

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de la calidad de las aguas
grises tratadas en filtros de separación
por densidad y materiales de origen
pétreo, elaborados parcialmente con
elementos reutilizados, en comunidades
indígenas rurales de la cuenca
hidrológica de San Cristóbal de Las
Casas, Chiapas**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

José Julián Díaz Constantino

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., noviembre de 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A Beatriz, mi madre, porqué lo ha dado todo para ver a sus hijos crecer, por su infinita abnegación, por el inmenso amor que me ha otorgado, cuando muchas veces no lo he merecido, por todo su apoyo a lo largo de este camino, y por mucho más, este logro es tanto tuyo como mío. To amo madre, lo lograste.

A Manuel, mi padre, que ha sido mi mejor amigo a lo largo de este camino llamado vida, porque me ha orientado y he encontrado una conexión con él como con nadie. Por sus enseñanzas y por su amor, muchas gracias.

A mis hermanos, Beatriz y Manuel, que han sido otros padres para mí, porqué siempre he sentido a través del tiempo y la distancia el amor que me tienen y el apoyo que tengo en ellos. Porqué me han amado como nadie y porqué son el más grande ejemplo a seguir, esto también es de ustedes.

A Romina y Bruno, por ser las personitas que más amo y que son el amor más puro e incondicional que tengo.

A Liliana Betanzos, por ser una cuñada excepcional, por apoyarme tanto y estar para mí, por escucharme y por ser la mejor mamá para mis sobrinos.

A mi abuelita Lily que me ha acompañado en el proceso de esta tesis, nutriéndome con amor y alimentos, cada día que la visité.

A mis abuelos que ya no están, pero que les debo tanto, un hogar, una familia, una identidad.

A mi tía Miroslava, porque he tenido la fortuna de tener varias madres, mujeres que siempre se han preocupado en que yo logre mis sueños y objetivos.

A Dios, porqué sé que hay algo superior que me ha bendecido infinitamente.

A mis primos Nesthor y Juan Manuel, que han sido aliados en este proceso, porque sin su apoyo hubiera sido muy complicado culminar esto.

A mis primos Juan Maya, César y Miguel por ser mis primeros amigos y compañeros de futbol, algo que atesoro tanto.

A mis mejores amigos, Fabio, Diego, Menona, Diego Puerto, Edgar, Desta, Bryan, Cabra, Pako Rojas, Pepe Toño, Hiram y Martín porqué me han aceptado como soy y me han impulsado siempre y han hecho la vida mucho más amena. Porqué me siento muy bendecido de tenerlos por amigos, y de contar con ellos, este logro va para la JK.

A Don Alex y Doña Keny, por el apoyo y cariño inmerecido, por su gran amistad.

A mi tía Gloria, por impulsarme y siempre estar al pendiente del avance de mi tesis.

A Cynthia, por haber sido mi compañera gran parte de este camino, por estar conmigo en éxitos y fracasos, y por haber contado con su apoyo y amor por 4 largos años.

A Natzeli, por volver a mi vida como la mejor amiga que podría tener.

A mis roomies, Fer, Archi, Alex y Arti, que se volvieron mi familia por 4 largos años. Porque ellos estuvieron ahí en los momentos más felices y oscuros de la carrera, nunca los olvidaré.

A Fer, Sebastián y Yektly, por ser los mejores amigos que la carrera me pudo dar.

Al R, por ser tan buena persona y apoyarme cada vez que lo necesité, "larga vida a la comuna".

A mi tía Lupita, por abrirme las puertas de su casa cuando lo necesité y permitirme terminar mis estudios ahí.

A Ixzel, por su enorme amistad y cariño, y por apoyarme en un momento complicado de la carrera y convertirse en sinónimo de aventuras y diversión.

A Rox, por alentarme y leer y aconsejar sobre mi tesis y compartirme de sus conocimientos y por la gran amistad que hemos forjado.

A Andrea por su amistad y abrirme las puertas de la organización donde aprendí tanto.

A Mercedes por las incansables jornadas de trabajo juntos en donde aprendí mucho.

A Ciudadanos por la Acción Territorial en el Valle de Jovel, por su idealismo, activismo, compromiso y convicciones.

Al M. en C. Héctor Castelán por su disposición y apoyo para realizar los análisis.

A mi asesor, el M.I. Rodrigo Sepúlveda, por su gran guía y apoyo.

A la Facultad de Ingeniería, por volverse mi casa 6 gratificantes años

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por lo que representa para tantos jóvenes, un semillero de sueños, una gran casa del conocimiento. Por haberme dado tanto por tan poco a cambio. Por darme esta gran herramienta para afrontar de mejor manera la vida, gracias infinitas.

A todas las personas que han estado a lo largo de mi vida y me han enseñado y he compartido algo, y ayudaron en la formación de la persona que soy hoy en día, gracias.

<<POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU>>

Índice

Introducción.....	6
Objetivo general	8
Objetivos específicos.....	8
Justificación	8
Hipótesis.....	9
Alcances	9
1. Usos y tratamiento de agua.....	11
1.1 El agua.....	11
1.2 El ciclo hidrológico	11
1.3 El uso y consumo del agua.....	13
1.4 Aguas grises	15
Composición de las aguas grises.....	16
Aguas grises utilizadas en agricultura.....	22
Tratamiento de aguas grises domésticas.....	24
Sistemas de tratamiento de aguas grises	25
1.5 Fundamentos de filtración como operación unitaria.....	33
Mecanismo de la filtración.....	34
Mecanismos de transporte	35
Cinética de la filtración	36
Balance de masas	36
Filtración lenta con arena	37
Características del medio filtrante.....	40
Tipo del medio filtrante.....	40
Granulometría del medio filtrante	41
Peso específico del material filtrante.....	42
1.6 Calidad del agua	42
1.7 Normatividad sobre calidad del agua en México	43
2. Aspectos generales de la cuenca hidrológica de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas	46
2.1 Concepto de cuenca	46
2.2 Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica de San Cristóbal de Las Casas	46
2.3 Hidrología superficial de la cuenca	48

2.4 Balance hídrico en la cuenca	49
Probables efectos del cambio climático en el balance hídrico de la CHSCLC....	52
2.5 Situación, distribución y acceso al agua en la cuenca	53
2.6 Caracterización socioeconómica de la cuenca	57
3. Metodología en la fabricación y colocación de los filtros de separación por densidad y de materiales de origen pétreo	63
3.1 Características de los hogares rurales beneficiarios de los proyectos	64
3.3 Concepción de los filtros	71
3.4 Elaboración de los filtros	73
3.5 Funcionamiento de los filtros	80
3.6 Estado actual de los filtros	82
4. Resultados	87
4.1 Generalidades de los análisis de calidad de las aguas grises crudas y tratadas	87
4.2 Filtros seleccionados y especificaciones de la toma de muestras.....	89
4.3 Presentación de los resultados de los análisis.....	97
Análisis de los resultados y comparativa con la NOM-001-SEMARNAT-1996...	106
5. Conclusiones y recomendaciones	125
Anexos	127
Bibliografía.....	133

Índice de figuras

Figura 1.1 Ciclo hidrológico y balance de agua (Tarbuck & Lutgens, 2005)	13
Figura 1.2 Esquema de la determinación de los sólidos en el agua (Aznar, 2000)	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1.3. Diagrama de oxígeno disuelto en función de la temperatura en el agua (Aznar, 2000).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1.4 Gráfica de la curva característica de la demanda bioquímica de oxígeno en el agua (Aznar, 2000).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1.5 Diagrama del sistema básico de dos estaciones con filtro (Li et al, 2010)	27
Figura 1.6 Esquema del sistema de aeración y desinfección con H ₂ O ₂ (Teh et al, 2012).....	29
Figura 1.7 Esquema del sistema de filtros de arena (izq.) y carbón activado (der.) descrito en Zipf et al (2016) (Medidas en m) (Elaboración propia, 2019).....	31
Figura 1.8 Elemento de lecho filtrante (Maldonado, 2004).....	36
Figura 1.9 Variación de la carga hidráulica en función de L y t en un lecho filtrante (Maldonado, 2004)	39
Figura 2.1 Macro y microlocalización de la cuenca hidrográfica de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas (CONAGUA, 2014).....	47
Figura 2.2 Altitudes y parteaguas de la cuenca hidrológica de SCLC, Chiapas (Santiago et al. 2016).....	48
Figura 2.3 Hidrología superficial de la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas (Bencala et al., 2006)	49
Figura 2.4 Ubicación geográfica de Joltojtk (pueblosamérica.com, 2019).....	60
Figura 2.5 Ubicación geográfica de San José Buenavista (pueblosamerica.com, 2019).....	61
Figura 2.6 Ubicación de El Pinar (pueblosamérica.com, 2019).....	62
Figura 3.1 Cocina de hogar beneficiario, comunidad Joltojtk, municipio de Chamula (Elaboración propia, 2019).....	64
Figura 3.2 Carpintería en vivienda beneficiaria, comunidad Agua de Pajarito, municipio de SCLC (Elaboración propia, 2019).....	65
Figura 3.3 Hortaliza doméstica, comunidad El Pinar, municipio de SCLC (Elaboración propia, 2019).....	65
Figura 3.4 Intento de tratamiento de aguas en la comunidad de Joltojtk, municipio de Chamula (Elaboración propia, 2019).....	66
Figura 3.5 Tanque de almacenamiento para reúso de las aguas grises, Joltojtk, municipio de Chamula (Elaboración propia, 2019).....	67
Figura 3.6 Toma de agua en la comunidad Agua de Pajarito (Elaboración propia, 2019)	67
Figura 3.7 Gráfico de los porcentajes de agua utilizada que representa cada actividad doméstica en SJB (Elaboración propia, 2019)	69
Figura 3.8 Gráfico de los porcentajes de agua utilizada que representa cada actividad doméstica en El Pinar (Elaboración propia, 2019)	70

Figura 3.9 Gráfico de los porcentajes de agua utilizada que representa cada actividad doméstica en Joltojtik (Elaboración propia, 2019).....	71
Figura 3.10 Tambo utilizado de PEAD de 140 litros (Elaboración propia, 2019)...	72
Figura 3.11 Boceto del sistema de filtros (medidas en m, a menos que se indique otra unidad) (Elaboración propia, 2019)	73
Figura 3.12 Tambo con tapa (Elaboración propia, 2019)	74
Figura 3.13 Tambo con tapa removida (Elaboración propia, 2019).....	74
Figura 3.14 Tambo perforado con brida (Elaboración propia, 2019).....	75
Figura 3.15 Tambo con t y tubos de CPC para separación por densidad (Elaboración propia, 2019)	76
Figura 3.16 Estructura en forma de <<U>> de tubos de CPVC (Elaboración propia, 2019)	76
Figura 3.17 Perforación de orificios en la estructura con forma de <<U>> (Elaboración propia, 2019)	77
Figura 3.18 Batea situación inicial (Elaboración propia, 2019).....	77
Figura 3.19 Batea con céspol y primer tambo (Elaboración propia, 2019).....	78
Figura 3.20 Roca para base del filtro de agregados (Elaboración propia, 2019)...	78
Figura 3.21 Estructura en forma de u posada sobre la capa de rocas (Elaboración propia, 2019)	78
Figura 3.22 Segunda capa de grava con malla mosquitera (Elaboración propia, 2019)	79
Figura 3.23 Grava cribada para segunda capa (Elaboración propia, 2019)	79
Figura 3.24 Segundo y tercer filtro instalados (Elaboración propia, 2019)	79
Figura 3.25 Césped instalado con primer filtro (Elaboración propia, 2019)	79
Figura 3.26 Sistema completo instalado en vivienda de la comunidad Joltojtik, municipio de Chamula (Elaboración propia, 2019).....	80
Figura 3.27 Sistema de tubo para fregadero y céspol en batea exterior de vivienda beneficiada (Elaboración propia, 2019).....	81
Figura 3.28 Diagrama de primer y segundo filtro (Elaboración propia, 2019)	82
Figura 3.29 Filtro de aguas grises de Don César (Elaboración propia, 2019)	84
Figura 3.30 Estado del filtro de aguas grises de Don José (Elaboración propia, 2019)	85
Figura 3.31 Filtro de aguas grises de Don Tumín (Elaboración propia, 2019)	85
Figura 3.32 Reservorio de aguas grises tratadas del filtro de Don César (elaboración propia, 2019)	86
Figura 4.1 Muestra etiquetada (Elaboración propia, 2019)	90
Figura 4.2 Muestras de aguas grises crudas y tratadas etiquetadas del filtro de Don César (Elaboración propia, 2019)	91
Figura 4.3 Comparativa visual agua cruda (izq.) agua tratada (Der.) del filtro de Don César (Elaboración propia, 2019)	92
Figura 4.4 Toma de muestras de agua tratada del filtro de Don Tumín (Elaboración propia, 2019)	93

Figura 4.5 Muestras de aguas grises crudas etiquetadas del filtro de Don Tumín (Elaboración propia, 2019)	93
Figura 4.6 Comparativa visual entre el agua cruda (Izq.) y el agua tratada (Der.) del filtro de Don Tumín (Elaboración propia, 2019)	94
Figura 4.7 Toma de muestras de agua tratada del filtro de Don José (Elaboración propia, 2019)	95
Figura 4.8 Muestras de aguas grises crudas etiquetadas del filtro de Don José (Elaboración propia, 2019)	96
Figura 4.9 Muestras de aguas grises crudas etiquetadas del filtro de Don José (Elaboración propia, 2019)	96
Figura 4.10 Comparativa visual entre el agua cruda (izq.) y el agua tratada (Der.) del filtro de Don José (Elaboración propia, 2019).....	97
Figura 4.11 Gráfico de valores paramétricos bacteriológicos del filtro de Don César (Análisis Cántaro Azul, 2019)	107
Figura 4.12 Gráfico de valores paramétricos físico-químicos de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don César (Análisis Cántaro Azul, 2019)	109
Figura 4.13 Gráfico de valores paramétricos de turbidez y color de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don César (Análisis Cántaro Azul, 2019) ..	110
Figura 4.14 Gráfico de valores paramétricos DBO y DQO de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don César (Análisis Cántaro Azul, 2019)	110
Figura 4.15 Gráfico de valores paramétricos bacteriológicos del filtro de Don Tumín (Análisis Cántaro Azul, 2019)	111
Figura 4.16 Gráfico de los valores paramétricos de turbidez y color de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don Tumín (Análisis Cántaro Azul, 2019) ..	113
Figura 4.17 Gráfico de los valores paramétricos físico-químicos de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don Tumín (Análisis Cántaro Azul, 2019) ..	114
Figura 4.18 Gráfico de los valores paramétricos DBO y DQO de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don Tumín (Análisis Cántaro Azul, 2019)	115
Figura 4.19 Gráfico de los valores paramétricos bacteriológicos del filtro de Don José (Análisis Cántaro Azul, 2019)	116
Figura 4.20 Gráfico de los valores paramétricos físico-químicos de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don José (Análisis Cántaro Azul, 2019)	118
Figura 4.21 Gráfico de los valores paramétricos DBO y DQO de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don José (Análisis Cántaro Azul, 2019)	119
Figura 4.22 Gráfico de los valores paramétricos de turbidez y color de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don José (Análisis Cántaro Azul, 2019)	119
Figura 4.23 Gráfico de la comparativa de los porcentajes de remoción de los tres filtros de aguas grises estudiados (Análisis Cántaro Azul, 2019)	121

Índice de tablas

Tabla 1.1 Consumo típico de agua en pequeñas comunidades.....	15
Tabla 1.2 Comparación de características de calidad en las aguas grises	18
Tabla 1.3 Comparación de características de calidad en las aguas grises en muestreos de diferentes países	19
Tabla 1.4 Resultados de los análisis de características de calidad en las aguas grises en 3 viviendas de Bogotá.....	20
Tabla 1.5 Resultados del estudio de biorremediación con <i>Chlorella Variabilis</i>	26
Tabla 1.6 Comparación de características de calidad en las aguas grises	32
Tabla 1.7 Comparación de remoción de contaminantes en las aguas grises	32
Tabla 1.8 Tabla de la capacidad de remoción de los filtros lentos de arena	39
Tabla 1.9 Peso específico de materiales filtrantes comunes.....	42
Tabla 1.10 Límites permisibles de contaminación por patógenos en agua para uso en riego agrícola.....	44
Tabla 1.11 Límites permisibles de contaminantes básicos para uso en riego agrícola	45
Tabla 1.12 Límites permisibles para metales pesados y cianuros en agua para uso en riego agrícola.....	45
Tabla 2.1 Estadísticas de acceso al servicio de agua en municipios de la CHSCLC	49
Tabla 2.2 Estadísticas de drenaje en municipios de la CHSCLC	56
Tabla 2.3 Indicadores de carencias en viviendas de municipios de la CHSCLC ..	58
Tabla 3.1 Uso semanal estimado en los hogares beneficiados.....	67
Tabla 3.2 Volumen utilizado diario aproximado del total de la vivienda y del volumen por persona.....	69
Tabla 4.1 Resultados bacteriológicos de las aguas grises crudas del filtro de Don César.....	98
Tabla 4.2 Resultados físico-químicos de las aguas grises crudas del filtro de Don César.....	99
Tabla 4.3 Resultados bacteriológicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don César.....	100
Tabla 4.4 Resultados físico-químicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don César.....	101
Tabla 4.5 Resultados bacteriológicos de las aguas grises crudas del filtro de Don Tumín	102
Tabla 4.7 Resultados físico-químicos de las aguas grises crudas del filtro de Don Tumín	102
Tabla 4.8 Resultados físico-químicos aguas grises tratadas del filtro de Don Tumín	103
Tabla 4.9 Resultados bacteriológicos de las aguas grises crudas del filtro de Don José.....	104
Tabla 4.10 Resultados físico-químicos de las aguas grises crudas del filtro de Don José.....	104

Tabla 4.11 Resultados bacteriológicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don José	105
Tabla 4.12 Resultados físico-químicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don José	105
Tabla 4.13 Porcentaje de remoción de los parámetros de calidad del filtro de Don César.....	106
Tabla 4.14 Porcentaje de remoción de los parámetros de calidad del filtro de Don Tumín.....	121
Tabla 4.15 Porcentaje de remoción de los parámetros de calidad del filtro de Don José.....	115
Tabla 4.16 Comparativa de los resultados de los filtros analizados con la NOM-001-SEMARNAT-1996	122

Introducción

El desarrollo económico, el aumento de la población y la necesidad consecuente de producir mayor cantidad de alimentos, junto con la contaminación, el calentamiento global, entre otras, son circunstancias que están conduciendo a una era de escasez de los recursos hídricos (Salgot & Folch, 2003)(Finley, 2008).

La optimización de los recursos hídricos es ahora un tema prioritario para las naciones del mundo y debido a su creciente escasez, es uno de los retos actuales más significativos en materia de salud humana y cuidado del medio ambiente (Finley, 2008).

Es por ello que en familias indígenas rurales de la cuenca hidrológica de San Cristóbal de Las Casas, donde el uso diario de agua oscila entre los 80 y 140 litros por familia, correspondiéndole 20 litros aproximadamente a cada integrante (Schenerock, 2014), la reutilización de sus aguas residuales grises se presenta como una estrategia prometedora en su potencial utilidad para satisfacer las necesidades de agua dulce que no necesita ser potable, por ejemplo para la agricultura de baja escala o subsistencia (Rodda, Salukazana, Jackson, & Smith, 2011).

En la actualidad se están realizando acciones necesarias de los gobiernos en conjunto con organizaciones civiles para atender esta problemática que afecta sobre todo al grupo vulnerable de los pueblos indígenas rurales (Comité de Cuenca Valle de Jovel;, H. Ayuntamiento de San Cristóbal de Las Casas;, & CONAGUA, 2010). Es recomendable que las acciones tengan un enfoque sostenible, es decir soportable en lo ecológico, viable en lo económico y equitativo en lo social (SEMARNAT, 2018).

La presente tesis desarrolla un proyecto para el suministro agua a parcelas e invernaderos familiares de autoconstrucción, tratadas en filtros de separación de componentes por densidad y sedimentación complementado con un filtro de materiales de origen pétreo. Se lleva a cabo junto con los habitantes de las

comunidades con la capacitación, participación y supervisión de los integrantes de una asociación civil multidisciplinaria, denominada Ciudadanos por la Acción Territorial en la Cuenca del Valle de Jovel A.C. Todo con la misión de proveer a familias indígenas del vital líquido y su aprovechamiento en la explotación de sus tierras para el autoconsumo, para su empoderamiento y mejora en la calidad de vida, además de la posibilidad de obtener un beneficio económico a través de sus plantaciones.

En el capítulo 1 se da una revisión general al tema del agua, las aguas residuales en general, aguas residuales grises, el estado del arte en algunos procesos de tratamiento de estas, tanto experimentales como en operación, así como temas de la calidad del agua y la normativa nacional para los fines propuestos en el presente trabajo.

En el capítulo 2 se abordan conceptos generales del área de trabajo, la cual es la cuenca hidrológica de San Cristóbal de Las Casas en el estado de Chiapas en México. Se revisan estudios y tesis sobre el estado de la cuenca, tanto hídrico como ambiental y socioeconómico. Se da también una breve examinación a las comunidades beneficiarias de los proyectos.

En el capítulo 3 se repasa la metodología que se siguió para la elaboración del sistema de filtros y su posterior colocación en los lugares seleccionados, además de la revisión de las características generales de las viviendas que fueron beneficiadas por este proyecto.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de los análisis de calidad de agua que se le realizaron a las aguas residuales grises crudas y tratadas. También se comparan con la normativa oficial mexicana junto con un breve análisis del resultado de estos. Se explican las limitaciones que presentaron la aplicación de estos.

En el capítulo 5 se finaliza el trabajo con una serie de conclusiones y recomendaciones brindadas por el realizador de la presente tesis.

Objetivo general

Analizar el funcionamiento de un sistema de tratamiento doméstico de aguas grises.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el agua tratada por filtros de separación por densidad y sedimentación y materiales de origen pétreo en hogares rurales, para el reúso de las aguas grises.
2. Evaluar la calidad del agua tratada de los sistemas mencionados mediante comparación con normativa nacional.

Justificación

Garantizar a las comunidades rurales el acceso al agua, es una necesidad urgente que deben de atender los estados del mundo. Ningún ser humano debería de prescindir de lo estricto, mientras una cúpula económica vive con excesos superfluos.

El agua, es el elemento más esencial para la vida, se necesita para beber, para mantener la sanidad, para producir comida, para las plantas generadoras de energía hidroeléctrica, y para enfriar a las plantas termoeléctricas, nucleares, etcétera; también se necesita para preservar los servicios que proveen los ecosistemas (Madani, 2015). Es por ello, que toda investigación, proyecto social y de infraestructura para la optimización del uso del recurso y la justa distribución de este tienen una justificación inherente.

Los proyectos realizados por Ciudadanos por la Acción Territorial en la Cuenca del Valle de Jovel A.C., relacionados a cuestiones hídricas, en la cuenca del Valle de Jovel, ubicada en los Altos de Chiapas, tienen como misión *<<[...] trabajar de manera coordinada en la gestión y promoción del manejo integral de la cuenca del valle de Jovel, para garantizar que generaciones futuras disfruten de los recursos naturales y servicios ambientales que de ella provienen y conlleve a una mejor calidad de vida, para nosotros y nuestros hijos>>* (Comité de Cuenca Valle de Jovel, 2013).

Este trabajo de tesis propone y analiza un pequeño proyecto de infraestructura sanitaria que se realiza con miras a mejorar la calidad de vida de los habitantes de comunidades rurales de indígenas tsotsiles de los Altos de Chiapas, así como procurar que sean sostenibles, es decir, que además de ecológicos y económicos, tengan una larga vida útil y los pobladores sean capaces de darles el mantenimiento necesario, tanto preventivo como correctivo. Para que esto sea asequible, es necesario que los proyectos estén desarrollados formalmente, revisando la totalidad de la información disponible, para la correcta toma de decisiones y llevar a cabo una ejecución adecuada.

Hipótesis

Las aguas grises tratadas por medio de un sistema semicontinuo de filtros lentos de arena, de elaboración y mecanismo simple, lograrán una calidad de agua mejor, incluso apropiada para su reutilización en agricultura de baja escala, de acuerdo a la normativa oficial mexicana.

Las aguas grises tratadas son una opción viable para la optimización del uso de los recursos hídricos en lugares con problemas en la disponibilidad de agua para uso doméstico y agrícola.

Alcances

Este trabajo analiza un proyecto realizado por la asociación civil <<Ciudadanos por la acción territorial en la Cuenca del Valle de Jovel A.C.>> de acuerdo a los recursos económicos y disponibilidad de tiempo existente.

El proyecto consiste en un sistema de filtros domésticos instalado en distintos hogares rurales de la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, de los que se extraerán dos muestras de agua, una al principio del tren de tratamiento y otra al final de este, pudiendo ser extraídas del reservorio o de un efluente si fuera el caso, y a las cuales se le harán diversos análisis para determinar parámetros tales como: coliformes totales, coliformes fecales, pH, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, derivados del nitrógeno, sulfatos, fosfatos, arsénico, dureza, sólidos disueltos totales, salinidad y otros que en el momento de los análisis sean factibles. Estos parámetros darán una idea de su calidad antes y después del

tratamiento y permitirán hacer una comparativa con la normatividad oficial mexicana vigente, en lo que respecta al reúso en riego agrícola, sin que se garantice que se cumpla con tales límites permisibles.

No existe una solución integral para la disposición de los desechos originados en el tratamiento de las aguas grises.

La funcionalidad de los sistemas a través del tiempo, dependerá del mantenimiento que le realicen los usuarios, a partir de las recomendaciones que les sean otorgadas.

1. Usos y tratamiento de agua

1.1 El agua

El agua es el elemento más importante para el desarrollo de la vida; sin agua, este fenómeno tal y como se conoce no sería posible, pues no existe en el planeta líquido que sea más adecuado para los procesos bioquímicos de la vida conocida y se presente como tal en un rango de presiones y temperaturas apropiadas para estos (Armstrong, 1982). A la presión de 1 atmósfera, se le encuentra en estado líquido en el rango de temperaturas que va de 273.15 K (0 °C) a 373.15 K (100 °C) (Wolfram Alpha LCC, 2019).

Es el protagonista del ciclo hidrológico, uno de los ciclos más determinantes en el planeta, pues este movimiento perpetuo al que se somete, crea condiciones favorables para la formación de las características de la Tierra; la superficie de nuestro planeta, está formado aproximadamente en un 75 % de este compuesto, que se forma mediante enlaces covalentes, producto de la unión de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, generando una molécula muy estable, la cual se define como H₂O (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C., 2018).

La historia muestra como las grandes ciudades y civilizaciones florecieron en lugares cercanos a fuentes importantes de agua, tales como las cuencas de los ríos, lo cual favoreció el desarrollo de la agricultura. Es así también que, si el agua escasea, el desarrollo de esas áreas presenta dificultades. Es entonces evidente y comprobado, de forma empírica y científica lo imprescindible que resulta la disponibilidad de este recurso.

1.2 El ciclo hidrológico

El agua presenta una dinámica sinfín y continua, de la tierra firme a los océanos y viceversa. A esta se le encuentra en todos los rincones del planeta, desde océanos hasta el tejido vivo, pasando por ríos, lagos y el mismo aire de la atmósfera. Todo esto constituye a la hidrosfera. Cerca de un 97.2 por ciento la constituyen los océanos existentes, alrededor del 2.15 por ciento lo hacen los hielos polares y glaciares, mientras que el restante 0.65 se divide entre todos los demás cuerpos de agua, los cuales pueden ser lagos, ríos, agua subterránea y vapor de agua en la

atmósfera (además de diminutas gotas). El agua que se encuentra en cada uno de estos elementos no se mantiene así indefinidamente, pues cambia constantemente de un estado de la materia a otro, debido a la variación de temperaturas y presiones existentes en la superficie del planeta. Estos estados pueden ser sólido, líquido o gaseoso. Los seres vivos también utilizan el agua para vivir, es decir que en la dinámica constante del agua participan la atmósfera, la hidrósfera, la corteza terrestre y la biósfera. A esta circulación interminable del agua en los componentes de la Tierra se le denomina ciclo hidrológico (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La energía que proviene del Sol es el motor principal de este ciclo. Esta energía calorífica aumenta la temperatura de la superficie terrestre y produce la evaporación de todos los cuerpos de agua tanto naturales como artificiales; la biósfera también participa, y transpira agua, fenómeno que en su conjunto se denomina evapotranspiración. Estos gases y diminutas gotas de agua con menor densidad que el aire son elevadas por efectos de densidad y corrientes de aire ascendentes. Se condensan en la atmósfera en forma de nubes y posteriormente son arrastradas por más corrientes de aire a través de largas distancias, para que finalmente, bajo ciertas circunstancias y factores, se precipiten en forma líquida como lluvia, o sólida, en forma de nieve o granizo.

Es así como el agua vuelve a ser parte de la superficie, generando escorrentías que tienen como destino los almacenamientos iniciales. Durante este recorrido parte del líquido logra infiltrarse al subsuelo, formando enormes reservorios, llamados acuíferos o agua subterránea (Roque & Ochoa, 2018).

En el ciclo hidrológico parte del agua que se evapora cae en los mismos océanos, a diferencia de los continentes en donde la precipitación es mayor que el agua que se evapotranspira. Esto produce un déficit de precipitación en los océanos, mientras que en los continentes se presenta un superávit, el cuál regresa parcialmente al océano mediante la escorrentía. Este proceso se puede observar en la figura 1.1 (Lossio, 2012).

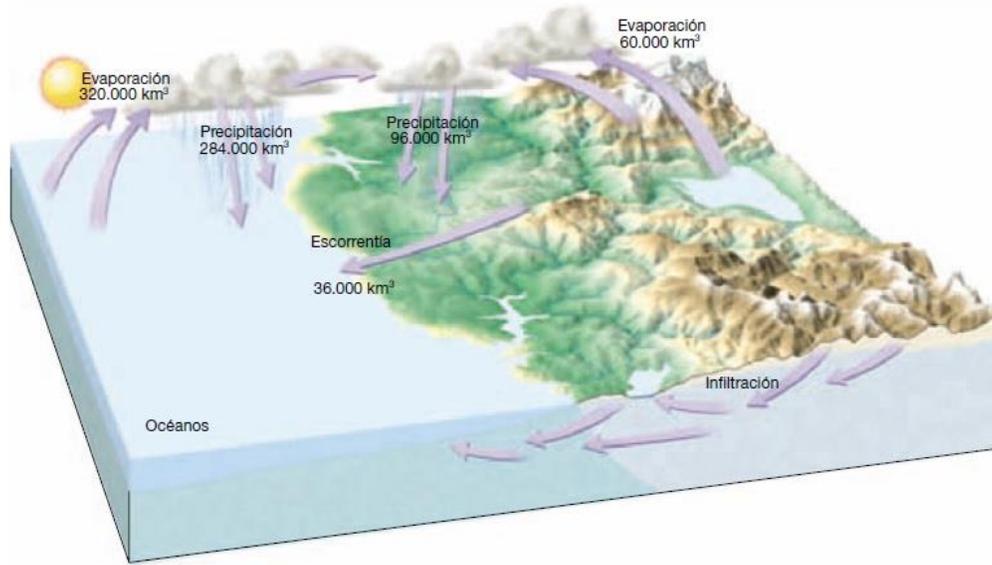


Figura 1.1 Ciclo hidrológico y balance de agua (Tarbuck & Lutgens, 2005)

1.3 El uso y consumo del agua

El uso del agua es primordial en la mayoría de las actividades humanas. Con ella se realizan las actividades individuales y colectivas más importantes, como son la hidratación, producción y preparación de los alimentos, limpieza e higiene personal, etcétera. Con el paso de la historia y el desarrollo de la tecnología y la evolución en el estilo de vida, el agua se comenzó a utilizar para diversos fines, tanto domésticos como comerciales, que eventualmente pasaron a ser industriales, lo que la convirtió en un recurso motor del sistema económico actual. Además, es ahora un recurso indispensable en la producción de energía eléctrica.

