remoción de los sólidos restantes, por ejemplo, comúnmente se usan decantadores, los cuales funcionan dependiendo del peso de las partículas, si estas son más pesadas que el agua, terminarán en el fondo del tanque.

Más del 80% de aguas residuales en países en desarrollo son descargadas directamente sin un tratamiento previo en cuerpos de agua. La industria es responsable de verter un estimado de 300 a 400 millones de toneladas de metales pesados, solventes, residuos tóxicos y otros desechos cada año. Los nitratos para agricultura son el contaminante químico más común en los acuíferos del mundo (ONU, 2011). Y no solo la industria, también el agua de desecho proveniente de áreas urbanas y rurales contribuyen a la contaminación de ríos, mares o lagos.

Se estima que cerca de un 40% de la población en el mundo, no tiene acceso a servicios de saneamiento adecuados, sufriendo el mayor impacto, los países en vías de desarrollo (Olguín *et al.*, 2010). Por lo anterior, en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, se estableció que el saneamiento está íntimamente relacionado con la buena salud y se mencionó la necesidad de elaborar planes de acción concretos para proteger la salud humana y el medio ambiente. Algunas de esas medidas son: diseñar y establecer sistemas eficaces de saneamiento para los

hogares y promover tecnologías y prácticas de bajo costo, y aceptables desde un punto de vista social y cultural.

La contaminación emitida por dichas fuentes se manifiesta a través del incremento de la acidez y altas concentraciones de nutrientes, sedimentos, sales, trazas de metales, químicos y otras toxinas, así como organismos patógenos que se desarrollan fácilmente en aguas más calientes (UN-Water, 2011). En América Latina y el Caribe, se enfrenta un rezago histórico en materia de servicios, en particular los relacionados con el saneamiento básico y la salud (Noyola, 2004).

3.5.1 Medio ambiente, sociedad y salud humana

El tratamiento de aguas residuales domésticas en asentamientos humanos dispersos es un problema que compete al desarrollo local sostenible, para el saneamiento de estas aguas han surgido una serie de tecnologías, una de ellas son las denominadas alternativas, cuyas características son adecuadas para esos casos (Díaz *et al.*, 2012). Las diferentes características sociales, topográficas, tecnológicas, demográficas, económicas y climatológicas, entre otras, que presentan las pequeñas y medianas poblaciones representan un reto a la hora de seleccionar tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas, creando la necesidad de desarrollar herramientas que faciliten la toma de decisiones para la implementación de estos sistemas (Bernal *et al.*, 2004).

El tratamiento de las aguas residuales es una necesidad que tiene la sociedad para proteger su medio ambiente y garantizar el bienestar humano, pues éstas configuran un peligro potencial para la salud pública, ya que a través de las mismas se pueden transmitir innumerables enfermedades; lo cual genera grandes impactos a la población y la economía de los países (Villegas & Vidal, 2009).

El uso de agua de baja calidad podría tener impactos directos e importantes en su uso productivo, tales serían la irrigación, con grandes efectos sobre la degradación de la tierra, producción de cultivos y, en consecuencia, los ingresos en zonas rurales y la seguridad alimentaria (ONU, 2011). En el medio ambiente, los efectos de las aguas residuales sin tratamiento vertidas a efluentes naturales, ocasiona la disminución peces y de cualquier organismo que no pueda adaptarse a las nuevas

condiciones impuestas, la presencia de sustancias o residuos que son tóxicos para las plantas, y el desequilibrio general del sistema natural.

La intrínseca relación del medio ambiente, con la sociedad y la salud humana es importante para el desarrollo, es decir, si una persona crece en un lugar cercano a un lago contaminado, su salud se ve mermada si la población utiliza esa agua para las actividades diarias y el consumo, de igual manera es difícil desarrollarse en condiciones donde no existe un suministro formal de agua potable y saneamiento.

Como se mencionó: “Las personas más afectadas son aquellas que viven cerca de cuerpos contaminados y quienes no tienen un acceso alternativo a agua o un correcto saneamiento” (ONU, 2011). Quien resulta más afectado es la población infantil, debido a enfermedades de transmisión hídrica como la hepatitis viral, tifoidea, disentería, cólera y otras atribuidas como causantes de diarrea. Según la CONAGUA (2011), “existe una correlación entre el incremento de las coberturas de agua potable y alcantarillado y la disminución de la tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas”

La Organización de las Naciones Unidas (2011) recalca que, cada año mueren 1.8 millones de personas por enfermedades diarreicas atribuidas a agua de poca calidad o mal saneamiento e higiene. Más de 1.5 millones son niños menores de 5 años, quienes tienen un mayor riesgo de contraer diarrea que malaria, virus de inmunodeficiencia humana (VIH) o sufrir cualquier tipo de herida fatal.

La necesidad de tratar las aguas residuales, resulta un factor de gran importancia para evitar la contaminación de los cuerpos de agua naturales, no sólo por sus implicaciones ecológicas, económicas y de salud de la contaminación, sino por las limitaciones que ésta impone al suministro de agua limpia a las urbanidad y zonas rurales para el propio consumo humano (Escalón, 2006).

3.6 Tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales

Las actividades humanas son generadoras de todo tipo de desechos, cuando utilizamos el agua para la producción en la industria, en los centros de trabajo, en

centros educativos, dentro de las casas, etcétera; las características que presentan al salir, como la presencia de heces fecales, aceites, productos de limpieza o restos de comida, las vuelven un producto de desecho, el cual es dirigido hacia un drenaje, ya sea la red de alcantarillado o en fosas sépticas, para poblaciones que no están conectadas a esta red. Estas aguas de desecho, también conocidas como aguas residuales, pueden ocasionar daños si no son depuradas antes de su vertimiento, suponiendo daños irreversibles al medio ambiente, como los ecosistemas acuáticos; además de riesgos a la salud pública (Secretariado Alianza por el Agua, 2008).

Por lo anterior, desde la puesta en marcha de la primera planta de tratamiento de aguas residuales en 1806 en París (Muñoz, 2008), el desarrollo y mejoramiento de nuevos métodos para tratar las aguas residuales de distintos tipos (domésticas, industriales, municipales) ha permitido obtener agua de mejor calidad. Es entonces que, el tratamiento de aguas se define como, un conjunto de procesos, ya sean físicos, químicos o biológicos, cuya finalidad es reducir la concentración de los contaminantes y eliminar las características no deseables del agua, minimizando así, los riesgos hacia el medio ambiente y la salud humana (Muñoz, 2008; Secretariado Alianza por el Agua, 2008; Pérez & Camacho, 2011).

En la actualidad, las zonas urbanas y algunas zonas rurales cuentan con un sistema de recolección de aguas residuales que eventualmente es dirigido hacia una planta de tratamiento municipal, en donde se realizan diferentes procesos para remover los contaminantes (Pérez & Camacho, 2011), como son los pre-tratamientos, tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Por lo general, en las poblaciones rurales, donde la escasez de recursos técnicos y económicos hace necesario abordar la depuración de las aguas residuales con premisas diferentes a las que se adoptan en las grandes urbes, se buscan soluciones de depuración que presenten el mínimo coste energético, un mantenimiento simple y una gran robustez de funcionamiento (Secretariado Alianza por el Agua, 2008). Es por ello que, se han imitado los procesos naturales de depuración de los distintos componentes del medio ambiente para el diseño de este tipo de tratamiento, por ejemplo, las

características de filtración del suelo, o la remoción de sustancias por medio de la vegetación, entre otros.

La denominación de métodos de depuración natural engloba aquellos procedimientos en los que, el tratamiento principal, es proporcionado por componentes del medio natural (Instituto Geológico y Minero de España, 1995). A decir de lo anterior, este tipo de tratamientos alcanzan su propósito principal, que es remover la mayor parte de sustancias contaminantes de las aguas residuales, mediante la interacción de distintos componentes de la naturaleza, como son el suelo, las plantas y los microorganismos. Aunque muchos autores han formulado su propia definición de lo que son los tratamientos por métodos naturales, todos coinciden en los beneficios de su aplicación, especialmente en áreas rurales. Entre las ventajas podemos mencionar: su versatilidad y adaptabilidad, su fácil integración al entorno natural, y su bajo costo de implementación y operación, los hacen indicados para la depuración de los vertidos de aguas residuales.

Los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales son muy diversos, por lo cual han sido clasificados dependiendo en su modo de acción por Crites *et al.* (2006):

- Unidades de tratamiento acuático. En los tratamientos acuáticos, los procesos biológicos son los predominantes, dentro de estos actúan las algas y los microorganismos, las plantas y algunos animales. Estas unidades de tratamiento se subdividen en dos clases: sistemas de laguna y de estanque.
- Unidades de tratamiento por humedal. Los humedales están definidos como sistemas naturales, en donde el suelo puede quedar cubierto por una capa de agua o que ésta fluya debajo del humedal. Lo anterior provoca condiciones de saturación del suelo y el crecimiento de especies vegetales adaptadas a este tipo de ambiente. El tratamiento por humedales también se subdivide en: humedales de flujo superficial o humedales de flujo sub-superficial.

- Métodos de tratamiento terrestre. Los métodos de tratamiento terrestre dependen de las reacciones que ocurren en la matriz del suelo, que son de tipo físico, químico y biológico

Otros autores, como el Instituto Geológico y Minero de España (1995), habitualmente solo los diferencian en dos grandes grupos: los métodos de tratamiento mediante aplicación en el terreno y los sistemas acuáticos, en estos últimos, se incluye tanto sistemas de laguna, como los humedales artificiales.

Capítulo 4. Metodología

En este apartado, se describe el procedimiento desarrollado en el estudio, esto, con el fin de elaborar la propuesta para el tratamiento por métodos naturales de las aguas residuales de tipo doméstico adecuados. A continuación, se presenta el esquema en donde se incluyen las distintas fases del procedimiento metodológico (ver **figura 4.1**).

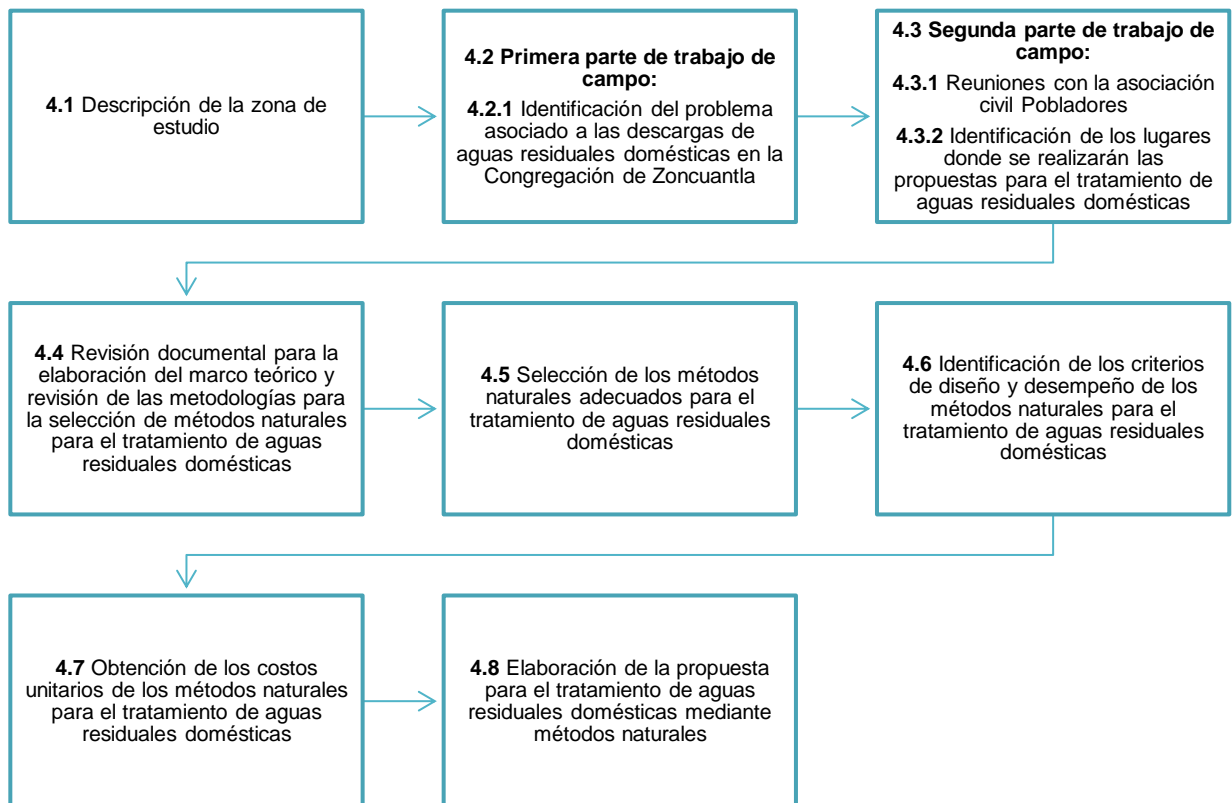


FIGURA 4.1 PROCEDIMIENTO DESARROLLADO PARA LA ELABORACIÓN DE LA PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS POR MÉTODOS NATURALES

4.1 Descripción de la zona de estudio

La propuesta que se presenta en este trabajo recepcional despliega una serie de alternativas para el tratamiento de aguas residuales domésticas para zonas rurales del ecosistema de bosque mesófilo de montaña, que es donde se encuentra asentada la Congregación de Zoncuantla, dentro de la microcuenca del río Pixquiac. Por ello, a continuación, se describe la zona de estudio que abarca la microcuenca del río Pixquiac y la Congregación de Zoncuantla en Coatepec, Veracruz.

La microcuenca del río Pixquiac forma parte de la Cuenca del río La Antigua, ubicada en la zona centro del estado de Veracruz. La zona tiene un área estimada de 107 kilómetros cuadrados, y abarca parcialmente los territorios municipales de Perote, Las Vigas de Ramírez, Acajete, Tlalnelhuayocan y Coatepec (Menchaca *et al.*, 2015). Para facilitar el estudio de la microcuenca, ésta se ha dividido en tres zonas: la cuenca alta, la cuenca media y la cuenca baja. El clima que impera en la zona baja es semicálido, mientras que en la zona media es templado y en la parte alta es templado frío (Brindis, 2015). En cambio, el ecosistema predominante es el bosque mesófilo de montaña, por lo que la vegetación y la fauna es muy variada. El tipo de suelo una amplia superficie es el andosol úmbrico, al que posteriormente le sigue el acrisol úmbrico y el leptosol ándico. El principal afluente de la microcuenca, el río Pixquiac, nace en la vertiente nororiental del Cofre de Perote a 3,760 metros sobre el nivel del mar y, a 1,300 msnm éste se une con el río Sordo (Menchaca, 2016). Entre los ríos que conforman la corriente principal del Pixquiac se encuentran: Huichila, Agüita Fría, Xocoyolapan y Atopa. Vidriales *et al.* (2012), indica que las principales zonas urbanas relacionadas a la microcuenca se localizan al oeste con la ciudad de Xalapa y al noroeste con Coatepec.

En la microcuenca del río Pixquiac se ubica la Congregación de Zoncuantla, que pertenece al municipio de Coatepec. La Congregación cubre un área que se considera dentro de una zona con categoría de Reserva Ecológica (Menchaca & Brindis, 2016). El trayecto del río Pixquiac en la parte baja de la microcuenca, atraviesa una extensa parte de la Congregación de Zoncuantla; según el último censo de INEGI (2010), la Congregación está habitada por una población de aproximadamente 1,584 personas, dispersas en cinco localidades: Mariano

Escobedo, El Atorón, 6 de Enero, La Pitahaya y Plan de la Cruz, las que se encuentran entre el kilómetro 4 y 7 de la carretera antigua a Coatepec (Menchaca & Brindis, 2016) (Ver **tabla 4.1**).

TABLA 4.1 POBLACIÓN DE LAS LOCALIDADES DE LA CONGREGACIÓN DE ZONCUANTLA, COATEPEC. FUENTE: CENSO 2010 DE INEGI

Localidad	Número de habitantes
La Pitahaya	389
Colonia Plan de la Cruz	253
Mariano Escobedo	561
Colonia Seis de Enero	333
El Atorón	48

La infraestructura en la Congregación de Zoncuantla está compuesta por caminos empedrados y de terracería, así como algunas calles pavimentadas; además, la población cuenta con los servicios públicos de luz, teléfono y agua (Menchaca & Brindis, 2016). El agua en la Congregación de Zoncuantla, es abastecida por el manantial “Ojo de Agua”, el cual se encuentra a aproximadamente cuatro kilómetros al noroeste (Brindis, 2016). Sin embargo, para la recolección de las aguas residuales la mayoría de las viviendas habitadas cuentan con fosas sépticas, mientras las restantes no cuentan con sistema de drenaje (ver **tabla 4.2**).