El clima y la carga de trabajo determinan en gran medida el consumo que el cuerpo humano necesita, el cual va de los 2 litros y puede elevarse hasta los 10 litros en casos extremos. El tipo y disponibilidad en el abastecimiento de agua hacen que la cantidad de agua usada para sus propósitos varíe ampliamente entre los grupos humanos. Otros factores, como los patrones y el nivel de vida, si es que tiene un costo monetario, la calidad de la misma y hábitos culturales también influyen directamente en su uso (Huisman, Azevedo, Sundaresan, Lanoix, & Hofkes, 1988).

Dos grandes categorías del tipo de uso del agua se han determinado y están estrechamente relacionados con su calidad:

- a) Uso consuntivo: Este es restrictivo, pues implica que, que el agua que ha sido empleada no puede utilizarse de la misma manera o para el mismo fin pues su calidad ha variado. Esto sucede en los casos de la utilización en el consumo doméstico, minero y agropecuario.
- b) Uso no consuntivo: El recurso hídrico puede reutilizarse con el mismo propósito pues la calidad de este después del primer uso no es tan significativa. El agua como transporte, uso recreativo y generación de energía en centrales hidroeléctricas son los casos más representativos de este grupo.

En las zonas rurales los usos más comunes del agua son:

- a) Doméstico: Incluye el agua que se consume para hidratación del ser, cocina, limpieza de la vivienda, higiene personal y lavado de prendas de vestir.
- b) Agricultura: Riego de huertos y parcelas, de baja y mediana escala.
- c) Ganadería: Abrevadero del ganado en prácticas extensivas, como pequeños rebaños, parvadas de aves, y algunas veces pequeñas manadas de ganado vacuno (Lossio, 2012).

En la tabla 1.1 se muestran los consumos típicos teóricos de acuerdo con la literatura de Huisman et al, publicación del Centro Internacional de Agua y Saneamiento (IRC, por sus siglas en inglés), una ONG sin fines de lucro, nacida en 1968, por acuerdo de la Organización Mundial de la Salud y el Gobierno de los Países Bajos.

Si se considera el promedio de dotación para la clase popular en zona urbana de 140 litro/hab.-día, se aprecia el bajo consumo típico en comunidades rurales, que se estima en un uso máximo de 120 litros/hab.-día (Huisman et al, 1988).

Tabla 1.8 Consumo típico de agua en pequeñas comunidades

Uso típico del agua doméstica en pequeñas comunidades	
Tipo de abastecimiento de agua	Consumo típico de agua (litros/persona-día)
Punto de agua comunal (pozo de poblado, fuente pública)	
A distancia considerable (1 km)	7
A distancia media (0.5 - 1 km)	12
Pozo de poblado	
Distancia a pie (0.25 km)	20
Fuente pública comunal	
Distancia a pie (0.25 km)	30
Conexión de patio	
Grifo colocado en el patio	40
Conexión de casa	
Grifo simple	50
Grifo múltiple	120

(Huisman et al, 1988)

1.4 Aguas grises

Las aguas grises son las aguas residuales que provienen de fuentes tales como regaderas, lavamanos, lavadoras de ropa, lavaplatos y fregaderos de la cocina sin interacción con las aguas negras provenientes de los excusados. La literatura define dos tipos: aguas grises y aguas grises ligeras. Las aguas grises ligeras solo incluyen el agua originada en el lavabo de manos y la ducha (Oktor & Çelik, 2019).

La selección de las fuentes a incluir depende del balance entre el agua disponibles y el nivel de contaminación que posee, aunque esto puede ser bajo un criterio de apreciación. El uso más común en el reúso de estas aguas es el destinado a los excusados, que se ha calculado, reduce hasta en un 30 por ciento a la demanda de agua en viviendas (Jefferson, Palmer, Jeffrey, Stuetz, & Judd, 2004).

Las aguas grises variarán en su composición ampliamente dependiendo de los hábitos de los residentes del hogar. A pesar de ello, parte de la comunidad científica y compañías de tecnología sugieren que este tipo de agua residual podría ser tratada con tecnologías simples y ser reutilizada para las necesidades de agua que no requieran ser potables, como el agua para el excusado e irrigación de plantíos y jardines, ya que además contienen nutrientes valiosos para el crecimiento de las plantas, actuando como un excelente fertilizante para cultivos agrícolas. Entre los nutrientes que se pueden encontrar en estas son fósforo, nitrógeno y potasio, de igual manera calcio y magnesio, los cuales son vitales para la salud de plantas y del suelo. Esta ventaja podría significar un ahorro para pequeños granjeros o agricultores. Otra potencial ventaja para el ambiente, es que estos nutrientes son reusados y no depositados en otros cuerpos de agua, en donde se pueden convertir en contaminantes o generar otro tipo de contaminación, tal como la eutroficación (Finley, 2008).

Pese a que presenta posibles beneficios, es también cierto que contiene elementos peligrosos que pueden impactar de forma negativa al ambiente y a la salud pública. Las posibles implicaciones del uso de aguas residuales en irrigación agrícola han recibido mucha atención en los años recientes, debido a que existen ciertas preocupaciones asociadas al reúso de agua residual. Elementos que las componen tales como metales pesados, coliformes fecales y otras bacterias, así como elementos farmoquímicos que podrían ser transferidos al medio o a la cadena de alimentación (Finley, 2008).

Composición de las aguas grises

En el estudio <<Caracterización de las aguas grises y su impacto en la selección y operación de tecnologías para reúso urbano>> de la autoría Jefferson et al. (2004) realizado en el Reino Unido, citado previamente, se obtuvieron resultados similares de 102 fuentes recolectadas, en condiciones básicamente iguales, de regaderas, bañeras y lavabos de viviendas particulares, con parámetros tales como la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de 146±55, 129±57 y 155±49 mg/l respectivamente, con un 76 por ciento en el nivel de confianza en los

resultados. Por el contrario, una variación mucho mayor fue observada en términos de la fracción no biodegradable que es obtenida a partir de las concentraciones del parámetro de la demanda química de oxígeno (DQO) en las mismas fuentes, las cuales arrojaron valores tales como: 420 ± 245 , 367 ± 246 y 587 ± 379 mg/l, de forma correspondiente a las fuentes. Por lo tanto, la razón entre la DBO_5 y el DQO fue normalmente mayor en la bañera (0.34 ± 0.15), y las muestras de las regaderas (0.36 ± 0.13) comparado con las muestras recolectadas del lavamanos (0.28 ± 0.12). Esto al ser comparado con las aguas residuales domésticas típicas con valores de 0.45 ± 0.12 y para el efluente final valores que van de 0.1 a 0.333, indica que las aguas grises tienden a contener mayores cantidades de sustancias no biodegradables que las que típicamente presentan las aguas residuales domésticas que incluyen agua proveniente del excusado, esto originado probablemente por la concentración de surfactantes. Sin embargo, la faceta más importante en lo que a sus componentes biodegradables se refiere es en su desequilibrio entre nutrientes y la DQO. Las razones de DQO:N:P para la bañera, regadera y lavamanos fueron promediadas en valores de 100:2.25:0.06, 100:2.91:0.05 y 100:1.77:0.06 de forma respectiva. La literatura revisada en la elaboración de ese estudio señalaba razones entre 100:20:1 y 100:10:1, lo que indica la deficiencia en nitrógeno y fósforo en proporciones aproximadamente iguales. Los valores de los parámetros arriba mencionados se presentan en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Comparación de características de calidad en las aguas grises

Comparación de características de aguas grises					
Parámetros de calidad	Regadera	Bañera	Lavabo	Combinados	Suren et al. 1999
DBO₅ (ppm)	146 ± 55	129 ± 57	155 ± 49	146 ± 54.3	96 ± 103
DQO (ppm)	420 ± 245	367 ± 246	587 ± 379	451 ± 289	168 ± 91
Turbiedad (UNT)	84.8 ± 70.5	59.8 ± 43	164 ± 171	100.6 ± 109	57 ± 138
SS (ppm)	89 ± 11.3	58 ± 46	153 ± 226	100 ± 145	45 ± 66
Coliformes Fecales (ufc/100 ml)	6800 ± 9740	6350 ± 9710	9420 ± 10100	7387 ± 9759	5 200 000
E. coli (ufc/100 ml)	1490 ± 4940	82.7 ± 120	10 ± 8750	2022 ± 5956	
EF (ufc/100 ml)	2050 ± 4440	40.1 ± 48.6	1710 ± 5510	1740 ± 4488	479 ± 859
PO₄⁻ (ppm)	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.4	0.4 ± 0.3	0.35 ± 0.23	2.4 ± 0.7
pH	7.52 ± 0.28	7.57 ± 0.29	7.32 ± 0.27	7.47 ± 0.29	7.7 ± 0.4

(Jefferson et al, 2004)

Acorde al estudio de Jefferson et al. de 2004, las 5 principales conclusiones en la caracterización de las aguas grises son:

- Una alta variabilidad en la concentración orgánica que va de la equivalencia con un influente municipal mediano de aguas residuales hasta un efluente terciario.
- Una razón alta entre la DQO y la DBO
- Desequilibrio en macro y micronutrientes, dividido de forma igual entre nitrógeno y fósforo
- Una relación baja entre los sólidos suspendidos y la turbiedad, con la mayoría de las partículas en un rango que oscila entre 10 y 100 µm
- 3 unidades logarítmicas de coliformes fecales por cada 100 ml de agua gris, sin identificar patógenos conocidos

Otro documento, <<Caracterización y biodegradabilidad anaeróbica de aguas grises>> (Hernández, Temmink, Zeeman, & Buisman, 2011), recopila características de aguas grises a partir de un selecto número de estudios. Estos estudios reportaron valores para la demanda química de oxígeno en valores que van de los 171 a los 4770 mg/l. En los hoteles, generalmente las aguas grises son significativamente diluidas, debido probablemente a la gran cantidad de agua que utiliza cada usuario (En el continente europeo se estima que cada usuario gasta entre 170 y 360 litros de agua por noche de estancia). Mientras que valores altos de

la demanda química de oxígeno, tales como 1352 mg/l y 4770 mg/l, está relacionado con un bajo consumo de agua, debido en gran medida a la escasez, en locaciones tales como áreas rurales de Jordania o Sudáfrica. Un promedio en la razón entre el DBO₅:DQO de 0.45 ± 0.13, provee el indicador necesario para pensar en la potencial tratabilidad biológica aeróbica.

La razón DQO:N:P en aguas grises, es generalmente de 100:3.5 ± 1.3:1.6 ± 0.7, lo que indica una deficiencia de nitrógeno para tratamiento aeróbico, pero se ajusta perfectamente a los valores requeridos para tratamiento anaeróbico.

A continuación, en la tabla 1.3 se presentan el origen de las muestras de aguas grises y algunos de los valores de sus parámetros químicos y microbiológicos, recopiladas de diversos estudios realizados en varios países para determinar la composición de las mismas.

Tabla 1.3 Comparación de características de calidad en las aguas grises en muestreos de diferentes países

Características de aguas grises en diferentes locaciones. Los valores son presentados en mg/l a menos que se especifique otra cosa. SA = Surfactantes aniónicos, A = Alemania, S = Suecia, PB = Países Bajos, SAf = Sudáfrica, E = España, J = Jordania, IS = Israel, CR = Costa Rica						
Fuente de aguas grises	Muestreo	DQO	DBO ₅	N total	P total	SA
111 hogares, A	4 meses	258 - 354	-	9.7 - 16.6	5.2 - 9.6	-
37 hogares, S	2 meses, n = 8	361	-	18.1	3.9	-
150 hogares, PB	2 semanas, n = 104	425	215	17.2	5.7	-
81 habitaciones de hotel, E	1 año, n = 24	171	-	114	-	-
Granja de 6 personas, IS	9 meses, n = 72	686	270	14	18	40
1 Hogar, IS	1 año, n = 96	474	195	-	-	17
1 Hogar, IS	1 año, n = 96	200	62	-	-	3
13 familias, J	n = 6	1351	133	17	-	76
Pueblos pequeños, SAf	n = 100	4770	-	72	-	-
4 hogares, CR	1 year, n = 11	-	167	-	6.28	-

(Hernández et al, 2011)

El parámetro que más llama la atención, es el de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) encontrada en los 4 hogares de Costa Rica, pues es un país virtualmente comparable con el nuestro en cuanto a estilo de vida, características climatológicas, económicas, etcétera. El DBO₅ presenta un valor de 167 mg/l, el cual, comparado con los valores que muestra el estudio de Jefferson et al., alcanza valores similares, a pesar de que el estudio de Jefferson fue llevado a cabo en el Reino Unido, un país rico e industrializado, con modos de vida totalmente distintos.

En la tesis <<Estudio de las aguas grises en tres niveles socioeconómicos de la ciudad de Bogotá>> realizada en la Pontificia Universidad Javeriana en la ciudad de Bogotá, Colombia, se hicieron análisis para determinar la composición de las aguas grises de tres viviendas de tres estratos socioeconómicos, siendo 1 el más bajo y 5 el más alto estudiado, en la escala del 1 al 6. La metodología empleada, fue recolectar todas las aguas grises utilizadas a lo largo de 17 horas, iniciando a las 5 a.m. y culminando a las 11 p.m. De la recolección total, se extrajeron muestras representativas y se dispusieron en recipientes adecuados para cada parámetro que se obtendría de estas.

Los resultados de la tesis realizada por Niño y Martínez (2013) se consideran importantes para el autor del presente trabajo, pues, tal y como Costa Rica, Colombia es un país con un modo de vida comparable al de nuestro país, dadas las similitudes, tanto económicas, como climatológicas, sociales y culturales. En la tabla 1.4 se expresan los resultados que se consideran más significativos.

Tabla 1.4 Resultados de los análisis de características de calidad en las aguas grises en 3 viviendas de Bogotá

Parámetro (En mg/l a menos que se indique otro)	Vivienda estrato 1	Vivienda estrato 3	Vivienda estrato 5
Arsénico	<0.01	<0.01	<0.01
Dureza total	81.8 - 85	30.3 - 30.9	45.3 - 83.8
Turbidez (NTU)	273 - 296	79.7 - 117	74 - 87.6
Sólidos totales	88 - 1150	270 - 632	426 - 454
SST	271 - 318	68 - 82	99 - 135
Fósforo total	5.03 - 7.08	2.8 - 11.13	2.66 - 3.99
Cloruros	21.1 - 30.9	15.5 - 22.1	23.9 - 26.2
pH	6.44 - 6.71	6.89 - 9	6.17 - 6.84
Nitrógeno total	8.4 - 23.5	6.7 - 7.2	5.6 - 9.6
DBO5	616.1 - 684	267.3 - 274.2	240 - 327.4
DQO	1147 - 1469.3	467.3 - 519.2	519.2 - 519.9
Grasas y aceites	53.8 - 76.2	13.5 - 56.6	32.5 - 53.2
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	691000 - 1600000	10 - 91.7	10.0 - 73.0
E. Coli (UFC/100 ml)	>= 10000	10.0 - 10000	8 - 140
Surfactantes	45.59 - 46.83	19.87 - 42.4	15.07 - 34.69

(Niño & Martínez, 2013)

Los resultados denotan niveles altos en la mayoría de los parámetros, por ejemplo, el DQO de este estudio en el estrato 1 es parecido a los obtenidos en los pueblos de Sudáfrica donde la escasez de agua es muy alta, así como los valores de la DBO₅, que alcanzan valores de países industrializados, tales como Alemania o Suecia, de acuerdo al documento de Hernández et al. (2011). El documento expresa que los valores altos alcanzados en el estrato 1 reflejan que la precariedad del medio en donde habitan, repercute directamente en la calidad de sus aguas y demuestra que su entorno es menos higiénico.

El valor más bajo de DBO₅ reportado se dio en la campaña 2 del estrato número 5, probablemente debido a las buenas prácticas de la familia donde habita un profesor de Hidrotecnia y Ambiental de UPUJ, demostrado también con un bajo consumo per cápita.

Basándose en fuentes tales como: <<*Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. Science of the Total Environment.*>> de Li, Wichmann, Otterpohl (2009), <<*Manual of greywater treatment practice: Characterisation of typical household greywater*>> de Hypes (1974), <<*Bathroom Greywater Characterization and Potential Treatments for Reuse*>> de Chaillou, Gerente, Andrés & Walbet (2011), etcétera, obtuvieron límites superior e inferior de los parámetros analizados.

Los resultados generales fueron los siguientes:

Parámetros por encima del límite superior reportado: aluminio, arsénico, cromo, molibdeno, calcio, DBO₅, DQO, fósforo total, alcalinidad total, sólidos totales, coliformes fecales (estrato 1), coliformes totales (estrato 1).

Parámetros dentro del rango reportado: bario, plata, DBO₅ (estrato 3 y 5), grasas y aceites, surfactantes aniónicos (estrato 1), turbidez, conductividad, coliformes fecales (estrato 3 y 5), coliformes totales (estrato 3 y 5).

Parámetros debajo del rango reportado: Surfactantes aniónicos (estrato 3 y 5).

Aguas grises utilizadas en agricultura

La inseguridad alimentaria debido a las variaciones actuales en los patrones de lluvias en zonas agrícolas de subsistencia y comercial es rampante. Los cambios en los patrones de lluvia, que son atribuidos al cambio climático, está generando que la agricultura de temporal se vuelva insostenible. Aunado a esto, muchas veces no existen suficientes fuentes de agua ni son adecuadas. Con los recursos hídricos menguando, y la población mundial en aumento, es de esperarse que el uso de agua residual para irrigación se vuelva prevalente (Maina et al., 2019).

Se calcula que más del 10 por ciento de la población mundial consume alimentos producidos mediante la irrigación con aguas residuales. Estos porcentajes aumentan considerablemente entre las poblaciones de países de bajos ingresos con climas áridos y semiáridos (OMS, 2006).

El uso de forma indiscriminada de aguas grises que puedan estar contaminadas representan un riesgo por los posibles efectos adversos que pueda provocar en la salud humana y el ambiente, particularmente en las plantas y el suelo irrigados (Rodda et al., 2011).

Aunque el Instituto Internacional de Gestión del Agua (IWMI, por sus siglas en inglés) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), han provisto información valiosa respecto a la irrigación agrícola con aguas residuales domesticas en países en vías de desarrollo, es necesario aclarar que las aguas grises no son directamente comparables con las aguas residuales domesticas que incluyen las aguas que provienen del excusado, consideradas aguas negras. Es por ello que en las aguas grises pueden suponerse menores cantidades de nitrógeno (N), fósforo (P), materia orgánica sólida, microorganismos patógenos, con especial énfasis en los huevos de helminto y metales, y mayores concentraciones de surfactantes y sales. La diferencia en la concentración de sales y surfactantes puede ser el punto en particular que determine la idoneidad de las aguas grises para el riego agrícola (Rodda et al., 2011).

A pesar de estos supuestos, numerosos estudios sugieren que en las aguas grises se pueden encontrar las mismas cargas de coliformes fecales, que en las aguas

residuales domesticas totales. Algunos muestran que aquellas aguas provenientes del fregadero de la cocina y del lavaplatos, por la presencia de alimentos y grasa, tenían el potencial de estar contaminadas con bacterias como la salmonella. Mientras que las aguas provenientes de la regadera, el lavabo del baño y la lavadora, contribuían con organismos de origen fecal, atribuidos al lavado de prendas con presencia de heces, así como los hábitos típicos de higiene personal (Finley, 2008).

En lo relativo a las plantas y el suelo, las variables de mayor interés en la composición de las aguas grises son las concentraciones de macronutrientes, con especial énfasis en nitrógeno (N) y fósforo (P), así como también de Sodio (Na). Los dos primeros pueden beneficiar el crecimiento de las plantas, siempre y cuando no se presenten en exceso, lo que provee el potencial a las aguas grises de convertirse en un fertilizante de baja escala para agricultores con bajos ingresos. Sin embargo, el sodio es tóxico para las plantas por absorción directa a través de raíces y hojas. Puede además causar salinización del suelo y unas condiciones desfavorables que provocan el deterioro de la estructura del suelo y su capacidad para soportar el crecimiento de vegetales (Rodda et al., 2011).

Un caso de estudio en Israel (Gross et al., 2005) comparó las propiedades nativas de suelos no irrigados y suelos de parcelas irrigados por un lapso de 3 años, con agua dulce, aguas grises y agua con fertilizantes.

Los resultados destacados se presentan a continuación:

- Los coliformes fecales no sobrevivieron de manera abundante, sin importar que las aguas grises contenían hasta 10^6 UFC/100ml.
- Las aguas grises presentaron una alta concentración de materia orgánica, parte de la cual se degradó pobremente, al igual que las concentraciones de surfactantes y aceite.
- Una concentración considerable de nitrógeno fue encontrada en el suelo que fue irrigado con fertilizante, mientras que el suelo irrigado con aguas grises no presentó tal característica.

- La salinidad del suelo, medida a partir de la conductividad eléctrica, fue menor en el suelo irrigado con agua dulce, como era de esperarse. A pesar de ello, la salinidad en los suelos irrigados con aguas grises, incluso después de tres años, no alcanzaron niveles que pudieran afectar a la mayoría de las plantas. Aun así, es necesario tomar en cuenta la fuente de la salinización, ya que se encontraron acumulaciones de Boro (B), producto de la irrigación con aguas grises. Altas concentraciones de Boro, generan efectos negativos en las propiedades del suelo y son tóxicas para las plantas.
- La mayor relación de absorción de sodio (RAS), fue encontrada en las parcelas irrigadas con aguas grises (1.01), seguidas por el suelo no irrigado (0.84), el suelo irrigado con fertilizante (0.72) y por último el irrigado con agua dulce (0.60). Como ha sido mencionado antes, el RAS puede afectar negativamente las propiedades del suelo y limita las especies de plantas que pueden ser cultivadas.
- El mayor potencial de nitrificación del suelo, por la conversión de amoníaco, fue encontrado en las parcelas irrigadas con fertilizante, seguidas por aquellas irrigadas con aguas grises y por último las parcelas de aguas dulces.
- La concentración de surfactantes en el suelo y potencialmente elevados por capilaridad, sugieren que el suelo irrigado por aguas grises podría convertirse en un suelo hidrofóbico. Los suelos hidrofóbicos, no son idóneos en el crecimiento saludable de la mayoría de plantas, lo que explicaría el lento crecimiento de algunos tipos durante el estudio.

El estudio de Gross et al. (2005) concluye que: *<<aunque en la mayoría de países del mundo no existen normativas oficiales en lo que a la irrigación con aguas grises se refiere, es recomendable su tratamiento para la irrigación a pesar de no ser un requerimiento legal, dada su potencial nocividad para el ambiente y la salud.>>*

Tratamiento de aguas grises domésticas

Más del 50% de las aguas residuales domésticas y municipales, son constituidas por aguas grises. Investigaciones recientes, sugieren que su reúso después de un

tratamiento adecuado podría solventar en un 50% las necesidades de agua no potable que son cubiertas con agua potable (Oktor & Çelik, 2019).

Con el fin de promover la reutilización de las aguas residuales en escalas pequeñas, ha comenzado a recibir mayor atención la separación de las descargas domésticas como una posible estrategia que permita la descentralización del tratamiento de estas aguas y simplificar su proceso, para su posterior reutilización (Finley, 2008).

El tratamiento de las aguas residuales, tanto negras como grises, tendría como fin aminorar la descarga de estas en estado crudo, con el fin de evitar eutroficación en cuerpos de agua. La eutroficación es el incremento y cambio en las proporciones de nutrientes (sobre todo de nitrógeno y fósforo) que produce crecimiento excesivo de microalgas. Este fenómeno que genera acumulaciones de amoníaco, emisiones de gases de invernadero y contaminación de acuíferos (Oktor & Çelik, 2019).

Las aguas grises separadas, pueden entonces conducirse a un lugar de tratamiento in situ; también surge la posibilidad de canalizarlas a instalaciones de tratamiento y que sean utilizadas en diversos propósitos (Diaper & Sharma, 2007).

Sistemas de tratamiento de aguas grises

4 criterios principales son los que las aguas tratadas deben de cumplir, cuando provienen de sistemas de tratamiento: Seguridad higiénica, estética, tolerancia ambiental, así como factibilidad técnica y económica (Teh, Poh, Gouwanda, & Chong, 2015).

Varias tecnologías de tratamiento de baja y alta escala han sido desarrolladas, tales como sistemas de filtración de membrana, coagulación/floculación y resinas de intercambio iónico, humedales, y biorreactores rotatorios, secuenciales o de membrana. Los siguientes métodos, tanto experimentales como actualmente en uso, fueron extraídos de estudios realizados en diversos países del mundo para el tratamiento de aguas grises:

Biorremediación con chlorella variabilis

La técnica de biorremediación consiste en la remoción contaminantes por medio de organismos vivos. Este método ofrece una alternativa ecológica y de bajo costo en comparación con los tratamientos químicos. Bacterias, hongos y microalgas son ampliamente investigados por su potencial en este tema. De estos tres, el que en la actualidad ha recibido más atención, es el tema de las microalgas, debido a su alta capacidad en la remoción de nutrientes que realiza simultáneamente mientras captura dióxido de carbono y su biomasa crece. Esta biomasa puede convertirse virtualmente en biocombustibles, alimentos, químicos entre otros productos con valor agregado, lo que mejoraría los costos de los procesos de biorremediación (Oktor & Çelik, 2019).

Las muestras provenían de duchas y lavabos de baño utilizadas por una sola persona, las cuales fueron estudiadas separadamente. Los sólidos suspendidos se removieron mediante centrifugación a 4000 rpm por un lapso de 20 minutos. Para asegurar el crecimiento de las algas las muestras se dividieron en aguas grises crudas y diluidas al 30% con agua del tubo. Las algas, crecidas en el medio BG-11, fueron cultivadas en matraces Erlenmeyer de 250 ml. La cantidad fue de 20 ml del líquido con microalgas. La cultivación y crecimiento heterotrófico fue conducida en un ambiente de 27° por un lapso de 19 días, con lámparas LED de 7 W y 2700 K. Al término de los 19 días la biomasa de las algas fue separada por medio de centrifugación a 4000 rpm en un periodo de 30 minutos. Las muestras de líquidos fueron analizadas en términos de DQO, DBO₅, contenido bacteriológico, fósforo total y nitrógeno total (Oktor & Çelik, 2019). Los resultados del experimento de Oktor & Celik (2019) se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.5 Resultados del estudio de biorremediación con *Chlorella Variabilis*

Tabla comparativa de las aguas grises crudas y tratadas con <i>Chlorella Variabilis</i> , Oktor & Çelik (2019)						
Parámetros	Aguas grises crudas ducha	Aguas grises ducha postratamiento		Aguas grises lavabo postratamiento		
		Eficiencia de remoción (%)		Eficiencia de remoción (%)		
DQO (mg/l)	654	69.2	89.42	1171	131	88.81
DBO ₅ (mg/l)	385	34	91.17	568	56	90.14
Fósforo total (mg/l)	1.67	0.246	85.27	2.25	0.435	80.67
Nitrógeno total (mg/l)	10.6	5.33	49.72	14.3	2.12	85.17
N/P	6.35	21.67	-	6.35	4.87	-

(Oktor & Çelik, 2019)

Sistema básico de dos estaciones con filtro

La tecnología más común en el tratamiento de las aguas grises domésticas, es el filtro de agregados combinado con desinfección con cloro.

Uno de los sistemas descritos en el estudio de Li et al. (2010), llevado a cabo en Irlanda, comprende un filtro de metal, que funciona como una barrera para las partículas suspendidas de mayor tamaño y la remoción de contaminación orgánica de forma efectiva. Este filtro genera aguas que deberían mostrar una diferencia sustancial en la claridad. Después de este proceso, se somete a desinfección con cloro o bromo. El poco tiempo de retención hidráulica a la que es sometida, produce que la composición química de las aguas grises no se altere. Aún después de estos procesos, la carga orgánica y la turbiedad se presentan altas y se considera que la efectividad de la desinfección química tiene ciertas limitaciones. La representación esquemática del sistema se presenta en la figura 1.5, en donde se aprecian sus elementos más importantes, y su disposición, vista desde la perspectiva de corte lateral de una casa habitación.

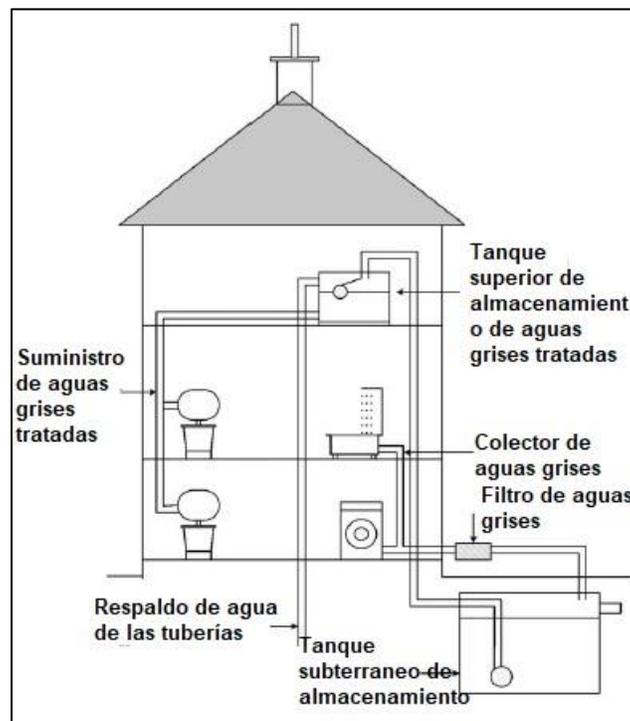


Figura 1.5 Diagrama del sistema básico de dos estaciones con filtro (Li et al, 2010)

Sistemas de procesos físicos

La filtración profunda realizada de forma invariable por medio de arena y complementado por diferentes tipos de membrana. Aquellos que cuentan con sistemas de membrana logran una alta clarificación del agua tratada, dado que los sistemas de membrana representan una barrera permanente contra las partículas que exceden el tamaño de estas, las cuales tienen un rango que va de los 0.5 μm para las membranas que llevan a cabo microfiltración, hasta dimensiones moleculares en procesos como la osmosis inversa.

Este sistema de tratamiento por medio de filtración por arena y complementado con membranas genera aguas de mejor calidad que el sistema de dos estaciones descrito anteriormente.

La desventaja de los sistemas con membrana, es el constante mantenimiento, pues requiere de una limpieza constante, ya que las partículas contaminantes se alojarán en la membrana y aumentarán la resistencia hidráulica de esta, lo que produciría un incremento en los requerimientos energéticos para permitir que el flujo del agua en proceso de tratamiento. Además, si el tiempo de retención hidráulica aumenta significativamente podría propiciar el desarrollo de componentes orgánicos anaeróbicos, los cuales presentan mayor dificultad en atravesar las membranas (Li, Boyle, & Reynolds, 2010).

Sistema de aeración y desinfección con peróxido de hidrógeno (experimental)

En el experimento llevado a cabo por Teh et al. (2015), se menciona que el uso de cloro en el tratamiento de las aguas grises puede generar sustancias que podrían tener un efecto adverso en la salud humana, de acuerdo a los resultados obtenidos por Naylor et al. (2012). Este grupo de investigación eligió el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como desinfectante.

El sistema experimental consistía en 4 tanques de acero inoxidable. Los cuatro cumplían con una función específica. Uno de ellos era el tanque que se alimentaba

de forma directa con las aguas grises ligeras provenientes de las muestras recolectadas en las casas seleccionadas para la realización de este estudio. Otro fungía como reservorio del peróxido de hidrógeno, además del tanque de aireación y por último el tanque de desinfección. Un último tanque con capacidad de 30 litros que no pertenecía propiamente al sistema de tratamiento, servía para el almacenamiento del agua tratada.

En la siguiente figura (1.6) se puede observar el sistema descrito en el párrafo anterior.

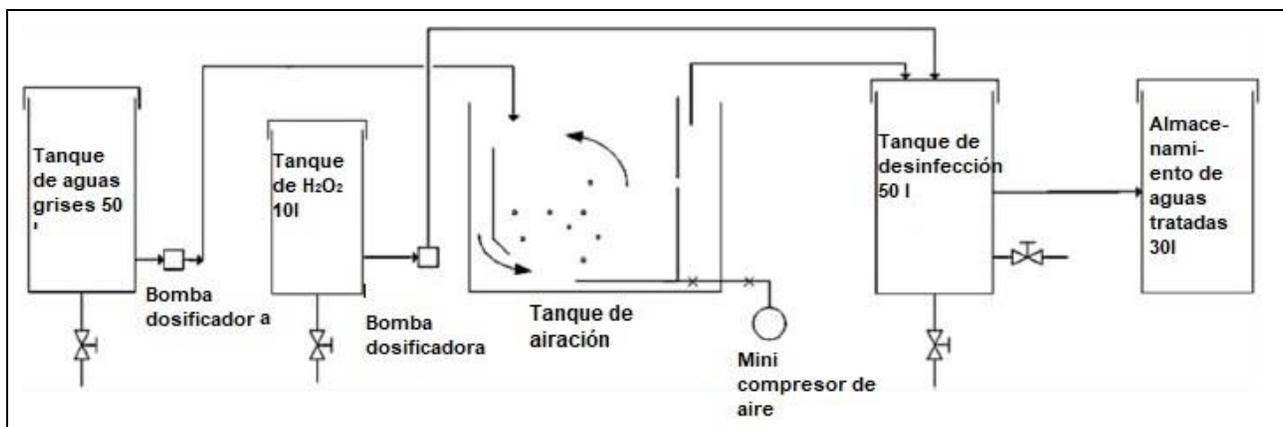


Figura 1.6 Esquema del sistema de aeración y desinfección con H₂O₂ (Teh et al, 2012)

Este sistema fue capaz de lograr resultados relativamente adecuados en términos de sólidos y materia orgánica removida, alcanzando valores del 68% y 88% en términos del SST y DQO, con la mayor eficiencia alcanzada con 5 horas de tiempo de retención hidráulica (TRH). El estudio también encontró, que el peróxido de hidrógeno residual, en concentraciones de 1 ml/l, es capaz de prevenir el crecimiento de bacterias en el agua almacenada, hasta por 3 días.

Sistema de filtración lenta en filtros de arena, pizarra y carbón activado (experimental)

El estudio realizado en la Universidad Regional de Blumenau, en Sao Paulo, Brasil, por Zipf et al (2016) es probablemente el sistema de tratamiento encontrado, de mayor interés para el autor de esta tesis, debido a las similitudes con el proyecto realizado, motivo de la presente investigación y de las evaluaciones del mismo.

El sistema es sencillo, tal como el estudio se titula: <<*Simplified greywater treatment systems: slow filters of sand and slate waste followed by granular activated carbon*>> (Sistemas simplificados de tratamiento de aguas grises: Filtros lentos de arena y desperdicios de pizarra seguidos por filtros de carbón granular activado).

El sistema comprendía dos sistemas de tratamiento de aguas grises y un tanque de almacenamiento. Los sistemas se componían separadamente, de un filtro lento de arena seguido por un filtro de carbón granular activado, y el segundo filtro se componía de igual manera de dos filtros, pero en este caso el primero utilizaba residuos de pizarra y posteriormente un filtro de carbón activado. Las aguas residuales tratadas fueron aguas grises, utilizando dos tasas de filtración diferentes para identificar el cambio en la eficiencia del tratamiento debido a este parámetro. Las aguas crudas y las aguas tratadas fueron analizadas para obtener sus características fisicoquímicas y microbiológicas, lo que permitió la obtención de las eficiencias de ambos sistemas y su posterior comparación. Dieciocho lavabos de baños de mujeres y hombres alimentaron el tanque de almacenamiento que posteriormente suministraría el agua a los sistemas de tratamiento.

Los filtros se construyeron con tubos rígidos de PVC, con diámetros de 0.2 m y alturas de 1.6 m para los filtros de arena y residuos de pizarra, mientras que para los filtros de carbón activado se utilizaron tubos con alturas de 1.4 m. A 4 cm por encima de la base de cada filtro fue provista de una base de acrílico con orificios para sostener el material filtrante, y por debajo de esta se ensamblaron los tubos de salida. Una capa de 20 cm de roca fracturada fue colocada por encima de la base de acrílico y por encima de esta una capa de 90 cm del material filtrante fue colocada, todo rodeado por geotextiles. La capa de 90 cm se eligió basado en los criterios de la normatividad técnica brasileña (ABNT 12216). Por su parte, las capas

de carbón activado constaron de 60 cm sostenidas por una capa de 20 cm de grava, con la misma disposición de la base de acrílico que las soportaba (figura 1.7).

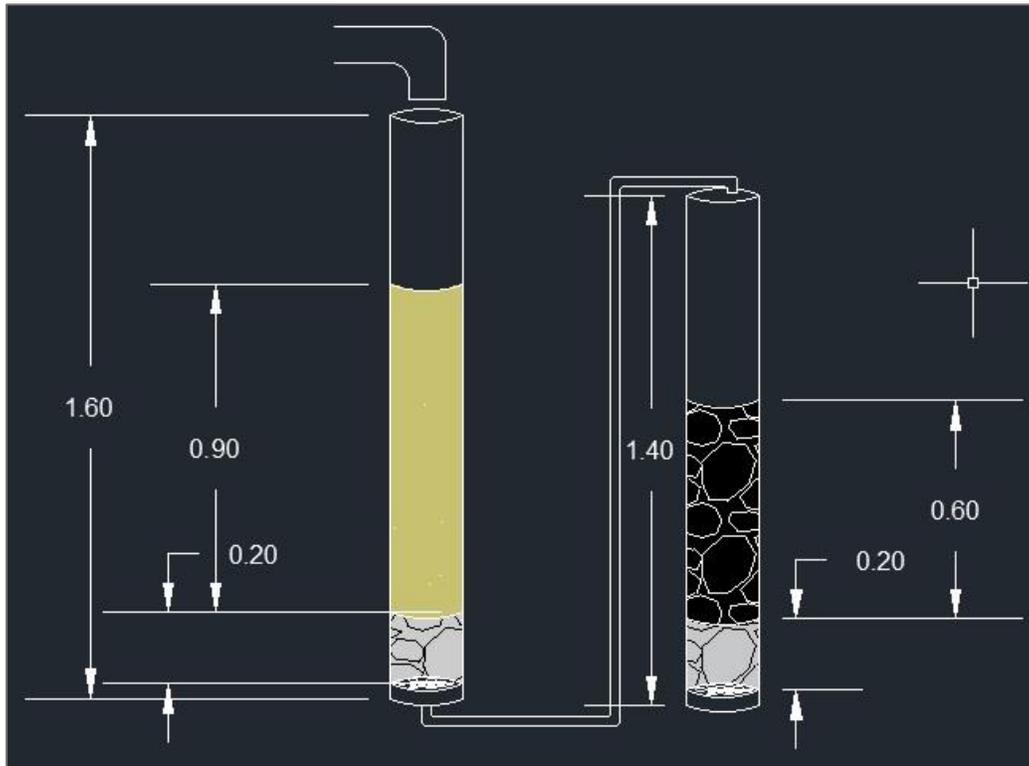


Figura 1.7 Esquema del sistema de filtros de arena (izq.) y carbón activado (der.) descrito en Zipf et al (2016) (Medidas en m) (Elaboración propia, 2019)

Las permeabilidades de la arena y de la pizarra tenían el mismo orden de magnitud, con $2.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ y $1.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ respectivamente; por su parte la permeabilidad del carbón activado fue de $1.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$.

Se utilizaron dos tasas de filtración, $6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ y $2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$, la cuales se analizaron para observar si existía cierta diferencia estadística significativa. En cada paso del sistema el test de Tukey fue realizado ya que, debido a la variación de las calidades de las aguas grises crudas, había que evaluar la eficiencia de los sistemas.

Las diferencias más significativas por motivo de las tasas de filtración en el filtro de arena fueron los parámetros de turbiedad, color aparente, y DBO. Para el caso del sistema completo, solo hubo diferencias en turbiedad, color aparente y DQO. En el sistema con residuos de pizarra, solo se presentaron diferencias en el color

aparente, y en el sistema completo, color aparente y DBO fueron los dos parámetros que presentaron variaciones estadísticas significativas, registradas en la tabla 1.6.

Tabla 1.6 Comparación de características de calidad en las aguas grises

Calidad del agua					
Parámetros	Aguas grises crudas	Filtro de arena	Filtro de residuos de pizarra	Filtro de arena + carbón granular activado	Filtro de residuos de pizarra + carbón granular activado
Turbiedad (UTN)	21.55	12.8	15.2	7	6.21
pH	7.6	7.64	7.8	7.57	7.57
DBO5 (mg/l)	52	53	45	26	27
DQO (mg/l)	128	100.45	102.25	52.1	46.75
Surfactantes (mg/l)	7.4	5.68	5.54	2	1.56
Coliformes totales (NMP/100 ml)	3.06E+03	1.37E+03	5.17E+02	7.71E+02	5.88E+02
Coliformes termotolerantes (NMP/100 ml)	3.59E+04	1.31E+03	4.67E+03	1.31E+03	3.10E+03

(Zipf et al, 2016)

La mediana (25% - 75%) de la calidad de las aguas grises crudas y tratadas con los dos tipos de filtros en este trabajo, se presenta a continuación en la tabla 1.7

Tabla 1.7 Comparación en la remoción de contaminantes en las aguas grises

Calidad del agua		Filtros			
Parámetros	Aguas grises crudas	Arena (Eficiencia en la remoción %)	Residuos de pizarra (Eficiencia en la remoción %)	Arena + carbón granular activado (Eficiencia en la remoción %)	Residuos de pizarra + carbón granular activado (Eficiencia en la remoción %)
Turbiedad (UTN)	21.55	40.60	29.47	67.52	71.18
DBO5 (mg/l)	52	-1.92	13.46	50.00	48.08
DQO (mg/l)	128	21.52	20.12	59.30	63.48
Surfactantes (mg/l)	7.4	23.24	25.14	72.97	78.92
Coliformes totales (NMP/100 ml)	3.06E+03	55.23	83.10	74.80	80.78
Coliformes termotolerantes (NMP/100 ml)	3.59E+04	96.35	86.99	96.35	91.36

(Zipf et al, 2016)

Los 4 sistemas de filtración simples que fueron probados, funcionaron bien a gravedad. La variación en la calidad de las aguas grises a lo largo de los 28 días que duró el experimento, no represento un problema verdadero ya que los filtros siempre demostraron la capacidad de mejorar sustancialmente la calidad de las aguas, una vez tratadas. En cuanto a los parámetros pH, DQO, DBO, surfactantes y coliformes termotolerantes, la eficiencia de los 4 sistemas fue buena. Mientras que para los coliformes totales y el color aparente, fue en un rango mediano y la eficiencia fue baja en el caso de la turbiedad si se compara los resultados con otros estudios, aunque cabe mencionar que la mayoría de estos utilizaron sistemas de tratamiento más robustos. Para el caso de la remoción de los surfactantes, en ambos filtros completos, la eficiencia fue alta, dada la dificultad que presentan la remoción de estos parámetros. Por último, para el caso de la turbiedad, color aparente, DBO, DQO y surfactantes, la presencia del carbón activado resultó ser la característica que proveía la mayor contribución al mejoramiento de la calidad del agua. Sin embargo, en otros tres parámetros importantes, como son pH, coliformes totales y termotolerantes, no hubo mejoramiento sobresaliente.

El potencial de los sistemas fue demostrado con los máximos valores de la eficiencia alcanzados, sugiriendo que, si se optimizan, el sistema de filtros podría alcanzar eficiencias promedio aún mayores (Zipf, Pinheiro, & Conegero, 2016).

1.5 Fundamentos de filtración como operación unitaria

De acuerdo al departamento de química de la Universidad de Barcelona, el proceso de filtración está definido como:

<<Es el proceso de separación de partículas sólidas de un líquido utilizando un material poroso llamado filtro. La técnica consiste en verter la mezcla sólido-líquido que se quiere tratar sobre un filtro que permita el paso del líquido pero que retenga las partículas sólidas.>>.

En otra fuente (Maldonado, 2004) se encontró la siguiente definición:

<<La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso”

Por lo tanto, el líquido de la suspensión que logra pasar a través del filtro se denomina filtrado. La porosidad del filtro será siempre en función al diámetro de las partículas que se quieren separar.(Universidad de Barcelona, n.d.)

El filtro es entonces el elemento que se interpone en un flujo para eliminar elementos sólidos no deseados, al fluido que ingresa al sistema de filtración se le denomina afluente y el fluido resultante se denomina efluente.(CEPIS, 2005)

Mecanismo de la filtración

Los mecanismos que producen la filtración se considera que son dos: transporte y adherencia. Si partimos de la hipótesis de que se activan fuerzas en distancias pequeñas, de algunos ángstroms, entre el medio filtrante y las partículas de la suspensión en proceso de filtración, lo que genera adherencia entre ellas, por lo tanto, estas permanecerán adheridas siempre y cuando resistan a las fuerzas que produzcan las condiciones hidrodinámicas del flujo de la suspensión. Las fuerzas de Van der Waals, electroquímicas y el puente químico, son los mecanismos de adherencia, aunque saber cuál de ellos es el preponderante ha significado un extenso debate aun sin resolución (Maldonado, 2004).

Es entonces el transporte un fenómeno más asociado a la mecánica de fluidos, determinada principalmente por los parámetros que gobiernan la transferencia de masas y, por otra parte, la adherencia entre partículas un fenómeno de acción superficial, en los que participan tanto efectos químicos como efectos físicos (Maldonado, 2004).

Mecanismos de transporte

Sedimentación

En el tema de la filtración, se consideró a la sedimentación una cuestión poco significativa, ya que los sólidos suspendidos generalmente sedimentan a una velocidad mucho menor que la velocidad intersticial. Pero cuando existe material suspendido relativamente grande y denso, se pueden producir asentamientos significativos de este, donde la carga hidráulica sea baja (Maldonado, 2004).

Intercepción

Debido a que generalmente durante un proceso de filtración el régimen es laminar, las partículas se mueven a lo largo de las líneas de corriente, entonces, como las partículas suspendidas son aproximadamente de igual densidad que el agua, se removerán de esta cuando las líneas de corriente estén a una distancia menor que la mitad del diámetro de las partículas suspendidas (Maldonado, 2004).

Cernido

En filtros lentos, la acción física del cernido es la dominante. Esta acción física es evidente para el ser humano, pues se produce cuando una partícula es de mayor tamaño que los poros del lecho filtrante, quedando atrapada en los intersticios.

Se produce generalmente solo en las capas más superficiales de la capa filtrante, en aquellas partículas que resisten los embates los esfuerzos cortantes que producen en las reducciones de tamaño por el lógico aumento de la velocidad.

Hall propuso una fórmula matemática a partir de consideraciones geométricas del medio filtrante y el diámetro de las partículas para obtener la probabilidad de cernido (Pr):

$$Pr = (d/Dc)^{2/3}$$

Donde:

d = diámetro de la partícula

D_c = diámetro del medio filtrante (Maldonado, 2004).

Cinética de la filtración

Un modelo matemático que defina los mecanismos de filtración de forma muy precisa es todavía una deuda pendiente de la ciencia, sin embargo, el conocimiento de los mecanismos de filtración es bastante bueno, pues por medios experimentales se pueden determinar los parámetros de los procesos de filtración. Así que, si se busca conocer el comportamiento de un filtro, es sugerible realizar estudios experimentales con filtros piloto (Maldonado, 2004).

Balance de masas

La filtración puede analizarse desde el enfoque del balance de masas, y este genera dos resultados importantes en el entendimiento del fenómeno.

Si se analiza en conjunto con la ecuación que modela la remoción de partículas suspendidas, permite, en función del tiempo y de la posición, la determinación de la distribución de los depósitos en el medio filtrante. Además, genera una expresión que posibilita conocer la remoción de los sólidos por unidad de volumen del medio filtrante (Maldonado, 2004).

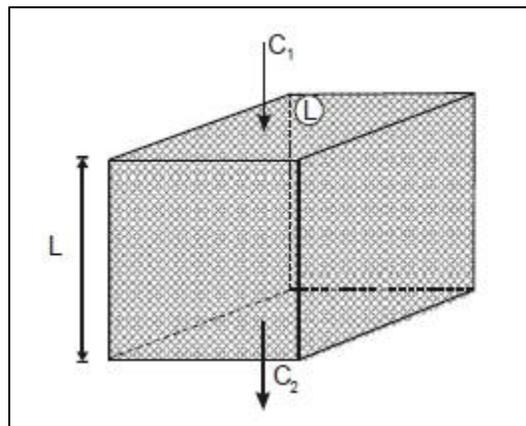


Figura 1.8 Elemento de lecho filtrante (Maldonado, 2004)

La figura 1.8 muestra un elemento del medio filtrante de espesor ΔL , ancho L y Área A . La concentración (C) de la suspensión variará entonces:

$$\Delta C = C_2 - C_1$$

Donde:

C1: es la concentración inicial

C2: Es la concentración final

A partir de esta ecuación y por medio de otras expresiones físicas y geométricas se llega a la expresión:

$$-\frac{\Delta C}{\Delta L} = \frac{1}{\beta V} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$$

Donde:

ΔC = Variación de la concentración de las partículas

ΔL = Variación del espesor del lecho filtrante

β = Relación entre el volumen de sólidos removidos y el volumen de los depósitos.

V = Velocidad de filtración o tasa de filtración (Q/A)

$\Delta \varepsilon$ = Porosidad del medio filtrante

Δt = Variación del tiempo

La cual expresa la tasa de variación de la concentración de la suspensión, que disminuye debido a que, con el tiempo de operación, la porosidad decrece; todo esto en función del espesor del medio filtrante (Maldonado, 2004).

Filtración lenta con arena

Se tiene registro que la primera vez que se utilizó la tecnología de la filtración lenta con arena fue en los Estados Unidos en 1872, convirtiéndose así en el tipo más antiguo de filtración municipal (NESC, 2000).

El proceso es simple, el afluente de agua no tratada se hace pasar a través de una cama porosa de arena, entra por la superficie del filtro y en el fondo se encuentra el drenaje de salida del agua ya tratada (NESC, 2000).

El filtro consiste, cuando se construye de manera correcta, en un tanque, un lecho de arena fina, otro lecho de grava que sirve de soporte, y en el fondo un sistema de subdrenajes para recoger el agua filtrada, así como un regulador de flujo que sirve para controlar la velocidad de filtración. No se añade ningún químico que facilite el proceso de filtración ni mejore la calidad del agua a tratar (NESC, 2000).

La técnica de los filtros de arena resulta una opción viable para la eliminación parcial de contaminantes orgánicos e inorgánicos debido al mínimo requerimiento de sustancias químicas y energía, así como la sencillez del diseño, construcción, operación y mantenimiento. Estos filtros resultan útiles incluso en el retiro de organismos patógenos, consecuentemente reduce la necesidad de procesos de desinfección y por lo tanto subproductos indeseables propios de estos procesos (NESC, 2000).

Otras ventajas que pueden mencionarse son:

- La mínima problemática en el manejo de los lodos
- La supervisión cercana del operador no es necesaria
- Los materiales y mano de obra generalmente son locales

Este tipo de filtros han comprobado ya su excelente funcionalidad en el tratamiento de las aguas (tabla 1.8), demostrando desde su implementación la efectividad en la remoción de partículas indeseables de las aguas residuales, en afluentes por debajo de 1.0 unidad de turbiedad nefelométrica (UTN), llegando a eliminar entre el 90 y 99% de virus y bacterias, así como prácticamente la eliminación total de quistes, tales como la *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium Oocyst*.

Tabla 1.8 Tabla de la capacidad de remoción de los filtros lentos de arena

Capacidad de remoción de contaminantes del filtro lento de arena	
Parámetro de calidad del agua	Capacidad de remoción
Turbiedad	<1.0 NTU
Coliformes	1-3 unidades log
Virus Entéricos	2-4 unidades log
Quiste Giardia	2-4 unidades log
Carbón Orgánico Disuelto	<15-25%
Precusores del Trihalometano	<20-30%
Zn, Cu, Cd, Pb	>95-99%
Fe, Mn	>67%
As	<47%

(NESC, 2000)

Pérdida de carga en un medio filtrante

La fricción que se produce por el gasto Q de un fluido que pasa a través un lecho filtrante de profundidad L genera una pérdida de carga h . Esta pérdida aumenta en función del tiempo, pues en el inicio de la operación, los granos están limpios, así que los factores que afectarán la carga serán la forma, el tamaño y la porosidad del medio filtrante, así como a la viscosidad y velocidad del fluido, que generalmente es una solución acuosa.

En la figura 1.9 se observa la pérdida de carga debido a que las partículas en suspensión en el fluido a tratar, poco a poco recubrirán los granos del medio filtrante,

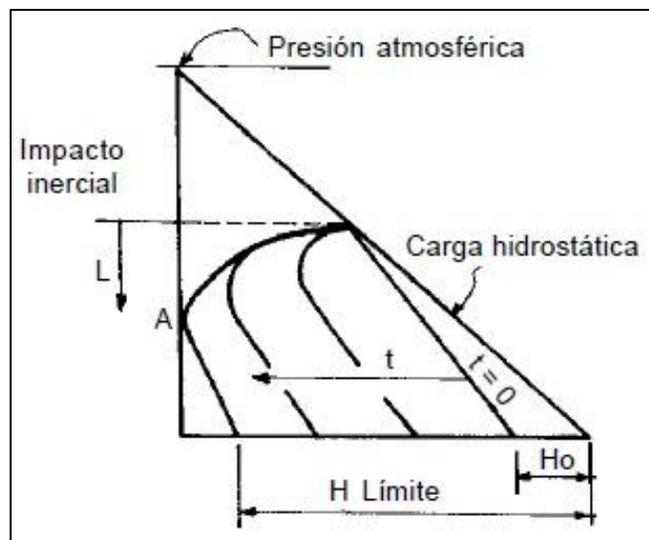


Figura 1.9 Variación de la carga hidráulica en función de L y t en un lecho filtrante (Maldonado, 2004)

lo que provocará un incremento en su diámetro, disminuyendo así la porosidad inicial, generando así una disminución en el área de los intersticios del flujo, provocando la pérdida de carga mencionada en un principio, de forma paulatina (Maldonado, 2004).

Entonces se considerarán dos tipos en la pérdida de carga:

- La pérdida de carga inicial, producto del proceso de filtración y la fricción que se produce, la cual se denomina h_0
- Y la pérdida producto de la reducción de las áreas de los intersticios, que será en función del tiempo $h\phi(t)$, que se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$h = h_0 + h\phi(t)$$

Características del medio filtrante

Las características más importantes del medio filtrante están relacionadas a aspectos geométricos y a su tipo, entre las que destacan: el peso específico, espesor de la capa filtrante y la granulometría del material.

Tipo del medio filtrante

El tipo del medio filtrante se rige de acuerdo a la calidad de agua que pretende lograrse en el efluente, como primer criterio, seguido de la capacidad de retención de este, así como a la facilidad de su lavado. Es entonces, el medio filtrante ideal, aquel que requiere una mínima cantidad de agua para el proceso de lavado, que presenta una granulometría y un peso específico determinado, y que produzca un efluente de alta calidad, removiendo la mayor cantidad de partículas suspendidas.

El medio filtrante que ha sido utilizado más comúnmente, es la arena. Con una granulometría pequeña, este medio filtrante produce un agua tratada de mejor calidad. Pero la estratificación del medio no es deseable, ya que se produciría una retención mayor en las capas superiores, lo que genera que en la parte intermedia se generen presiones por debajo de la atmosférica, fenómeno que produce partículas de aire, así como una compactación del lecho filtrante, provocando

dificultades en el proceso de lavado y de filtración. Las propuestas para evitar la estratificación del medio filtrante consisten en:

- Utilizar arena con un coeficiente de uniformidad próximo a la unidad
- Uso de arena que haya sido preparada con dos tamices consecutivos, como por ejemplo los de aberturas de 0.42 mm y 0.59 mm

Aunque en la práctica lo común es que se utilice arena con un coeficiente de uniformidad inferior a 1.5. Otra forma de controlar estratificación es el empleo de antracita, debido a que este material presenta un peso específico menor al de la arena.

Ya que las tasas de filtración elevadas, no producen un cambio significativo en la calidad de los efluentes, se hicieron investigaciones exhaustivas en filtros de medios múltiples, logrando calidades de agua muy superiores a las de un solo medio, además de una notable inferior pérdida de carga. No obstante, su uso no se ha normalizado, sobre todo por la dificultad de conseguir todos los materiales, como son el granate y la magnetita, además de la posibilidad de la indeseable mezcla entre los granos mayores y los menores, de las capas adyacentes (Maldonado, 2004).

Muchos factores influyen en la elección del medio filtrante, pero generalmente, los más importantes resultan ser: el costo, la posibilidad de adquisición de los materiales, y la calidad que se busca para el efluente.

Granulometría del medio filtrante

La granulometría del medio filtrante está definida por varios parámetros que permiten caracterizarlo de forma específica. Los más importantes son: tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad (Cu), tamaño mínimo y tamaño máximo (Maldonado, 2004).

- **Tamaño efectivo:** Este parámetro corresponde al 10 % del total del peso acumulado que pasa a través de mallas de una serie granulométrica.
- **Coeficiente de uniformidad (Cu):** Este parámetro expresa la relación que hay entre el 60% y el 10% del tamaño de los granos, del total del peso acumulado de la muestra que pasa a través de mallas de una serie granulométrica.
- **Tamaño mínimo:** Es el tamaño de grano por debajo del cual no deben encontrarse partículas del medio filtrante.
- **Tamaño máximo:** Es el parámetro que determina que no deben encontrarse granos de mayor tamaño en el medio filtrante.

Peso específico del material filtrante

El peso específico es un parámetro físico derivado que se obtiene de la misma forma que se obtiene para cualquier otra sustancia o material, como en el caso del medio filtrante, en el cual es igual al peso de los granos dividido por el volumen que ocupan estos. Algunos valores comunes se observan en la tabla 1.9.

Tabla 1.9 Peso específico de materiales filtrantes comunes

Material	Peso específico (ton/m³)
Arena	2.65 - 2.67
Antracita	1.50 - 1.70
Granate	4.00 - 4.20

(Maldonado, 2004)

1.6 Calidad del agua

Numerosos estudios han documentado el riesgo sanitario que representa el entrar en contacto o consumir agua proveniente de sistemas de tratamiento y de distribución municipal, que no se tratan de forma correcta. Estos riesgos son comúnmente enfermedades infecciosas producto de agentes patógenos tales como virus, bacterias y parásitos, que generalmente derivan en padecimientos de tipo gastrointestinal, los cuales pueden llegar a ser letales (Galdos-Balzategui et al., 2017).

Es en función de una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos que la calidad del agua es definida y la convierten en apropiada para el uso que se tenga destinado, tal como bebida, baño, higiene, riego agrícola, etcétera.

En la selección de la fuente de abastecimiento de agua, teóricamente, se debe tener en cuenta la calidad del agua como un criterio técnico fundamental con el fin de evitar efectos nocivos en la salud de los beneficiarios del proyecto, en particular en sistemas de abastecimiento de agua potable o de agua que tenga un contacto directo con las personas de comunidades rurales dado que las alternativas de la fuente y la posibilidad de tratamiento del agua son limitadas.

El agua que tiene como fin el reúso para riego agrícola responde a otros criterios de calidad en función de los mismos parámetros, pero con mayor tolerancia en la presencia de estos. Asimismo, como se ha mencionado ya en capítulos anteriores, para las actividades domésticas que no requieren el uso de agua potable, tales como las descargas del inodoro, las aguas grises representan una solución factible para el ahorro de agua, no importando la calidad que presenten.

Las aguas tratadas, no necesariamente tienen que cumplir con lineamientos para considerarse potables, siempre y cuando el uso que se les vaya a dar no sea tal. Para el caso de las aguas grises tratadas con fines de reúso agrícola, será de especial importancia la NOM-001-SEMARNAT-1996, pues es esta la que determina la calidad de las descargas de aguas residuales tratadas en bienes nacionales, tales como el suelo para reúso agrícola.

1.7 Normatividad sobre calidad del agua en México

De acuerdo a la legislación mexicana es la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 la que <<establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales>> y en la que se expresan los límites para los contaminantes en aguas para uso en riego agrícola, tales como embalses naturales y artificiales, así como para su utilización en el suelo.

El fin de esta norma es salvaguardar la calidad y mantener posible la utilización de las aguas y bienes nacionales, definidos en el artículo 27 de nuestra Constitución Política y en la Ley de Aguas Nacionales.

Los contaminantes que se presentan en las descargas de aguas residuales que pueden ser estabilizados o removidos con métodos de tratamiento convencionales, se denominan contaminantes básicos tales como grasas y aceites, materia flotante, sólidos en general, y la demanda bioquímica de oxígeno que es un indicador de la capacidad del agua para sostener vida. La tabla 1.11 muestra los límites permisibles de estos en las aguas residuales tratadas que se pueden utilizar en riego agrícola.

Las aguas residuales pueden contener microorganismos, quistes y huevos de parásitos que representan un riesgo a la salud humana, fauna y flora. A estos se les denomina <<contaminantes patógenos y parasitarios>>. La NOM-001-SEMARNAT-1996 solo considera como tales a los huevos del helminto y coliformes fecales.

La determinación de esta clase de contaminación será con el indicador de los coliformes fecales, siendo 1000 para el promedio mensual y 2000 para el promedio diario como número más probable (NMP), de coliformes fecales por cada 100 ml de agua residual, límites presentados en la tabla 1.10.

Tabla 0.10 Límites permisibles de contaminación por patógenos en agua para uso en riego agrícola

Parámetros	Límites permisibles en contaminantes básicos					
	Uso en riego agrícola (A)					
NMP/100 ml	Ríos		Embalses naturales y		Suelo	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Coliformes fecales	2000	1000	2000	1000	2000	1000

(NOM-001-SEMARNAT-1996, 1996)

Los metales pesados y cianuros son otros parámetros que se revisan en las aguas residuales que tienen como fin el uso agrícola. Acorde a esta Norma Oficial Mexicana solo aplican los siguientes: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuros. Los límites máximos permisibles se pueden encontrar en la tabla 1.12

Tabla 0.11 Límites permisibles de contaminantes básicos para uso en riego agrícola

Parámetros	Límites permisibles en contaminantes básicos					
	Uso en riego agrícola (A)					
mg/l excepto cuando se especifique	Ríos		Embalses naturales y artificiales		Suelo	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura a C°	N.A	N.A	40	40	N.A	N.A
Grasas y aceites	15	25	15	25	15	25
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	N.A	N.A
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	N.A	N.A
DBO ₅	150	200	75	150	N.A	N.A
Nitrógeno total	40	60	40	60	N.A	N.A
Fósforo total	20	30	20	30	N.A	N.A

(NOM-001-SEMARNAT-1996, 1996)

Tabla 0.12 Límites permisibles para metales pesados y cianuros en agua para uso en riego agrícola

Parámetros	Límites permisibles para metales pesados y cianuros					
	Uso en riego agrícola (A)					
mg/l excepto cuando se especifique	Ríos		Embalses naturales y artificiales		Suelo	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4	0.2	0.4	0.05	0.1
Cianuros	1	3	2	3	2	3
Cobre	4	6	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	1	1.5	0.5	1
Mercurio	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	1	5	10
Zinc	10	20	10	20	10	20

(NOM-001-SEMARNAT-1996, 1996)

2. Aspectos generales de la cuenca hidrológica de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas

En el presente capítulo se describen las características principales de la cuenca hidrológica de San Cristóbal de Las Casas (también conocida como cuenca hidrológica del Valle de Jovel), puesto que por ser el territorio geográfico en donde ejecuta el proyecto, que ha sido descrito de manera breve en los capítulos anteriores y que será revisado detalladamente en el capítulo siguiente, el cual es el motivo de estudio del presente trabajo de tesis, se considera necesario dar una revisión a esta que se define como el área de trabajo.

2.1 Concepto de cuenca

Es una zona de la superficie del planeta, en donde todas las precipitaciones, sean pluviales, de granizo o de nieve, tienden por medio de las corrientes existentes a verterse a un mismo punto de salida (Aparicio, 2010).