TABLA 4.2 PORCENTAJE DE VIVIENDAS, POR LOCALIDAD, QUE NO CUENTAN CON DRENAJE. FUENTE: CENSO 2010 DE INEGI

Localidad	% de viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje
La Pitahaya	3.15
Colonia Plan de la Cruz	6.06
Mariano Escobedo	2.52
Colonia Seis de Enero	3.74
El Atorón	25

Los habitantes de esta Congregación se integran por familias de distinto nivel socioeconómico. La profesión u oficio que desempeñan para obtener ingresos; el grado de escolaridad que tienen, desde la primaria hasta un nivel de posgrado; el ingreso que perciben cada mes, entre otros factores. De entre las personas que desempeñan una ocupación, se puede encontrar aquellas dedicadas a oficios como servicio doméstico, carpinteros o a la construcción. También habitan en Zoncuantla funcionarios públicos, artistas, académicos y profesionistas de otras áreas (Menchaca & Brindis, 2016).

Según datos del Servicio Meteorológico Nacional, la estación meteorológica de Briones en Coatepec, que es la más cercana a la Congregación de Zoncuantla, indica que la temperatura media anual en el periodo de 1981 hasta el año 2010, ha sido de 17.7 grados Celsius. Mientras que la precipitación anual, en el mismo periodo, alcanza los 1, 706.3 milímetros en la zona.

4.2 Primera parte del trabajo de campo:

4.2.1 Identificación del problema asociado a las descargas de aguas residuales de tipo doméstico en la Congregación de Zoncuantla

La primera parte del trabajo de campo se llevó a cabo para cumplir con el segundo objetivo específico, “seleccionar distintos métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas”. Con el fin de hacer un reconocimiento previo de la zona de estudio, se realizó el primer recorrido en la Congregación de Zoncuantla. Se reconocieron los asentamientos cercanos al río Pixquiac, el cual, como ya se mencionó, en su trayecto atraviesa las colonias que conforman Zoncuantla: Mariano Escobedo, El Atorón, 6 de Enero, La Pitahaya y Plan de la Cruz. También durante este primer recorrido, se identificaron visualmente las descargas directas de aguas residuales a las calles y al río Pixquiac.

Durante el segundo recorrido, se visitó a familias de distintas localidades de Zoncuantla. Se platicó con las personas presentes sobre sus hábitos cotidianos de consumo de agua y el manejo de las aguas residuales domésticas generadas. Posteriormente, con el acompañamiento de la Asociación Civil Pobladores, se asistió, a la colonia Mariano Escobedo para localizar cuáles son las viviendas que

descargan sus aguas grises hacia la calle, y que presentan problemas con sus fosas sépticas. Según lo realizado en el primer recorrido, también se habló con las personas acerca de las actividades diarias que generan aguas residuales domésticas y si han tomado medidas para evitar que éstas lleguen a las calles o al río Pixquiac.

Durante el último recorrido en la Congregación de Zoncuantla, se examinaron los sitios propuestos por Pobladores A.C., para realizar la propuesta de tratamientos colectivos de aguas grises por métodos naturales en la colonia Mariano Escobedo. De acuerdo a los recorridos realizados en la Congregación de Zoncuantla, así como a la participación de Pobladores A.C. y de los habitantes, se identificó la problemática asociada a las descargas de aguas residuales domésticas en este trabajo de campo.

4.3 Segunda parte del trabajo de campo:

4.3.1 Reuniones con la Asociación Civil Pobladores

Las reuniones con la Asociación Civil Pobladores tuvieron como fin alcanzar los objetivos específicos uno y tres, la selección de los tratamientos de aguas residuales por métodos naturales y la identificación de los sitios para la propuesta. Como parte del trabajo recepcional, se llevaron a cabo dos reuniones. En la primera, se desarrolló un plan de trabajo enfocado al desarrollo de la propuesta para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en la Congregación de Zoncuantla.

Posteriormente, y con el fin de conocer los antecedentes de la comunidad, la segunda reunión se llevó a cabo con algunos de los vecinos, en donde se expuso el objetivo inmediato de elaborar una propuesta que sea de utilidad para los habitantes de la Congregación de Zoncuantla sobre el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales, así como el plan de trabajo para realizar dicha propuesta.

4.3.2 Identificación de los lugares donde se realizarán las propuestas para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Se realizó la identificación de los lugares donde se realizarán las propuestas tal y como se indica en el tercer objetivo específico. Por ello, a partir de las reuniones

organizadas con la Asociación Pobladores y con los vecinos de Zoncuantla, y los recorridos realizados, se prosiguió a localizar los lugares donde se ubicará la propuesta de los tratamientos para aguas grises de la colonia Mariano Escobedo; y las viviendas que servirán de base para la propuesta a nivel individual. La red instalada en la colonia Mariano Escobedo para la conducción del agua, la separación de las aguas grises y negras en las casas, y la superficie disponible, determinaron los sitios.

Después de seleccionar las dos zonas para la propuesta de Mariano Escobedo y con base en los antecedentes y experiencias de Pobladores A.C., se prosiguió a medir la superficie de estos lugares. La medición se llevó a cabo con un flexómetro de 20 metros y una libreta para las anotaciones. De igual forma, se midió la distancia desde cada una de las casas que se conectarán al tratamiento y el recorrido total que debe realizar el agua hasta cada una de las zonas seleccionadas. En el caso de las viviendas, se seleccionaron dos y se tomó las medidas para obtener la disponibilidad de espacio.

Durante esta etapa se tomaron fotografías como evidencia de la presencia de agua estancada en las calles, por la descarga de las viviendas circundantes; las condiciones actuales de los dos sitios seleccionados en la colonia Mariano Escobedo y de las dos viviendas; y la localización de las tuberías que vierten directamente las aguas residuales al río Pixquiac.

4.4 Revisión documental para la elaboración del marco teórico y revisión de las metodologías para la selección de métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Con base en el problema de las descargas de aguas residuales de tipo doméstico en la microcuenca del río Pixquiac, se realizó la revisión documental para elaborar el marco teórico del trabajo recepcional. Este apartado forma parte de la selección de métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas, tal y como marca el primer objetivo específico. Para realizar el marco teórico, se elaboró la estructura de los temas, desde un conocimiento general hasta los temás

específicos. Además, se investigó sobre los tratamientos naturales para aguas residuales domésticas.

La revisión documental incluyó la búsqueda de distintos tipos de tratamientos naturales para aguas residuales domésticas, el modo de funcionamiento, se revisaron las experiencias recopiladas de su aplicación y el desarrollo que han tenido los sistemas por métodos naturales durante los últimos años. La información recabada proporcionó una visión general de los tratamientos por métodos naturales.

El análisis de las metodologías consultadas para la selección de tratamientos para las aguas residuales domésticas, cumplió una serie de criterios, entre ellos: el uso de tratamientos por métodos naturales de bajo costo; la adaptación de éstos a poblaciones rurales y a viviendas individuales; el uso de plantas ornamentales o comestibles, materiales reciclables, de fácil adquisición y disponibles en la localidades; de fácil operación y mantenimiento; y que los tratamientos por métodos naturales tengan un impacto mínimo sobre el medio ambiente.

Las consultas se realizaron mediante distintos ámbitos de información, como, por ejemplo: ResearchGate, Scielo, Dialnet, entre otros, para obtener información confiable sobre los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales. Además, las metodologías encontradas fueron ordenadas de acuerdo al lugar donde se realizaron, es decir, a nivel internacional, nacional, estatal o local.

4.5 Selección de los métodos naturales adecuados para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Esta etapa del proceso metodológico, se concluye con el trabajo referido para el primer objetivo específico. De acuerdo a la identificación de las problemáticas relacionadas con la descarga de las aguas residuales domésticas, los antecedentes de su manejo y las experiencias adquiridas por la población, a través de la construcción e instalación de sistemas de tratamiento naturales; así como las condiciones socioeconómicas de la población en la Congregación de Zoncuantla y la información proporcionada por el Observatorio del Agua Bosques, Cuencas y Costas (OABCC), se realizó la selección de los métodos naturales para el tratamiento de las aguas residuales domésticas a nivel colectivo para la colonia

Mariano Escobedo y para las viviendas individuales de la Congregación de Zoncuantla.

Mediante la revisión documental efectuada en un inicio, se tenía un conocimiento general del desarrollo, la forma de implementación y los avances de innovación de los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales; tomando también en cuenta los criterios mencionados, se seleccionaron los tratamientos adecuados que se incluirán en la propuesta del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante métodos naturales. Los tratamientos seleccionados se presentan a continuación:

- Entramado de raíces
- Humedal de flujo vertical
- Torre para aguas grises
- Filtro anaerobio
- Tanque séptico

De esta forma, el siguiente paso consiste en la identificación de los criterios que deben cumplirse para su diseño y el desempeño teórico, es decir, la cantidad de contaminantes que pueden remover de las aguas residuales de tipo doméstico.

4.6 Identificación de los criterios de diseño y desempeño de los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Después de seleccionar los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas, adecuados a las condiciones de la Congregación de Zoncuantla, se realizó la búsqueda de los criterios de diseño y de desempeño para cada uno de los tratamientos seleccionados, tal y como se establece para el cumplimiento del tercer objetivo específico. Entre los requerimientos a investigar, se tienen los siguientes: la descripción general del método; cuáles son los beneficios, se incluye la capacidad de remoción de contaminantes; el modo de funcionamiento, es decir, que procesos físicos, químicos o biológicos están involucrados en el tratamiento de las aguas grises; la implementación del método, cuáles son los

requerimientos de éste y el modo de construcción y, qué pre-tratamiento o tratamiento primario está recomendado para este método; los materiales que pueden utilizarse para la construcción, así como el costo unitario del tratamiento para aguas grises

4.7 Obtención de los costos unitarios de los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Como parte del tercer objetivo específico, se obtuvieron los costos unitarios aproximados para cada uno de los tratamientos por métodos naturales para aguas residuales de tipo doméstico. La obtención de costos se realizó conforme a los posibles materiales que se pueden utilizar para la construcción, la mano de obra que requerida, así como los procedimientos de construcción requeridos por dichos tratamientos.

4.8 Elaboración de la propuesta para el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante métodos naturales

El cumplimiento del último objetivo específico planteado para este trabajo recepcional, que es la elaboración de una propuesta donde se incluyen los tratamientos por métodos naturales para aguas residuales de tipo doméstico seleccionados en el apartado anterior. Lo anterior mediante los datos recabados durante la investigación documental de los tratamientos por métodos naturales para aguas residuales domésticas, en conjunto con el trabajo de campo. La elaboración de la propuesta estará dirigida hacia dos tipos de casos:

- 1) En trabajo conjunto con Pobladores A.C., para los tratamientos colectivos de aguas grises en la colonia Mariano Escobedo, para la calle Gardenias y privada de las Flores, así como la calle 10 de Noviembre.
- 2) Tratamientos individuales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en áreas rurales de ecosistemas de bosque mesófilo de montaña

A continuación, se presentan los apartados que contiene la propuesta:

1. Introducción

2. Los tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales: definición y análisis
3. Beneficios de los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales
4. Tratamiento de aguas residuales domésticas para zonas rurales
 - 4.1. Tratamientos colectivos de aguas grises para la Colonia Mariano Escobedo, en la Congregación de Zoncuantla, Coatepec, Ver.
 - a. Entramado de raíces
 - b. Humedal de flujo vertical
 - 4.2. Tratamientos individuales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en áreas rurales de ecosistemas de bosque mesófilo de montaña
 - a. Filtro anaerobio
 - b. Torre para aguas grises
 - c. Tanque séptico

En la siguiente lista, se describe brevemente lo que contiene cada uno de los apartados de los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico.

- **Descripción del método** – Características principales del método, ¿es utilizado para el tratamiento de aguas grises o aguas negras?
- **Beneficios del método** – Grado de desempeño, se refiere a la capacidad de remoción de contaminantes.
- **Modo de funcionamiento** – Descripción de los procesos físicos, químicos o biológicos mediante los cuales se tratan las aguas residuales domésticas.
- **Implementación** – Requerimientos, es decir, que características debe tener el lugar para que el método tenga un correcto funcionamiento; qué pre-tratamiento o tratamiento primario está recomendado para este método; y el modo de construcción.
- **Materiales para la construcción** – Qué materiales pueden utilizarse para la construcción, y costo unitario aproximado del método.

Capítulo 5. Resultados

Dentro del apartado de resultados, se muestran los datos obtenidos a partir de las actividades realizadas en la Congregación de Zoncuantla, como parte del trabajo de campo para alcanzar los objetivos de este trabajo recepcional.

5.1 Identificación del problema asociado a las descargas de aguas residuales de tipo doméstico en la Congregación de Zoncuantla

Con el fin de hacer un reconocimiento previo de la zona de estudio, se realizó el primer recorrido en la Congregación de Zoncuantla. Se reconocieron los asentamientos cercanos al río Pixquiac, el cual, como ya se mencionó, en su trayecto atraviesa las colonias que conforman Zoncuantla: Mariano Escobedo, El Atorón, 6 de Enero, La Pitahaya y Plan de la Cruz. Durante este primer recorrido, se identificaron visualmente las descargas directas de aguas residuales a las calles y al río Pixquiac, así como las actividades en las que los habitantes desechaban las aguas residuales a la calle y provocaban encharcamientos; las características de la colonia Mariano Escobedo y los distintos niveles socioeconómicos de los habitantes; así como la existencia de escuelas, tiendas, universidades, campos deportivos u otro tipo de establecimientos que pudieran descargar sus aguas residuales directo al río Pixquiac.

Durante el segundo recorrido, se platicó con cinco familias de la Congregación de Zoncuantla, quienes habitan a escasos metros del río Pixquiac, además, se habló con el dueño de una tienda en la colonia Mariano Escobedo. A continuación, se muestran la información obtenida (ver **tabla 5.1**).

TABLA 5.1 TIPO DE SERVICIO PARA LA RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS POR MÉTODOS NATURALES EN LAS VIVIENDAS DE LA CONGREGACIÓN DE ZONCUANTLA

Familia	Colonia	Tipo de servicio para la recolección de las ARD	Tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales
1	Mariano Escobedo	Fosa séptica para el baño	El agua de la cocina y de lavado de ropa es dirigida hacia un lecho a orillas del río Pixquiatic
2	La Pitahaya	Fosa séptica	No cuenta con otro tipo de tratamiento
3	Mariano Escobedo	Fosa séptica	No cuenta con otro tipo de tratamiento
4	La Pitahaya	Fosa séptica	Las aguas grises son tratadas en un entramado de raíces
5	Mariano Escobedo	Drenaje conectado a un sistema colectivo	Biodigestor, entramado de raíces y laguna de estabilización
Tienda	Mariano Escobedo	Drenaje conectado a un tratamiento por método natural	Biodigestor y entramado de raíces

Conforme a la información que se obtuvo de las familias y los recorridos realizados en la Congregación de Zoncuantla, se detectaron los problemas asociados a las descargas directas de aguas residuales de tipo doméstico:

- La ausencia de un sistema de drenaje, conduce las aguas residuales domésticas directo a las calles y su posterior escurrimiento al río Pixquiatic y a las áreas verdes de la zona. No existe una planta de tratamiento de aguas residuales cercana que cubra las necesidades de saneamiento de las colonias que conforman a la Congregación de Zoncuantla (ver **figura 5.1**).



FIGURA 5.1 ESCURRIMIENTO DE AGUAS GRISES EN UNA DE LAS CALLES DE LA CONGREGACIÓN DE ZONCUANTLA

- Las viviendas hacen uso de fosas sépticas para el tratamiento de sus aguas residuales, sin embargo, éstas no tienen la capacidad adecuada de almacenamiento o no se les da el mantenimiento necesario por parte de los usuarios.
- En la colonia Mariano Escobedo, se tiene dos descargas directas de aguas grises con salida directa al río Pixquiac; la primera se ubica en la calle Gardenias, mientras que la segunda pertenece a la calle 10 de noviembre, la cual tiene salida a una canaleta que lleva también al río Pixquiac y a un área verde (ver **figura 5.2**).