Existen las endorreicas y exorreicas. Las primeras no tienen salida al océano, ya sea directa o indirecta, sino que desembocan o se infiltran dentro de los límites de la cuenca, mientras que las segundas tienen su punto de salida en los límites de la cuenca y se unen a otra corriente o al océano (Aparicio, 2010).

2.2 Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica de San Cristóbal de Las Casas

Dentro de la Región Hidrológica Número 30 denominada Grijalva-Usumacinta, la cual agrupa 83 cuencas, en su subdivisión RH30Eb Alto Grijalva se encuentra la cuenca hidrográfica de San Cristóbal de Las Casas, en la parte centro-norte del estado de Chiapas (figura 2.1) (CONAGUA, 2018).

La CHSCLC está localizada en la región socioeconómica de los Altos de Chiapas que forma parte de la provincia fisiográfica llamada Meseta Central de Chiapas (Espíritu, 1998).

La cuenca era endorreica, puesto que fue abierta mediante el túnel del Sumidero, en el periodo de 1974-1976 para aminorar los riesgos de inundación del valle, convirtiéndola en una cuenca exorreica.

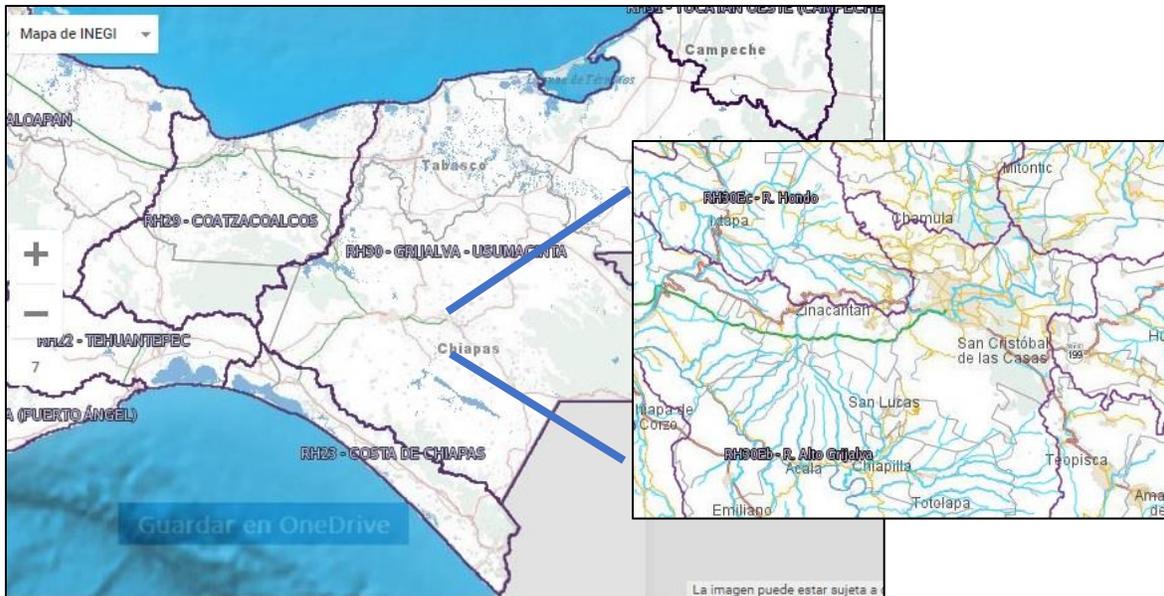


Figura 2.1 Macro y microlocalización de la cuenca hidrográfica de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas (CONAGUA, 2014)

Encontrada entre las coordenadas extremas $92^{\circ} 38' 13''$ de longitud oeste y $16^{\circ} 44' 09''$ de latitud norte, con aproximadamente 28,558 hectáreas (258.58 km^2) de extensión con forma semialargada. Sus parteaguas se encuentran al norte en el municipio de San Juan Chamula, al nororiente por el volcán Tzontehuitz y el municipio de Tenejapa, y al oriente por el municipio de Huixtán.

A 2,110 msnm se encuentra el punto más bajo de la cuenca, en el sumidero de San Cristóbal de Las Casas, y a 2,880 msnm se halla el punto más alto, correspondiente a un punto en las inmediaciones del volcán Tzontehuitz. Son cinco los municipios, que total o parcialmente comprenden a la cuenca, siendo San Cristóbal de Las Casas el centro económico, político, y ciudad más importante de la región (Comité de Cuenca Valle de Jovel; et al., 2010).

2.3 Hidrología superficial de la cuenca

En la cuenca se presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temporada de secas que va de noviembre a mayo. Las temperaturas que se experimentan a lo largo del año oscilan entre los 12° y 24° en la escala de Celsius y en las partes altas rondan entre los 12° y 20° C, que en invierno pueden descender hasta -3° C, provocando heladas.

Las precipitaciones se encuentran en un rango entre los 1000 y 1800 mm en el valle, en tanto que los valores van desde los 1000 a los 3000 mm en las partes altas, representadas en colores en la figura 2.2, las cuales van del verde claro para las altitudes menores al morado oscuro para las altitudes mayores, así como el parteaguas de la cuenca de interés (Santiago, Manco, Choque, Ramírez, & Valencia, 2016).

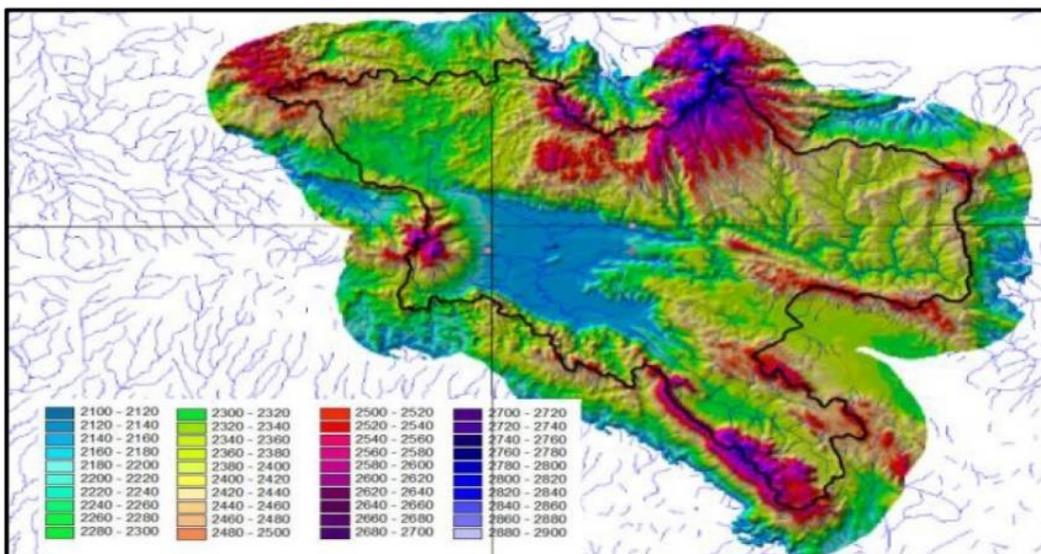


Figura 2.2 Altitudes y parteaguas de la cuenca hidrológica de SCLC, Chiapas (Santiago et al. 2016)

Cinco son las escorrentías principales que se forman en la cuenca, los cuales son (en orden alfabético) el río Amarillo, río Chamula, río Fogótico y río San Felipe, además del arroyo Navajuelos (figura 2.3), junto con un remanente de 225 hectáreas de humedales de montaña, denominados La Kisst y María Eugenia (Santiago et al., 2016).

Al noreste del municipio de San Cristóbal de Las Casas nace el Río Amarillo, recorriendo cerca de 10 km a través de la microcuenca Peje de Oro, y 4 km más dentro de la cabecera municipal hasta unirse con el río Fogótico. Este último, forma su caudal con aguas del río denominado San Antonio y con la vertiente sursureste del volcán Tzontehuitz que aporta de forma intermitente. Recorre 12 km en la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, hasta unirse con el río Amarillo para posteriormente sumergirse en el túnel del Sumidero, obra construida con el propósito de evitar inundaciones en el Valle de Jovel. El río Chamula atraviesa un par de colonias en la porción noreste de la ciudad, descendiendo de la microcuenca que forman el cerro Milpoleta y el volcán Huitepec (Gómez et al., 2008).

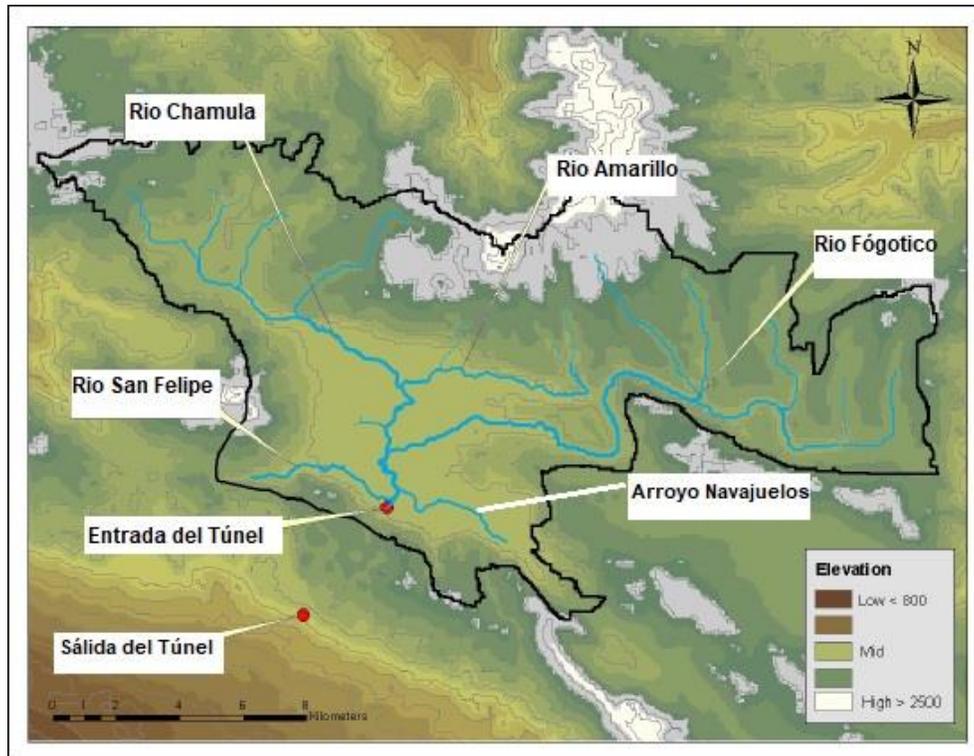


Figura 2.3 Hidrología superficial de la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas (Bencala et al., 2006)

2.4 Balance hídrico en la cuenca

El balance hídrico está definido por la expresión:

$$En = ETR + E + Ex + \Delta a$$

en la cual se determina al concepto como las entradas (En) menos las salidas de una cuenca (ETR + E + Ex + Δa), en donde En = Precipitación promedio anual por

subcuenca; ETR = Evapotranspiración real promedio anual por subcuenca; E = Esgurrimiento por subcuenca; Ex = extracción de agua; Δa = Almacenamiento total por subcuenca (Espíritu, 1998).

Precipitación

La máxima precipitación de la cuenca se encuentra en una de las zonas más altas de esta y va disminuyendo de forma gradual y semiparalela a las curvas de nivel del volcán Tzontehuitz, montaña que alcanza los 2880 metros sobre el nivel del mar, hacia las partes bajas de la cuenca donde se encuentra la urbe de San Cristóbal. Los valores se calcularon de 2616 mm a 984 mm. El aumento de la temperatura y el decremento de la altitud son directamente proporcionales a la variación de las precipitaciones, que tienen una clara tendencia de decremento (Espíritu, 1998)

Evapotranspiración

El resultado que Espíritu (1998) presenta es de 690 mm el promedio anual para toda la cuenca. Por otra parte, aplicando el método de la precipitación anual, el valor alcanza los 714 mm de promedio anual.

En el caso de la evapotranspiración real por subcuencas (ETR), los valores obtenidos son de 596 mm como máxima de promedio anual y 556 mm como mínimo promedio anual.

La correlación según Pearson entre la precipitación y la evapotranspiración de la cuenca es de 0.53, lo que sugiere que la segunda es directamente proporcional al incremento de los valores de la primera (Espíritu, 1998).

Esgurrimiento

El volumen total calculado para toda la cuenca de acuerdo a Espíritu (1998) es de 103 millones de m³, a partir del cálculo de cada uno de los esgurrimientos para las subcuencas mediante la ecuación:

$$V_e = PM \text{ As } C_e$$

donde:

V_c = Volumen anual de escurrimiento en m^3 por subcuenca; PM : Precipitación media en m , por subcuenca; A_s = Área de subcuenca; C_e = Coeficiente de escurrimiento.

En la parte crítica del estiaje en los meses de marzo y abril, así como inmediatamente después de las lluvias, los resultados de las mediciones críticas que revelaron descensos en los niveles de agua en las corrientes de 30 % para la zona oriente de la cuenca, y alcanzando valores que van del 50 al 100 % en las zonas poniente y sur de la cuenca (Espíritu, 1998).

Almacenamiento

De la misma forma que en el caso del escurrimiento, las mediciones de campo en épocas críticas de estiaje, y después de las lluvias, detectando variaciones en los manantiales: de la parte noreste se detectó un incremento del 40 al 50 % del caudal. Valores de entre 90 % y 100 % se registraron en la parte este, y en el centro de la cuenca, una variación mayor, entre los 20 y 87 %. El dato máximo de caudal de los manantiales de la cuenca, se registró en la subcuenca de San Cristóbal con 400 l/s.

Extracción

El dato de la extracción arrojaba un gasto de 356 l/s y solo había 5 manantiales en actividad. La industria refresquera y otros particulares extraían 196 l/s de acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (Espíritu, 1998).

La ecuación para determinar la proyección de población futura:

$$P_{i+1} = (P_i + i/100)$$

donde:

$$P_{i+1} = \text{Población futura}; i = \text{tasa de crecimiento}$$

El resultado del consumo total demandado en la cuenca para 1997 de 60 593 556 m^3/s , con 87% del total, demandado por la subcuenca de San Cristóbal, donde se encuentra la urbe del homónima (Espíritu, 1998).

Disponibilidad proyectada

Para el año 2010, se proyectó un aumento en la demanda de consumo promedio del 120%, los valores de disponibilidad de agua disminuirían en tres subcuencas: San Cristóbal, Chamula y Las Ollas. Dato que no pudo ser corroborado, al no contar con estudios específicos de ello.

En la mayoría de los casos estudiados por Espíritu (1998), el agua entrante era todavía mayor que la saliente por extracción, lo que representa un resultado positivo en la disponibilidad de agua en las subcuencas.

Probables efectos del cambio climático en el balance hídrico de la CHSCLC

Los resultados aquí expuestos son parte del estudio de <<Modelación de los efectos del cambio climático en la cuenca del Valle de Jovel, Chiapas>>, en donde se utilizó el modelo hidrológico <<Herramienta de Evaluación del Suelo y el Agua>> (SWAT, por sus siglas en inglés) dentro del software ArcGIS 10.2. El modelo fue desarrollado por USDA Agricultural Research y Texas A&M AgriLife Research de la Universidad de Texas en la década de los noventa. Este modelo que se basa en la ecuación del balance hídrico, está desarrollado con el objetivo de analizar la calidad y cantidad de entrada, salida y almacenamiento de agua e incluso sedimentos, así como el impacto en las cuencas, por las prácticas de manejo, cambios de uso de suelo y el cambio climático global (Santiago et al., 2016).

El periodo comprendido entre el 1 de enero de 1984 al 12 de diciembre de 2013, de casi 30 años, fue el elegido para correr en la simulación, que consideró el Modelo Digital de Elevación (MDE) obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del INEGI, además de otras consideraciones, como Trayectorias de Concentraciones Representativas RCP4.5, el cuál es un escenario de emisiones moderado, con una radiación global de energía de 4.5 Wm^{-2} y concentraciones de 650 ppm e incremento de la temperatura media anual en +1.6, entre otras.

Los resultados obtenidos fueron comparativos; El modelo fue ejecutado en dos escenarios, el actual (2016), así como en el de cambio climático. Comparando ambos, ante el supuesto del cambio climático, hay diferencias cuantitativas

importantes, puesto que se esperaría una reducción en la escorrentía superficial del orden del 16%; 9% en la evaporación y evapotranspiración y de un 6% en la recarga del acuífero. Estas proyecciones generarían efectos <<positivos>> del cambio climático, pues disminuye la posibilidad de inundaciones y pérdida de suelo. No obstante, las proyecciones respecto a la evapotranspiración provocarían un decremento de la productividad primaria neta de los ecosistemas y agroecosistemas de la cuenca, algo que se traduciría como menor captura de CO₂ en bosques y humedales, así como la disminución en los rendimientos agrícolas. Con respecto al aprovechamiento del recurso hídrico sin cambios, cosa improbable pues la tendencia es siempre en aumento, dado el constante crecimiento de la población, en un periodo de alrededor de 15 años se tendrían problemas serios de abastecimiento de agua potable, con el recurso vital que se considera excedente en la cuenca, pero del que se tiene un muy mal manejo, aunque no se contempla un estrés hídrico elevado (Santiago et al., 2016).

2.5 Situación, distribución y acceso al agua en la cuenca

De acuerdo con datos de la CONAGUA, en la región de la frontera sur de México (Chiapas y Tabasco), la disponibilidad de agua superficial y subterránea es de 158.26 km³, equivalente a 24 549 m³/persona-año. Sin embargo, aun presentando esta abundancia, tan sólo es el 77.8% de la población chiapaneca tiene alguna clase de conexión a una fuente de agua potable, siendo así uno de los 5 estados mexicanos por debajo del nivel del 80%. Las estimaciones del agua que se extrae en esta región, que son datos de los organismos públicos municipales que suministran el agua, arrojan cantidades de cerca de 2 km³ o 305 m³/persona-año, las cuales engloban ventas en todos los sectores, como industria (3%), doméstico (22%) y agricultura (75%). Para dimensionar el número, basta con decir que es menos de la mitad de 791 m³/persona-año promedio del que el país goza. Aunque no existen datos compilados por CONAGUA para municipios individuales, la tesis de Bencala et al. (2006) sugiere que la cobertura en la cuenca de San Cristóbal es aún menor que la estatal.

El Sistema de Agua Potable y Alcantarillado Municipal es un organismo descentralizado que se encarga de la obtención, almacenamiento y distribución del agua en el municipio de San Cristóbal de Las Casas. Organismos análogos lo hacen en los demás municipios que forman parte de la cuenca.

Actualmente SAPAM San Cristóbal cuenta con 12 manantiales y pozos que abastecen a la ciudad con el vital líquido. Cuenta además con 33 cárcamos y tanques de almacenamiento. 5 estaciones de bombeo se sirven de los manantiales y pozos antes mencionados para distribuir el agua a los 42 mil usuarios registrados en el padrón. SAPAM hace hincapié en el hecho de que este padrón no es fiable, pues existen tomas clandestinas que no son tomadas en cuenta (Villafuerte, 2018).

No obstante que como se ha mencionado ya, la disponibilidad de agua en el sureste mexicano es la más alta en el país, diversos factores limitan el acceso a ella, esto aunado al crecimiento poblacional, provoca que, durante la temporada de sequías, el municipio de San Cristóbal recurra a un programa de rotación para surtir del vital líquido a diferentes colonias. Entre los meses de diciembre de 2004 y noviembre de 2005, el estudio de Bencala et al (2006), arrojó que la cantidad total de agua extraída del manto acuífero fue de 14.6 millones de m^3 , dato que fue utilizado para estimar el consumo por persona en la cuenca, en aquel entonces. Consideraron un 50% de pérdidas en el sistema, y que el volumen de agua extraída se utilizaba en la población que en aquel entonces rondaba los 138,000 habitantes, se estimó que el abastecimiento aproximado era de 143 l/persona-día o lo que sería lo mismo, 52 m^3 /persona-año. Esta estadística muestra solo el suministro industrial y doméstico de la ciudad, en la cual se desarrolla poca actividad agrícola, además de que es de baja escala, a este par de razones se debe la discrepancia con las estadísticas de los párrafos anteriores (Bencala et al., 2006).

La cuenca tiene situadas dentro de su territorio, 42 comunidades, la mayor parte de estas tiene un comité de agua que se encarga del suministro normativo del agua potable y la gestión de este recurso. Varias de estas carecen de infraestructura,

debido sobre todo a sus bajos recursos económicos, utilizando la mayoría de las veces la alternativa de los escurrimientos superficiales. Aun así, la percepción generalizada, es que el agua extraída de los manantiales es mejor, esto sugiere la adquisición de conciencia acerca de los problemas de contaminación que presentan las aguas superficiales (Espíritu, 1998).

La siguiente tabla (2.1), elaborada con datos de la Secretaría de Desarrollo Social recolectados en 2016, muestra el bajo porcentaje de acceso al servicio de agua, de los municipios pertenecientes a la cuenca, con excepción de San Cristóbal de Las Casas, que presenta una cobertura alta, pero por debajo del promedio nacional.

Tabla 2.1 Estadísticas de acceso al servicio de agua en municipios de la CHSCLC

Acceso al servicio de agua en los municipios pertenecientes a la CHSCLC	
Municipio	Acceso al agua (%)
Chamula	41.7
Huixtán	64.6
San Cristóbal de Las Casas	88.3
Tenejapa	58.8
Zinacantán	46

(SEDESOL,2016)

En la tabla 2.2 se observa que el acceso al drenaje es también limitado en los municipios que forman parte de la cuenca. Se estima que el porcentaje de viviendas que no cuentan con este servicio es de poco más del 30%, lo cual repercute en temas de salud pública así como en el deterioro de la calidad del agua superficial, debido a que estas descargas son enviadas directamente a cauces y arroyos de la cuenca (Estrada, Trucios, Villanueva, Cerano, & Constante, 2013).

Tabla 2.2 Estadísticas de drenaje en municipios de la CHSCLC

Municipio	CON DR	SIN DR	NO ESP
Chamula	566	3,382	37
Huixtán	0	148	0
San Cristóbal de las Casas	21,165	3,092	129
Tenejapa	0	71	0
Total	21,731	6,693	166

(Estrada et al, 2013)

Aunque no existen datos oficiales, se estima que el 60% de las aguas superficiales se encuentran contaminadas por aguas residuales (Bencala et al., 2006), que provienen de alrededor de 185,000 residentes de la ciudad (INEGI, 2015) y más de 40,000 que viven en la cuenca, en altitudes más elevadas que el área urbana, habitantes que residen en comunidades indígenas de los municipios que parcialmente pertenecen a la cuenca. Este último, es un grupo vulnerable que se interesa por la gestión del agua de la cuenca, ya que viven en los límites de esta y tienen poco o nulo acceso a la infraestructura de SAPAM, por lo que se valen de pozos pequeños, ríos o manantiales locales para abastecerse de agua. Dentro de ellos existen agricultores de baja escala, tanto para comercio como de subsistencia, algunos residen fuera de la cuenca, pero reciben las aguas residuales de esta y la utilizan para sus cultivos (Bencala et al., 2006).

Evidencia empírica señala que el SAPAM tiene cubierta la demanda de alrededor del 94% de la población de San Cristóbal de Las Casas. Mientras que los habitantes restantes tienen que recurrir a sistemas independientes de agua, que son dotados por agua de la misma cuenca (Galdos-Balzategui et al., 2017).

Los beneficiarios de los proyectos que se analizan en el presente trabajo de tesis serán residentes de la cuenca hidrológica de San Cristóbal, que son parte del grupo vulnerable de indígenas sin infraestructura hidráulica municipal. Debido a esta condición es necesario brindarles alternativas sostenibles, como la captación de agua de lluvia y el reciclaje de sus aguas, que les permita tener acceso constante a este recurso vital.

2.6 Caracterización socioeconómica de la cuenca

El desarrollo social en Chiapas y en la cuenca de San Cristóbal de las Casas es un reto y objetivo que tiene que ir de la mano con la conservación de sus vastos recursos naturales, por lo tanto, las políticas gubernamentales y acciones de organizaciones civiles deben estar encaminadas en ambos sentidos. Si bien es cierto que el grado de marginación en el estado ha mostrado cierta evolución después de la puesta en marcha de múltiples programas sociales emprendidos por los tres niveles de gobierno, es también verdadero que se traduce en una limitante para la aplicación de políticas medioambientales que contribuyan a la preservación de los recursos naturales (Estrada et al., 2013).

A continuación, se presentan una serie de datos analizados sobre indicadores de pobreza y rezago social en los municipios que forman parte de la cuenca de San Cristóbal de Las Casas. Datos que fueron extraídos del <<*Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2010 y 2016*>> presentado por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) y la Subsecretaría de Planeación, Evaluación y Desarrollo Regional, dependiente de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, hoy Secretaría del Bienestar), respectivamente. Cabe mencionar, que los datos son del municipio en su totalidad, y que estos pertenecen solo parcialmente a la cuenca en estudio, pero dan una idea de la situación general con respecto a la pobreza y la carencia social que existe en los servicios básicos del agua y drenaje.

En la tabla 2.3 se observa claramente el alto porcentaje de pobreza, tanto moderada como extrema que existe en la mayoría de los municipios en los que se halla la cuenca y que es representativo del estado de Chiapas. Esto se traduce en múltiples carencias, tanto alimentarias como de infraestructura, esta última como resultado de la desatención del gobierno y la falta de políticas que atiendan los problemas, así como la desviación de recursos que no permiten el desarrollo de estos municipios con alto grado de marginación. A pesar de que son datos del año 2010, se estima que los valores no han variado mucho.

Tabla 2.3 Indicadores de pobreza en municipios de la CHSCLC

Municipio	Indicadores de pobreza (2010)	
	Pobreza moderada (%)	Pobreza extrema (%)
Chamula	25.1	69.7
Huixtán	32.4	60.5
San Cristóbal de Las Casas	44.9	21.3
Tenejapa	30.6	65.2
Zinacantán	30.1	64.8

(CONEVAL, 2010)

En la tabla 2.4 se aprecia el alto índice de viviendas que padecen alguna carencia en servicios básicos en los municipios de interés. Chamula alcanza un preocupante 91.42 por ciento de viviendas con alguna clase de carencia en servicios básicos.

Tabla 2.4 Indicadores de carencias en viviendas de municipios de la CHSCLC

Municipio	Total de viviendas	Carencia por servicios básicos en la vivienda (2016)			
		Número de viviendas con carencias	Porcentaje respecto al total de viviendas	Sin acceso al agua (%)	Sin acceso a servicio de drenaje público (%)
Chamula	19,158	17,515	91.42	58.3	63.0
Huixtán	4,705	4,028	85.61	35.4	44.0
San Cristóbal de Las Casas	51,377	11,320	22.03	11.7	6.9
Tenejapa	7,832	7,111	90.79	41.2	40.0
Zinacantán	8,055	6,009	74.60	54.0	21.0

(SEDESOL, 2016)

Los otros municipios, con excepción de San Cristóbal, presentan porcentajes similares. San Cristóbal es el centro económico, social y cultural de la región, una de las razones por las que presenta un menor grado de marginación. Los Altos de Chiapas es una de las regiones con más alto grado de marginación y pobreza del país (Bencala et al., 2006). El promedio de viviendas sin acceso al servicio de agua en estos municipios es de 40.12 %, y en el caso del servicio de drenaje es de 34.98 % que siendo comparados con los valores nacionales de 5.10 y 6.08 % respectivamente, demuestran el nivel de subdesarrollo de esta región en específico.

El estado de Chiapas de acuerdo a datos de la CONAPO y el INEGI, en el periodo de 2003 a 2018, presentó una contracción en el Producto Interno Bruto por

habitante, del 0.3 %. Este alcanzó, para Chiapas, la cifra de 60, 262 pesos anuales (Cantillo, 2018).

Comunidades beneficiadas por los proyectos de filtros de Ciudadanos por la Acción Territorial en la Cuenca del Valle de Jovel A.C.

Las comunidades que fueron beneficiadas con el proyecto de los filtros de aguas grises elaborados por la organización CATVJ y el agua tratada por medio de ellos de donde se extraerán muestras para los análisis de agua, motivo del presente trabajo de tesis, son 3: Joltojtik, San José Buenavista y El Pinar. A continuación, se muestran algunos datos de ellas.

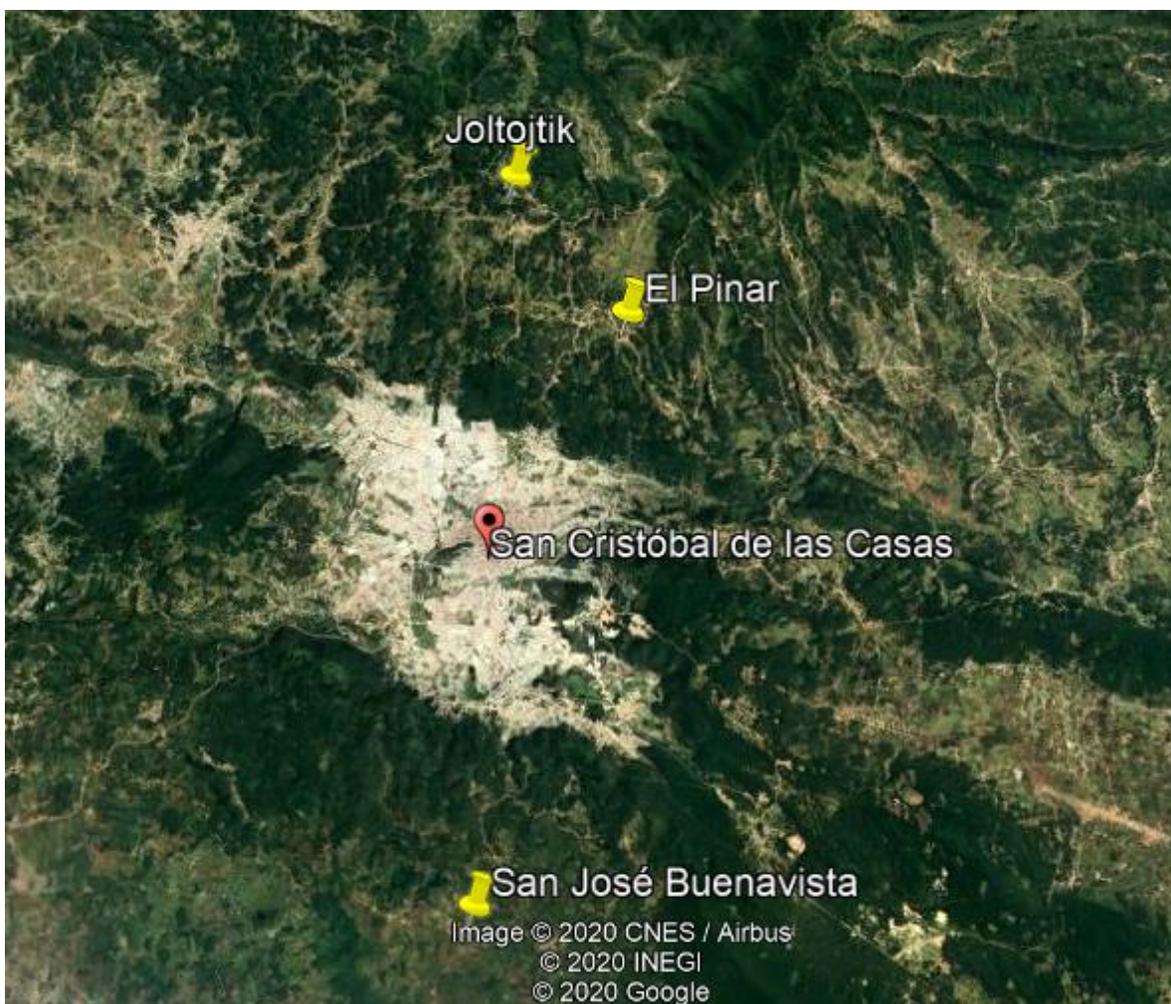


Figura 2.4 Ubicación geográfica de las comunidades beneficiadas (Elaboración propia, 2019)

Joltojtik

Ubicada en el municipio de San Juan Chamula al norte de la cabecera municipal de San Cristóbal de Las Casas (figura 2.4), en 2010 contaba con una población de 340 personas, 157 hombres y 183 mujeres, y reportaba un grado de marginación “Muy alto”. El 29.41% de la población es analfabeta, y el grado de escolaridad promedio es de 2.84 años. Solamente el 36% de la población se consideraba económicamente activa. En Joltojtik hay 91 viviendas. De ellas, el 88,61% contaban con electricidad, el 7,59% tenían agua entubada, el 15,19% tenía excusado o sanitario (SEDESOL, 2013).

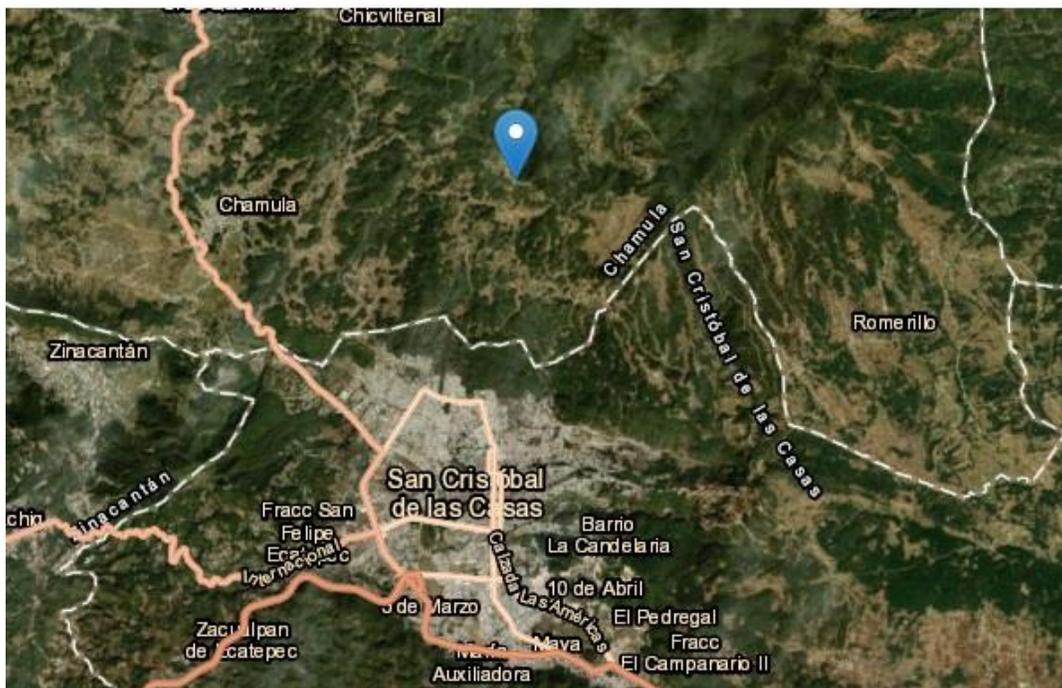


Figura 2.5 Ubicación geográfica de Joltojtik (pueblosamérica.com, 2019)

San José Buenavista

La localidad se encuentra en el lado sur de la cuenca (figura 2.5), dentro del municipio de San Cristóbal de Las Casas, a 2300 metros sobre el nivel del mar. En el 2010 tenía una población de 315 habitantes, de los cuales 153 eran hombres y 162 eran mujeres. Con tan solo 2.21 años de escolaridad promedio, el analfabetismo alcanzaba al 28.25 % de la población. El desempleo rozaba el 73%

entre los mayores de 12 años. En aquel momento la comunidad contaba con 66 viviendas. De ellas, el 98,44% cuentan con electricidad, el 3,12% tienen agua entubada, el 90,62% tiene excusado o sanitario, y el 0,00% lavadora (SEDESOL, 2013).

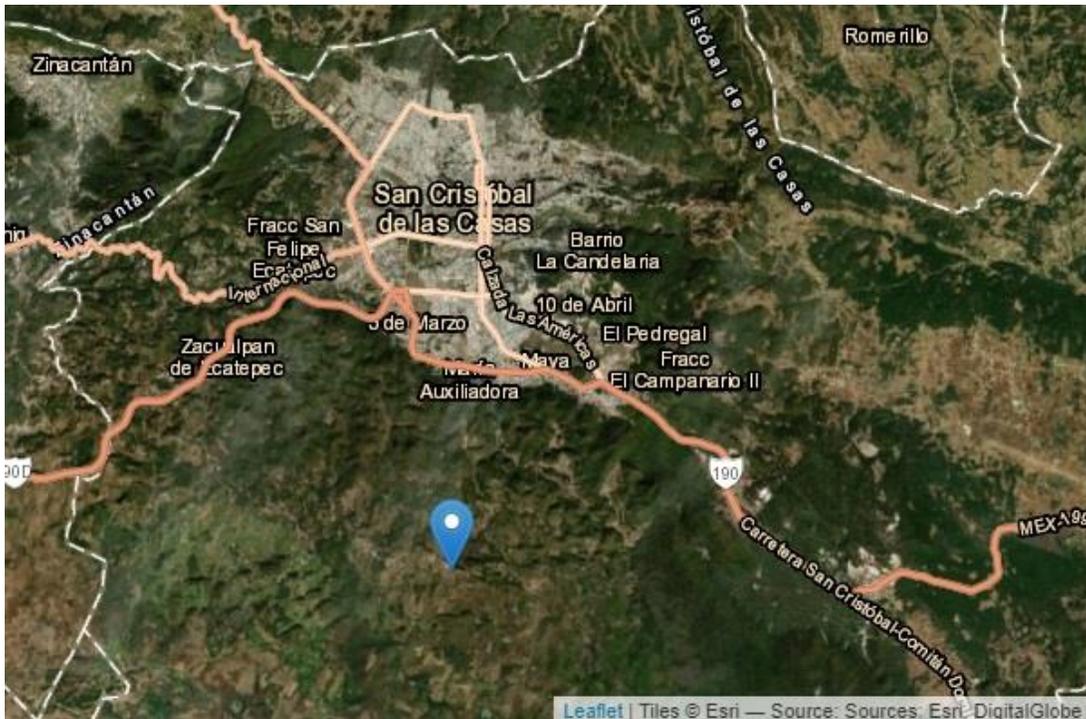


Figura 2.6 Ubicación geográfica de San José Buenavista (pueblosamerica.com, 2019)

El Pinar

Se sitúa en el municipio de San Cristóbal a 2350 metros sobre el nivel del mar, del lado noreste de la cuenca (figura 2.6). En el 2010 alcanzaba una población de 931 habitantes, de los cuales 434 eran hombres y 497 mujeres. Con un grado de marginación “Muy alto”, los índices de desempleo y analfabetismo alcanzaban el 61% y 18% respectivamente. En El Pinar hay 209 viviendas. De ellas, el 96,72%

cuentan con electricidad, el 82,51% tienen agua entubada, el 67,21% tiene excusado o sanitario, el 1,09% lavadora (SEDESOL, 2013).

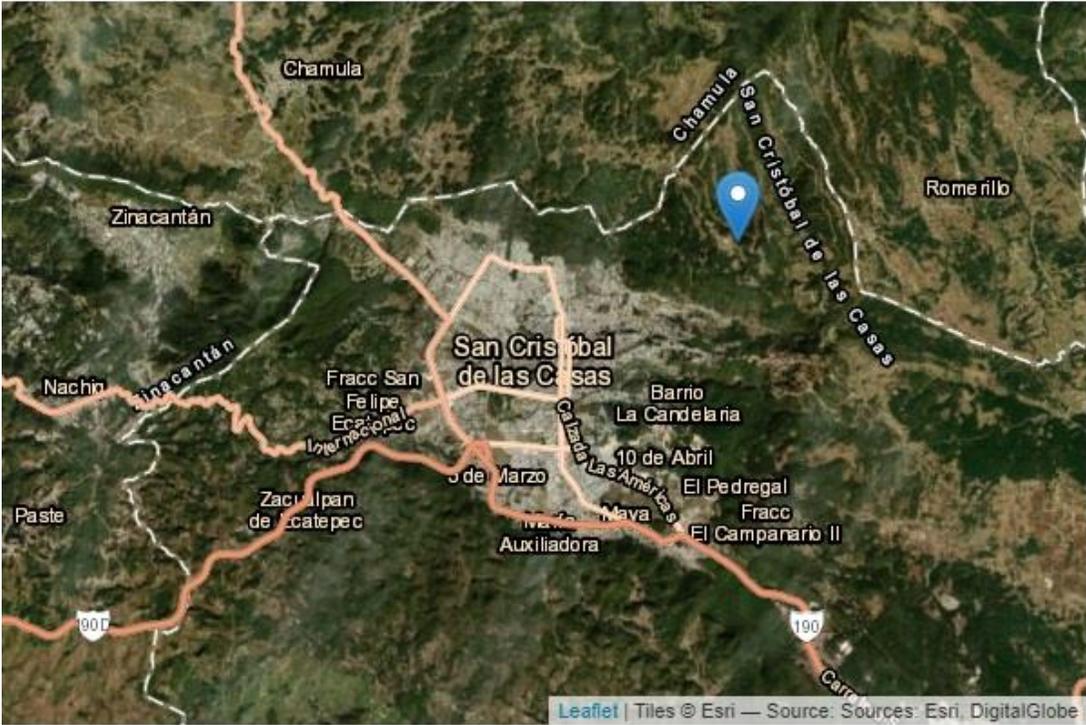


Figura 2.7 Ubicación de El Pinar (pueblosamérica.com, 2019)

3. Metodología en la fabricación y colocación de los filtros de separación por densidad y de materiales de origen pétreo

Los filtros de separación por densidad y materiales de origen pétreo surgen como proyecto por iniciativa de la Arquitecta Mercedes Cortés Ortega durante la labor que ha desempeñado en la asociación civil Ciudadanos por la Acción Territorial en la Cuenca del Valle de Jovel, asociación parte del Comité de Cuenca del Valle de Jovel, ente compuesto por instituciones públicas y privadas, así como por ciudadanos independientes, que tiene como fin la preservación de los recursos de la cuenca de San Cristóbal de Las Casas. El autor de la presente tesis, participó como voluntario por un plazo de 6 meses en la asociación civil mencionada, y fue colaborador constante de la Arquitecta Cortés. Durante este plazo se realizaron diversos proyectos:

- La construcción de invernaderos familiares en parcelas de habitantes de las comunidades
- Acciones COUSSA (Conservación y uso sustentable de suelo y agua)
- Tanques de concreto reforzado con captación de agua de lluvia
- Baños secos con vermifiltros y composta
- Filtros de aguas grises de separación por densidad y agregados pétreos

Todos los proyectos buscan tener un enfoque sostenible, pero con énfasis en el tema ecológico, y beneficiar a las personas de mayor marginación de la cuenca de San Cristóbal.

Los filtros se seleccionaron para realizar una investigación más exhaustiva por el impacto que se consideró podrían tener en las comunidades, además de su alcance, que puede ser mayor, debido a la facilidad de su fabricación, de su colocación, el bajo costo en su elaboración y su funcionalidad. Todo esto coadyuva en la aceptación por parte de los habitantes en los hogares de las comunidades indígenas de la cuenca.

En este capítulo se revisará de manera detallada los siguientes temas: los hogares beneficiados de las comunidades, la elaboración de los filtros, y el funcionamiento.

3.1 Características de los hogares rurales beneficiarios de los proyectos

Las viviendas beneficiadas por los proyectos están localizadas todas en municipios que son parte de la cuenca hidrológica de San Cristóbal. Todas las atendidas hasta el momento de la redacción de este apartado, eran familias indígenas de la etnia tsotsil, con un número mayor a 4 habitantes por hogar.



Figura 3.1 Cocina de hogar beneficiario, comunidad Joltojtik, municipio de Chamula (Elaboración propia, 2019)

Las casas generalmente están construidas con madera, y muchas veces no presentan divisiones entre sus habitaciones más que sábanas o cortinas. Algunos espacios de estas han sido construidos con concreto y tienen recamaras separadas. Las cocinas normalmente cuentan con otra construcción propia y contienen fogones de leña, la fachada de una cocina tradicional se aprecia en la figura 3.1.

En la figura 3.2 se observa una hortaliza típica de estos hogares rurales, las cuales dependen en gran medida del temporal de lluvias, por lo cual, una fuente extraordinaria para la época de estiaje, resultaría ser muy beneficiosa. Los filtros funcionan también como reservorios de agua.



Figura 3.2 Hortaliza doméstica, comunidad El Pinar, municipio de SCLC (Elaboración propia, 2019)

En la mayoría de estas, teóricamente los únicos miembros de la familia económicamente activos son los varones, que se dedican a actividades tales como la carpintería (figura 3.3), venta de madera, y como asalariados en la ciudad de San Cristóbal de Las Casas. No obstante, en algunos casos las mujeres, al ser las encargadas de temas como la agricultura o la atención en la venta de productos como la madera, participaban activamente en la economía del hogar. La mayor parte de sus productos eran llevados a la ciudad y vendidos ahí. Las mujeres en su



Figura 3.3 Carpintería en vivienda beneficiaria, comunidad Agua de Pajarito, municipio de SCLC (Elaboración propia, 2019)

mayoría, se dedicaban al cuidado de los animales, a la recolección de leña, labores domésticas y cuidado de los infantes. Esto propició que ellas participarán activamente en la ejecución de los proyectos.

Aunque en determinadas ocasiones y bajo ciertos criterios se aceptan propuestas de viviendas que se encuentran en los municipios que componen la cuenca más no dentro de los límites de la cuenca, como en el caso de la comunidad Joltojtik, en la que un habitante fue beneficiado, debido a que utilizaba sus aguas grises para regar árboles y plantas de un vivero de su propiedad. El beneficiario de Joltojtik, ideó un sistema en donde intentó tratar el agua reteniéndolo en el suelo de su parcela y posteriormente, hacerlo pasar por un tubo de CPVC enterrado, suponiendo que la retención del agua ayudaría a limpiarla de contaminantes y su paso lento a través del tubo de diámetro pequeño funcionaría como una especie de filtro. El sistema se puede observar de forma parcial en la imagen 3.4. Bajo esta premisa es lógico que la implementación del sistema de filtros por más simple que sea, le pareció interesante y potencialmente útil.



Figura 3.63 Intento de tratamiento de aguas en la comunidad de Joltojtik, municipio de Chamula (Elaboración propia, 2019)

En la figura 3.5 se puede observar la disposición final de las aguas del sistema construido por Don José en su hogar en la comunidad de Joltojtik. El tanque sirvió como sitio de disposición de las aguas tratadas por los filtros



Figura 3.5 Tanque de almacenamiento para reuso de las aguas grises, Joltojtik, municipio de Chamula (Elaboración propia, 2019)

3.2 Estimación del uso de agua en los hogares beneficiados

En las comunidades existen sistemas sencillos de distribución de agua que generalmente solo alimentan a las zonas medias y bajas, incluso hay una percepción mística, de que las deidades, deciden a través de los cerros quienes reciben agua y quienes no (Soares, 2007).



Figura 3.6 Toma de agua en la comunidad Agua de Pajarito (Elaboración propia, 2019)

Muchas veces estos sistemas se componen de mangueras de plástico que proceden de los manantiales o ríos donde captan el líquido vital y lo almacenan en botes o tambos, como se logra observar en la figura 3.6. Estos sistemas comprenden algunas válvulas o a veces sistemas sencillos que obstruyen el paso del agua de forma manual. Normalmente las tomas de agua se encuentran en el espacio solar de las viviendas.

El uso del recurso hídrico en los hogares beneficiados, se estimó mediante encuestas realizadas a habitantes de estos, cuestionando la cantidad de botes de 20 litros (como unidad de referencia) que utilizan diariamente para una actividad determinada. Se le preguntó a la mujer adulta madura, pues ella era la responsable de la mayoría de estas actividades. Cabe mencionar que ellos realizan su higiene personal en baños que son un concepto similar al temazcal, y generalmente las mujeres y niños se bañan juntos, mientras que los hombres adolescentes y adultos lo hacen por separado.

Es preciso mencionar que el aforo total del consumo de agua es complejo, debido a que el único lugar en donde las aguas residuales no son de *no retorno* es en el uso de la batea, en donde realizan el lavado de los trastes y de la ropa, es por ello que se decidió realizar encuestas para conocer el uso en las otras actividades, por lo tanto, es un valor aproximado. En la tabla 3.1 observamos los resultados, acorde a las respuestas obtenidas.

Tabla 3.26 Uso semanal estimado en los hogares beneficiados

Actividad	Comunidad								
	Joltojtik(4 adultos, 2 niños)			San José Buenavista(2 adultos, 2 niños)			El Pinar (6 adultos, 2 niños)		
	Frecuencia (semanal)	Volumen utilizado (litros)	Subtotal	Frecuencia (semanal)	Volumen utilizado (litros)	Subtotal	Frecuencia (semanal)	Volumen utilizado (litros)	Subtotal
Lavar trastes	7	40	280	7	20	140	7	50	350
Baño (temazcal)	3	80	240	2	60	120	4	160	640
Lavar ropa	1	200	200	1	120	120	2	220	440
Limpieza del hogar	2	40	80	2	40	80	2	80	160
Cocinar	7	10	70	7	10	70	7	20	140
		Total	870		Total	530		Total	1730

(Elaboración propia, 2019)

Se aprecia una diferencia relativamente grande en el uso del agua en cada comunidad. Esto se debe sobre todo a cuatro razones principales: número de habitantes del hogar, al sistema de distribución existente en la comunidad, las tomas de agua dispuestas en el hogar y la disponibilidad de agua asociada al manantial.

Tabla 3.2 Volumen utilizado diario aproximado del total de la vivienda y del volumen por persona

Joltojtik		San José Buenavista		El Pinar	
Volumen diario utilizado (l)	Volumen p/p utilizado diario (l)	Volumen diario utilizado (l)	Volumen p/p utilizado diario (l)	Volumen diario utilizado (l)	Volumen p/p utilizado diario (l)
124.29	20.71	75.71	18.93	247.14	30.89

(Elaboración propia, 2019)

San José Buenavista se encuentra en el sur de la cuenca, en el lugar más seco de esta, donde no se encuentran fuentes de agua superficiales y el suelo presenta un alto grado de degradación.

En la figura 3.7 se detallan los porcentajes de utilización en cada actividad doméstica en la vivienda de San José Buenavista, donde se distingue que la actividad del lavado de trastes es la actividad de mayor consumo, seguido por el lavado de ropa y baño, que juntos alcanzan cerca del 75% del consumo total.

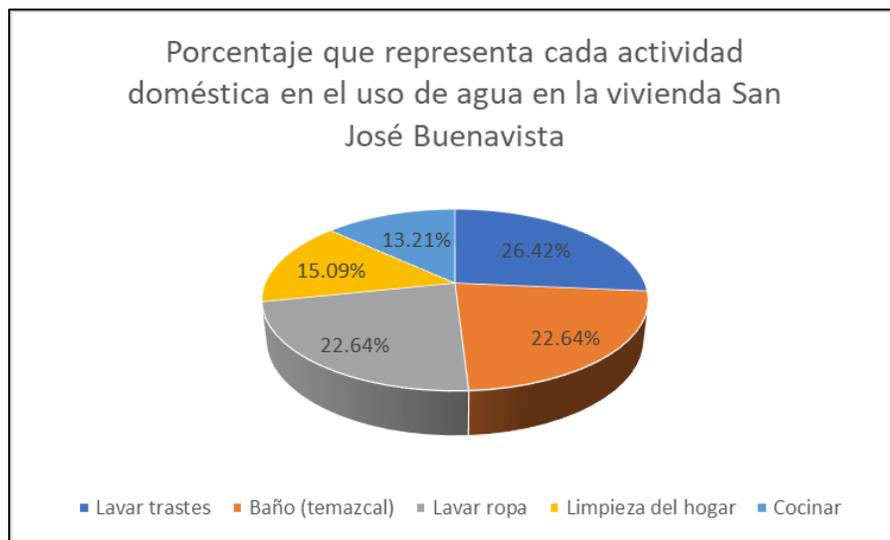


Figura 3.7 Gráfico de los porcentajes de agua utilizada que representa cada actividad doméstica en SJB (Elaboración propia, 2019)

Caso contrario sucede en la comunidad El Pinar, la cual, localizada en la subcuenca del Peje de Oro, presenta buena disponibilidad, pues se alimenta del manantial Tzontehuitz que le provee agua en los periodos de lluvia, presentando cierta escasez en los meses de febrero, marzo y abril. La vivienda beneficiaria, contaba con red entubada desde el manantial y hasta la cocina de la casa y otros lugares de la vivienda. El elevado consumo en la actividad del lavado de trastes (60 litros diarios), responde al hecho de que tienen agua entubada hasta el fregadero de la cocina, con disponibilidad constante, lo que incrementa sustancialmente el uso de esta. Es preciso señalar que el consumo que más aporta es el tema de la ducha, pues ellos cuentan con regadera convencional, provista por el sistema de distribución doméstico que viene del manantial mencionado en líneas anteriores.

En la figura 3.8, se aprecia que la ducha es la actividad que genera un mayor gasto del agua en la vivienda del Pinar, esto relacionado a que esta familia tiene un baño provisto de una regadera convencional además del temazcal y la habitan 8 personas. El lavado de ropa es la segunda actividad de mayor consumo. La limpieza del hogar, el cual, en la cocina donde se llevan a cabo la mayor parte de las actividades, tiene piso de tierra, lo que reduce notablemente su consumo. Entre la cocina y la limpieza del hogar alcanzan apenas un 17.34 % del consumo total estimado.

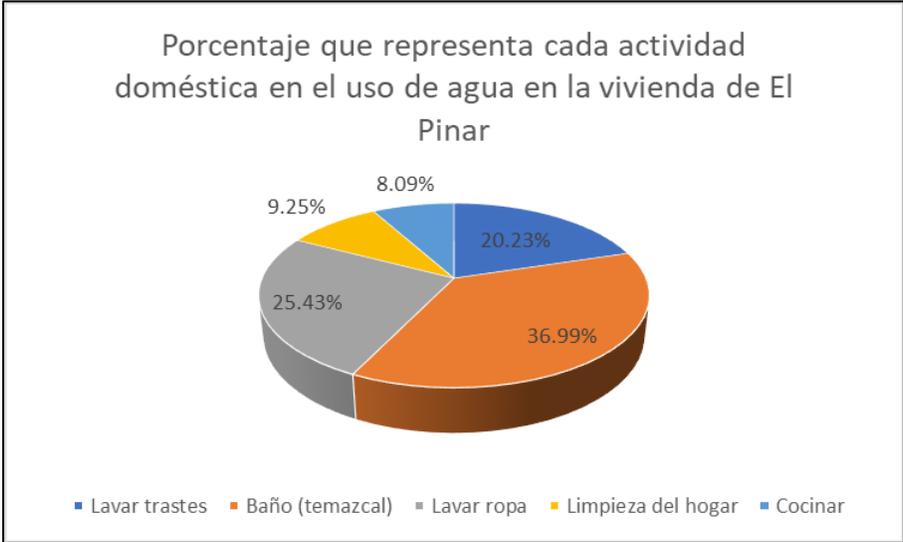


Figura 3.8 Gráfico de los porcentajes de agua utilizada que representa cada actividad doméstica en El Pinar (Elaboración propia, 2019)

En el caso de Joltojtik, el uso diario por habitante ronda los 20 litros de agua, tal y como lo describe Schenerock (2014). El consumo en todas las comunidades refleja un bajo consumo si se compara con la dotación diaria propia de las ciudades, y es consecuente a la administración que se le da al líquido en las comunidades indígenas, conscientes de la escasez que presentan en ciertos momentos del año. La figura 3.9 muestra los diferentes consumos, destacando el baño y el lavado de trastes, actividad de la que se tuvo oportunidad de presenciar y que era evidentemente menos eficiente que en otras viviendas.

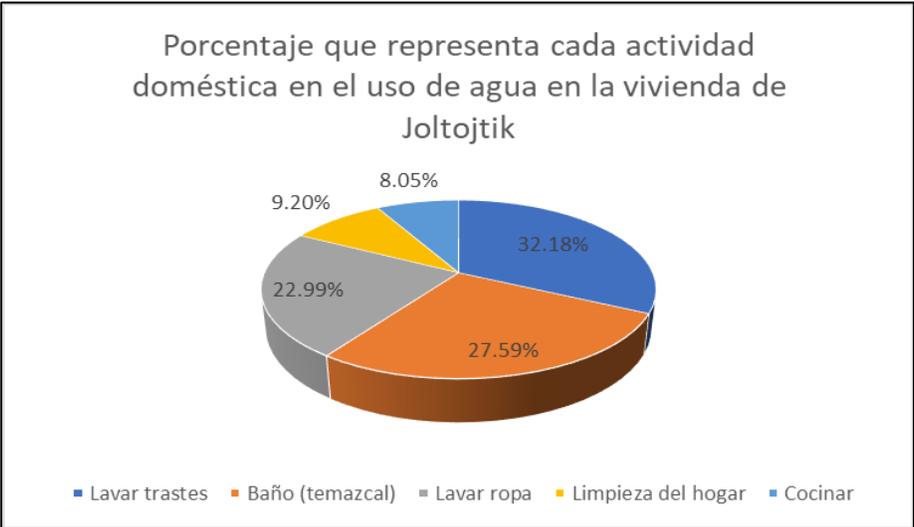


Figura 3.9 Gráfico de los porcentajes de agua utilizada que representa cada actividad doméstica en Joltojtik (Elaboración propia, 2019)

3.3 Concepción de los filtros

La planta embotelladora Inmuebles del Golfo S.A. de C.V. (Coca Cola® / FEMSA®) en la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, recibe diariamente 40 barriles de PEAD (polietileno de alta densidad) con capacidad de 140 litros, que contienen la fórmula base de la bebida Coca-Cola® y otros productos de la empresa. Los barriles utilizados son exactamente como los mostrados en la figura 3.10. Para la empresa no debe ser rentable reenviarlos a la planta donde se produce la fórmula para su reutilización, así que estos recipientes son destruidos y posteriormente desechados como parte de los residuos sólidos municipales.



Figura 3.10 Tambo utilizado de PEAD de 140 litros (Elaboración propia, 2019)

FEMSA San Cristóbal es una de las instituciones privadas que forman parte del Comité de Cuenca del Valle de Jovel, por lo tanto, realiza un trabajo coordinado con las demás instituciones parte de este. Es así como hace del conocimiento a CATCVJAC de la situación de los tambos descrita arriba, en donde se comienzan a barajar alternativas para su reúso.

Una de las alternativas que surgió fue la posibilidad de utilizar los tambos como filtros para aguas grises en hogares de comunidades donde los recursos hídricos escasean, especialmente durante la temporada de estiaje. La propuesta es aceptada por los coordinadores de la asociación y se comienza a dialogar con los habitantes de los hogares en las comunidades y se les explica las ventajas que conlleva la implementación del proyecto en sus viviendas para que acepten o no ser beneficiarios de este proyecto. En la mayoría de los casos se recibieron respuestas positivas.

El boceto del tren de tratamiento se presenta en la figura 3.11, dos filtros de separación por densidades y un filtro de arena final. Se aprecia el cambio en el mecanismo de flujo del agua, con las t's en un principio y la estructura en forma de u en el filtro final

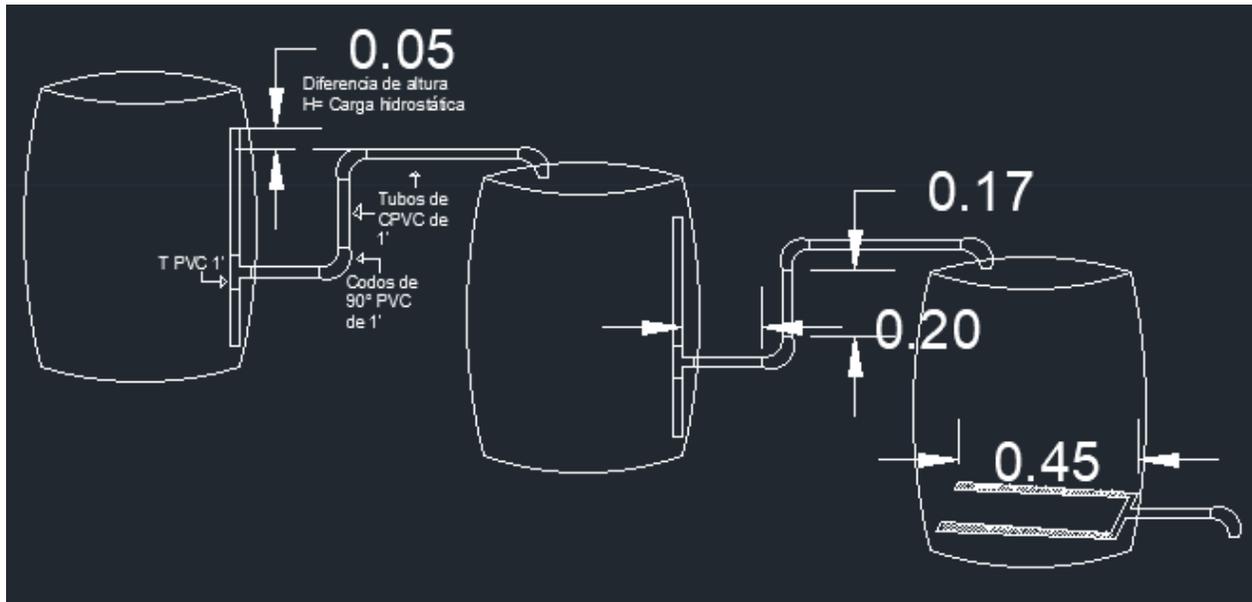


Figura 3.11 Boceto del sistema de filtros (medidas en m, a menos que se indique otra unidad)
(Elaboración propia, 2019)

3.4 Elaboración de los filtros

La elaboración de los filtros es bastante sencilla y puede ser realizada por una sola persona. Los criterios con los que se realizaban no respondían a ningún cálculo hidráulico o del comportamiento de los materiales de origen pétreo como material filtrante para estimar la eficiencia de los resultados en el tratamiento de las aguas grises, de hecho, el fin de esta tesis es estudiar muestras de agua para presentar los resultados obtenidos del tren de tratamiento con las características físicas de este mismo. Generalmente tomaba entre 4 o 5 horas la elaboración y colocación del sistema de filtros, teniendo todos elementos de este y las herramientas necesarias para su fabricación.

Las herramientas que se utilizan son:

- Sierra caladora
- Taladro eléctrico
- Soplete manual
- Lija

Los materiales y elementos utilizados:

- Tambos de PEAD de 140 litros
- Tubos de 1' de CPVC
- 8 codos de 90°
- 3 bridas de ¿?
- 3 T's
- Rocas
- Grava y arena

La elaboración de los filtros se realizó en los hogares de los beneficiarios. Todos los elementos necesarios para su fabricación se trasladaban desde las instalaciones de la asociación hasta las comunidades y todo el proceso de elaboración se hacía *in situ*.

Pasos en la elaboración de los filtros:

- a) Se retira la tapa con sierra caladora o alguna otra herramienta con la capacidad de atravesar el polietileno de alta densidad (Figuras 3.12 y 3.13); la tapa esta adherida al cuerpo del tambo.



Figura 3.12 Tambo con tapa (Elaboración propia, 2019)



Figura 3.13 Tambo con tapa removida (Elaboración propia, 2019)

- b) Se realizan perforaciones en los costados de los tambos 25 cm por encima de la base para los tambos separadores por densidad y 10 cm por encima de la base para el filtro de agregados pétreos, con el fin de colocar la brida, tal y como se muestra en la figura 3.14. Los 25 cm tienen como fin evitar la intrusión de sólidos que se mantengan suspendidos en los primeros centímetros del tambo. Para el caso del último filtro se busca un mayor aprovechamiento del líquido almacenado por lo tanto la altura es menor, pero suficiente para posar la estructura en U sobre las rocas que darán estabilidad al tambo y servirán como capa soporte de los tubos de CPVC.



Figura 3.14 Tambo perforado con brida
(Elaboración propia, 2019)

- c) Se realizan cortes en los tubos de CPVC de 10, 15, 25, 45 cm para construir las formas que llevarán el agua de un filtro a otro y además de otros cortes con las medidas necesarias según las características del lugar (figura 3.26, de sistema en Joltojtik).