FIGURA 5.2 TUBO DE SALIDA DE AGUAS GRISES DE LA CALLE GARDENIAS

- En la colonia Mariano Escobedo, se cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas que cubre un total de 15 viviendas, ubicado en la calle Bugambilias. Este sistema consiste en un biodigestor, un entramado de raíces y una laguna de estabilización. Dicho sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas fue instalado en 2009, mediante una gestión con CMAS de Coatepec por parte de la Asociación Civil Pobladores.



FIGURA 5.3 BIODIGESTOR DE LA CALLE BUGAMBILIAS EN LA COLONIA MARIANO ESCOBEDO

- En la calle Gardenias y privada de las Flores, de la colonia Mariano Escobedo, existe un total de 9 casas con ll de salida de aguas grises; mientras que, en la calle 10 de Noviembre hay un total de 4 viviendas con tuberías de salida del mismo tipo (ver **figura 5.4**).



FIGURA 5.4 TUBERÍA DE SALIDA DE AGUAS GRISES DE UNA VIVIENDA EN LA COLONIA MARIANO ESCOBEDO

- En la Congregación de Zoncuantla existen antecedentes de tratamientos para las aguas grises por métodos naturales *in situ*.
 - La vivienda ubicada en la Pitahaya, cuenta con un sistema de tratamiento de aguas grises, el cual consiste en una trampa de grasas, un entramado de raíces de tres metros cuadrados y un estanque. El sistema está construido para tratar las aguas grises de hasta cuatro habitantes. Para el entramado y el estanque, se utilizaron plantas nativas.
 - En la colonia Mariano Escobedo, dos familias cuentan con entramado de raíces para tratar las aguas grises. Para ambos casos, el entramado de raíces se construyó para tratar el efluente de hasta cinco personas, y al igual que el caso anterior, se utilizaron plantas de la región.
 - En uno de los comercios ubicados en la colonia Mariano Escobedo, el cual, cuenta también con una sala de reuniones para los habitantes de la colonia, en la planta alta, utiliza un biodigestor y un entramado de raíces para el tratamiento de las aguas residuales. Actualmente, este entramado de raíces tiene problemas de taponamiento.
- Hay un interés por parte de la comunidad para mejorar la calidad de sus recursos hídricos y del medio ambiente.

5.2 Caracterización de los sitios seleccionados para la propuesta de tratamiento por métodos naturales para aguas residuales de tipo doméstico en la colonia Mariano Escobedo

Durante el trabajo de campo realizado en la colonia Mariano Escobedo, en donde se realizaron cuatro recorridos, se obtuvieron datos referentes al tipo de aguas residuales domésticas a tratar, el número de habitantes por vivienda y cuantas viviendas cuentan con separación de aguas grises; los espacios disponibles para la implementación de los tratamientos por métodos naturales y la topografía de los

sitios seleccionados. Es importante proveer los datos recolectados durante el trabajo de campo, no solo al Observatorio del Agua o a la Asociación Civil Pobladores, también a la comunidad de la Congregación de Zoncuantla.

- **Sitios seleccionados para la propuesta de tratamiento por métodos naturales de aguas grises**

La colonia Mariano Escobedo cuenta con tres espacios disponibles para la implementación de tratamientos de aguas residuales domésticas (Pobladores A.C., 2010). Para esta propuesta se han tomado en cuenta dos de los sitios: la zona del parque para la calle Gardenias y la zona de la iglesia para la calle 10 de noviembre (ver **tabla 5.2**).

TABLA 5.2 UBICACIÓN Y SUPERFICIE DE LOS SITIOS SELECCIONADOS PARA LA PROPUESTA DE TRATAMIENTOS POR MÉTODOS NATURALES DE AGUAS GRISES DE LA COLONIA MARIANO ESCOBEDO

Sitio	Coordenadas		Área disponible (m ²)
	Norte	Oeste	
Opción 1 – Parque	19° 29' 42.68"	96° 56' 37.96"	344.40
Opción 2 – Iglesia	19° 29' 47.95"	96° 56' 37.96"	2,031.49

La opción 1, se encuentra ubicada a un costado del área de juegos de la colonia Mariano Escobedo y, es aquí donde se implementará el entramado de raíces para la calle Gardenias. El área de juegos señalada en la imagen se encuentra en estado de abandono. Según las medidas topográficas proporcionadas por Pobladores A.C., el punto más bajo del terreno es el marcado por el número 97 de las curvas de nivel, por tanto, este sería un sitio idóneo para tomar en cuenta durante el diseño.

La desventaja de este punto, es que se encuentra a menor distancia del río Pixquiac, por lo que, podría ser necesario solicitar un mapa topográfico donde se incluya la calle Gardenias, y así conocer cuál es la diferencia de altura que existe desde las viviendas hasta el entramado de raíces, con lo que las aguas grises tendrán un flujo adecuado, sin estancamientos (ver **figura 5.5**).

El sitio marcado como opción número 2, por Pobladores A.C., se encuentra justo frente a la iglesia de la colonia Mariano Escobedo. El río Pixquiac se encuentra más

lejano en este sitio, a aproximadamente 30 metros de distancia. Los puntos más bajos están marcados por los números 93 y 94 en las curvas de nivel, por lo que, ambos casos son sitios idóneos si se busca, posteriormente, elaborar el diseño de un tratamiento de aguas grises por métodos naturales para la calle 10 de noviembre (ver **figura 5.6**).



FIGURA 5.5 UBICACIÓN DE LAS DESCARGAS DE AGUAS GRISAS EN LA CALLE GARDENIAS Y PRIVADA DE LAS FLORES, EN LA COLONIA MARIANO ESCOBEDO. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE MAPA BASE DE CMAS COATEPEC (2017).

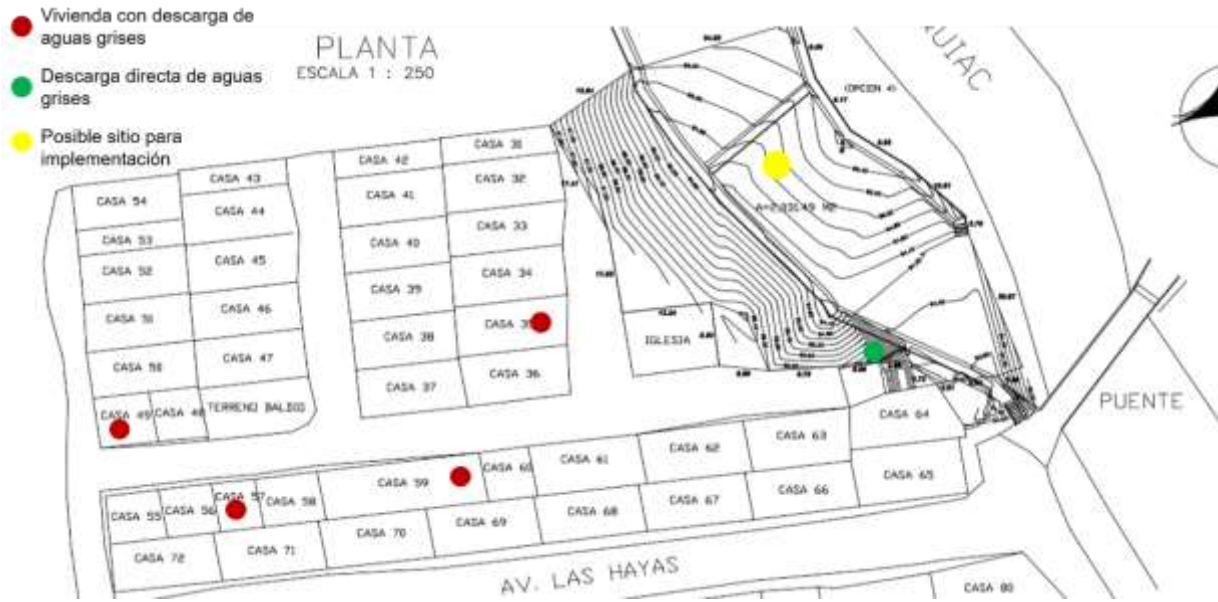


FIGURA 5.6 UBICACIÓN DE LAS DESCARGAS DE AGUAS GRISAS EN LA CALLE 10 DE NOVIEMBRE EN LA COLONIA MARIANO ESCOBEDO. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE MAPA BASE DE CMAS COATEPEC (2017).

Las calles seleccionadas por Pobladores A.C. para el diseño e implementación de tratamientos de aguas residuales domésticas, son consideradas en el presente estudio para cumplir con el objetivo general de este trabajo recepcional. A continuación, se mencionan las dos calles seleccionadas, junto con el número total de viviendas con separación de aguas grises en cada una (ver **tabla 5.3**)

TABLA 5.3 NÚMERO DE VIVIENDAS CON DESCARGAS DE AGUAS GRISAS EN LA COLONIA MARIANO ESCOBEDO

Nombre de la calle	No. de casas con descarga de aguas grises
Calle Gardenias	9
Calle 10 de noviembre	4

- **Número de habitantes por vivienda**

Como ya se mencionó en la descripción de la zona de estudio, en la sección de metodología, la Congregación de Zoncuantla tiene una población aproximada de mil 584 personas, mientras que la colonia Mariano Escobedo, está compuesta por un total de 561 habitantes (INEGI, 2010).

Según información proporcionada por Pobladores A.C. (2010), cada vivienda está habitada por familias compuestas por cinco o seis personas.

Por tanto, en la Calle Gardenias, para las viviendas con descarga de aguas grises, se tiene un estimado de 50 a 60 habitantes (Pobladores A.C., 2010), para la propuesta de tratamiento colectivo por métodos naturales para aguas grises.

Capítulo 6. Propuesta para el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales para la Congregación de Zoncuantla, Coatepec, Veracruz

La propuesta de tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales, se presenta para las zonas rurales de ecosistemas de bosque mesófilo de montaña, en donde la ausencia de drenaje permite la descarga directa de aguas residuales domésticas a cuerpos de agua naturales y al suelo. Por lo anterior, esta propuesta incluye alternativas de naturales y de bajo costo que ayudarán a disminuir la cantidad de contaminantes que llegan a ríos, lagos, arroyos, etc. Se presenta, entonces, la definición de los tratamientos por métodos naturales, así como los beneficios que éstos ofrecen a los usuarios. La propuesta se ha dividido en dos secciones, la primera, se enfoca en el tratamiento colectivo de aguas grises para la colonia Mariano Escobedo; mientras que la segunda sección contiene las alternativas de tratamiento de aguas residuales domésticas para zonas rurales en ecosistemas de bosque mesófilo de montaña.

CONTENIDO

6.1 Introducción

6.2 Los tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales: definición y análisis

6.3 Beneficios de los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales

6.4 Tratamiento de aguas residuales domésticas para zonas rurales

6.4.1 Tratamientos colectivos de aguas grises para la Colonia Mariano Escobedo, en la Congregación de Zoncuantla, Coatepec, Ver.

a. Entramado de raíces

b. Humedal de flujo vertical

6.4.2 Tratamientos individuales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en áreas rurales de ecosistemas de bosque mesófilo de montaña

c. Filtro anaerobio

d. Torre para aguas grises

e. Tanque séptico

6.1 Introducción

La propuesta para el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales presentada a continuación, está conformada por dos casos: en el primero, se describen los tratamientos colectivos para aguas grises para la colonia Mariano Escobedo, en la Congregación de Zoncuantla; en el segundo, se describen los tratamientos individuales para zonas rurales ubicadas en ecosistemas de bosque mesófilo de montaña. Lo anterior, se realiza con el fin de ofrecer un mayor entendimiento sobre cada método natural y mostrar a la comunidad alternativas para el tratamiento de aguas residuales, no solo a nivel colectivo (como es el caso de la colonia Mariano Escobedo), ya que, a nivel individual también es posible implementar sistemas que traten las aguas residuales domésticas de la vivienda.

La propuesta de tratamientos colectivos para aguas grises, se realizó en conjunto con la Asociación Civil Pobladores, quienes aportaron información importante sobre la colonia Mariano Escobedo. Cabe señalar que, para continuar con el proceso de diseño e implementación de los tratamientos para aguas residuales domésticas por métodos naturales aquí explicados, es fundamental y necesario realizar la medición del volumen de aguas residuales proveniente de las viviendas y, además, se debe considerar la concentración de materia orgánica y que calidad de agua se desea obtener a la salida del tratamiento. Lo anterior, con el fin de lograr un correcto dimensionamiento del método natural seleccionado y alcanzar el adecuado funcionamiento del mismo.

6.2 Los tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales: definición y análisis

Los tratamientos de aguas residuales de tipo doméstico no son tecnología de reciente creación, de hecho, desde su inicio, el ser humano ha observado como el ambiente es capaz de depurar su propio medio cuando las características de éste pierden sus propiedades originales, por ejemplo, cuando a un río llega materia orgánica en descomposición, los microorganismos, la flora, la fauna, así como otros componentes, comienzan a interactuar entre ellos para regresar su medio al estado

original. A partir de ello, el humano ha tratado de asemejar estas características y las ha integrado a su propia tecnología, en este caso, para el tratamiento de aguas residuales.

En las zonas urbanas, es común que las aguas residuales domésticas sean recolectadas mediante un sistema de drenaje, en donde se combinan con aquellas provenientes de comercios, de aguas pre-tratadas de industrias cercanas y de la lluvia; a la combinación de éstas últimas con las aguas residuales domésticas, se le conoce como aguas residuales municipales. Después de que las aguas residuales municipales son recolectadas, éstas se envían a una planta de tratamiento de aguas residuales, en donde pasan por diferentes procesos físicos, químicos y biológicos para su depuración. Sin embargo, para el caso de las zonas rurales se le ha dado prioridad a la cobertura de agua potable y a la instalación de redes de alcantarillado en algunas áreas, más no al tratamiento de las aguas residuales. Debido a lo anterior, éstas son dirigidas hacia una planta de tratamiento urbana cercana o directamente a cuerpos naturales de agua o al suelo. Por este motivo, en las zonas rurales, se ha recurrido a la implementación de tratamientos de aguas residuales por método naturales.

Los tratamientos por métodos naturales son tecnologías utilizadas para la depuración de aguas residuales, que han ganado terreno para su uso a nivel individual, para comunidades con poco número de habitantes y, hasta en pequeñas plantas industriales o granjas (Rozkosný *et al.*, 2014). Los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales han ganado terreno en los ámbitos anteriormente mencionados debido a que su efecto depurador se debe a la acción de la vegetación, del suelo, de los microorganismos, ya sean éstos terrestres o acuáticos, y en menor medida, a la acción de animales superiores, sin la intervención de agentes artificiales, como químicos (Instituto Geológico y Minero de España, 1995). Es por esto que, se utilizan los elementos naturales presentes en las zonas, como pueden ser la vegetación y el suelo, además, de las condiciones climáticas imperantes, las cuales ayudan a la evaporación o la evapotranspiración, en el caso de las plantas.

6.3 Beneficios de los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales

Actualmente, los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales ha adquirido una mayor aceptación, no solo como parte de nuevas instalaciones para plantas de tratamiento de aguas residuales para zonas urbanas, también a nivel individual o para comunidades con poco número de habitantes en zonas rurales y, hasta en pequeñas plantas industriales o granjas (Rozkosný *et al.*, 2014). Son diversos los factores que han llevado a optar por tecnologías derivadas de los mecanismos naturales de depuración del medio ambiente, sin embargo, enfrentan algunas barreras, que han impedido su implementación; más que nada por la falta de conocimiento, de difusión y de diseños accesibles para los usuarios directos (Zurita *et al.*, 2011).

Los tratamientos por métodos naturales presentan características que los hacen atractivos comparados con los sistemas convencionales, éstos ofrecen una gran variedad de beneficios a los usuarios y al medio ambiente, entre las ventajas podemos mencionar:

- La constante mejora de los tratamientos por métodos naturales, permite la obtención de efluentes de mayor calidad, por lo tanto, ofrecen la posibilidad de reutilizar el agua tratada en actividades diversas, como en la limpieza de los hogares o el riesgo agrícola (Rozkosný *et al.*, 2014).
- La implementación de la tecnología es relativamente sencilla, ya que estos métodos no requieren de grandes construcciones, de estructuras complejas o de partes mecanizadas que a largo plazo son difíciles de instalar o de adquirir (Mahmood *et al.*, 2013).
- Por lo anterior, los costos de inversión y de operación son bajos, esto último debido al bajo consumo de energía, no requieren de personal altamente capacitado, ni de piezas mecánicas que puedan ser difíciles de conseguir en caso de falla (Zurita *et al.*, 2011).