- d) Se procede a colocar las t's dentro de las bridas en la parte interior como se observa en la figura 3.15, para formar la estructura simple con los tubos CPVC que permitirán la separación por densidades y reducir la intrusión de sólidos.



Figura 3.15 Tambo con t y tubos de CPC para separación por densidad (Elaboración propia, 2019)

- e) Para el filtro con agregados pétreos se construye con algunos cortes de los tubos CPVC una estructura en forma de <<U>> con orificios hechos con la broca número ¼ "que no permite la intrusión del diámetro más pequeño de la capa de



Figura 3.16 Estructura en forma de <<U>> de tubos de CPVC (Elaboración propia, 2019)

grava (Figura 3.17 y 3.18). Estos orificios se encuentran en toda la circunferencia del tubo, de esta manera se busca que el líquido siempre encuentre una vía para poder fluir a través de los tubos



Figura 3.17 Perforación de orificios en la estructura con forma de <<U>> (Elaboración propia, 2019)

- f) Los filtros se sitúan en los lugares que ocuparán dependiendo de las características de la vivienda, generalmente se instalan cerca de una batea exterior que se expone en la figura 3.18. Batea que los habitantes utilizan para lavar trastes y ropa, pues es la mayor fuente de aguas grises en estos hogares. En ella se instala un céspol que ayuda a evitar que todos los sólidos lleguen al



Figura 3.18 Batea situación inicial (Elaboración propia, 2019)

primer filtro. Se busca que no se conviertan en un estorbo para las actividades diarias y que queden cerca del lugar para la disposición final del agua tratada. En la figura 3.19 se puede observar el céspol con el acordeón ajustado a la batea y en dirección al primer tambo, que fungirá como filtro de separación de densidades, primer elemento del tren de tratamiento.



Figura 3.19 Batea con céspol y primer tambo (Elaboración propia, 2019)

- g) Al último filtro se le pone una primera capa de rocas de tamaño considerable que le brinda estabilidad, capa en la que se posa la estructura en forma de u, como se muestra en la figura 3.20. Las rocas utilizadas, se observan en la figura 3.21.



Figura 3.20 Roca para base del filtro de agregados (Elaboración propia, 2019)



Figura 3.21 Estructura en forma de u posada sobre la capa de rocas (Elaboración propia, 2019)

- h) Encima de ello se coloca una capa de grava cribada en criba del número 4 y posteriormente se sitúa la capa de arena que realizará el proceso de filtración de mayor importancia. Las cuales se presentan en las figuras 3.22 y 3.23.



Figura 3.22 Grava cribada para segunda capa (Elaboración propia, 2019)



Figura 3.23 Segunda capa de grava con malla mosquitera (Elaboración propia, 2019)

- i) Una vez colocados los filtros en los lugares que les corresponden, se realiza el armado de las tuberías con los codos y los tubos cortados acorde a las características del lugar de instalación, como se aprecia en las figuras 3.24 y 3.25.



Figura 3.24 Césped instalado con primer filtro (Elaboración propia, 2019)



Figura 3.25 Segundo y tercer filtro instalados (Elaboración propia, 2019)

j) En la figura 3.26 se observa la instalación total del filtro, con el armado de las tuberías y con los agregados puestos en su lugar, se somete a pruebas de inmediato para buscar fugas u otros detalles. La instalación en la comunidad de Joltojtik fue interesante, pues ya existían excavaciones situadas en lugares ideales para la colocación de ellos filtros, así como un reservorio final para el agua que pasaba a través de las excavaciones y tubos enterrados, lo que facilitó el emplazamiento del sistema, solamente que requirió longitudes más largas de los tubos del tren de tratamiento.



Figura 3.26 Sistema completo instalado en vivienda de la comunidad Joltojtik, municipio de Chamula (Elaboración propia, 2019)

3.5 Funcionamiento de los filtros

Los filtros se instalan generalmente cerca de bateas exteriores que los habitantes de los hogares en las comunidades rurales de la cuenca utilizan para lavar trastes y ropa. Es así como los filtros reciben el suministro de las aguas grises que son el elemento que se pretende tratar por medio de estos. El sistema que se instala en la batea consiste en un tubo para fregadero que generalmente contiene una malla de plástico que evita la intrusión de sólidos de gran tamaño, así como el céspol que sirve también como un sedimentador y evita parcialmente el paso de sólidos más pequeños.

La malla y el céspol no garantizan que sólidos no logren introducirse en el sistema.



Figura 3.27 Sistema de tubo para fregadero y céspol en batea exterior de vivienda beneficiada (Elaboración propia, 2019)

En el primer y segundo filtro se busca que las grasas y otros elementos de menor densidad que el agua, floten y así se separen del agua que pasará por el filtro de materiales pétreos. También se busca que elementos sólidos de mayor densidad del agua sedimenten al fondo del filtro, y no se introduzcan en el sistema de tubos que transportan el agua a través de los filtros. La manera en que se intenta lograr esto, es que el sistema estabilice el agua que fluye a través de este. Se trata de lograr esto, haciendo que el sistema trabaje con una carga hidrostática máxima relativamente pequeña (0.05 m) que permita una retención hidráulica mayor y permita la sedimentación lenta de los sólidos contenidos, evitando también que las grasas se introduzcan al orificio superior de la estructura del tubo que parte de la T de PVC. El agua fluye de abajo para arriba, esto con el fin de evitar la intrusión de mayor cantidad de sólidos posibles, que se busca se sedimenten. Es claro que un filtro dispuesto en la boquilla del tubo, proveería mejores resultados. El sistema del primer y segundo filtro se presenta la figura 3.28.

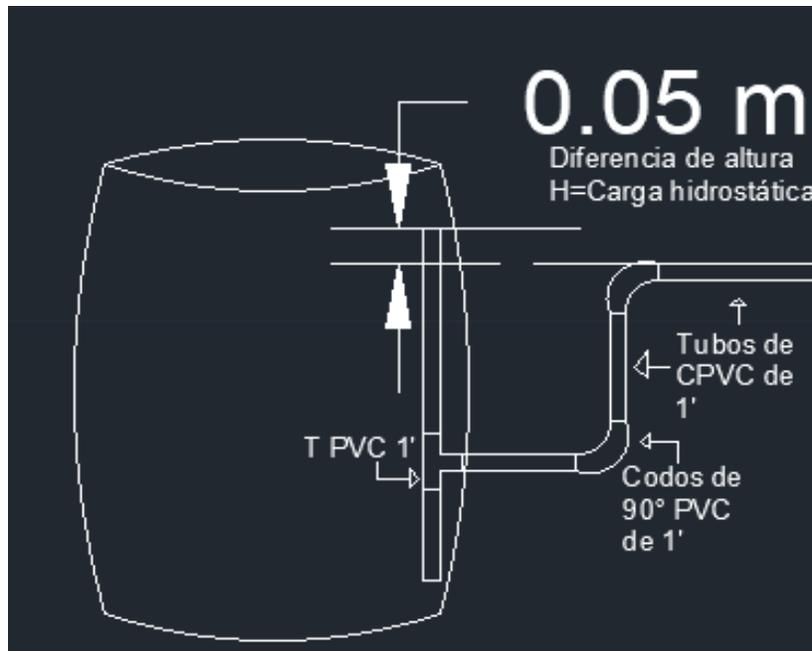


Figura 3.28 Diagrama de primer y segundo filtro
(Elaboración propia, 2019)

3.6 Estado actual de los filtros

Los filtros evaluados se instalaron en las fechas siguientes:

Filtro de Don José: 29 de enero de 2019

Filtro de Don Tumín: 25 de febrero de 2019

Filtro de Don César: 16 de marzo de 2019

y fueron muestreados el primero de diciembre de 2019 los tres, por lo tanto, tenían 10, 9 y 8 meses en actividad a la fecha de muestreo y análisis, respectivamente.

Los filtros de separación por densidad y aguas grises de Don César y Don José presentan estados aceptables, tanto de apariencia como funcionamiento, mientras que el filtro de Don Tumín presenta continuos bloqueos en el flujo del agua y una fractura del último tubo de CPVC, de donde sale el efluente final. Los estados en que se encontraron responden al hecho de encontrarse a la intemperie, y en parte como consecuencia de la falta de transmisión efectiva de la información y recomendaciones dadas para su mantenimiento, más que la revisión periódica de los lugares del sistema donde se podrían acumular sólidos grandes que son indeseables y la limpieza semestral del sistema completo, reemplazando los

materiales de origen pétreo, y lavándolos con agua y jabón pertinentemente, acciones que se recomendó hacer después de los primeros 6 meses de uso. También se percibe una posible falta de interés de los usuarios por no apreciar su potencial. Esto conlleva normalmente el fracaso a largo plazo de los proyectos.

Los filtros al haber sido dispuestos directamente sobre el suelo de tierra del lugar, presentan manchas de lodo, lo que les da una apariencia maltratada. Estas son lógicamente provocadas por la acción de la lluvia y la presencia constante de agua en el lugar.

Las tapas, por el tipo de corte que se realizó con los primeros, no permitió una colocación correcta de estas, es por ello que los usuarios decidieron remover la mayoría, lo que los deja más expuestos a agentes externos. Es preciso aceptar que la instalación de los filtros debe perfeccionarse.

La calidad de las aguas contenidas en ellos, a primera vista se observa baja, sobre todo en los filtros de las casas de Don Tumín (figura 3.30) y Don José (figura 3.31), en lo que respecta a los parámetros organolépticos. Con excepción del filtro de la casa Don César, se perciben olores fuertes y desagradables, así como colores bastante oscuros. Esto se debe probablemente a que las mujeres indígenas utilizan un tinte natural extraído de plantas y a veces sintético, adquirido en las inmediaciones de la cabecera municipal de San Cristóbal de Las Casas. El tinte negro natural proviene de la <<Hierba amarga>>, o <<h'a te>> como le llaman los tsotsiles a la planta de la extraen el más profundo color negro. Existen otras fuentes como el lodo negro, el palo de campeche, etcétera.

El color entonces no significa que las aguas hayan sido combinadas con aguas negras, ya que además de que no están conectadas a la red de drenaje de las casas que cuentan con ello, la mayoría de los hogares tienen sistemas de letrinas. Esto no garantiza que no haya presencia de coliformes fecales en las aguas crudas y tratadas.



Figura 3.29 Filtro de aguas grises de Don César
(Elaboración propia, 2019)

El estado físico de los filtros de la casa de Don César, es el que presenta un mejor aspecto. El sistema se presenta en la figura 3.29, donde se aprecian 2 filtros con tapa y el último sin tapa y con presencia de materia orgánica viva en su interior.



Figura 3.30 Estado del filtro de aguas grises de Don Tumín (Elaboración propia, 2019)



Figura 3.31 Filtro de aguas grises de Don José (Elaboración propia, 2019)

En la figura 3.32 se presenta el reservorio final de las aguas tratadas de los filtros de El Pinar. Por instrucciones de la Arquitecta Cortés, algunos meses después de su puesta en marcha, se introdujeron plantas en el filtro de arena y el reservorio mencionado, que supusieron, ayudaría en el tratamiento de las aguas. El impacto de esta condición no es contemplado en los análisis, aunque se puede apreciar que

las aguas de Don César presentan mucho mejor color y menos turbiedad que las otras dos aguas tratadas, debido posiblemente a esta razón. La actividad de plantas en el tratamiento de las aguas está documentada en diversos estudios, sin embargo, esta fuera de los alcances de este trabajo.



Figura 3.32 Reservorio de aguas grises tratadas del filtro de Don César (Elaboración propia, 2019)

4. Resultados

En este capítulo se presentarán los resultados de los análisis realizados a las aguas grises residuales crudas y tratadas en los filtros que han sido el motivo del presente trabajo de tesis. Los parámetros que se obtuvieron responden a aquellos que se consideraron de mayor importancia para comparar con los lineamientos de las Normas Oficiales Mexicanas para descargas en aguas y bienes nacionales con fines de reúso agrícola, así como a las limitaciones económicas, técnicas y de tiempo para su obtención.

Las limitaciones en la realización de los análisis consistieron principalmente en el costo de efectuarlos en laboratorios privados, aunado a las limitaciones técnicas o falta de reactivos del laboratorio de la institución que los realizó.

4.1 Generalidades de los análisis de calidad de las aguas grises crudas y tratadas

Los filtros fueron instalados en enero, febrero y marzo del año 2019. La toma de muestras de las aguas fue realizada por el autor de esta tesis con el apoyo de un compañero, el domingo 1 de diciembre de 2019. Las muestras fueron recolectadas en tres distintos recipientes, para los análisis de DBO y DQO, se utilizó un frasco de 250 ml de vidrio de borosilicato marca CIVEQ, mientras que para los otros parámetros físico-químicos se usó un recipiente de polietileno de alta densidad de 250 ml, y para el caso de los análisis bacteriológicos se utilizaron bolsas esterilizadas Whirl-Pak de 4 onzas de capacidad máxima con dosificador para 100 ml, inertes al contenido de las aguas residuales, cada uno para el almacenamiento y posterior determinación de parámetros específicos (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1980).

Las muestras fueron conservadas en una hielera y por sugerencia del especialista en agua de la Asociación Civil Cántaro Azul (ente de carácter civil en el que se decidió ejecutar los análisis) se le agregó hielo para evitar la degradación bacteriana, pues pasarían alrededor de seis horas entre la toma de las muestras y la entrega de estas.

Las muestras fueron tomadas entre las 14 y 16 horas y fueron puestas a disposición del M. en C. Héctor Castelán, colaborador de Cántaro Azul A.C., a las 20 horas con 30 minutos aproximadamente, hora del centro de México, de la misma fecha. Los análisis de acuerdo con sus reportes, se realizaron al día siguiente, el lunes 2 de diciembre de 2019, cumpliendo con las sugerencias de la NMX-AA-003-1980. Los resultados fueron entregados una semana después, debido al proceso de captura en los formatos pertinentes (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1980).

Cántaro Azul es una asociación civil que se crea en el año 2006, en el estado mexicano de Baja California Sur, <<con el objetivo de contribuir a mejorar la salud y la calidad de vida de personas sin acceso al agua segura ni condiciones básicas de higiene y saneamiento, principalmente en comunidades rurales de México>> (Cántaro Azul A.C., 2019).

Su punto de partida es el diseño de la Mesita Azul®, un sistema de desinfección que se jacta de ser el primero de desinfección de agua por medio de luz ultravioleta, diseñado para medios rurales.

Actualmente su sede se encuentra en la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, y ofrecen servicios en la evaluación y soluciones de agua, higiene y saneamiento. Entre estos servicios, se encuentra la de realización de análisis para determinar la calidad del agua en un laboratorio propio, con ciertas limitaciones, que solventan mediante un convenio que poseen con El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad San Cristóbal, el cual posee un laboratorio con una acreditación ante la Entidad Mexicana de Acreditación, <<que ha otorgado el reconocimiento a nuestra competencia técnica, en las ramas de suelos y plantas, agua y alimentos en cumplimiento de la NMX-EC-17025-IMNC-2017, “Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración”. Esta acreditación es otorgada desde 2010. [...] Todos los laboratorios institucionales trabajan con un sistema de Gestión de la Calidad basado en la norma NMX-EC-17025-IMNC-2017>> (Webmaster Infonomía ECOSUR, 2015).

El encargado de realizar los estudios fue el Maestro en Ciencias, por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Héctor Edgar Castelán Martínez, especialista en calidad del agua, colaborador de la organización.

Cántaro Azul actualmente posee más de 50 colaboradores y ha logrado impacto en la calidad de vida de más de 60,000 personas, a través de sus soluciones para el acceso a agua segura (Cántaro Azul A.C., 2019).

4.2 Filtros seleccionados y especificaciones de la toma de muestras

Se agendó la entrega de los recipientes para la toma de las muestras para el sábado 30 de noviembre del año 2019, pues ese día ambas partes tenían la posibilidad de encontrarse. Se coordinó para que el día domingo 1 de diciembre durante la tarde fueran recolectadas y posteriormente en la noche, fueran entregadas y así el especialista en agua las conservara en un ambiente adecuado para evitar una alteración significativa en estas.³

Debido a situaciones ajenas a la organización y de dificultad en la comunicación con los habitantes de la comunidad de San José Buenavista, descrita en el apartado << *Comunidades beneficiadas por los proyectos de filtros de Ciudadanos por la Acción Territorial en la Cuenca del Valle de Jovel A.C*>> del presente escrito, no se procedió a recolectar muestras de ese lugar y se optó por la obtención de muestras de dos filtros instalados en la comunidad de El Pinar, situación que se consideró, arrojaría resultados interesantes, porque se podrían comparar los resultados de agua provenientes de un mismo efluente que tienen usos similares pero que las particularidades de cada filtro y hogar, podrían afectar de buena o mala forma a la calidad final de las aguas. Se recolectaron también, muestras de Joltoltik, pues se tenía la idea, por el interés mostrado de parte de Don José, padre de familia de este hogar, que pondría más atención en el cuidado de sus filtros. En conversaciones con la Arquitecta Cortés, responsable del proyecto, se llegó a la conclusión que el hecho de haberlos instalados pocos meses antes de la temporada de lluvias, ha provocado que no dimensionen la importancia y utilidad que pueden alcanzar, pues funcionan también como reservorios de una cantidad importante de agua. Estas reflexiones se expresarán con más detalle en el siguiente capítulo.

Para la identificación de las muestras se utilizaron etiquetas con los nombres de los jefes del hogar y la comunidad, la hora y fecha y el tipo de muestra (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1980) como se muestra en la figura 4.1:

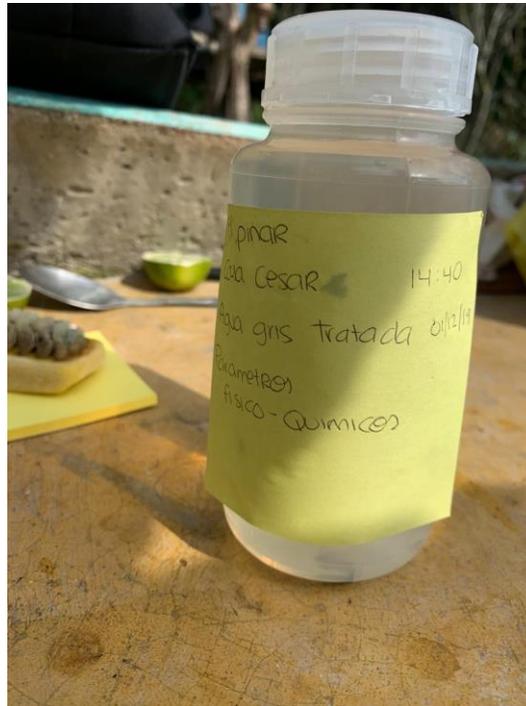


Figura 4.1 Muestra etiquetada
(Elaboración propia, 2019)

Se seleccionaron los primeros tambos del sistema para la toma de muestras de agua que se considerará el agua cruda, pues el único tratamiento que teóricamente recibe, es la sedimentación que se produce de partículas propensas a este fenómeno, así como la eliminación de algunos de los residuos en el céspol y por la flotación de componentes menos densos que el agua. Se elige también ya que el afluente no es continuo, y solo se da cuando alguien utiliza la batea principal. En el caso del filtro de Don César en la comunidad El Pinar, el filtro resultó estar únicamente conectado a las aguas producidas en la cocina, donde se lleva a cabo el lavado de trastes y el desecho del agua utilizada para cocinar. Y en dos casos existe un reservorio final para el agua tratada, que se detallarán más adelante y para uno de los casos, el efluente está conectado a una manguera que riega inmediatamente a la milpa aguas abajo. Por lo tanto, se pudo tomar la muestra sin necesidad de introducir nuestra extremidad superior, desconectando la manguera,

ya que en ese momento los volúmenes contenidos de los tambos producían flujo del líquido a través del efluente final.

Se recolectó un total de 500 ml para la obtención de los parámetros físico-químicos, 500 ml para la obtención de DBO y DQO y un aproximado de 250 ml para los parámetros bacteriológicos, tanto para las aguas grises crudas como de las tratadas, en cada filtro analizado.

Filtro de Don César

El filtro de Don César, como se le denominó por estar instalado en la casa propiedad del homónimo, se localiza en la comunidad El Pinar, a alrededor de 7 kilómetros de la cabecera municipal de San Cristóbal de Las Casas.

La toma de muestras (figura 4.2) se inició a las 14 horas con 34 minutos del primero de diciembre de 2019, hora local GMT-6.

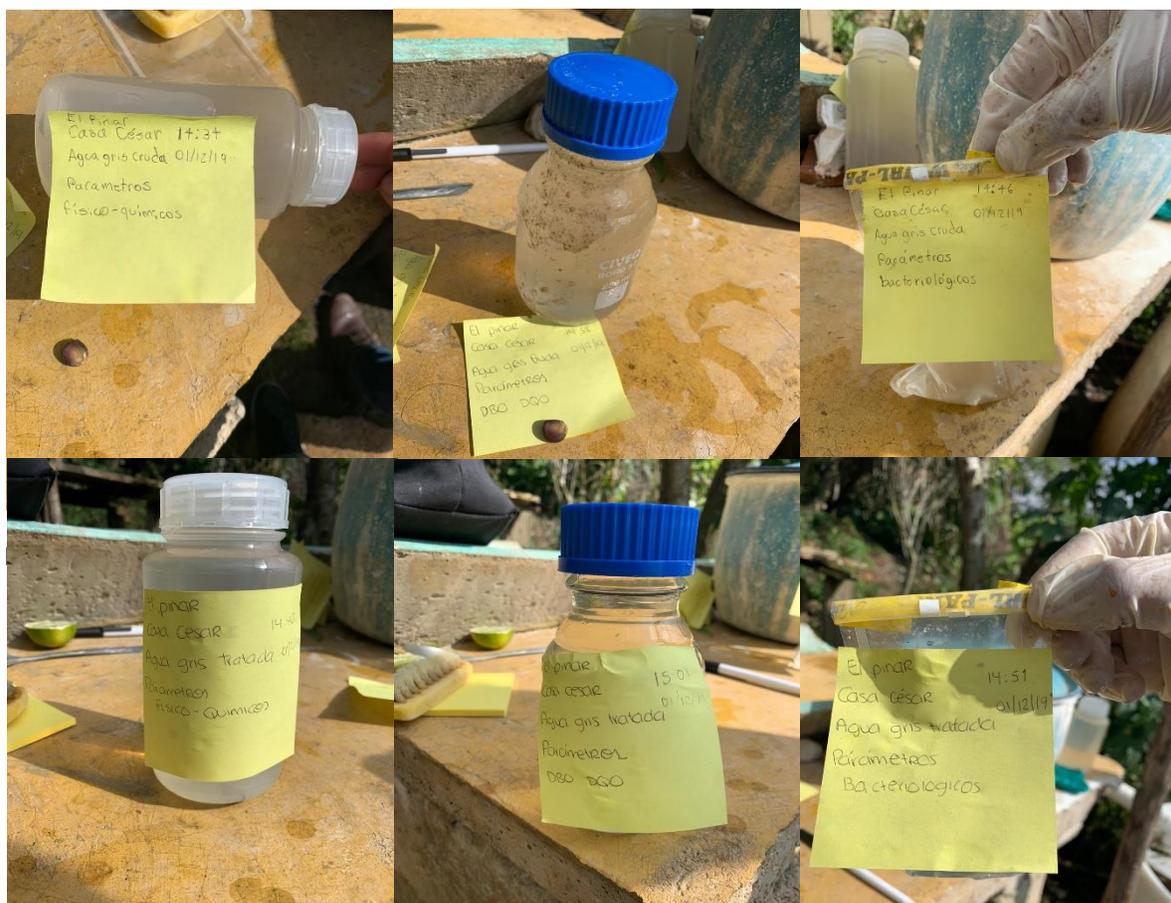


Figura 4.21 Muestras de aguas grises crudas y tratadas etiquetadas del filtro de Don César (Elaboración propia, 2019)

Se finalizó con la toma de muestras de este filtro a las 14 horas con 51 minutos. Al no contar con la temperatura de las muestras en el momento de la toma, se presenta la temperatura del ambiente en el aquel momento, la cual era de 21° C.



Figura 4.3 Comparativa visual agua cruda (izq.)
agua tratada (Der.) del filtro de Don César
(Elaboración propia, 2019)

Filtro de Don Tumin, El Pinar

La toma de muestras (figura 4.4) se efectuó a las 14 horas con 25 minutos, hora del centro de México, a una temperatura de 19° Celsius en la comunidad de El Pinar, municipio de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. El agua del filtro de Don Tumin, presentaba colores grises muy fuertes y olores desagradables, tanto en el agua cruda como en la que ha pasado ya por el filtro de arena. El filtro presenta una pequeña fractura en el tubo de CPVC del efluente final, lo que no permite el completo aprovechamiento del agua. Es el único de los tres filtros que se estudiaron que está conectado a una manguera que la transporta al lugar donde sirve para irrigar parte de la milpa de su terreno.



Figura 4.4 Toma de muestras de agua tratada del filtro de Don Tumín (Elaboración propia, 2019)

Fue el lugar donde la toma de muestras del efluente final fue menos invasiva y entonces se podría descartar alguna alteración por contacto con las manos.

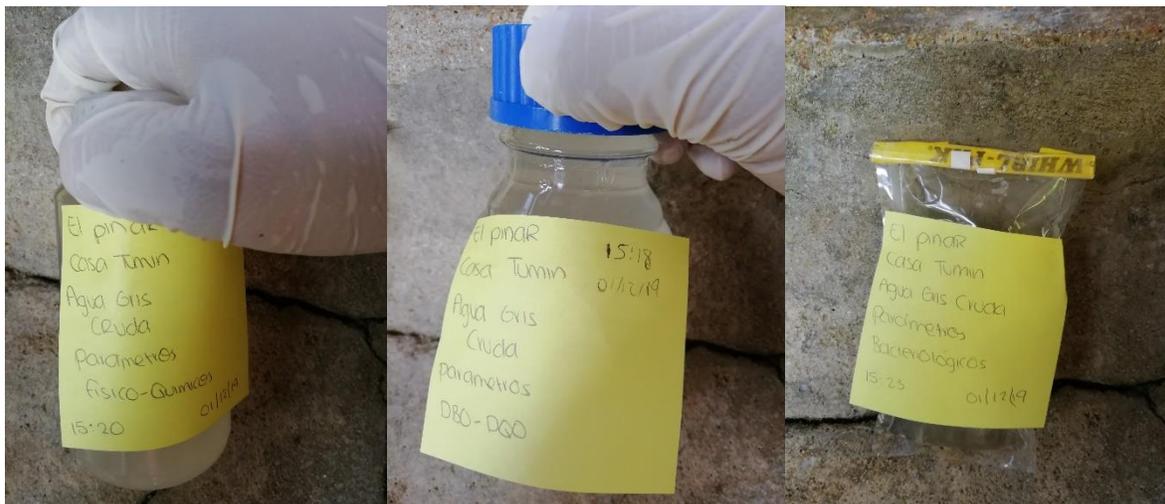


Figura 4.5 Muestras de aguas grises crudas etiquetadas del filtro de Don Tumín (Elaboración propia, 2019)

La evidencia de las muestras de aguas crudas es la figura 4.5 y de la comparativa visual de ambas aguas la figura 4.6.



Figura 4.6 Comparativa visual entre el agua cruda (Izq.) y el agua tratada (Der.) del filtro de Don Tumín (Elaboración propia, 2019)

Se observa un color más café en el agua gris cruda comparada con un tono más grisáceo del agua gris tratada, de acuerdo a la percepción visual de la figura 4.6.

Filtro de Don José, Joltojtik

A la comunidad de Joltojtik se arribó aproximadamente a las 16 horas con 40 minutos, hora local, y después de una breve conversación con las personas presentes en el hogar, se dispuso a tomar muestras del primer tambo, ya que el efluente no es continuo, el primer tambo se tomó como el reservorio de las aguas grises crudas, como se ha especificado anteriormente.

Se inicio la recolección de muestras a las 16 horas con 13 minutos y terminaron de tomarse a las 16 horas con 22 minutos aproximadamente, a una temperatura de 17° Celsius, temperatura típica de una tarde soleada de finales de otoño en los Altos de Chiapas. La temperatura de las muestras no fue recolectada en el momento.

Dispuestas inmediatamente después en la nevera, se inició el trayecto de vuelta a San Cristóbal de Las Casas.

El lugar donde Don José y su familia almacenan el agua gris tratada, es un tanque de block macizo, unido con mortero, de aproximadamente 1 metro con 10 centímetros de altura, 1 metro de largo y 60 cm de ancho. Este se encuentra a escasos dos metros del pequeño invernadero con el que cuenta y en donde preserva especies nativas donadas por el programa paralelo de Guardianes del Bosque, parte de CATCVJ. La toma de muestras en este sitio se observa en la figura 4.7.



Figura 4.7 Toma de muestras de agua tratada del filtro de Don José (Capturada por acompañante, 2019)

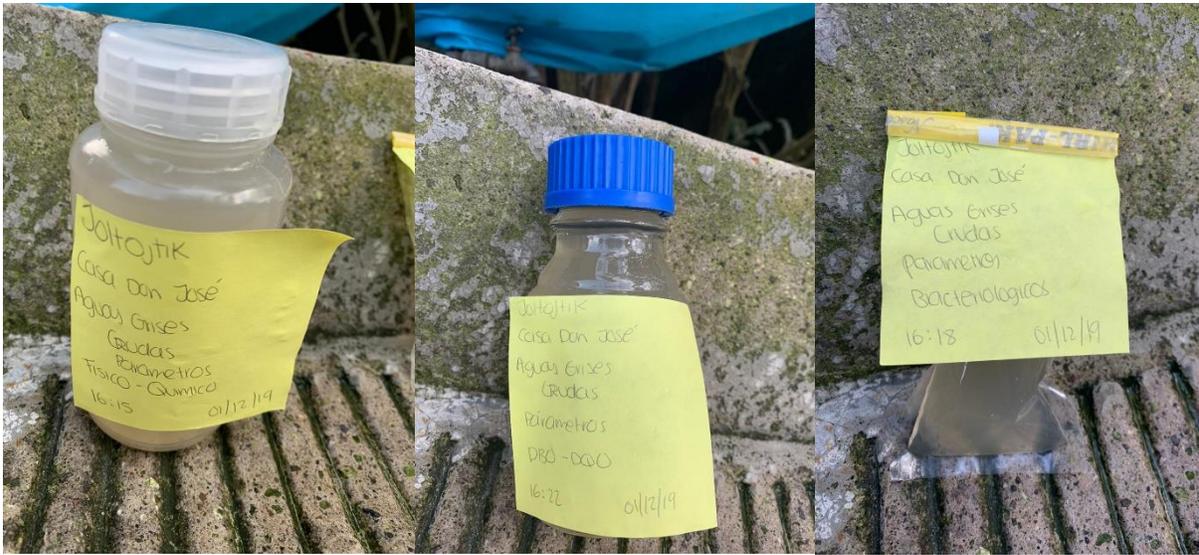


Figura 4.8 Muestras de aguas grises crudas etiquetadas del filtro de Don José (Elaboración propia, 2019)

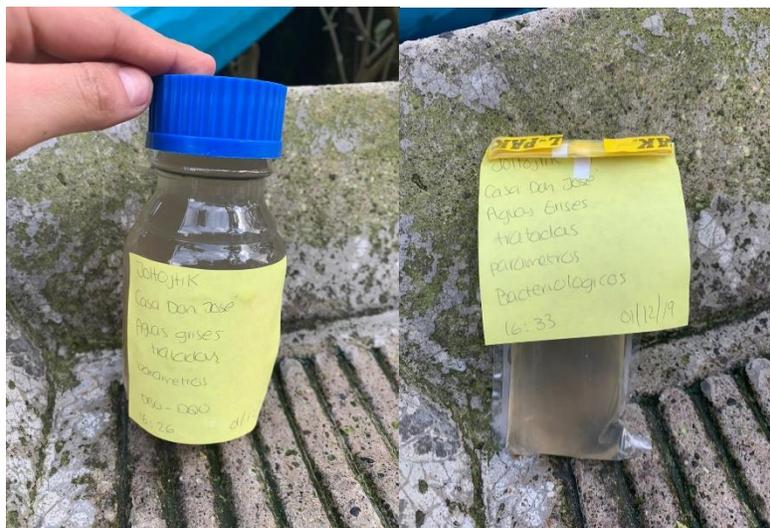


Figura 4.9 Muestras de aguas grises crudas etiquetadas del filtro de Don José (Elaboración propia, 2019)

Los recipientes con las muestras de aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don José, se visualizan en las figuras 4.8 y 4.9, respectivamente.



Figura 4.10 Comparativa visual entre el agua cruda (izq.) y el agua tratada (Der.) del filtro de Don José (Elaboración propia, 2019)

Las aguas tratadas de Don José son las únicas que a simple vista demuestran un color más oscuro que las aguas grises crudas (figura 4.10). Resultado que se presentará en Unidades de Platino-Cobalto más adelante, junto con el resultado en Unidades Nefelométricas de la turbidez. No existe hasta este punto una hipótesis de una posible razón.

4.3 Presentación de los resultados de los análisis

Los análisis fueron entregados vía correo electrónico el día 11 de diciembre de 2019. Se presentan a continuación, en tablas en el orden en que las muestras fueron recolectadas:

Resultados del filtro de aguas grises de Don César, El Pinar

Tabla 4.18 Resultados bacteriológicos de las aguas grises crudas del filtro de Don César

Resultados bacteriológicos				
Aguas grises crudas. Filtro de Don César				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra	Unidades	Método usado	Tipo de procedimiento
Coliformes totales	> 30,075	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B 97 (por Colilert y Colilert 18). Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos.
Escherichia Coli	>6,180	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Las diluciones se deben a que el laboratorio de Cántaro Azul, al especializarse en el estudio de agua para consumo humano, no tiene equipo que permita la detección de un valor muy alto de presencia de bacterias coliformes.

El valor obtenido ese encuentra por debajo de los reportados por Niño y Martínez (2013), en la ciudad de Bogotá, para el estrato 1 (nivel socioeconómico más bajo) y rondan los valores del estrato socioeconómico 3.

La particularidad de este filtro es que está conectado exclusivamente al desagüe de la cocina. Cabe mencionar que el autor del presente trabajo de tesis no participó en la instalación de este filtro, por lo cual, se desconoce el motivo de haber dejado la instalación incompleta.

Los valores de estas aguas, rebasan por mucho los valores de estos parámetros permitidos en aguas para reúso agrícola que son descargadas en receptores acuáticos, más no para la descarga directa en el suelo, revisados en el apartado 1.8 de este escrito, en el cual se especifica que, para el caso de promedio diario, (el que se tomará como caso para esto, pues el análisis contó con únicamente dos muestras simples en un día de muestreo) el Número Más Probable máximo permitido es de 2000 por cada 100 ml de agua descargada en otros cuerpos de agua. Hay que resaltar que son los resultados obtenidos para las aguas grises crudas.

En la siguiente tabla (4.2) se presentan los resultados de los parámetros físico-químicos de las aguas grises crudas de este filtro

Tabla 4.2 Resultados físico-químicos de las aguas grises crudas del filtro de Don César

Resultados físico-químicos				
Aguas grises crudas. Filtro de Don César				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra.	Unidades	Método/Instrumento usado	Tipo de procedimiento
pH	5.6	pH	Sonda multiparamétrica Extech instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	94.1	mg/l		
Sólidos disueltos totales	139.2	mg/l		
Conductividad	207.8	µS		
Turbidez	88	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	205	Unidades Platino-Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	15	mg/l	Método de Diazotización, reducción de Cadmio.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0.02	mg/l		
Fosfatos	3.9	mg/l	Método FosfaVer	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	5	mg/l	Método Sulfato 4: Sulfato/Bario	Cuantitativo para uso en campo
Dureza	51.3	mg/l	Método de titulación de gota/EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Arsénico	0.01	mg/l	Método de reacción con bromuro e mercurio y halogenuros. Coincidencia de color con bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	128.2	mg/l	Método de digestión del reactor de manganeso III	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DBO	93.1	mg/l	Manométrico	Estandarizado Internacionalmente - EPA

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Los parámetros físico-químicos de las aguas grises crudas, no presentan valores extraordinarios, incluso algunos cumplen con la norma de interés, tema que se analizará con mayor detalle en el siguiente subcapítulo.

Es necesario señalar que, por causas de fuerza mayor, no fue posible para el especialista en agua la obtención del DBO a 5 días, por lo que el resultado aquí mostrado fue estimado a 2 días, situación que no permite determinar con certeza la carga orgánica en las aguas analizadas que tal parámetro reporta. Aunque se aprecia una mejora con respecto a las aguas grises crudas, este parámetro continúa bastante por encima del valor permitido en las NOM-001-SEMARNAT-1996 para aguas de reúso agrícola que se vierten a ríos y embalses naturales y artificiales.

Tabla 4.3 Resultados bacteriológicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don César

Resultados bacteriológicos				
Aguas grises tratadas. Filtro de Don César				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra	Unidades	Método usado	Tipo de procedimiento
Coliformes totales	> 25,115	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B 97 (por Colilert y Colilert 18). Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos.
Escherichia Coli	745	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

La remoción para el caso de los coliformes totales, es de 16.5 %. En el caso de la *E. Coli*, se aprecia una remoción del 87.94 %, un valor que sería deseable en ambos parámetros.

Se observa entonces el nivel bajo de remoción que tienen los filtros para el tema bacteriológico; algo esperado, pues no cuenta con ningún sistema de desinfección. Es probable que el método de la cloración podría ser útil para mejorar los resultados de este punto. Entonces la reducción de la población de estos, se debe muy probablemente a causas naturales

La presencia de estos microorganismos en el agua, debería ser atendida, pues los habitantes de esta comunidad utilizan esta agua (antes de desecharla) para cocinar, lavar los trastes y beber, lo que supone que no debe variar en gran medida su calidad. Muy probablemente la razón principal de la incidencia de enfermedades gastrointestinales (Mandujano, 2016).

Tabla 4.4 Resultados físico-químicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don César

Resultados físico-químicos				
Aguas grises tratadas. Filtro de Don César				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra.	Unidades	Método/Instrumento usado	Tipo de procedimiento
pH	7.21	pH	Sonda multiparamétrica Extech instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	165	mg/l		
Sólidos disueltos totales	242	mg/l		
Conductividad	346	μS		
Turbidez	31	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	160	Unidades Platino-Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	2	mg/l	Método de Diazotización, reducción de Cadmio.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/l		
Fosfatos	1.5	mg/l	Método FosfaVer	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	3	mg/l	Método Sulfato 4: Sulfato/Bario	Cuantitativo para uso en campo
Dureza	307.8	mg/l	Método de titulación de gota/EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Arsénico	0	mg/l	Método de reacción con bromuro e mercurio y halogenuros. Coincidencia de color con bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	37.1	mg/l	Método de digestión del reactor de manganeso III	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DBO	14.3	mg/l	Manométrico	Estandarizado Internacionalmente - EPA

(Análisis Cántaro, Azul, 2019)

En el caso de los resultados físico-químicos de las aguas tratadas se aprecia mejoría en varios parámetros, tales como el pH, color, nitratos y nitritos, fosfatos; de igual manera existen incremento en la concentración de algunos analitos que son indeseables, como los SDT y la dureza. Estos resultados se presentan en la tabla 4.4.

A pesar de que algunos parámetros incrementaron su valor, el comportamiento de los filtros, dado el estado en que se encontraron, el poco mantenimiento que recibieron y el tiempo de uso, se entrevé aceptable.

Resultados del filtro de aguas grises de Don Tumín, El Pinar

Tabla 4.5 Resultados bacteriológicos de las aguas grises crudas del filtro de Don Tumín

Resultados bacteriológicos				
Aguas grises crudas. Filtro de Don Tumín				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra	Unidades	Método usado	Tipo de procedimiento
Coliformes totales	> 30,075	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B 97 (por Colilert y Colilert 18). Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos.
Escherichia Coli	>1675	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Tabla 4.6 Resultados físico-químicos de las aguas grises crudas del filtro de Don Tumín

Resultados físico-químicos				
Aguas grises crudas. Filtro de Don Tumín				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra.	Unidades	Método/Instrumento usado	Tipo de procedimiento
pH	5.85	pH	Sonda multiparamétrica Extech instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	631	mg/l		
Sólidos disueltos totales	892	mg/l		
Conductividad	1277	µS		
Turbidez	226	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	500	Unidades Platino-Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	10	mg/l	Método de Diazotización, reducción de Cadmio.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/l		
Fosfatos	4.7	mg/l	Método FosfaVer	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	10	mg/l	Método Sulfato 4: Sulfato/Bario	Cuantitativo para uso en campo
Dureza	750	mg/l	Método de titulación de gota/EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Arsénico	0	mg/l	Método de reacción con bromuro e mercurio y halogenuros. Coincidencia de color con bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	157.9	mg/l	Método de digestión del reactor de manganeso III	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DBO	105.5	mg/l	Manométrico	Estandarizado Internacionalmente - EPA

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Tabla 4.7 Resultados bacteriológicos aguas grises tratadas del filtro de Don Tumín

Resultados bacteriológicos				
Aguas grises tratadas. Filtro de Don Tumín				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra	Unidades	Método usado	Tipo de procedimiento
Coliformes totales	> 30,075	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B 97 (por Colilert y Colilert 18). Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos.
Escherichia Coli	545	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Tabla 4.8 Resultados físicos-químicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don Tumín

Resultados físico-químicos				
Aguas grises tratadas. Filtro de Don Tumín				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra.	Unidades	Método/Instrumento usado	Tipo de procedimiento
pH	5.17	pH	Sonda multiparamétrica Extech instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	276	mg/l		
Sólidos disueltos totales	400	mg/l		
Conductividad	572	µS		
Turbidez	155	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	350	Unidades Platino-Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	20	mg/l	Método de Diazotización, reducción de Cadmio.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/l		
Fosfatos	1.9	mg/l	Método FosfaVer	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	8	mg/l	Método Sulfato 4: Sulfato/Bario	Cuantitativo para uso en campo
Dureza	188.1	mg/l	Método de titulación de gota/EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Arsénico	0	mg/l	Método de reacción con bromuro e mercurio y halogenuros. Coincidencia de color con bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	28.9	mg/l	Método de digestión del reactor de manganeso III	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DBO	17.3	mg/l	Manométrico	Estandarizado Internacionalmente - EPA

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Resultados del filtro de aguas grises de Don José, Joltojtik

Tabla 4.9 Resultados bacteriológicos de las aguas grises crudas del filtro de Don José

Resultados bacteriológicos				
Aguas grises crudas. Filtro de Don José				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra	Unidades	Método usado	Tipo de procedimiento
Coliformes totales	> 30,075	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B 97 (por Colilert y Colilert 18). Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos.
Escherichia Coli	>26,545	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Tabla 4.10 Resultados físico-químicos de las aguas grises crudas del filtro de Don José

Resultados físico-químicos				
Aguas grises crudas. Filtro de Don José				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra.	Unidades	Método/Instrumento usado	Tipo de procedimiento
pH	7.65	pH	Sonda multiparamétrica Extech instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	490	mg/l		
Sólidos disueltos totales	702	mg/l		
Conductividad	1001	µS		
Turbidez	164	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	375	Unidades Platino-Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	8	mg/l	Método de Diazotización, reducción de Cadmio.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/l		
Fosfatos	5.1	mg/l	Método FosfaVer	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	15	mg/l	Método Sulfato 4: Sulfato/Bario	Cuantitativo para uso en campo
Dureza	68.4	mg/l	Método de titulación de gota/EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Arsénico	0	mg/l	Método de reacción con bromurio e mercurio y halogenuros. Coincidencia de color con bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	201.7	mg/l	Método de digestión del reactor de manganeso III	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DBO	164.8	mg/l	Manométrico	Estandarizado Internacionalmente - EPA

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Tabla 4.11 Resultados bacteriológicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don José

Resultados bacteriológicos				
Aguas grises tratadas. Filtro de Don José				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra	Unidades	Método usado	Tipo de procedimiento
Coliformes totales	> 30,075	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B 97 (por Colilert y Colilert 18). Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos.
Escherichia Coli	960	(NMP/100 ml)	Método por sustrato cromogénico	

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Tabla 4.12 Resultados físico-químicos de las aguas grises tratadas del filtro de Don José

Resultados físico-químicos				
Aguas grises tratadas. Filtro de Don José				
Parámetro	Resultados. 3 diluciones por muestra.	Unidades	Método/Instrumento usado	Tipo de procedimiento
pH	8.21	pH	Sonda multiparamétrica Extech instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	403	mg/l		
Sólidos disueltos totales	585	mg/l		
Conductividad	820	µS		
Turbidez	205	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	500	Unidades Platino-Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	16	mg/l	Método de Diazotización, reducción de Cadmio.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/l		
Fosfatos	2.2	mg/l	Método FosfaVer	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	55	mg/l	Método Sulfato 4: Sulfato/Bario	Cuantitativo para uso en campo
Dureza	85.5	mg/l	Método de titulación de gota/EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Arsénico	0.01	mg/l	Método de reacción con bromuro e mercurio y halogenuros. Coincidencia de color con bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	33.4	mg/l	Método de digestión del reactor de manganeso III	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DBO	24.6	mg/l	Manométrico	Estandarizado Internacionalmente - EPA

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

Análisis de los resultados y comparativa con la NOM-001-SEMARNAT-1996

Con el fin de cumplir el objetivo específico propuesto y revisar las hipótesis planteadas para esta tesis, en este subcapítulo se llevará a cabo el análisis y comparativa entre sí, de los resultados arrojados por los análisis, así como la comparativa con la NOM-001-SEMARNAT-1996.

A continuación, en la tabla 4.13 se muestran los resultados en los valores paramétricos analizados de cada filtro, y el porcentaje de remoción para cada parámetro en donde es aplicable. Cabe señalar que existen parámetros para los cuales el valor aumentó, fenómeno indeseable y que es necesario corregir en filtros futuros.

Filtro de aguas grises, Casa de Don César, El Pinar

Tabla 4.13 Porcentaje de remoción de los parámetros de calidad del filtro de Don César

Parámetros	Valores paramétricos agua cruda	Valores paramétricos agua tratada	% de remoción
Coliformes totales	30,075	25,115	16.49
<i>Escherichia Coli</i>	6,180	745	87.94
pH	5.60	7.21	N.A.
Salinidad (mg/l)	94.1	165	-75.35
SDT (mg/l)	139.2	242	-73.85
Conductividad (µS)	207.8	346	-66.51
Turbidez (NTU)	88	31	64.77
Color (U Pt-Co)	205	160	21.95
Nitratos (mg/l)	15	2	86.67
Nitritos (mg/l)	0.02	0	100.00
Fosfatos (mg/l)	3.9	1.5	61.54
Sulfatos (mg/l)	5	3	40.00
Dureza (mg/l)	51	307.8	-500.00
Arsénico (mg/l)	0.01	0.00	100.00
DQO(mg/l)	128.20	37.10	71.06
DBO (mg/l)	93.10	14.30	84.64

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

En el filtro de la casa de César, que tiene la particularidad de estar únicamente conectado al desagüe de la cocina, se aprecia un comportamiento muy malo en el tema de la dureza, lo que muy probablemente se deba a un grano muy fino de arena que se infiltra y llega al efluente final, lo que aumenta la cantidad de sólidos disueltos

totales, y con ello su conductividad, pues son dos parámetros estrechamente relacionados. Asimismo, la salinidad muestra un crecimiento significativo, lo que podría afectar la capacidad de las tierras de permitir el crecimiento de los cultivos (Gross et al., 2005). Es preciso comentar, que el método de obtención de los parámetros de sólidos disueltos totales y salinidad, no es de gran fidelidad.

Otra posible explicación, es el tiempo que el agua tratada pasa estancada, lo que produce un proceso de salinización por temas de evaporación, y constante aumento de la concentración de sólidos, al no ser removidos con la descarga de las aguas al sitio de disposición final.

En el tema bacteriológico, es difícil definir si la remoción de los Coliformes totales es como tal se muestra, porque el resultado registrado por Cántaro Azul, informa que es un valor mayor al (>) mostrado y su registro como tal, se debe a sus limitaciones técnicas. En el caso de la *Escherichia Coli*, que es el parámetro que se expone como representativo de las Coliformes fecales, se halla una remoción importante, de casi el 90%. Se reitera que en el tema bacteriológico se esperaban estos resultados ya que el agua no recibe ninguna clase de proceso de desinfección, situación que podría mejorarse sustancialmente, por ejemplo, con cloración dosificada.

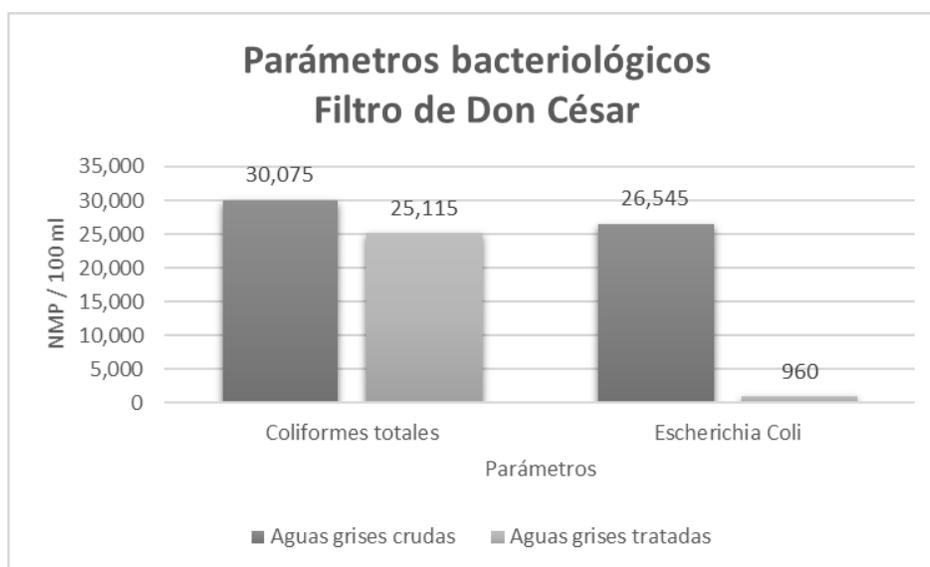


Figura 4.11 Gráfico de valores paramétricos bacteriológicos del filtro de Don César (Análisis Cántaro Azul, 2019)

Todos los demás parámetros físico-químicos presentaron un comportamiento de remoción en los parámetros analizados.

En el caso de la DBO, que fue estimada a 2 días, lo que no brinda un resultado muy confiable. Por su parte, para el tema de la DQO, se obtuvo un valor razonable, tanto en resultado como en remoción.

Como dato de referencia, en el estudio de Zipf et al (2016), la mediana de los valores de DQO para aguas grises crudas fue de 128 mg/l; después de pasar por el filtro de arena alcanzó valores de alrededor de 100 mg/l, y agregándole el carbón granular activado logró valores de 52.1 mg/l, lo que indica una actividad química normal en las aguas grises crudas del filtro de Don César y una remoción importante de más del 70% en sus aguas tratadas.

El DBO como se ha mencionado, no se obtuvo a 5 días, aunque se aprecia un valor alto para ser un resultado obtenido a 2 días. La razón $DBO_2:DQO$ en este caso es de 0.73 para las aguas grises crudas, enfatizando en el hecho de que la Demanda Bioquímica de Oxígeno se estimó a 2 días. Esto sugeriría que gran parte de la materia oxidable en las muestras es biodegradable, sino es que básicamente lo es toda. Como referencia, los datos presentados en el estudio de Jefferson et al. (2004), arrojan entre 0.36 ± 0.17 y 0.28 ± 0.10 en la razón $DBO_2:DQO$. Zipf y su equipo, obtuvieron valores de 0.38 ± 0.10 .

La razón baja de $DBO_2:DQO$, de este trabajo, tiene sentido, pues es agua de manantial de montaña que se utiliza para cocina y lavado de trastes y alimentos, sin presencia industrial, más que de surfactantes que se dosifican de manera importante con el fin de evitar la compra recurrente de ellos.

No cumple entonces con una de las conclusiones del estudio de Jefferson et al., donde se dice que la razón $DBO_5:DQO$ es baja en aguas grises. Por el contrario, se asemeja más a los valores promedio de esta razón en el estudio de Niño y Martínez (2013), que rondan de 0.56 a 0.52 ± 0.12 . Esta razón baja, indicaría un potencial tratamiento biológico aerobio, de acuerdo a Hernández et al. (2011).

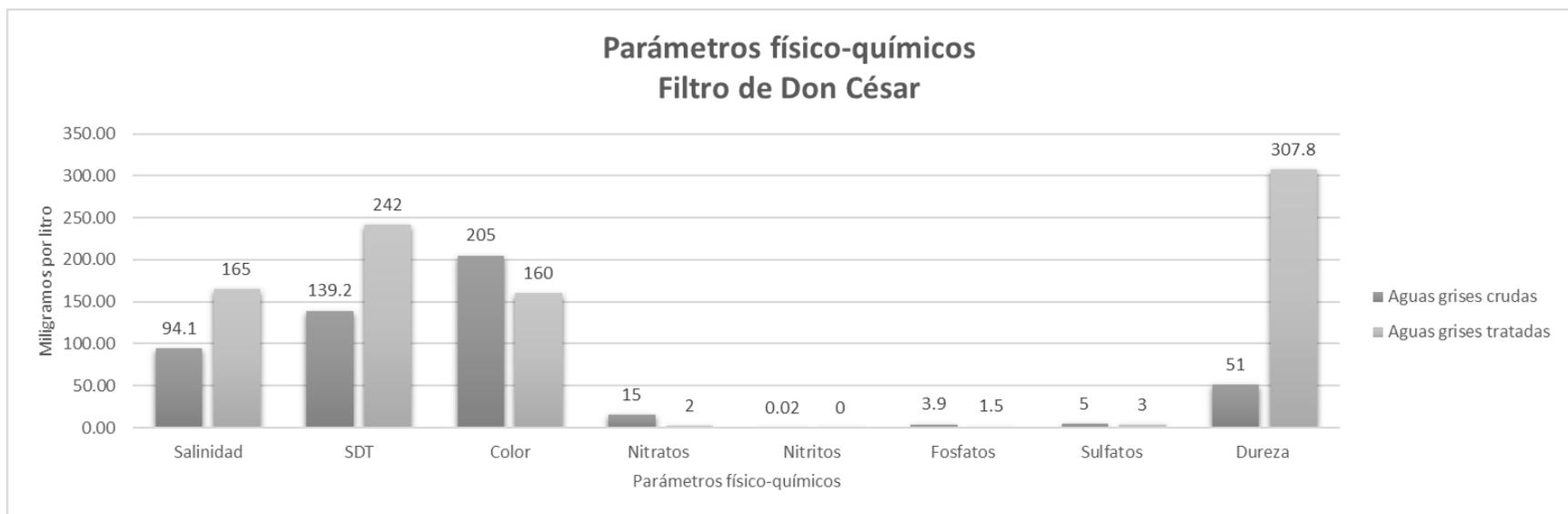


Figura 4.12 Gráfico de valores paramétricos físico-químicos de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don César (Análisis Cántaro Azul, 2019)

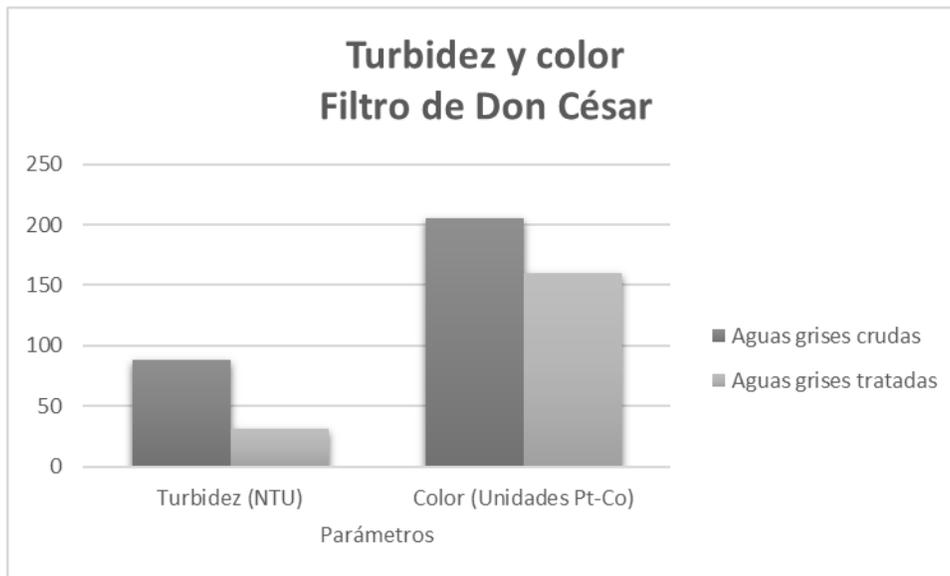


Figura 4.13 gráfico de valores paramétricos de turbidez y color de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don César (Análisis Cántaro Azul, 2019)

Los valores de turbidez y color se presentan en la figura 4.13, en unidades nefelométricas y en la escala de Platino-Cobalto, respectivamente. Se aprecia remoción en ambos casos, en el filtro de Don César.

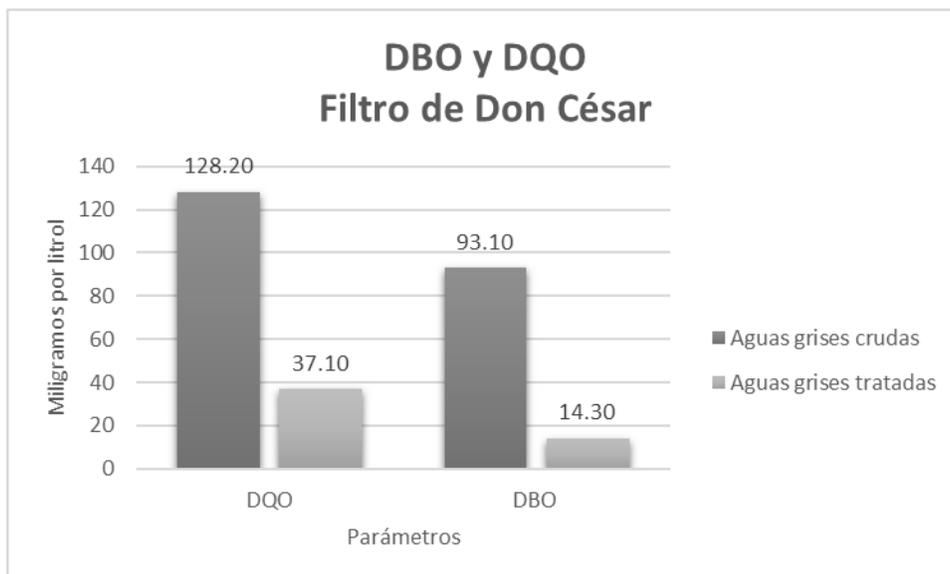


Figura 4.14 Gráfico de valores paramétricos DBO y DQO de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don César (Análisis Cántaro Azul, 2019)

Filtro de aguas grises, Casa de Don Tumín, El Pinar

Tabla 4.14 Porcentaje de remoción de los parámetros de calidad del filtro de Don Tumín

Parámetros	Valores paramétricos agua cruda	Valores paramétricos agua tratada	% de remoción
Coliformes totales	30,075	30,075	0.00
<i>Escherichia Coli</i>	1,675	545	67.46
pH	5.85	5.17	N.A.
Salinidad	631	276	56.26
Sólidos disueltos totales	892	400	55.16
Conductividad	1,277	572	55.21
Turbidez	226	155	31.42
Color	500	350	30.00
Nitratos	10	20	-100.00
Nitritos	0	0	-
Fosfatos	4.70	1.9	59.57
Sulfatos	10	8	20.00
Dureza	750	188.1	74.92
Arsénico	0.00	0.00	0.00
DQO	157.90	28.9	81.70
DBO	105.50	17.3	83.60

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

El filtro de Don Tumín, no presenta remoción en el tema de los Coliformes Totales, pero sí un valor del 67.46% para el caso de la *E. Coli*. Como se mencionó en el análisis del filtro anterior, estos parámetros podrían mostrar una mejora sustancial

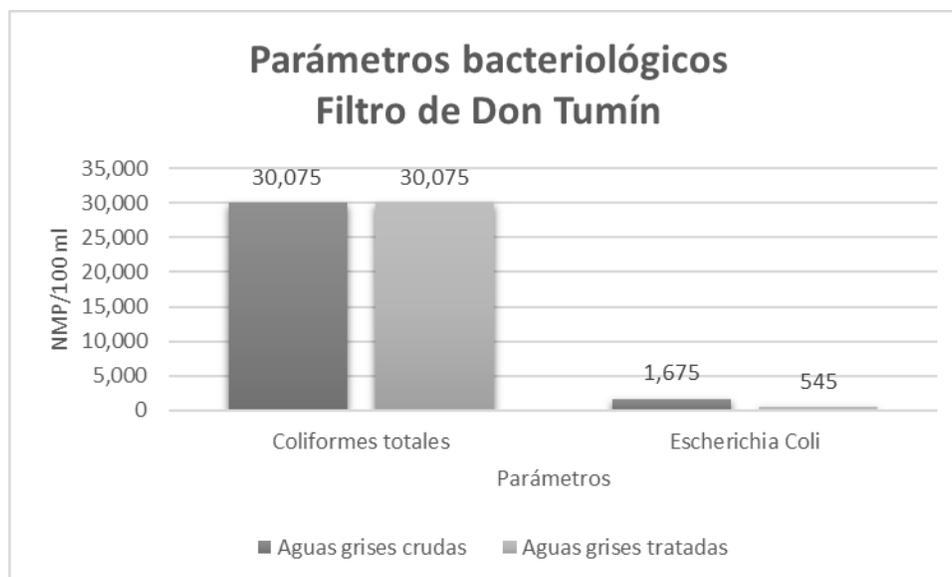


Figura 4.15 Gráfico de valores paramétricos bacteriológicos del filtro de Don Tumín (Análisis Cántaro Azul, 2019)

en caso de aplicar un método de desinfección. El sistema, al no poseer un sistema de desinfección, lo que sugiere que las bacterias redujeron su población por causas naturales.

Todos los demás valores paramétricos de este filtro se mostraron con un comportamiento positivo, con excepción de los nitratos, que aumentaron en 100% su valor. Temas como la dureza, a diferencia del filtro anterior, presentan buen comportamiento, lo que sugiere que la granulometría del material utilizado fue óptima y no se infiltraron partículas que aumentarían la cantidad de sólidos disueltos totales, y la conductividad asociada (Aznar, 2000). Además, este filtro presenta el uso del efluente continuamente para la irrigación de algunas plantaciones en la milpa, lo que evita su estancamiento y concentración de sólidos, hipótesis más probable.

El pH al final del tren de tratamiento redujo su valor, pero no en un valor significativo para un parámetro como el pH que es susceptible a muchas variables del entorno.

La remoción más baja corresponde a los sulfatos con apenas 20%.

A pesar de que esta casa es la de mayor consumo de las tres, por la cantidad de personas que la habitan, así como la disponibilidad de agua debido a las instalaciones hidráulicas que llegan hasta los puntos específicos de uso, y que los filtros están conectados tanto a la bodega como a la cocina, sus valores paramétricos no resultan tener una diferencia significativa con respecto a los otros resultados.

El DQO es más alto que en el filtro anterior que se ubica en la misma comunidad; Esto puede tener relación con las prácticas del hogar en cuestión. Lamentablemente el parámetro de surfactantes no fue posible obtenerlo debido a falta de reactivos, analito que podría darnos una idea de las prácticas de los hogares.

El DBO₂, presenta un valor un poco mayor si es comparado al DBO₅ del estudio de Zipf et al. (2016), que presenta un resultado de 52 mg/l para las aguas grises crudas, pero bajo si se compara con cualquiera de los valores resultantes de la caracterización de las aguas en el estudio de Niño y Martínez (2013). Pero es destacable la remoción efectuada por el filtro, de cerca de 83.60 por ciento.