- El mantenimiento de los tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales requiere de vigilancia mínima, por lo que, los costos de mantenimiento también resultan bajos (Osorio, 2013).
- El proceso de tratamiento puede adecuarse rápidamente, así como alcanzar una buena calidad de desempeño después de iniciadas las operaciones del sistema (Rozkosný *et al.*, 2014).
- Su operación es eficaz ante un amplio rango de caudales y cargas, esto es, el volumen de agua que sale de las casas y la concentración de contaminantes que llevan consigo (Osorio, 2013).
- Para la construcción de los tratamientos por métodos naturales es posible aprovechar los materiales localmente disponibles (Zurita *et al.*, 2011).
- Además, ya que la mayoría incorpora vegetación o sistemas de lagunaje, los métodos naturales se integran fácilmente al medio natural que los rodea, como puede ser el caso del entramado de raíces (Rozkosný *et al.*, 2014).

De lo anterior, existe gran cantidad de estudios realizados por académicos alrededor del mundo, en los que se han diseñado e implementado distintos tratamientos por métodos naturales a nivel de laboratorio y piloto, y casos aplicados, en los que se ha analizado el funcionamiento y desempeño de este tipo de tratamientos, en condiciones reales. Es por ello que, no solo se ha demostrado la simplicidad y la accesibilidad de los tratamientos para aguas residuales domésticas por métodos naturales, sino también su desempeño en la remoción de diferentes tipos de contaminantes, en distintas concentraciones.

6.4 Tratamiento de aguas residuales domésticas para zonas rurales

En esta sección, se presentan dos casos distintos: los tratamientos colectivos para aguas grises por métodos naturales para la Colonia Mariano Escobedo y los tratamientos individuales para aguas residuales de tipo doméstico por métodos naturales para áreas rurales de ecosistemas de bosque mesófilo de montaña. En ambos apartados, se presentan los tratamientos por métodos naturales seleccionados, los cuales son posteriormente descritos detalladamente, por lo que

se incluye: la descripción general del método; qué beneficios ofrece, se incluye la capacidad de remoción de contaminantes que tiene el método natural; el modo de funcionamiento, es decir, que procesos físicos, químicos o biológicos están involucrados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas; la implementación del método, estos es, sus requerimientos y cuál es el modo de construcción; y, por último, los materiales que pueden utilizarse para la construcción, así como el costo unitario del método natural. Para cada caso, es importante recordar que para implementar cualquiera de los tratamientos es fundamental y necesario que se mida el caudal de aguas residuales domésticas, esto es, el volumen de aguas residuales generadas por cada persona en las viviendas y la cantidad de materia orgánica que entrará al tratamiento.

6.4.1 Tratamientos colectivos de aguas grises para la colonia Mariano Escobedo, en la Congregación de Zoncuantla, Coatepec, Ver.

Los tratamientos colectivos de aguas grises seleccionados para la colonia Mariano Escobedo son: el entramado de raíces y el humedal de flujo vertical. Ambos métodos naturales son descritos a continuación, y contienen la siguiente información: la descripción general del método; qué beneficios ofrece, se incluye la capacidad de remoción de contaminantes que tiene el método natural; el modo de funcionamiento, es decir, que procesos físicos, químicos o biológicos están involucrados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas; la implementación del método, esto es, sus requerimientos y cuál es el modo de construcción; y, por último, los materiales que pueden utilizarse para la construcción, así como el costo unitario del método natural. Es importante recordar que para implementar cualquiera de los tratamientos es fundamental y necesario que se mida el caudal de aguas grises, esto es, el volumen de aguas residuales generadas por cada persona en las viviendas y la cantidad de materia orgánica que entrará al tratamiento.

a. Entramado de raíces

Descripción del método – El humedal artificial horizontal de flujo sub-superficial, conocido comúnmente como entramado de raíces, es un método natural para el tratamiento de aguas grises, es decir, aquellas provenientes de la cocina, de los

lavabos, la lavadora o de la limpieza. Los principales componentes del método son las raíces de las plantas y el material o medio filtrante, como puede ser la gravilla, la arena gruesa o el vidrio roto (Morel & Diener, 2006), ya que estos son los encargados de la depuración de las aguas grises. Las distintas capas de material filtrante en el entramado de raíces cumplen dos funciones: la primera, proveer de condiciones adecuadas para que los microorganismos anaerobios puedan adherirse a su superficie (ver **figura 6.1**)

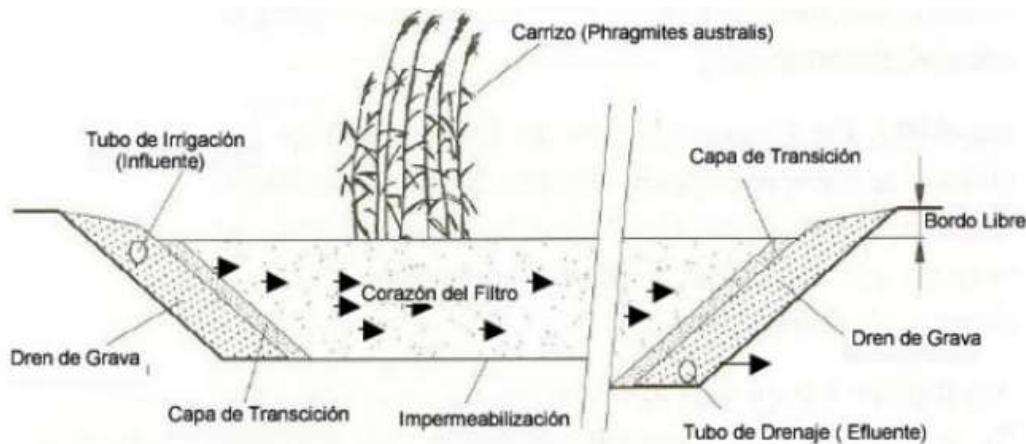


FIGURA 6.1 SECCIONES DE UN ENTRAMADO DE RAÍCES. FUENTE: EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UN ASENTAMIENTO IRREGULAR (HARO & APONTE, 2010)

Beneficios del método – El entramado de raíces es considerado como un método natural debido a su modo de funcionamiento y a los beneficios que aporta tanto al medio ambiente como a la comunidad donde es instalado. A continuación, se presentan las ventajas del entramado de raíces: Al ser un sistema donde el agua a tratar fluye por debajo del suelo, éste no produce malos olores, el contacto con el usuario es nulo y no permite la generación de fauna nociva, como los mosquitos (Morel & Diener, 2006; Water Installations, s.f.); el costo de mantenimiento y operación son bajos, el primero debido a los mínimos requerimientos de mantenimiento del método, mientras que la operación del entramado de raíces no requiere de un experto (Water Installations, s.f.); si los materiales para la construcción se consiguen localmente, como pueden ser el material filtrante, los costos de construcción se reducen significativamente (Rose, 1999). El entramado

de raíces combina tres procesos diferentes, que son: la filtración mecánica, la precipitación química y la degradación biológica (Kalpana *et al.*, 2014).

Por medio de este tratamiento, se tiene una buena remoción de contaminantes presentes en las aguas grises, Morel & Diener (2006) y Rozkosný *et al.* (2011), coinciden en esto, de hecho, los humedales tienen un alto grado de desempeño, es por ello que han ganado terreno en la actualidad. El entramado de raíces es muy eficiente para la remoción de materia orgánica y de sólidos suspendidos. Según los estudios realizados, se tiene que, hay una remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de un 65 a 80 por ciento; mientras que los sólidos suspendidos alcanzan un porcentaje de remoción de entre 70 a 95 por ciento. Otro de los aspectos importantes de este método, es su eficacia para la eliminación de patógenos, alcanzando un 99 por ciento del total presente en las aguas grises. Aunque la remoción de nutrientes es un proceso complejo, los humedales artificiales facilitan la proliferación de microorganismos, los cuales están encargados de la eliminación de nitrógeno y fósforo. Por ejemplo, para el nitrógeno, se tiene una capacidad del 15 al 40 por ciento; mientras que para el fósforo es de un 30 a 50 por ciento.

Modo de funcionamiento – Un entramado de raíces trabaja a partir de distintos procesos físicos, químicos y biológicos para la depuración de las aguas grises, entre estos, podemos mencionar: la degradación aerobia o anaerobia de contaminantes, o la sedimentación. A diferencia del humedal artificial de flujo vertical, el cual se describe en los métodos naturales para el tratamiento individual de aguas residuales domésticas, la entrada de aguas grises es continua, solo que, en este caso, entran por la parte inferior del entramado, por medio de un tubo. Al ser el humedal de flujo horizontal, las aguas grises realizarán su recorrido de forma lenta, ya que la distribución de agua es moderada por la primera capa de material filtrante. Conforme el agua sube de nivel y atraviesa las distintas capas de material filtrante, ésta arrastrará consigo pequeñas cantidades de oxígeno, que se difundirá por las cavidades porosas del suelo (SSWM, 2009).

La rápida y sencilla adherencia de los microorganismos a la superficie de los materiales filtrantes, permiten que, durante su camino, las aguas grises sean tratadas por microorganismos anaerobios, los cuales facilitan la descomposición de la materia orgánica. Gracias a la acción de los materiales filtrantes, las aguas grises son filtradas, permitiendo así, la remoción de partículas sólidas; además, éste funciona como soporte para el crecimiento de la vegetación (SSWM, 2009), permitiéndola extender raíces hacia el fondo, las cuales ayudan a permear las capas del material filtrante, es decir, permiten una mejor difusión de las aguas grises a través de éstas.

Las raíces de las plantas sembradas en el humedal, juegan un papel importante en la depuración, ya que son el hábitat de microorganismos aerobios y anaerobios. De hecho, las plantas transfieren una pequeña cantidad de oxígeno hacia la zona de las raíces, donde las bacterias aerobias crecen y se encargan de degradar los nutrientes y la materia orgánica, principalmente. Cuando las aguas ya tratadas llegan al extremo contrario del humedal, éstas son recolectadas por una red de drenaje que posteriormente entra a otro tratamiento o hacia un tanque de almacenamiento (Alianza por el Agua, 2008).

Implementación – Por principio, para el diseño de un humedal artificial horizontal de flujo sub-superficial, se requiere conocer el número de habitantes de cada vivienda que se conectará al sistema colectivo, lo anterior, tiene el propósito de determinar el volumen de aguas grises que se generan (Guevara, 2015); también debe considerarse la carga orgánica, ya que la capacidad de asimilación del entramado de raíces tiene que superar la carga orgánica que aportan las aguas grises, y con ello calcular la superficie del humedal (Seoáñez, 2005); y otro punto importante para dimensionar el entramado de raíces, es determinar qué calidad deberá tener el agua a la salida del tratamiento, esto último debe considerar los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas.

Después de obtener los datos antes mencionados y de realizar el diseño, la construcción del entramado de raíces puede realizarse como se indica a continuación: en primer lugar, debe tomarse en cuenta que ocupa un área de entre

1 a 3 metros cuadrados por persona. En general, cualquier tipo de suelo puede utilizarse para la construcción de un entramado de raíces, siempre y cuando se tome en cuenta la impermeabilización del lecho (Seoáñez, 2005), es decir, el lugar donde se asiente la estructura del entramado de raíces. En el lugar seleccionado, debe excavarse un hoyo en el terreno que tenga una profundidad no mayor a 0.6 metros (Morel & Diener, 2006). El lecho debe tener entre 0.5 a 1 por ciento de pendiente, esto con el fin de que el agua se dirija en la dirección correcta (Rozkosný *et al.*, 2011; Morel & Diener, 2006). Para evitar la infiltración de las aguas grises directamente en el suelo, el lecho es recubierto por material impermeable, como puede ser arcilla compactada, concreto o algún tipo de plástico que no se rompa fácilmente, éste última debe tener un espesor de entre 1 a 1.5 milímetros (Rozkosný *et al.*, 2011). Como paso siguiente, el lecho es rellenado con el material encargado de la filtración y que, además, sirve como medio de soporte para las raíces de las plantas y de adhesión de microorganismos, este material puede ser: arena gruesa, gravilla o vidrio roto. Para la arena, se indican dos diámetros diferentes de partícula, que son: arenas graduadas de 2 mm de diámetro y arenas gravosas de 8 mm de diámetro. Para el caso de la grava, tenemos: gravas finas de 16 mm de diámetro, gravas medianas de 32 mm de diámetro y rocas pequeñas con un diámetro de 128 mm. En la superficie del humedal, se añade una capa de suelo de entre 5 a 10 centímetros, aquí es donde se sembrará la vegetación (Morel & Diener, 2006). Rozkosný *et al.* (2011), recomienda que en las zonas de entrada y salida se implemente una pequeña capa con material más grueso, esto es entre 40 a 80 milímetros, con ello, se tendrá una mayor distribución del agua en el humedal. Para evitar la colmatación del humedal por el escurrimiento de tierra o de residuos, Seoáñez (2005), recomienda que se construyan canaletas en el perímetro, que viertan al punto de salida del entramado (ver **figura 6.2**).



FIGURA 6.2 ENTRAMADO DE RAÍCES PARA LAS AGUAS GRISAS DE UNA VIVIENDA EN TEPOZTLÁN, MÉXICO. FUENTE: GREYWATER MANAGEMENT (MOREL & DIENER, 2006).

El entramado de raíces funciona como un tratamiento secundario o terciario dentro del tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico, es por ello que se requiere implementar un pre-tratamiento o tratamiento primario, para evitar que las partículas grandes taponeen el sistema. Para este método está recomendado el uso de un sedimentador o un tanque séptico como un primer nivel de tratamiento (Morel & Diener, 2006), en el apartado siguiente, se describe el funcionamiento de este tratamiento, pero enfocado al agua que es descargada de los baños. De la misma manera, las trampas de grasas son una opción válida, especialmente, si las aguas grises provienen de lugares como la cocina, en donde es común encontrar grasas y aceites. La trampa de grasas es un tanque que está conformado por una sola cámara a donde llega el agua, a través de un tubo, está construida con cemento, block o ladrillos. En ésta, las aguas grises sufren una separación física, denominada decantación, que es cuando las sustancias de menor densidad al agua se separan, quedando en la superficie. Posteriormente, las aguas grises salen de la cámara a través de un tubo posicionado en medio de la debajo de la capa de grasa y aceite formada en la superficie.

Materiales para la construcción – El entramado de raíces puede utilizar distintos tipos de materiales, conseguirlo depende de la disponibilidad local y del precio de éstos. Si el suelo donde se asienta el humedal artificial es mayormente impermeable, es decir, no permite la completa infiltración del agua a través de su estructura, éste puede únicamente compactarse para evitar que las aguas grises se infiltren al suelo. Sin embargo, cuando el suelo permite la infiltración del agua, es necesario instalar una capa de arcilla compactada, plástico, tela geotextil o cemento. Otro de los materiales a tomar en cuenta son los tubos PVC, que en este caso se consideraron para las tuberías de entrada y de salida. Mientras que para el medio filtrante se consideró la arena de río y la gravilla. La mano de obra es importante, más que nada para realizar trabajos de excavación, compactación del suelo, la correcta nivelación y la construcción de las estructuras principales. Con base en todo lo anterior, el costo unitario aproximado de un entramado de raíces, por cada 4 metros cuadrados de construcción, es de: 1, 185.25 pesos mexicanos (ver **anexo 1**). Cabe señalar que, el costo unitario es solo un referente del valor económico de los materiales que se utilizan por cuatro metros cuadrados de construcción, sin embargo, debe tomarse en cuenta que el entramado de raíces debe dimensionarse acorde al número de habitantes, el volumen de aguas grises que se generan, la concentración de materia orgánica y la calidad deseada para el efluente.

Cabe señalar que, en la colonia Mariano Escobedo, en la Congregación de Zoncuantla, se ha comenzado con el proceso de diseño e implementación de un entramado de raíces para el tratamiento de aguas grises para nueve viviendas de la calle Gardenias. El proyecto debe ser terminado en marzo de 2018.

b. Humedal artificial de flujo vertical

Descripción del método – El humedal artificial de flujo vertical es similar al entramado de raíces en su estructura y en el modo de funcionamiento, sin embargo, este método natural se diferencia del entramado de raíces por la forma en que las aguas residuales entran al sistema, que, en este caso, son vertidas sobre el humedal para posteriormente infiltrarse por la capa de suelo y del material filtrante (SSWM, 2009). El humedal de flujo vertical es típicamente utilizado para el

tratamiento de aguas grises, las cuales provienen de la cocina, la lavadora, de los lavabos o de la limpieza (ver **figura 6.3**).

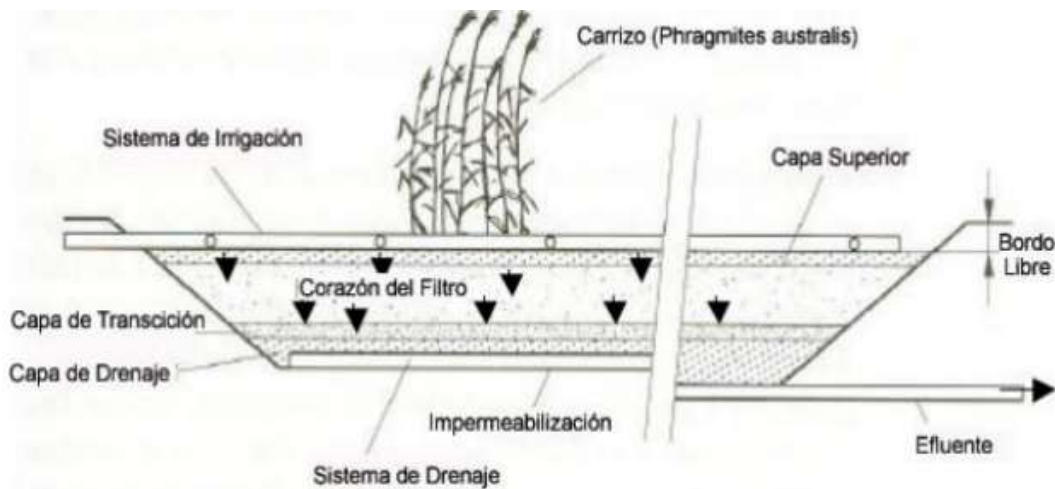


FIGURA 6.3 SECCIONES DE UN HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL. FUENTE: EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL COMO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UN ASENTAMIENTO IRREGULAR (HARO & APONTE, 2010)

Beneficios del método – El tratamiento de aguas grises por medio de un humedal artificial de flujo vertical destaca por la manera en que realiza la depuración de las aguas grises, incorporando procesos naturales a su sistema, por ejemplo, el uso de plantas o de materiales filtrantes que asemejan las características del suelo. Este método se integra totalmente al paisaje natural de la zona al involucrar elementos como plantas o pastos, los cuales pueden ser utilizados también con fines ornamentales; la implementación de un humedal artificial incrementará la biodiversidad de la zona, al crear un hábitat para insectos, anfibios o aves; de igual forma, se mejorará el microclima del lugar gracias a la constante evaporación de agua por la vegetación presente (Rozkosný *et al.*, 2014). Debido al proceso de infiltración de las aguas grises, éstas no permanecerán mucho tiempo sobre el suelo y, por lo tanto, no provocarán la aparición de mosquitos o de malos olores como consecuencia de su estancamiento (Morel & Diener, 2006). Otro de los beneficios relacionados con el tipo de flujo que presenta este humedal artificial, es su menor posibilidad de taponamiento, esto comparado con el entramado de raíces (SSWM, 2009).

El método natural de humedal artificial de flujo vertical requiere de menor espacio para su implementación; la construcción de este método es simple, y no requiere de energía eléctrica para su funcionamiento, a menos que se instale una bomba para la dosificación de las aguas grises; sus costos de operación son bajos, principalmente porque no se utilizan sustancias químicas para el tratamiento de las aguas grises; y aunque requiere de un mantenimiento frecuente, éste resulta accesible (SSWM, 2009; Rozkosný *et al.*, 2014). Este método natural de tratamiento de aguas grises presenta una buena eficiencia de remoción de contaminantes, tal y como indican Morel & Diener (2006); Rozkosný *et al.* (2014) y SSWM (2009), los principales procesos físicos del humedal artificial de flujo vertical, como son la filtración y la sedimentación, remueven los sólidos suspendidos contenidos en las aguas grises, esto es entre un 65 a un 85 por ciento. De igual forma se reduce la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), que se traduce hasta en un 85 por ciento durante el tratamiento. Los compuestos orgánicos son removidos principalmente por la acción de microorganismos aerobios y anaerobios; mientras que las partículas coloidales se remueven por medio de la filtración, sedimentación o adsorción. La cantidad de nitrógeno y fósforo, presente en las aguas grises, es reducida en un 30 por ciento para el nitrógeno y 35 por ciento para el fósforo.

Modo de funcionamiento – De manera general, el humedal artificial de flujo vertical funciona a través de la aplicación intermitente de aguas grises sobre la superficie del humedal, éstas llegan por medio de un tubo con pequeñas perforaciones y es distribuida por una bomba o por un sifón mecánico (Morel & Diener, 2006). Durante la aplicación, las aguas grises comenzarán a infiltrarse a través del suelo, el cual se saturará y permitirá la aparición de un espejo de agua sobre la superficie, que posteriormente desaparecerá y el humedal volverá a su estado insaturado. Conforme el agua desciende a través de las capas de material filtrante, ésta arrastrará consigo pequeñas cantidades de oxígeno, que se difundirá por las cavidades porosas del suelo (SSWM, 2009).

Gracias a la fácil adherencia de microorganismos a la superficie de los materiales filtrantes, y mientras las aguas grises recorren su camino hacia el fondo del humedal, éstas son tratadas por microorganismos anaerobios, los cuales facilitan la

descomposición de la materia orgánica. De igual manera, el medio filtrante actúa como un filtro, permitiendo la remoción de partículas sólidas; además, sirve como soporte para el crecimiento de la vegetación (SSWM, 2009), permitiéndola extender raíces gruesas y profundas, las cuales ayudan a permear las capas del material filtrante, es decir, que permite una mejor difusión de las aguas grises a través de éstas.

Además de permear el medio filtrante, las raíces de las plantas sembradas en el humedal, son el hábitat de diferentes microorganismos, ya sean aerobios o anaerobios. De hecho, la vegetación transfiere una pequeña cantidad de oxígeno hacia la zona de raíces, donde las bacterias aerobias crecen y se encargan de degradar los nutrientes y la materia orgánica, principalmente. Al llegar las aguas tratadas al fondo del humedal artificial, éstas son recolectadas por una red de drenaje que posteriormente sale hacia otro tratamiento o hacia un tanque de almacenamiento (Alianza por el Agua, 2008) (ver **figura 6.4**).



FIGURA 6.4 HUMEDAL DE FLUJO VERTICAL EN UNA VIVIENDA EN KATHMANDÚ, NEPAL. FUENTE: GREYWATER MANAGEMENT (MOREL & DIENER, 2006)

Implementación – Por principio, para el diseño de un humedal artificial vertical de flujo sub-superficial, se requiere conocer el número de habitantes de cada vivienda

que se conectará al sistema colectivo, lo anterior tiene el propósito de determinar el volumen de aguas grises que se generan (Guevara, 2015); también debe considerarse la carga orgánica, ya que la capacidad de asimilación del humedal artificial tiene que superar la carga orgánica que aportan las aguas grises, y con ello calcular la superficie de éste (Seoáñez, 2005); y otro punto importante para dimensionar el humedal artificial de flujo vertical, es determinar qué calidad deberá tener el agua a la salida del tratamiento, esto último debe considerar los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas.



El humedal artificial de flujo vertical es construido de manera similar al entramado de raíces. Uno de los primeros elementos a tomar en cuenta para el humedal es la superficie que se ocupará para su construcción, para este caso, se requiere de 0.5 a 2 metros cuadrados por persona (Morel & Diener, 2006). En general, cualquier tipo de suelo puede utilizarse para la construcción de un entramado de raíces, siempre y cuando se tome en cuenta la impermeabilización del lecho (Seoáñez, 2005), es decir, el lugar donde se asiente la estructura del entramado de raíces. Cuando se tenga el sitio seleccionado para la construcción del humedal artificial, se debe excavar en el terreno una zanja de entre 0.8 a 1.2 metros de profundidad (Morel & Diener, 2006); sin embargo, Rozkosný *et al.* (2014) señala que, la profundidad también puede ser de entre 0.9 a 1.5 metros. El lecho debe ser recubierto dependiendo del grado de infiltración del suelo y tener una pendiente mínima del 0.5% aunque, Seoáñez (2005), señala que puede trabajarse en pendientes menores al 6%. Para evitar la infiltración de las aguas grises directamente en el suelo, el lecho debe ser recubierto por algún material impermeable, como puede ser material plástico, arcilla compactada o concreto (Rozkosný *et al.*, 2011). Posteriormente, la base del humedal artificial es rellenado con capas de diferentes materiales, como son la arena gruesa o de río, la gravilla o el vidrio roto. En el caso de la arena, podemos incorporar de distintos diámetros en el humedal: arenas graduadas de 2 mm de diámetro y arenas gravosas de 8 mm de diámetro. Para la grava, es similar: gravas finas de 16 mm de diámetro, gravas medianas de 32 mm de diámetro y rocas pequeñas con un diámetro 128 mm (Rodríguez & Cárdenas, 2014). Después de rellenar el humedal con los materiales

filtrantes adecuados, se añade a la superficie, una capa de suelo de entre 5 a 10 centímetros, en los que se sembrará la vegetación (Morel & Diener, 2006). Para evitar la colmatación del humedal por el escurrimiento de tierra o de residuos, Seoáñez (2005), recomienda que se construyan canaletas en el perímetro, que viertan al punto de salida del entramado. En el caso de los humedales artificiales de flujo sub-superficial verticales, para favorecer la oxigenación del sustrato, suele ser frecuente que se conecten a las tuberías de drenaje chimeneas verticales que sobresalen por encima del medio filtrante, y que ejercen un efecto de renovación del aire presente en los drenes (Alianza por el agua, 2008).

Materiales para la construcción – Debido a la similitud con el entramado de raíces, se consideraron los mismos materiales y accesorios que en el entramado de raíces, lo que cambia es la cantidad de tubos PVC a utilizar. Se considera también, un humedal confinado sobre el suelo, como se muestra en el ejemplo de la figura 5.6. De igual manera para el costo unitario aproximado, se toma en cuenta un área de 4 metros cuadrados, lo que nos da: 1, 385 pesos mexicanos (ver **anexo 1**). Cabe señalar que, el costo unitario es solo un referente del valor económico de los materiales que se utilizan por cuatro metros cuadrados de construcción, sin embargo, debe tomarse en cuenta que el humedal de flujo vertical debe dimensionarse acorde al número de habitantes, el volumen de aguas grises que se generan, la concentración de materia orgánica y la calidad deseada para el efluente. Ya que ambos humedales son del tipo de flujo sub-superficial, las plantas utilizadas son similares, es por ello que, a continuación, se presenta la vegetación reportada en distintos estudios realizados dentro del estado de Veracruz de humedales artificiales y que podrían utilizarse para la Congregación de Zoncuantla (ver **tabla 6.1**).

TABLA 6.1 ESPECIES EMERGENTES MÁS QUE PUEDEN IMPLEMENTARSE EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA LA COLONIA MARIANO ESCOBEDO.

Nombre científico	Nombre común	Imagen	Referencia
<i>Cyperus papyrus</i>	Papiro		Hernández, 2016
<i>Phragmites australis</i>	Carrizo		Rodríguez & Cárdenas, 2014
<i>Cyperus articulatus</i>	Junco		Méndez, 2014
<i>Cyperus arternifolius</i>	Sombrilla		Hernández, 2016
<i>Iris pseudacorus L.</i>	Lirio amarillo, espadaña fina		Rodríguez & Cárdenas, 2014
<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Alcatraz		Méndez, 2014

<i>Anthurium sp.</i>	Anturio		Hernández, 2016
<i>Heliconia rostrata</i>	Platanillo, bandera española		Méndez, 2014

6.4.2 Tratamientos individuales para aguas residuales de tipo doméstico en áreas rurales de ecosistemas de bosque mesófilo de montaña

El tratamiento *in situ* de aguas residuales domésticas es una opción con muchas ventajas, principalmente para la reutilización del agua tratada en actividades diversas, como puede ser: la limpieza, el lavado de automóviles, el riego de jardines, entre otras. Al igual que en el apartado anterior, de tratamientos colectivos para aguas grises, aquí también se presenta la información correspondiente a cada método natural, estos son: la descripción general del método; cuáles son los beneficios, se incluye su capacidad de remoción de contaminantes; el modo de funcionamiento, es decir, que procesos físicos, químicos o biológicos están involucrados en el tratamiento de las aguas residuales de tipo doméstico; la implementación del método, cuáles son los requerimientos de éste y el modo de construcción; y los materiales que pueden utilizarse para la construcción, así como el costo unitario del tratamiento para aguas residuales domésticas. Es importante recordar que para implementar cualquiera de los tratamientos es fundamental y necesario que se mida el caudal de aguas residuales, esto es, el volumen generado por cada persona en la vivienda y la cantidad de materia orgánica que entrará al tratamiento.

c. Torre para aguas grises

Descripción del método – Una torre para aguas grises, también conocida como jardín vertical por algunos autores, es un método natural de tecnología sencilla y de

bajo costo (Eklund & Tegelberg, 2010). Su característica principal radica en su función como jardín vertical en forma de cilindro. Tal y como su nombre lo indica, un jardín vertical se utiliza para el tratamiento y la reutilización de las aguas grises de los hogares, en este caso, con propósitos de jardinería. Este tipo de método es usado en áreas donde hay gran escasez de agua, ya que ofrece un amplio potencial de aprovechamiento para huertos (SSWM, 2009), además, no es dependiente de las lluvias y disminuye el uso de agua limpia para su riego (Eklund & Tegelberg, 2010) (ver **figura 6.5**).

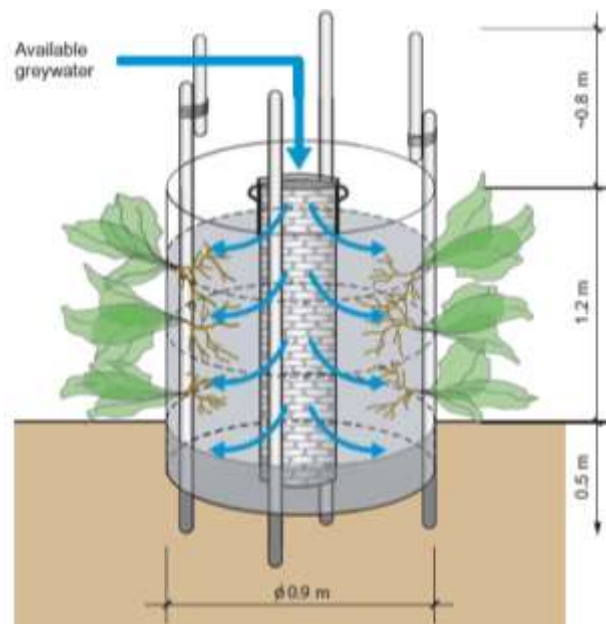


FIGURA 6.5 DISEÑO DE UNA TORRE PARA AGUAS GRISAS CON SUS MEDIDAS. FUENTE: GREYWATER MANAGEMENT (MOREL & DIENER, 2006)

Beneficios del método – Como ya se mencionó en el párrafo anterior, la torre para aguas grises es un método natural con muchas ventajas, desde su simplicidad tecnológica hasta su adaptabilidad a zonas donde hay prevalencia de escasez de agua, resulta un método de bajo costo para los usuarios, ya que no requiere de sistemas eléctricos, ni contiene partes que deban ser traídas de otro lugar, es decir, los materiales usados para su construcción se consiguen localmente. De igual manera, Morel & Diener (2004), señalan que, entre las fortalezas que presenta el jardín vertical para aguas grises, podemos mencionar que el trabajo de construcción, el monitoreo del sistema y los requerimientos para su mantenimiento

son mínimos. Por ejemplo, Eklund & Tegelberg (2010) y Kulabako *et al.* (2011), mencionan que, para la construcción de este sistema, se requiere un poco más de un metro cuadrado, por tanto, puede ser utilizado en lugares donde la limitante sea la disponibilidad de espacios.

Modo de funcionamiento – El correcto funcionamiento de la torre para aguas grises se encuentra en función de la columna de grava ubicada al centro de la estructura, que es donde se vierte directamente el agua a tratar. Dentro de la columna, además de realizarse la filtración de partículas grandes, ésta distribuye de forma equitativa las aguas grises en toda la estructura, lo que permite mantener la humedad en la tierra que rodea la columna y, por ende, el crecimiento óptimo de las plantas. De hecho, en la columna central, también se lleva a cabo un proceso de digestión aerobia de los contaminantes, ya que ésta se encuentra abierta y permite el paso del oxígeno entre la grava. Conforme las aguas grises avanzan a través de la capa de tierra, donde también se filtran, los microorganismos anaerobios comienzan a descomponer la materia orgánica de las aguas grises. En esta parte, las raíces de las plantas sembradas intervienen para continuar con la remoción de nutrientes, como es el caso del nitrógeno y del fósforo; en las raíces se adhieren diferentes microorganismos que son los encargados de descomponer los nutrientes para que la planta pueda absorberlos con mayor facilidad. Las aguas grises que atraviesan hasta el fondo de la estructura del jardín vertical, se topan con una nueva capa de grava antes de llegar al suelo.

Implementación – Para la construcción de una torre para aguas grises se deben considerar los siguientes puntos: debe excavarse un hoyo en el suelo que tenga una profundidad aproximada de 0.20 metros a 0.50 metros (Morel & Diener, 2004), aquí es donde se asentará la estructura del jardín vertical; Eklund & Tegelberg (2010) recomiendan que, esta sección sea rellena con grava, para una mejor filtración de las aguas grises. Este método natural, consiste, principalmente, en una bolsa, costal o cualquier tipo de malla o material que pueda contener tierra o composta, y que pueda ser sostenida fácilmente en forma de cilindro, por medio de estacas de madera o tubos de meta. En el centro del jardín, se ubica una columna, que puede ser elaborada con el mismo material que la estructura exterior, para esto,

debe tomarse en cuenta que el material permita el paso del agua hacia la zona de tierra o composta; la columna debe rellenarse con piedras, de preferencia que tengan una forma aplanada, para que las aguas grises sean distribuidas correctamente en todo el jardín. Es en el centro de la torre, que las aguas grises son vertidas directamente a diario (Morel & Diener, 2004; SSWM, 2009). Alrededor de la bolsa o costal exterior, el cual contiene la tierra, se abren pequeños agujeros, en donde se siembran plantas, las cuales, según los antecedentes (Kulabako *et al.*, 2011; Morel & Diener, 2004; SSWM, 2009), presentan un buen crecimiento gracias a los nutrientes que le son aportados por este tipo de aguas residuales (SSWM, 2009). Las plantas recomendadas para sembrar en el jardín vertical son aquellas de hojas comestibles, como las espinacas; también pueden sembrarse tomates y cebollas en la parte superior; sin embargo, no deben sembrarse plantas con raíces comestibles, como la papa, ya que las aguas grises estarían en contacto directo con éstas, pudiendo ocasionar daños a la salud de quienes las consuman. Este tratamiento es considerado simple, pero innovador, ya que reutiliza las aguas grises para el crecimiento de plantas y vegetales en pequeños espacios (Kulabako *et al.*, 2011).

Implementar una torre para aguas grises no necesita de requerimientos especiales, solamente que el suelo sea lo suficiente permeable para que las aguas ya tratadas, se infiltren y no provoque su acumulación en la superficie del mismo. La estructura de la torre para aguas grises tiene una altura no mayor a 1.20 metros; las estacas o tubos tendrán una altura aproximada de 0.80 metros; el hueco donde se asienta la estructura debe tener una profundidad de entre 0.20 a 0.50 metros, si es rellenado por grava, ésta debe tener un tamaño entre 7 y 20 milímetros (Eklund & Tegelberg, 2010). En un principio, al comenzar a verter las aguas grises en la torre, no se tendrá el cálculo exacto de cuánta agua requiere éste, sin embargo, la Sustainable Sanitation and Water Management (2013), recomienda aplicar un aproximado de 20 litros de aguas grises al día; con el paso del tiempo se determinará la cantidad de agua necesaria para mantener la tierra húmeda, para que las plantas o los vegetales prosperen.

Es importante mencionar que, al igual que en los métodos anteriores, las aguas grises utilizadas en el tratamiento de jardín vertical, también pueden pasar por un tratamiento primario antes de verterlas, evitando así un posible taponamiento en la columna central del jardín (Eklund & Tegelberg, 2010). El tipo de tratamiento dependerá de la procedencia de las aguas grises. Aunque, Morel & Diener (2004), recomiendan una trampa de grasas. En cambio, la IRC (2013), menciona que, de ser necesario, se puede implementar una red o tela filtrante justo en la parte superior de la columna central, para así evitar la entrada de partículas grandes que vengan con las aguas grises.

Materiales para la construcción – Una torre para aguas grises es una construcción sencilla que no requiere de materiales difíciles de encontrar, como lo son postes o estacas de madera no mayores a un metro y medio de alto; algún tipo de malla resistente para contener la columna central y la exterior, donde se sembrarán las plantas, en la práctica se utilizan bolsas negras o costales, aunque su tiempo de vida es menor debido a las condiciones exteriores. Es por ello que, el costo unitario de este método se obtuvo por unidad, es decir, qué costaría una torre para aguas grises; aproximadamente, un jardín vertical costaría: 742.10 pesos mexicanos (ver **anexo 1**).

d. Filtro anaerobio de flujo ascendente.

Descripción del método – El filtro anaerobio de flujo ascendente es un método natural de tratamiento para las aguas residuales de tipo doméstico, éste se adapta mayormente a las aguas grises, es decir, aquellas provenientes de lavadoras, de la cocina o de los lavabos; aunque algunos autores señalan que este tipo de tratamiento también es apto para el agua residual proveniente de los baños. Tal y como su nombre lo indica, este filtro trabaja con microorganismos adaptados a condiciones totalmente libres de oxígeno, es decir, condiciones anaerobias. Este método natural, es descrito, por Morel & Diener (2004), como un reactor biológico de lecho fijo, esto quiere decir que, el medio filtrante que compone al filtro anaerobio, es hogar de distintos microorganismos, los cuales se adhieren fácilmente a su superficie, ayudando a la depuración de las aguas grises mediante la descomposición de los contaminantes (ver **figura 6.6**).

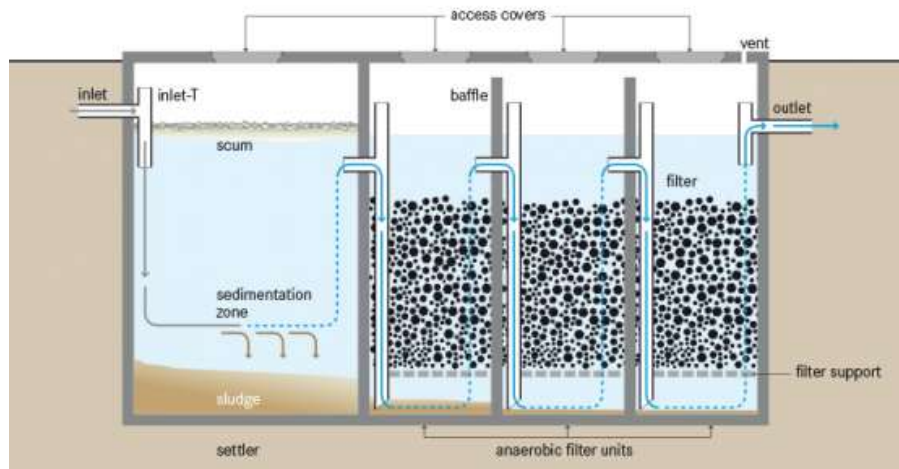


FIGURA 6.6 SECCIONES DE UN FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE DE 4 CÁMARAS. FUENTE: ANAEROBIC FILTER (SSWM, 2009), [HTTP://WWW.SSWM.INFO/CONTENT/ANAEROBIC-FILTER](http://www.sswm.info/content/anaerobic-filter)

Beneficios del método – El filtro anaerobio de flujo ascendente, es un método natural de gran alcance, esto quiere decir que, es adaptable y aplicable en distintos escenarios, como puede ser construido para una sola vivienda o para un vecindario completo con cierto número de casas, así como para áreas más grandes (SSWM, 2009). La tecnología de filtro anaerobio no se limita a lugares con amplios espacios, de hecho, el tanque puede ser construido bajo tierra y requiere de un espacio pequeño. En lo que respecta a su construcción, el tanque del filtro anaerobio puede construirse por encima del suelo o debajo de éste, sin modificar ninguna de las características de remoción de contaminantes del tratamiento. Lo anterior depende de la conexión de tuberías, la disponibilidad de espacio y la cercanía del nivel freático a la superficie del suelo (SSWM, 2009). Este método natural es resiliente a los cambios drásticos en la concentración de materia orgánica, así como a la cantidad de agua que entra al tanque (Morel & Diener, 2004). El sistema no requiere de energía eléctrica para su funcionamiento y sus costos de operación son bajos; además, la biomasa, es decir, los microorganismos, permanecen adheridos al material filtrante por un largo tiempo (Morel & Diener, 2004). Tiene un largo periodo de vida, si la remoción de lodos se lleva a cabo en tiempo y forma, aunque este método no genera cantidades grandes de lodos, por tanto, su mantenimiento es poco costoso (SSWM, 2009).

Diversos estudios, recopilados por Morel & Diener (2004) y SSWM (2009), nos muestran las principales características de eliminación de contaminantes por parte del filtro anaerobio de flujo ascendente. Una de las principales, es su alta tasa de reducción para los sólidos suspendidos totales, los sólidos disueltos totales y la Demanda Bioquímica de Oxígeno, esto es, para los sólidos y la DBO, hay un porcentaje de remoción del 50 al 80 por ciento. A pesar que la eliminación de nutrientes de las aguas grises es baja, aproximadamente un 15 por ciento para el nitrógeno, esto representa una ventaja, ya que permite reutilizar el agua tratada para el riego en la agricultura.

Modo de funcionamiento – El filtro anaerobio es un sistema que trabaja mediante una combinación de tratamiento físico y tratamiento biológico (SSWM, 2009). Durante la primera etapa del tratamiento, en el primer compartimiento o cámara, se lleva a cabo la sedimentación, ésta sucede cuando las partículas más pesadas descienden al fondo del tanque y se acumulan formando una capa de lodo, la cual debe ser retirada cada cierto tiempo. En cambio, el tratamiento biológico se refiere a la degradación anaerobia, producto del trabajo de los microorganismos adheridos al material filtrante dentro del tanque.

El punto de entrada de las aguas grises, que es por medio de un tubo, está comúnmente ubicado en la parte inferior del tanque que compone al filtro; o en caso que, éste se componga por varias cámaras o compartimientos, las aguas grises pueden entrar por la parte superior, ya que la primera cámara se encargará de sedimentar las partículas más grandes, las cuales podrían ocasionar algún taponamiento en el medio filtrante. En este primer compartimiento, se forma una capa de lodo, producto de la sedimentación. El agua continúa su camino y atraviesa el primer baffle a través de un tubo que la deposita al fondo de la segunda cámara, de modo que el flujo de agua pasa a ser ascendente en el siguiente compartimiento. Lo anterior permite que, el agua atraviese las diferentes capas de material filtrante (grava, block triturado, piedras, etc.), que es donde los microorganismos se encuentran adheridos, poniéndose en contacto con éstos para la degradación anaerobia de los contaminantes. El filtro anaerobio trabaja mediante un sistema de biopelícula fija, también conocido como lecho fijo o reactor de película fija (Morel &

Diener, 2004). Lo anterior significa que, dentro del filtro anaerobio, los procesos de remoción de contaminantes de las aguas residuales domésticas se llevan a cabo en un ambiente libre de oxígeno; en donde los microorganismos anaerobios se fijan a un material inerte (no vivo), lo que viene siendo el medio filtrante, formando una biopelícula sobre estos materiales, lo que permite la eliminación de sólidos no sedimentables y disueltos, principalmente (SSWM, 2009). Conforme el agua asciende por el tanque y las partículas y sustancias no deseadas son eliminadas, el agua ya tratada sale a través de un tubo posicionado en la parte superior del tanque, guardando distancia del medio filtrante, para impedir el ingreso y la obstaculización de la circulación (ver **figura 6.7**).



FIGURA 6.7 TANQUES DE PLÁSTICO DE 220 LITROS, SE UTILIZAN TAMBIÉN COMO FILTRO ANAEROBIO EN JORDANIA.

FUENTE: GREYWATER MANAGEMENT (MOREL & DIENER, 2006).

Implementación – Por principio, para el diseño de un filtro anaerobio de flujo ascendente, se requiere conocer el número de habitantes de cada vivienda que se conectará al sistema, lo anterior, tiene el propósito de determinar el volumen de aguas grises que se generan (Guevara, 2015); también debe considerarse la carga orgánica, ya que la capacidad de asimilación del filtro anaerobio tiene que superar la carga orgánica que aportan las aguas grises, y con ello calcular la superficie de éste (Seoáñez, 2005); y otro punto importante para dimensionar el filtro anaerobio, es determinar qué calidad deberá tener el agua a la salida del tratamiento, esto último debe considerar los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas.

Para la construcción de un filtro anaerobio de flujo ascendente debe tomarse en cuenta lo siguiente: como primer paso, se tiene que tomar en cuenta la disponibilidad de espacio de la vivienda y las conexiones de salida de las aguas grises, con el fin de ubicar mejor el filtro anaerobio, esto es, si se instalará sobre el suelo o debajo de éste. En la actualidad, es común que se construya debajo del suelo, ya que se provee mayor protección contra climas extremos y un correcto aislamiento (Morel & Diener, 2004). La capacidad que debe tener el tanque de acuerdo al número de personas es variable, esto es desde 0.5 metros cúbicos hasta 1 metro cúbico por persona. El tanque consiste en una estructura hermética, comúnmente construida con concreto, ladrillos o fabricado de material plástico. El tanque puede contener uno o más compartimientos o cámaras, divididos por baffles, es decir, el tanque está seccionado.

Como ya se mencionó anteriormente, el punto de entrada de las aguas grises depende de si el filtro anaerobio cuenta o no con dos o más cámaras o compartimientos; el tubo puede estar ubicado en la parte inferior del tanque que compone al filtro o, puede ingresar por la parte superior. El paso siguiente en el filtro, es el material filtrante, el cual puede estar constituido por gravas, rocas o block triturado, el tamaño de las partículas debe ser del rango de 12 a 55 milímetros. La profundidad del tanque estará determinada por las capas de medio filtrante, Morel & Diener (2004) recomiendan una a tres capas de material filtrante, el cual ocupará una altura de entre 0.8 a 1.2 metros, aproximadamente. En este caso, el material debe ser acomodado de mayor a menor tamaño, esto es, las partículas más grandes se asentarán al fondo del tanque e irán decreciendo en tamaño conforme se acerca a la superficie. El nivel de aguas grises dentro del tanque debe ser de al menos 0.3 metros para garantizar un flujo correcto y es recomendable que el agua permanezca dentro del sistema entre 12 a 36 horas, a esto se le conoce como tiempo de retención hidráulica (TRH).

Aun si el filtro se encuentra sobre el suelo o debajo de éste, es necesario instalar tapas de registro para dar el mantenimiento adecuado al filtro, en especial, cuando la capa de microorganismos ha crecido demasiado e impide la correcta circulación del agua o, si se presenta algún problema por taponamiento; aunque esto último es

poco común que ocurra, al tratarse de un filtro donde el agua asciende, el riesgo es mínimo (Navarro, 2008). Además, la degradación anaerobia genera malos olores y gases, como el metano, por tanto, se necesita ventilación en el filtro, por lo que deben instalarse pequeñas salidas en la tapa del tanque.

Materiales para la construcción – Para la construcción de un filtro anaerobio de flujo ascendente, se consideró un tanque de dos cámaras hecho con blocks y repellado con cemento; para el medio filtrante, se tomaron en cuenta tres tamaños distintos de grava; los accesorios, como son, los tubos de PVC en forma de “t”, el tramo de 3 metros de PVC de 2 pulgadas de diámetro y un tramo de 3 metros de CPVC de 1 pulgada. Al igual que en los anteriores tratamientos, se incorpora el costo de mano de obra y, se considera el costo unitario aproximado para una construcción de 4 metros cuadrados: 1, 421 pesos mexicanos (ver **anexo 1**). Cabe señalar que, el costo unitario es solo un referente del valor económico de los materiales que se utilizan por cuatro metros cuadrados de construcción, sin embargo, debe tomarse en cuenta que el filtro anaerobio de flujo ascendente debe dimensionarse acorde al número de habitantes, el volumen de aguas grises que se generan, la concentración de materia orgánica y la calidad deseada para el efluente.

e. Tanque séptico

Descripción del método – El método natural denominado tanque séptico, o también conocido como fosa séptica, es uno de los más utilizados alrededor del mundo, especialmente en áreas donde no hay presencia de redes de alcantarillado o para las viviendas se encuentran más aisladas (Tchobanoglous & Crites, 2000). Para este estudio, el tanque séptico se recomienda para el tratamiento de las aguas negras, es decir, aquellas que provienen de la descarga de baños. En términos generales, una fosa séptica es un tanque de concreto reforzado, de ladrillos o de material plástico, compuesto por uno o dos compartimientos o cámaras, en donde ocurren los procesos físicos de sedimentación y decantación, además de la descomposición anaerobia de los contaminantes (Morel & Diener, 2004). Actualmente, los tanques sépticos pueden construirse según las características específicas de la vivienda o también pueden comprarse pre-fabricados, estos últimos, comúnmente están fabricados de plástico reforzado con fibra de vidrio o

poliéster. De hecho, la NOM-006-CONAGUA-1997, considera las especificaciones y los métodos de prueba para las fosas sépticas pre-fabricadas, las cuales define de la siguiente manera: “elemento de tratamiento, diseñado y construido para recibir las descargas de aguas residuales domiciliarias que al proporcionar un tiempo de permanencia adecuado (tiempo de retención), es capaz de separar parcialmente los sólidos suspendidos, digerir una fracción de la materia orgánica presente y retener temporalmente los lodos, natas y espumas generadas (NOM-006-CONAGUA-1997, p. 3) (ver **figura 6.8**).

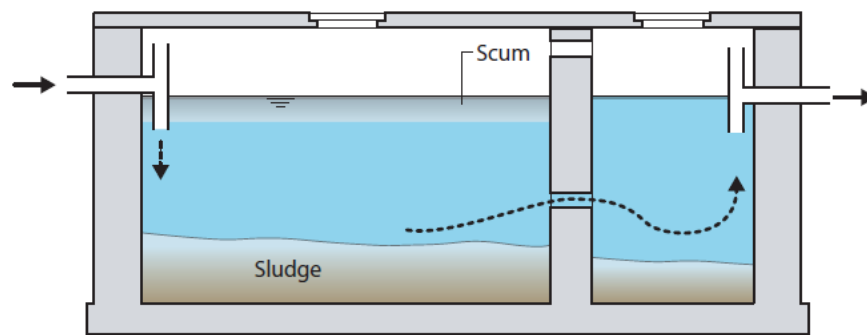


FIGURA 6.8 ESQUEMA GENERAL DE UN TANQUE SÉPTICO DE DOS CÁMARAS. FUENTE: GREYWATER MANAGEMENT (MOREL & DIENER, 2006).

Beneficios del método – El uso del tratamiento de aguas residuales domésticas por fosas sépticas se encuentra muy difundido en todo el mundo, principalmente por las ventajas que ofrece a los usuarios. Una de las más importantes, la cual se mencionó al principio, es su implementación en zonas donde la red de alcantarillado no existe o ésta resulta muy costosa debido a la lejanía; de hecho, la utilización de los tanques sépticos se ha extendido no solo para el tratamiento de aguas residuales de viviendas, también para establecimientos educativos, parques, campamentos, condominios, entre otros (Tchobanoglous & Crites, 2000). Otra de sus características, es el bajo costo de inversión requerido para su construcción, ya que algunos de los materiales se consiguen de manera local; de igual manera, el costo de operación es significativamente bajo, esto es gracias a que el sistema no utiliza energía eléctrica, no requiere de la adición de químicos o de personal especializado en su operación (Organización Panamericana de la Salud, 2005). La limpieza del tanque séptico no es frecuente, ésta se realiza cada 2 a 5 años (Morel

& Diener, 2006), para ello, se debe retirar el lodo acumulado en la parte inferior, producto de la sedimentación de sólidos. La superficie necesaria para su construcción depende del número de habitantes en la vivienda o del número de habitaciones, la ventaja, es que la construcción se realiza debajo del suelo y, por tanto, el espacio ocupado es mínimo (Morel & Diener, 2006).

Modo de funcionamiento – El principio de funcionamiento de un tanque séptico está basado en los procesos físicos de sedimentación y decantación. Cuando un tanque séptico se compone de dos cámaras o compartimientos, las aguas negras, es decir, las que provienen de la descarga de baños, llegan al primer compartimiento mediante la tubería de entrada. En este primer compartimiento, las partículas más pesadas que el agua, como son restos de papel o cabellos, descienden hasta el fondo del tanque y se acumulan, formando una capa de lodo. El lodo, también cumple una función específica en la fosa séptica, que es, proveer de un ambiente adecuado para el desarrollo de microorganismos anaerobios, los cuales ayudan a degradar los contaminantes presentes en las aguas negras. Otro de los procesos físicos que sucede en esta etapa, es la decantación, esto es, cuando las sustancias más ligeras que el agua, las de menor densidad, ascienden a la superficie; estas sustancias pueden ser: las grasas, los aceites o las espumas generadas por detergentes. Al concluir su estancia en la primera cámara, el agua atraviesa una pared o baffle, a través de un tubo colocado en medio, para evitar que el aceite, la espuma o el lodo pasen al compartimiento continuo. En la segunda sección, que es más pequeña que la primera, ocurren los mismos procesos, solo que aquí, se acumula una menor cantidad de lodo en el fondo del tanque, ya que la mayor parte de sólidos, fueron removidos en la primera cámara. El aceite y la espuma restante en el agua, termina de ascender a la superficie por el proceso de decantación. Al finalizar su recorrido, el agua tratada puede ser dirigida a otro tratamiento para eliminar los contaminantes restantes.

Implementación – Por principio, para el diseño de un tanque séptico, se requiere conocer el número de habitantes de la vivienda que se conectará al sistema, lo anterior, tiene el propósito de determinar el volumen de aguas residuales que se generan (Guevara, 2015); también debe considerarse la carga orgánica, ya que la

capacidad de asimilación del tanque séptico tiene que superar la carga orgánica que aportan las aguas residuales, y con ello calcular la superficie de éste (Seoánez, 2005); y otro punto importante para dimensionar la fosa séptica, es determinar qué calidad deberá tener el agua a la salida del tratamiento, esto último debe considerar los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas.

Para construir o instalar una fosa séptica, la NOM-006-CONAGUA-1997, señala los requisitos de localización de este método. En primer lugar, debe evitarse terrenos pantanosos, de relleno o sujetos a inundación, asimismo, que se localice al menos a tres metros de distancia de cualquier paso de vehículos. La fosa séptica debe mantener una distancia mínima de 60 metros con embalses o cuerpos de agua utilizados como fuente de abastecimiento; 30 metros de pozos de agua; a 15 metros de corrientes de agua; y 5 metros como mínimo de la edificación o de predios colindantes (ver **figura 6.9**).

Localización	Distancia (m)
Distancia a embalses o cuerpos de agua utilizados como fuentes de abastecimiento	60
Distancia a pozos de agua	30
Distancia a corrientes de agua	15
Distancia a la edificación o predios colindantes	5

FIGURA 6.9 DISTANCIA MÍNIMA REQUERIDA PARA LA UBICACIÓN DE UN TANQUE SÉPTICO. FUENTE: NOM-006-CONAGUA-1997, p. 11.

Una fosa séptica se construye de acuerdo al volumen de aguas negras generadas dentro de la vivienda, esto depende del número de personas que habiten en ella. El tanque se construye principalmente de ladrillos, block o concreto; para evitar infiltraciones hacia el suelo, la estructura de ladrillos y blocks es recubierta con varias capas de cemento. La profundidad sugerida para un tanque séptico, es de un metro; sin embargo, Crites & Tchobanoglous (2000) recomienda que ésta sea de un metro y medio, además que el tanque sea construido con concreto reforzado o ladrillos. El elemento de entrada al tanque séptico, que en este caso puede ser un tubo de PVC, debe estar sumergido en el agua, por lo menos 15 centímetros; mientras que el diámetro interior del tubo tiene que ser como mínimo de 10 centímetros (NOM-006-CONAGUA-1997). Para que el agua fluya correctamente de

un compartimiento hacia otro, durante la construcción, debe de dejarse al menos una diferencia de 20 centímetros de altura entre la primera cámara y la segunda, esto es, la pendiente. Si el tanque séptico está compuesto por dos cámaras, debe tomarse en cuenta que la primera cámara, almacenará las dos terceras partes del volumen total del sistema (Morel & Diener, 2006). Debido a que el proceso de descomposición se da en condiciones libres de oxígeno, es común que se acumulen gases y de malos olores dentro del tanque, es por ello que deben instalarse respiraderos en la parte superior. De igual manera, se requiere de tapas de registro para verificar la acumulación de lodo en el fondo, ya que cuando esta capa alcanza el 30% de la capacidad del tanque, puede comenzar a afectar el funcionamiento del sistema. Estas tapas de registro deben tener como mínimo una medida de 0.50 metros. Por lo anterior, se recomienda, remover el lodo acumulado cada 2 a 5 años (Morel & Diener, 2006). Actualmente en la NOM-006-CONAGUA-1997, ya se tiene establecida la capacidad de trabajo de una fosa séptica dependiendo del número de usuarios y en que medio se localiza, es decir, si es urbano o rural (ver **figura 6.10**).

Capacidad nominal (No. de usuarios)	Capacidad de trabajo (m ³)	
	medio rural	medio urbano
hasta 5	0,60	1,05
6 a 10	1,15	2,10
11 a 15	1,75	3,10
16 a 20	2,30	4,15
21 a 30	3,50	6,25
31 a 40	4,65	8,30
41 a 50	5,80	10,40
51 a 60	6,95	12,45
61 a 80	9,25	16,60
81 a 100	11,55	20,75

FIGURA 6.10 CAPACIDAD DE TRABAJO DE LA FOSA SÉPTICA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE USUARIOS. FUENTE: NOM-006-CONAGUA-1997, p. 5.

Materiales para la construcción – Para la obtención del costo unitario aproximado de una fosa séptica, se tomó como base una superficie de 4 metros cuadrados construida con blocks y recubierta con cemento para evitar infiltraciones al suelo. La salida y entrada al sistema se consideran con tubos PVC de 2 pulgadas, así

como otros accesorios. El número de mano de obra por jornada también se incluye. Por tanto, para una fosa séptica, el costo unitario aproximado es de: 1, 695 pesos mexicanos (ver **anexo 1**). Cabe señalar que, el costo unitario es solo un referente del valor económico de los materiales que se utilizan por cuatro metros cuadrados de construcción, sin embargo, debe tomarse en cuenta que el tanque séptico debe dimensionarse acorde al número de habitantes, el volumen de aguas grises que se generan, la concentración de materia orgánica y la calidad deseada para el efluente.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

El agua es un recurso natural importante para el ser humano, ya que proporciona servicios esenciales para la obtención de productos y servicios. Sin embargo, los recursos hídricos son susceptibles a la contaminación, en este caso, por la descarga de aguas residuales provenientes de distintos ámbitos. Para efectos de este trabajo recepcional, se consideran las aguas residuales domésticas en las zonas rurales del ecosistema de bosque mesófilo de montaña, ya que representan un punto de interés al no existir una red de drenaje y sistemas de tratamiento para este tipo de aguas residuales.

Es por ello que, se establece la necesidad de promover una cultura del cuidado de los recursos hídricos en zonas rurales, ya que los habitantes no cuentan con la información suficiente sobre las afectaciones que pueden ocasionar las descargas a cuerpos de aguas naturales y al suelo. Además de esta falta de cultura del agua en las zonas rurales, se suma la poca difusión de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y su reutilización. Por estos motivos, se desarrolló una propuesta de tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales, la cual resulta el objetivo general del trabajo recepcional.

Los antecedentes que existen en la Congregación de Zoncuantla, sobre el establecimiento de estrategias que ayudan a disminuir la carga de contaminantes que llegan al río Pixquiac, lo que implica la protección de los recursos hídricos de la zona, sirvieron como base para realizar una propuesta que pueda llegar a manos de la comunidad y, mediante la cual, obtendrán acceso a aquellas alternativas que resulten acordes a sus condiciones. Es por ello que, dentro de ésta, se da una visión general de cada tratamiento, junto con su modo de funcionamiento, como se implementa y que materiales se utilizan para su construcción. Se establece entonces que, estas medidas resultan de bajo costo para la población; disminuyen los contaminantes de las aguas residuales domésticas; permiten la reutilización de

las aguas residuales tratadas; se incorporan fácilmente con la estética del ambiente; los humedales, por ejemplo, permiten obtener productos como son las plantas ornamentales; el uso mínimo de energía y aplicación de tecnología sencilla, es decir, cualquier persona pueda ser capacitada para su manejo.

7.2 Recomendaciones

Los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas se presentan como una alternativa para zonas rurales, esto se debe a que su implementación trae beneficios a los usuarios, como es su bajo costo de construcción; su modo funcionamiento es sencillo, por lo que no siempre requieren de personal altamente capacitado; y, sobre todo, utilizan los elementos del medio ambiente para depurar las aguas residuales domésticas, por lo que su construcción no requiere de componentes mecanizados o la adición de sustancias químicas. Sin embargo, los tratamientos por métodos naturales, como los humedales artificiales, requieren de una amplia superficie, para que su dimensionamiento sea adecuado a las condiciones de la zona. Como es el caso de la colonia Mariano Escobedo, en la cual se han designado una serie de espacios, con el propósito de llevar a cabo la implementación de entramados de raíces para el tratamiento de sus aguas grises. Además del espacio, conviene tomar en cuenta otras características de la zona, como es el tipo de suelo, el tipo de clima, la vegetación de la zona, la cercanía de los sitios a algún cuerpo de agua natural, como es el río Pixquiac; a esto se suma cuál es el nivel máximo que alcanza el río durante la temporada de lluvias y qué registros existen sobre las inundaciones en el lugar.

Como se estableció en la propuesta, el proceso de diseño de los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas, tiene que realizarse para que su funcionamiento cumpla con un alto desempeño de remoción de contaminantes y las aguas tratadas puedan reutilizarse en actividades diversas, exceptuando el consumo o higiene personal de la población. Lo anterior, se puede conseguir tomando en cuenta lo siguiente: para el caso de las aguas grises, debe considerarse su procedencia, es decir, si son del lavabo, del lavado de ropa, de la limpieza de las

viviendas o de la cocina, o si se mezclan las anteriores con excepción de la cocina. Esto permitirá tener una visión más amplia sobre el tipo de tratamiento que puede utilizarse y si es necesario establecer un pre-tratamiento, como puede ser una trampa de grasas o un sedimentador. Otro punto a tomar en cuenta, es la cantidad de aguas grises generadas en el hogar, esto es, el volumen de agua que entrará al sistema cada cierto tiempo; para ello, los habitantes pueden llevar un registro de los litros aproximados de agua que utilizan para las actividades domésticas, o bien, considerar las mediciones ya reportadas en los libros o en estudios anteriormente realizados. De igual manera, es necesario conocer que concentración de materia orgánica entrará al tratamiento, ya que éste, debe estar diseñado para asimilarla, y evitar problemas de funcionamiento a largo plazo. No debe olvidarse que, determinar la calidad del agua que sale del tratamiento es importante para el correcto diseño; además, debe consultarse las Normas Oficiales Mexicanas para conocer los límites máximos permisibles, dependiendo de si se descargan a un cuerpo de agua natural o el agua se utiliza como parte de otras actividades, como es el riego de jardines o limpieza de espacios público.

Los costos unitarios presentados en la propuesta de tratamientos de aguas residuales domésticas por métodos naturales, es un aproximado de los materiales que se requieren para la construcción de cuatro metros cuadrados. Esto no quiere decir que, los tratamientos por métodos naturales descritos en la propuesta tienen que diseñarse y construirse con esa superficie. Con base en el volumen de aguas residuales, la concentración de materia orgánica y la calidad de agua deseada, los tratamientos deben dimensionarse dependiendo cada caso. Y de acuerdo a esto, considerar la cantidad total de materiales a utilizar, así como su costo a nivel local, y el costo de la mano de obra.

Anexo

Desglose de costo de materiales y mano de obra para los tratamientos por métodos naturales de aguas residuales domésticas

Entramado de raíces				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Elaboración de la estructura y repello				
Bulto de cal de 25 kg	Kg	25.00	\$1.88	\$47.00
Lata de arena	Lata	5.00	\$15.00	\$75.00
Bulto de cemento de 50 kg	Kg	12.50	\$3.30	\$41.25
Blocks	pieza	40.00	\$4.70	\$188.00
Medio filtrante y accesorios del humedal				
Lona de gravilla	Kg	40.00	\$0.75	\$30.00
Codos de PVC para tubo de 2"	pieza	2.00	\$8.00	\$16.00
Tramo de 3 m de PVC de 2"	pieza	1.00	\$200.00	\$200.00
Pegamento para tubo de PVC de 118 ml	pieza	1.00	\$48.00	\$48.00
Mano de obra				
Albañil	Jornada	1.00	\$300.00	\$300.00
Peón	Jornada	1.00	\$240.00	\$240.00
Costo unitario por 4 m ² de construcción				\$1,185.25

Humedal artificial de flujo vertical				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Elaboración de la estructura y repello				
Bulto de cal de 25 kg	Kg	25.00	\$1.88	\$47.00
Lata de arena	Lata	5.00	\$15.00	\$75.00
Bulto de cemento de 50 kg	Kg	12.50	\$3.30	\$41.25
Blocks	pieza	40.00	\$4.70	\$188.00
Medio filtrante y accesorios del humedal				
Lona de gravilla	Kg	40.00	\$0.75	\$30.00
Codos de PVC para tubo de 2"	pieza	2.00	\$8.00	\$16.00
Tramo de 3 m de PVC de 2"	pieza	2.00	\$200.00	\$400.00

Pegamento para tubo de PVC de 118 ml	pieza	1.00	\$48.00	\$48.00
Mano de obra				
Albañil	Jornada	1.00	\$300.00	\$300.00
Peón	Jornada	1.00	\$240.00	\$240.00
Costo unitario por 4 m ² de construcción				\$1,385.25

Torre para aguas grises				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Postes de madera	pieza	4.00	\$50.00	\$200.00
Malla sombra	metro	3.00	\$97.50	\$292.50
Grava gruesa	Kg	40.00	\$0.24	\$9.60
Peón	Jornada	1.00	\$240.00	\$240.00
			Costo aproximado por unidad	\$742.10

Filtro anaerobio de flujo ascendente				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Elaboración de la estructura y repello				
Bulto de cal de 25 kg	Kg	25.00	\$1.88	\$47.00
Lata de arena	Lata	5.00	\$15.00	\$75.00
Bulto de cemento de 50 kg	Kg	12.50	\$3.30	\$41.25
Blocks	pieza	40.00	\$4.70	\$188.00
Medio filtrante y accesorios del filtro anaerobio				
Lona de grava gruesa	Kg	80.00	\$0.24	\$19.00
Lona de grava mediana	Kg	60.00	\$0.32	\$18.96
Lona de gravilla	Kg	40.00	\$0.75	\$30.00
Tubos "t" de PVC de 2"	pieza	2.00	\$8.00	\$16.00
Tramo de 3 m de PVC de 2"	pieza	1.00	\$200.00	\$200.00
Tramo de 3 m de CPVC de 1"	pieza	1.00	\$198.00	\$198.00
Pegamento para tubo de PVC de 118 ml	pieza	1.00	\$48.00	\$48.00
Mano de obra				
Albañil	Jornada	1.00	\$300.00	\$300.00
Peón	Jornada	1.00	\$240.00	\$240.00
Costo unitario por 4 m ² de construcción				\$1,421.21

Tanque séptico				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Elaboración de la estructura y repello				
Bulto de cal de 25 kg	Kg	25.00	\$1.88	\$47.00
Lata de arena	Lata	5.00	\$15.00	\$75.00
Bulto de cemento de 50 kg	Kg	12.50	\$3.30	\$41.25
Blocks	pieza	40.00	\$4.70	\$188.00
Codos de PVC para tubo de 2"	pieza	2.00	\$8.00	\$16.00
Tramo de 3 m de PVC de 2"	pieza	1.00	\$200.00	\$200.00
Pegamento para tubo de PVC de 118 ml	pieza	1.00	\$48.00	\$48.00
Mano de obra				
Albañil	Jornada	2.00	\$300.00	\$600.00
Peón	Jornada	2.00	\$240.00	\$480.00
			Costo unitario por 4 m ² de construcción	\$1,695.25

Bibliografía

- Alianza por el Agua (2008). *Monográficos agua en Centroamérica: manual de depuración de aguas residuales urbanas*. CENTA. España. 261 p.
- Alvarado, E. L. (2010). *Agua: efectos provocados por las actividades antropogénicas en la microcuenca del río Pixquiac*. Universidad Veracruzana, Xalapa.
- Anaya, M. & Rivera, D. (1999). *Memorias de la VI Reunión Nacional sobre sistemas de captación de agua de lluvia (25 al 28 de octubre de 1999)*. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Edo. De México. ISBN: 968-6201-48-3.
- Báez C. (2016). Desarrollan sistema de tratamiento de aguas residuales para pequeñas comunidades. Consultado el 26 de noviembre de 2016 en: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/9346-desarrollan-sistema-de-tratamiento-de-aguas-residuales-para-pequenas-comunidades>
- Baskar, G., Deeptha, V. T., & Abdul Rahaman, A. (2009). Root zone technology for campus waste water treatment. *Journal of Environmental Research and Development*, 3(3), 11.
- Bernal D., Cardona D., Galvis A. & Peña M. (2004). Guía de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad del Valle. Colombia.
- Brindis, A. (2016). *Gestión del recurso hídrico del manantial Ojo de Agua que realiza CMAS en Zoncuantla, Coatepec, Veracruz*. Trabajo recepcional. Universidad Veracruzana. Veracruz. 117 p.
- Castañeda A. & Flores H. (2013). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas de los Altos de Jalisco, México. *Revista de Tecnología y Sociedad*. Año 3. Número 5. México.

- Castañeda, A.A. & Flores, H.E. (2013). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México*. Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad (5), 13.
- CNA. (2007). *Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Comisión Nacional del Agua
- Colli, J. (2000). *Paquetes tecnológicos para el tratamiento de excretas y aguas residuales en comunidades rurales. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. (Vol. 2). Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Colorado, S.L. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de aprovechamiento de agua de lluvia y de reutilización de aguas grises a nivel vivienda en la ciudad de Xalapa, Veracruz*. Trabajo recepcional. Universidad Veracruzana. Veracruz. 111 p.
- Comisión Nacional del Agua (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: datos básicos*. México. ISBN: 978-968-817-880-5.
- Comisión Nacional del Agua (2014). *Inventario Nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Diciembre 2014*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Subdirección General de Agua Potable. Drenaje y Saneamiento. México. 308 p.
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. México: CONAGUA-SEMARNAT.
- CONAGUA. (2015). *Estadísticas del agua en México, edición 2015*. México: CONAGUA-SEMARNAT.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana.
- Crites, R.W., Middlebrooks, J. & Reed S.C. (2006). *Natural wastewater treatment systems*. Taylor & Francis Group. Florida. ISBN: 0-8493-3804-2. 546 p.

- De la Peña, M.E., Ducci, J. & Zamora, V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. Nota técnica # IDB-TN-521. Banco Interamericano de Desarrollo. México. 42 p.
- Díaz E., Alvarado A. & Camacho K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera. Vol. 14. Número 1. Pp. 78-97. México.
- Domínguez J. (2008). *Cobertura del servicio público de agua en el Estado de Veracruz*. El Colegio de México. México. 184 p.
- Domínguez J. (2010). El acceso al agua y saneamiento: un problema de capacidad institucional local. Análisis en el estado de Veracruz. Gestión y Política Pública. Vol. 19. Número 2. México.
- Eklund, O.C. & Tegelberg, L. (2010). *Small-scale systems for greywater reuse and disposal: a case of study in Ouagadougou*. Sveriges lantbruksuniversitet. 152 p.
- Enciclopedia Medioambiental. (2015). Dinamica e importancia del agua. Recuperado el 21 de marzo de 2017, a partir de http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/Dinamica_importancia_del_agua.asp#
- Esponda A. (2001). Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Ferrer, G., & Ballester, A. (2015). La importancia social del agua: intereses y valores en juego. Recuperado a partir de <http://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/agua-y-sociedad/la-importancia-social-del-agua>
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., (2015). *Agua y Medio Ambiente: Un prontuario para la toma de Decisiones*. FCEA.

- Goel, P.K. (2006). *Water pollution: causes, effects and control*. New Age International. United States. 418 p.
- Gutiérrez, T. (2015). *Agua y medioambiente, un prontuario para la correcta toma de decisiones*. México: Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental.
- Henry, G., & Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental* (Segunda). México: Prentice Hall.
- Hernández, M.E. (2016). *Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México*. Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable. El Colegio de Veracruz. Vol. 1 (2). Pp. 01-12.
- Houbron Eric (2010) Calidad del agua, En: Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz ; E. Florescano, J. O. Escamilla, coordinadores. México : Gobierno del Estado de Veracruz : Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana : Universidad Veracruzana, 2010. 3era ed, vol. 1, cap 6, p. 147-159 . ISBN 9786079513160rr
- INEGI. *Censo de Población y Vivienda 2010*. Principales resultados por localidad (ITER).
- International Water and Sanitation Centre (2013). *Greywater reuse interventions: keyhole and vertical gardens*. Recuperado el 20 de mayo de 2017, a partir de: <http://www.irc.nl/>
- Jiménez B. (2008). Calidad del agua en México: principales retos. ANEAS. México.
- Jiménez, B.E. (2007). *Información y calidad del agua en México*. Trayectorias. Vol. IX. No. 24. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León. Pp. 45-56.
- Kalpna, K.T., Avinash, B. & Shailbala, S.B. (2014). *Wastewater treatment through root zone technology with special reference to Shahpura Lake of Bhopal (M.P.), India*. International Journal of Applied Science and Engineering. 12, 3. Pp. 169-175.

- Kulabako, N.R., Ssonko, N.K.M & Kinobe, J. (2011). *Greywater Characteristics and Reuse in Tower Gardens in Peri-Urban Areas – Experiences of Kawaala, Kampala, Uganda*. The Open Environmental Engineering Journal. Vol. 4. Pp. 147-154
- Mahmood, Q., Pervez, A., Zeb, B.S., Zaffar, H., Yaqoob, H., Waseem, M., Zahidullah & Afsheen S. (2013). *Natural treatment systems and sustainable ecotechnologies for the developing countries*. Biomed Research International. Hindawi Publishing Corporation.
- Menchaca S., Alvarado E., Zapata K. & Uscanga L. (2014). Riesgo: Antropización de los Servicios Ambientales, Amenaza por Contaminación del Agua y Vulnerabilidad en la Microcuenca del Río Pixquiac, Veracruz, México. Memorias. En: Congreso Internacional de Investigación en Ciencias y Sustentabilidad de Academia Journals. Tuxpan, Veracruz, 28 a 30 de mayo, 2014. Memorias publicadas, (ISBN 978-1-939982-04-9), (ISBN978-1-939982-05-6) y (ISSN 2169-6152).
- Menchaca, M. del S. & Brindis, A. (2016). *Opinión y percepción local sobre la disponibilidad del agua y su gestión en Zoncuantla, municipio de Coatepec, Veracruz, México*. UVserva. No. 2. Veracruz. Pp. 2-10.
- Menchaca, M. del S. (2016). *Cultura del agua para la gobernanza en la gestión integral de los recursos hídricos*. México.
- Menchaca, S., Alvarado, E., Zapata, K. & Pérez, M. (2015). Construcción del riesgo por contaminación del agua y el principio de precaución. En Derecho y gestión del agua. México: Ubijus Editorial.
- Méndez, A.S. (2014). *Uso de plantas ornamentales en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Tesis de Maestría. El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas. 58 p.
- Metcalf, & Eddy. (1994). *Ingeniería sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales* (Tercera). Colombia: Grupo Editor Quinto.

- Morató J., Subirana A., Gris A., Carneiro A. & Pastor R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. Vol. 3. Número 1. España.
- Morel, A., & Diener, S. (2006). *Greywater management in low and middle-income countries, review of different treatment systems for household or neighbourhoods*. Dübendorf: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- Moreno L. (2003). La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Instituto Geológico y Minero de España. 168 p. España.
- Muñoz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Monografía. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. 305 p.
- National Geographic (2017). *Water pollution*. Recuperado el 21 de marzo de 2017, a partir de: <http://www.nationalgeographic.com/environment/freshwater/pollution/>
- Navarro, J. D. (2008). *Diseño, construcción y evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la lavandería y del casino en el campamento Payoa de Petrosantander (Colombia), Inc*. Universidad Industrial de Santander, Santander.
- Newman, M. (2006). Agua para uso doméstico. Estados Unidos: The University of Sheffield. Recuperado a partir de www.worldmapper.org
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Diario Oficial de la Federación, México, 6 de enero de 1997.
- NOM-006-CONAGUA-1997. Diario Oficial de la Federación, México, 29 de enero de 1999.
- Noyola A. (2004). Tendencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica. Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad del Valle. Colombia.

- Olguín, E.J., González, R.E., Sánchez, G., Zamora, J.E. & Owen T. (2010). *Contaminación de ríos urbanos: El caso de la subcuenca del río Sordo en Xalapa, Veracruz, México*. Revista Latinoamericana en Biotecnología Ambiental Algal. 1 (2). Pp. 178-190.
- Ordoñez, J. J. (2011). *Cartilla técnica: ciclo hidrológico* (Primera). Lima: Sociedad Geográfica de Lima.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Lima. Perú. 42 p.
- Paré L. (2009). *Conflictos sociales en torno al agua en Veracruz*. La palabra y el hombre. Pp. 32-37.
- Pérez, A.V. (2010). *Selección de sistema de tratamiento de aguas residuales para la localidad de Santa Bárbara usando Metodología de Decisión Multicriterio AHP*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Pérez, F.E. & Camacho, K.L. (2011). *Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas*. Tesina de Licenciatura. Universidad Veracruzana. Veracruz. 77 p.
- PNUMA, ERCE & UNESCO (2006). *El agua en México: lo que todas y todos debemos saber*. México. 96 p.
- Rodríguez, A. & Cárdenas, J. (2014). *El uso de humedales artificiales en la depuración de aguas residuales. Diseño y construcción de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas y pluviales*. Editorial Académica Española. Alemania. 199 p.
- Romero M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional Contaminación Ambiental. Vol. 25. Número 3. México.
- Romero, M., Colín, A., Sánchez, E. & Ortiz, M.L. (2009). *Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, vol.25, no.3. México.

- Rose, G.D. (1999). *Community-based technologies for domestic wastewater treatment and reuse: options for urban agricultura*. International Development Research Centre. 83 p.
- Rozkosný, M., Kriska, M., Sálek, J., Bodík, I., & Istenic, D. (2014). *Natural technologies of wastewater treatment*. Global Water Partnership.
- Secretariado Alianza por el Agua (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Monográficos agua en Centroamérica. Ideasameres. 264 p.
- Seoánez, M. (2005). *Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo*. Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 84-8476-226-2. Madrid. 463 p.
- Soares, D., Vargas, S., & Nuño, M. R. (Eds.). (2008). *La gestión de los recursos hídricos: realidades y perspectivas* (Vol. 1). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM) (2009). *Concept introduction*. Recuperado el 20 de mayo de 2017, a partir de: <http://www.sswm.info/>
- Toledo, A. (2006). *Agua, hombre y paisaje*. México: INE-SEMARNAT.
- UNESCO (2016). Informe de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. UN-Water. Francia.
- UN-HABITAT. (2003). *Water and sanitation in the world's cities, local action for global goals*. Virginia, Estados Unidos: Earthscan.
- Universidad Técnica Particular de Loja (2010). Guía para la selección de tecnologías de depuración de aguas residuales por métodos naturales. 227 p. Ecuador.
- UN-Water (2011). *Policy Brief: Water quality*. United Nations.
- Uscanga, L.A. (2014). *Análisis del factor antrópico, calidad del agua y salud en la microcuenca del río Pixquiac, Veracruz*. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana. Veracruz. 214 p.

- Vidriales G., Fuentes T., García I., Paré L. & Gerez P. (2011). Cogestión de la cuenca del río Pixquiac. México.
- Villegas M. & Vidal E. (2009). Gestión de los procesos de descontaminación de aguas residuales domésticas de tipo rural en Colombia. 1983-2009. Monografía. Universidad de Antioquia. Colombia.
- Vörösmarty, C., McIntyre, P., Gessner, M., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S., Sullivan, C., Liermann, C. & Davies, P. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555-561.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2017. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París, UNESCO.
- WWF (2017). *Water pollution*. Recuperado el 21 de marzo de 2017, a partir de: http://wwf.panda.org/about_our_earth/teacher_resources/webfieldtrips/water_pollution/
- Zurita, F., Castellanos, O.A. & Rodríguez, A. (2011). *El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 2. No. 1. México.