La tasa $DBO_2:DQO$ para las aguas crudas de este filtro es 0.67, lo que refuerza la idea de que estos filtros tienen una alta carga orgánica debido a su origen y su forma de uso y una baja carga que no es oxobiodegradable. Es muy probable que, si el parámetro del DBO se hubiera dejado desarrollar a 5 días, los valores serían muy cercanos a los de DQO. La tasa para el caso de las aguas tratadas es de 0.60, logrando consistencia en los resultados.

En la tabla 4.16 se presentan los valores de turbidez y color, ambos mostrados en las unidades correspondientes, las cuales son: unidades nefelométricas y de escala platino-cobalto, respectivamente.

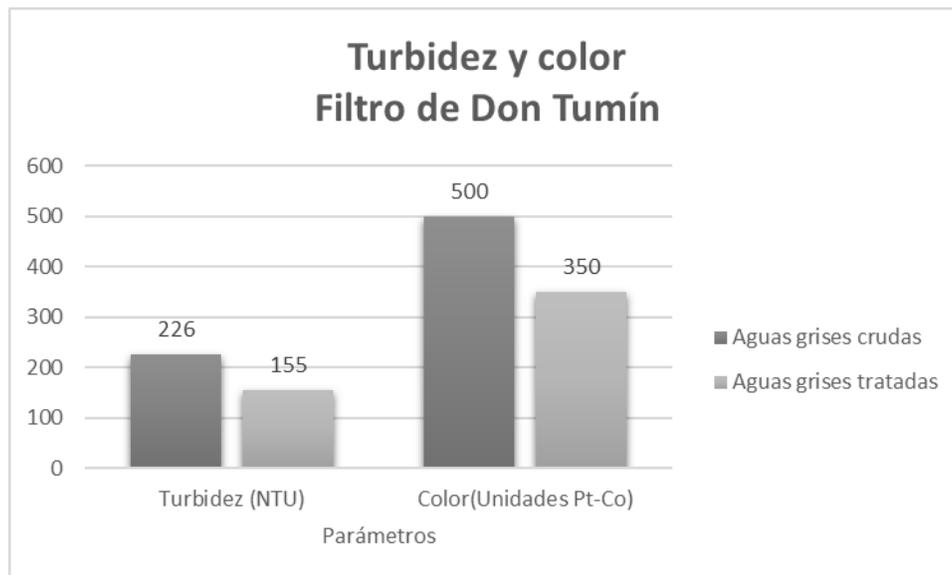


Figura 4.16 Gráfico de los valores paramétricos de turbidez y color de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don Tumín (Análisis Cántaro Azul, 2019)

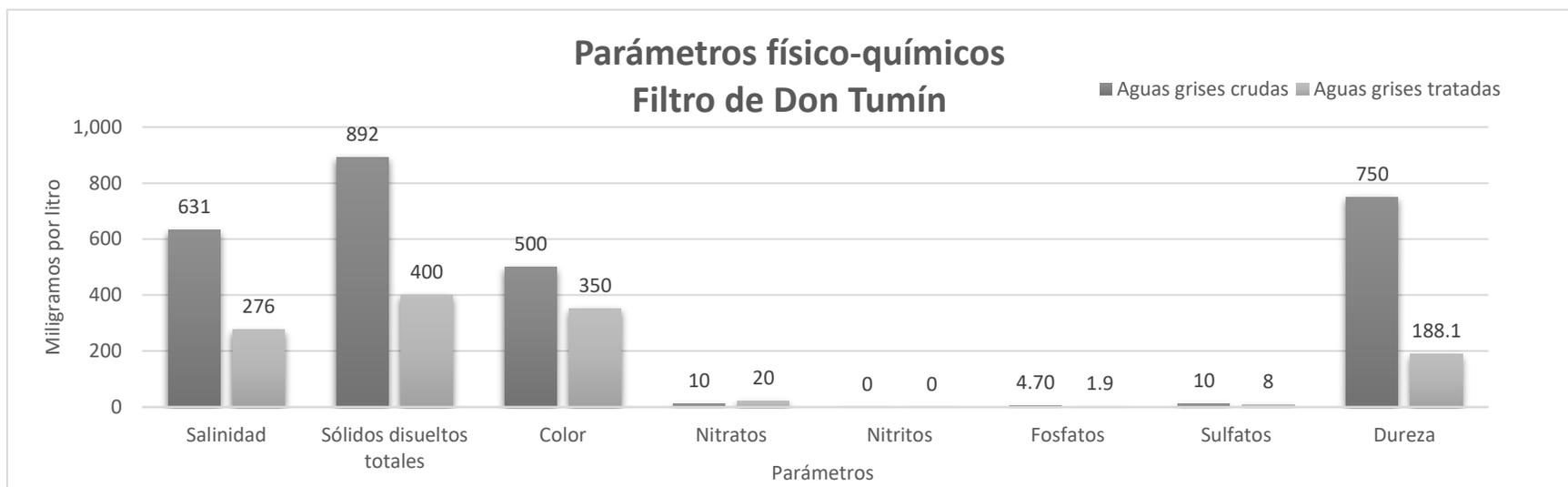


Figura 4.17 Gráfico de los valores paramétricos físico-químicos de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don Tumín (Análisis Cántaro Azul, 2019)

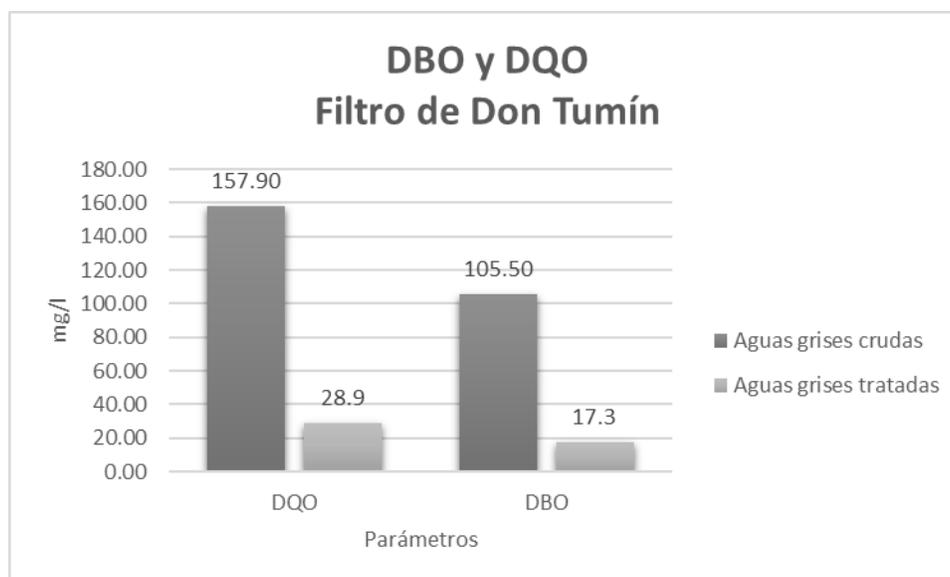


Figura 4.18 Gráfico de los valores paramétricos DBO y DQO de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don Tumín (Análisis Cántaro Azul, 2019)

Filtro de aguas grises, Casa de Don José, Joltojtik

Tabla 4.15 Porcentaje de remoción de los parámetros de calidad del filtro de Don José

Parámetros	Valores paramétricos agua cruda	Valores paramétricos agua tratada	% de remoción
Coliformes totales	30,075	25,115	16.49
<i>Escherichia Coli</i>	26,545	960	96.38
pH	7.65	8.21	N.A.
Salinidad (mg/l)	490	403	17.76
SDT (mg/l)	702	585	16.67
Conductividad (µS)	1,001	820	18.08
Turbidez (NTU)	164	205	-25.00
Color (U Pt-Co)	375	500	-33.33
Nitratos (mg/l)	8	16	-100.00
Nitritos (mg/l)	0	0	-
Fosfatos (mg/l)	5.1	2.2	56.86
Sulfatos (mg/l)	15	55	-266.67
Dureza (mg/l)	68.4	85.5	-25.00
Arsénico (mg/l)	0.00	0.01	-
DQO	201.70	33.40	83.44
DBO	164.80	24.60	85.07

(Análisis Cántaro Azul, 2019)

En la tabla 4.15, al igual que los filtros anteriores, el filtro de Don José se comportó de forma similar para el tema bacteriológico, lo que refuerza las conclusiones anteriores. Un sistema de desinfección podría mejorar considerablemente este

aspecto y seguramente la *E. Coli* encuentra un entorno hostil para mantenerse con vida.

El pH presentó valores apenas alcalinos para las aguas crudas, y aumentó este valor sin que sea un cambio tan trascendente para un analito como el pH, sujeto a muchas variables del entorno, tales como la temperatura.

La dureza presentó un comportamiento negativo, pero mucho menor que en el primer filtro, lo que sugiere también infiltraciones pequeñas del agregado pétreo. A pesar de ello, y su aumento en 25 % de su valor en las aguas grises tratadas, este es similar a los máximos descritos en el estudio de Niño y Martínez (2013).

Los parámetros que pueden asociarse a los sólidos disueltos totales, presentaron un comportamiento positivo, aunque bajo en su remoción y los valores se entrevén altos. Si se comparan, por ejemplo, los valores de Sólidos Totales del estudio de Niño y Martínez (2013), realizado en Bogotá, se encuentran valores de entre 88 – 1150 para el estrato 1, 270 – 632 para el estrato 2 y 426 – 454, valores semejantes a los SDT obtenidos tanto para aguas crudas y residuales del filtro en estudio. Recalcando que los SDT son un parte de los sólidos totales que contiene una muestra de aguas, situación que dependía de la posibilidad de realizarlos por parte de Cántaro Azul.

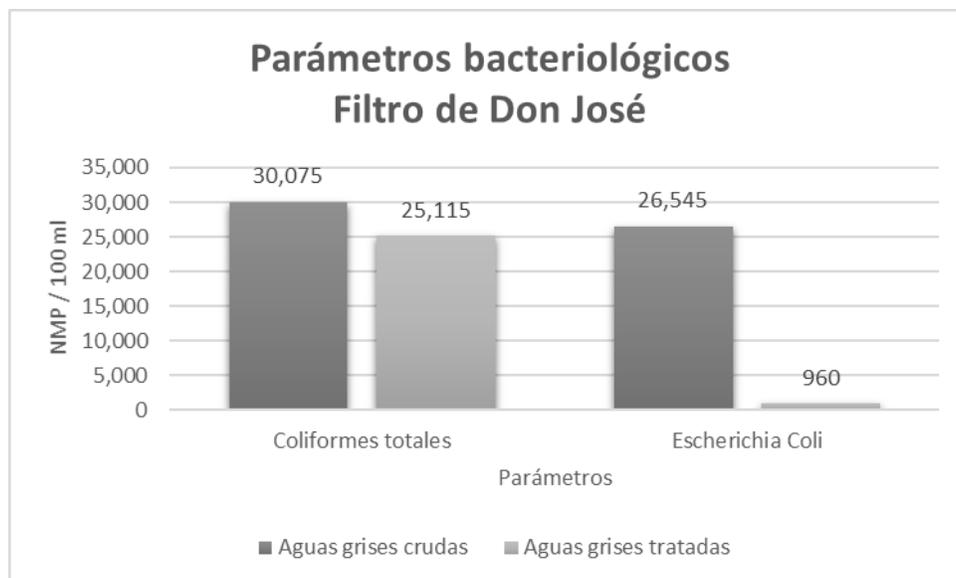


Figura 4.19 Gráfico de los valores paramétricos bacteriológicos del filtro de Don José (Análisis Cántaro Azul, 2019)

Es interesante observar que la dureza aumentó en sus valores, pero los SDT y la Conductividad se redujeron. Podría tratarse de un resultado de laboratorio inconsistente.

La turbidez y el color aumentaron en sus valores, situación apreciable a simple vista, como se percibe en las imágenes mostradas en la descripción de los filtros analizados y la toma de muestras.

Los nitratos y sulfatos aumentaron su valor en 100% y 267% respectivamente, situación de la que se analizará su potencial impacto una vez que se comparen los resultados con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y las conclusiones del estudio de Gross et al. (2005).

El arsénico presentó un comportamiento inusual, aumentando su valor, aunque muy poco, sin tener una hipótesis al respecto.

La actividad oxobiodegradable y oxodegradable de las aguas se mostró similar a los filtros anteriores. El DQO alcanzó valores de 200 mg/l para las aguas grises crudas, pero logrando una remoción de casi el 84%, arrojó valores finales de 33 mg/l en las aguas tratadas, un comportamiento deseable, por debajo de los valores de 367 mg/l como valor mínimo presentado por Jefferson et al. (2004), con variaciones de 246 mg/l, en las que alcanzaría valores debajo de los aquí descritos. En comparación con los resultados de Niño y Martínez (2013), el DQO presenta valores más bajos que el mínimo registrado de 467.3 mg/l para el estrato 3 (Nivel socioeconómico medio).

El DBO₂ con un valor de 164.8 mg/l está muy por debajo que cualquier resultado de DBO₅ del estudio de Niño y Martínez (2013), con valores que van de los 240 a los 684. Hay que enfatizar que los resultados del estudio citado son de DBO₅, por lo tanto, la comparación no resulta tan significativa. La remoción de este valor, alcanzó un valor de 85%, similar a la remoción de la DQO.

La razón DBO₂:DQO es de 0.83 para las aguas grises crudas, donde se aprecia que la actividad orgánica es casi igual que la actividad oxodegradable total lo que refuerza la idea de que prácticamente toda la materia sea oxobiodegradable.

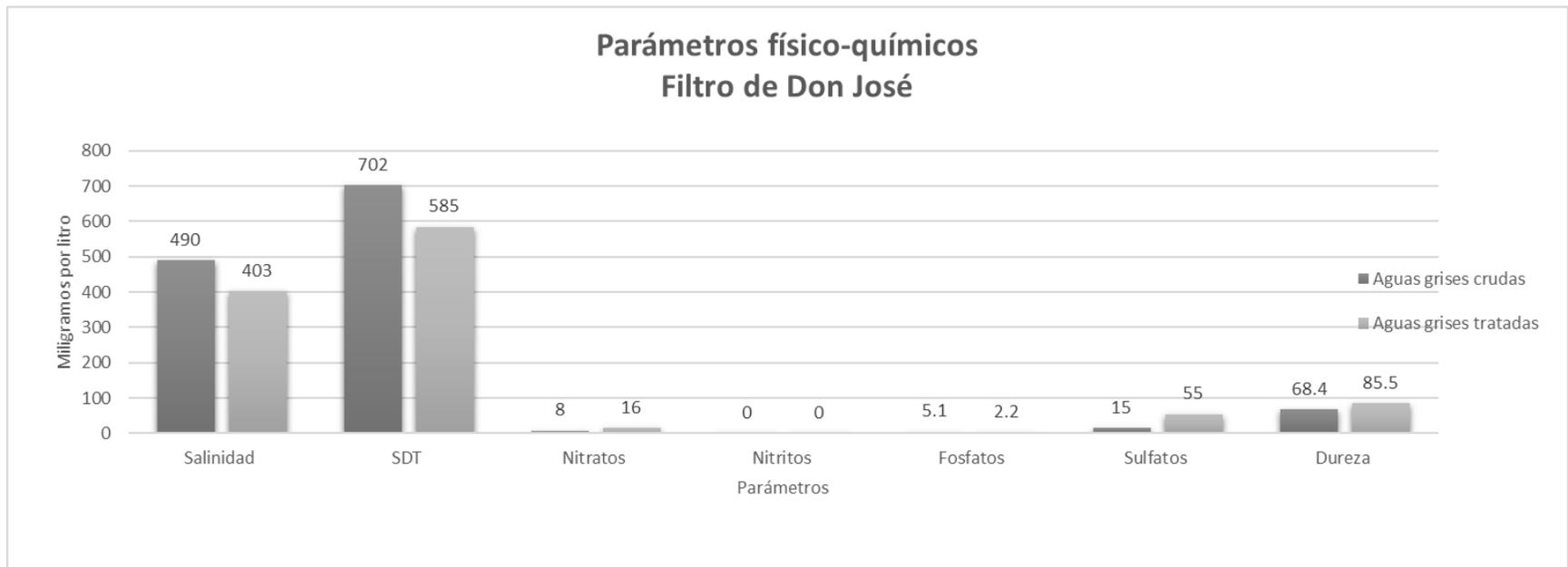


Figura 4.20 Gráfico de los valores paramétricos físico-químicos de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don José (Análisis Cántaro Azul, 2019)

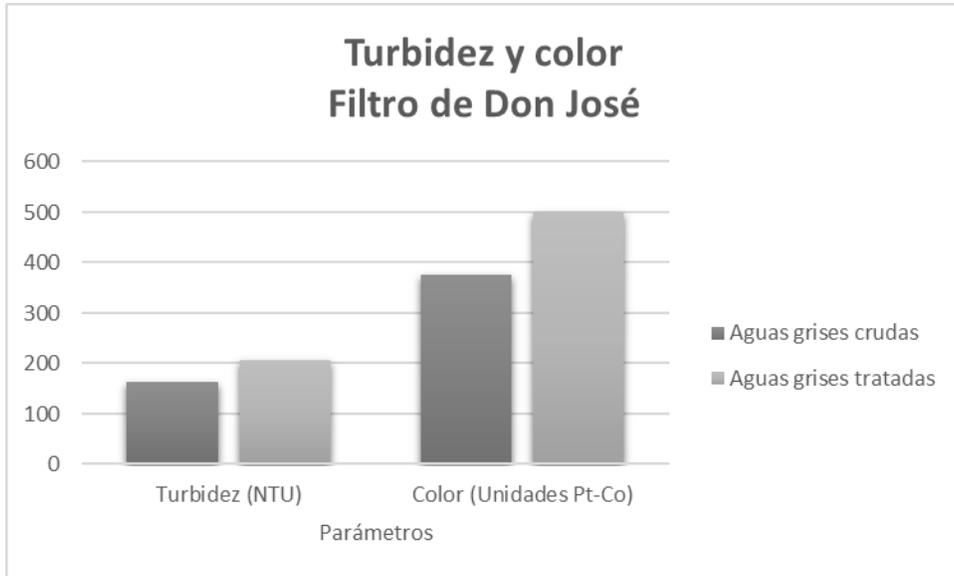


Figura 4.21 Gráfico de los valores paramétricos de turbidez y color de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don José (Análisis Cántaro Azul, 2019)

De la misma manera que en los resultados presentados de los filtros anteriores, la turbidez se expresa en unidades nefelométricas y el color en unidades en la escala Pt-Co.

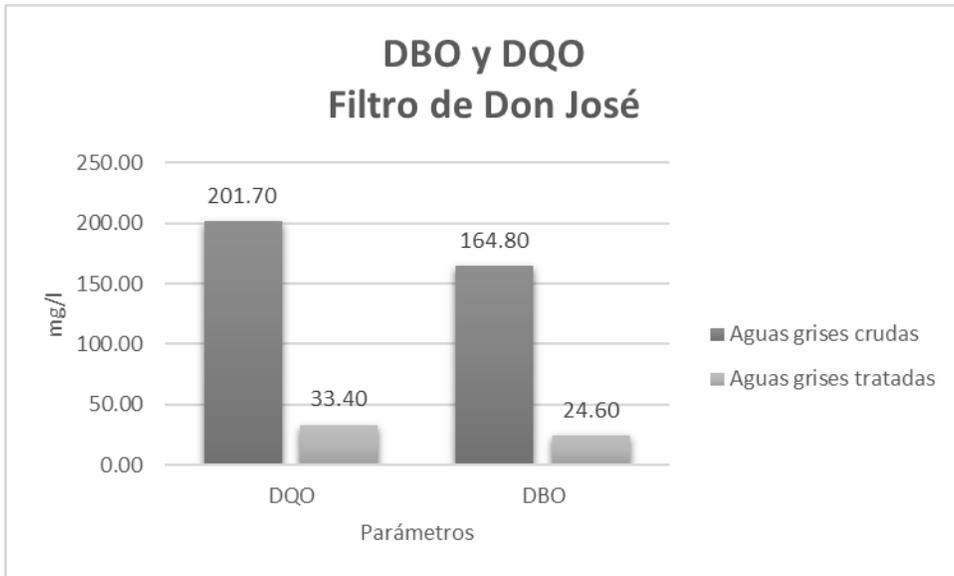


Figura 4.22 Gráfico de los valores paramétricos DBO y DQO de las aguas grises crudas y tratadas del filtro de Don José (Análisis Cántaro Azul, 2019)

Por su parte, la tasa $DBO_2:DQO$ en las aguas tratadas de este filtro tiene como valor 0.73.

Los resultados de los tres filtros no fueron homogéneos en la mayoría de los parámetros, con excepción de la remoción de la *E. Coli*, fosfatos, DQO y DBO, esto sugiere entonces particularidades de cada uno que deben ser diagnosticadas y mejoradas en futuros proyectos, sobre todo en el tema de la dureza y también un método de desinfección, ya que las personas entran en contacto con esta agua de forma directa y la NOM-003-SEMARNAT-1997, ordena que la máxima concentración en NMP/100 ml de Coliformes fecales en aguas de reúso que entren en contacto directo con las personas no rebase de 240.

Los nitratos también aumentaron en concentración en dos de los tres filtros estudiados, suponiendo presencia de bacterias nitrificantes, y sugiriendo que el agua permanece estancada por un tiempo relativamente largo (Aznar, 2000).

En la figura 4.23 se presentan los resultados de los porcentajes de la remoción en cada filtro, para cada parámetro analizado. En gris oscuro observamos el filtro de Don César, en gris de tonalidad intermedia el filtro de Don Tumín, y en gris claro se presentan los porcentajes de remoción del filtro de Don José.

Se ha mencionado anteriormente, que los únicos parámetros con una remoción consistente fueron la *E. Coli*, los fosfatos, DBO y DQO. Todos los demás parámetros presentan altas variaciones en sus porcentajes de remoción o incremento en sus valores.

Comparativa de porcentajes de remoción de los parámetros en los tres filtros

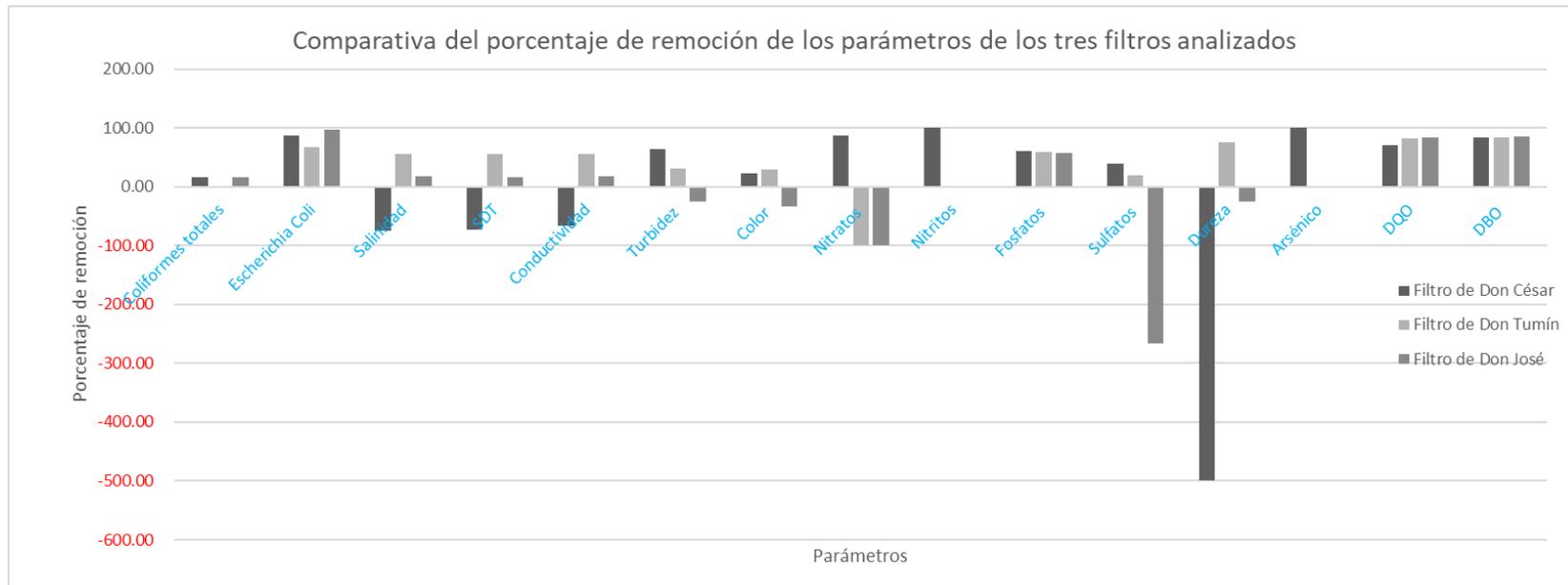


Figura 4.23 Gráfico de la comparativa de los porcentajes de remoción de los tres filtros de aguas grises estudiados (Análisis Cántaro Azul, 2019)

Comparativa con los valores permitidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996: Que establece los límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 contempla cuatro posibles receptores de la descarga, y 11 usos posibles de esta agua. Es de particular interés, la descarga en suelo con el fin del reúso agrícola. No obstante, se comparará con algunos de los valores de los otros receptores y usos, para observar la calidad de las aguas tratadas por los filtros en estudio. La tabla 4.16 recopila los límites en los receptores acuáticos y el suelo, comparándolos con el valor obtenido en los parámetros analizados. Las siglas N.A. y N.O. significa <<no aplica>> y <<no obtenido>> respectivamente.

Tabla 4.16 Comparativa de los resultados de los filtros analizados con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (En verde los parámetros que cumplen).

Parámetros	Límites permisibles en contaminantes básicos						Resultados de los filtros de aguas grises		
	Uso en riego agrícola (A)						Filtro de Don César	Filtro de Don Tumín	Filtro de Don José
	Ríos		Embalses naturales y artificiales		Suelo				
mg/l excepto cuando se especifique	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.			
Coliformes fecales (<i>E. Coli</i>) (NMP/100 ml)	1000	2000	1000	2000	N.A.	N.A.	745	545	960
pH	5 - 10	5 - 10	5 - 10	5 - 10	5 - 10	5 - 10	7.21	5.17	8.21
Temperatura a C°	N.A	N.A	40	40	N.A	N.A	21	20	18
Grasas y aceites	15	25	15	25	15	25	N. O.	N. O.	N. O.
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	N. O.	N. O.	N. O.
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	N.A	N.A	N. O.	N. O.	N. O.
DBO ₅	150	200	75	150	N.A	N.A	N. O.	N. O.	N. O.
Nitrógeno total	40	60	40	60	N.A	N.A	0.45	4.51	3.61
Fósforo total	20	30	20	30	N.A	N.A	0.49	0.62	0.72
Arsénico	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0	0	0.01

(Análisis Cántaro Azul, 2019; NOM-001-SEMARNAT-1996)

La norma citada, no contempla el parámetro de la dureza, a pesar de ello, se consideró importante analizarlo para observar el impacto que iba a tener en la calidad de las aguas la posible infiltración del material de origen pétreo utilizado para su tratamiento, fenómeno no comprobado, o la posible falta de circulación por

un tiempo significativo del agua tratada, evaporándose constantemente provocando el fenómeno de concentración de sólidos

La toma de muestras y los análisis no están apegados con rigor a la normatividad mexicana, así que no se puede hacer una comparativa con los Promedios Diarios y Mensuales, simplemente como valor absoluto.

El fósforo total se obtuvo utilizando una conversión de los miligramos por litro de fosfato entre 3.06, pues es la relación que existe entre la molécula de fósforo (P) y los fosfatos (PO_4^{3-}) (Hanna Instruments, 2019).

El nitrógeno total se obtuvo bajo la lógica anterior, con la relación de la partícula de los nitratos (NO_3^- , la única presente en las aguas tratadas) y la del nitrógeno (N), que es de alrededor de 4.43 (Hanna Instruments, 2019).

No se analizaron otros metales pesados contemplados en la norma, aparte del arsénico, debido a las limitaciones mencionadas anteriormente, por lo tanto, no se puede sostener como afirmación que los parámetros cumplan con las disposiciones de la norma en cuanto a metales pesados y los otros parámetros obtenidos. De la misma manera, cabe mencionar que los parásitos (huevos de helminto) no fueron cuantificados, parámetro contemplado en la norma.

El valor de la DBO_5 no se contempla, pues aun teniendo el parámetro de la DBO_2 , la estimación matemática de este, no es posible sin tener por lo menos otro valor (DBO_3 , DBO_4). Sin embargo, el parámetro de DQO resulta más eficiente por la facilidad de su obtención y la información que ofrece (contenido de materia total oxodegradable), no obstante, la norma actual no lo contempla.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 es bastante permisiva en cuanto a los parámetros que revisa, sobre todo en la descarga directa al suelo con fines agrícolas. Lamentablemente los parámetros obtenidos, que como se ha dicho, responden a varias limitaciones para su obtención, mencionadas en repetidas ocasiones en el texto, no permiten una comparación representativa con la norma. Grasas y aceites y materia flotante, serían por ejemplo dos parámetros muy significativos, que desafortunadamente no se obtuvieron. Aun así, con los parámetros obtenidos se

sienta un precedente, y se observa que algunos de ellos si cumplen con la normatividad nacional, tales como coliformes fecales, pH, temperatura, y arsénico.

Si la hipótesis surgida por los resultados del DBO a 2 días y el DQO, se cumpliera, el DBO 5 de las aguas tratadas de estos filtros no cumplirían con la normatividad para las descargas en cuerpos de agua, más no representa problema en el caso de la descarga directa al suelo, pues este parámetro <<*no aplica*>>.

5. Conclusiones y recomendaciones

Los objetivos de la tesis se cumplieron parcialmente, pues debido a las limitaciones expresadas al principio y en el desarrollo del trabajo, no fue posible evaluar todos los parámetros deseados, contenidos en la normatividad oficial mexicana. Sin embargo, los análisis realizados y los resultados obtenidos aportan una visión general de la calidad de las aguas que fueron objeto de estudio y que sugieren que existen varios aspectos por corregir. Un ejemplo concreto podría ser, el alto contenido de coliformes que presentan las aguas estudiadas, lo que probablemente se deba a varias razones, entre ellas, el contenido de materia orgánica con coliformes, presentes en los alimentos y ropa de los usuarios, la toma de muestras sin cubrebocas, así como la exposición de los filtros a la intemperie ya que la mayoría de las tapas fueron removidas debido a la baja practicidad en su uso, lo que probablemente provocó que fauna pudiera defecar en las aguas.

El tema microbiológico debe atenderse, pues las aguas entran en contacto directo con los humanos, pudiendo significar un foco infeccioso de enfermedades gastrointestinales y de otros tipos. Como se menciona al principio de este capítulo, el conocimiento de este parámetro, permite entender que estos filtros, aunque se dicen de aguas grises y se esperaba una baja concentración de patógenos, presentan contrariamente, una alta concentración de estos, situación que no se hubiera podido conocer sin el presente estudio.

El estudio sienta un precedente para futuros proyectos de asociaciones civiles con limitaciones técnicas y económicas, que podrán suplir en cierta escala con los conocimientos científicos aquí aportados. Se podrá poner más atención en la correcta fabricación, colocación y mantenimiento de proyectos de esta índole.

El análisis del impacto económico que podría tener la implementación de este sistema y su aportación en el aumento de la producción agrícola de este proyecto no se contempló, pero es un tema con potencial importante, pudiendo analizarse el impacto en la economía familiar de los beneficiarios por las plantaciones producidas con potencial de venta. Algunos de los primeros testimonios, de filtros en

funcionamiento, comentaron que pudieron aumentar la producción de cilantro, especie de alta demanda en el mercado y que proveía un ingreso extra a estas familias de bajos recursos. Cabe mencionar, que el incremento en la producción se debió también a que la familia pudo construir un invernadero en su terreno.

Los parámetros relacionados con los sólidos de las aguas tratadas deberían de mejorar en su comportamiento. Acciones sencillas, como dando un mayor y más constante uso a las aguas tratadas, lograría que la concentración de sólidos se redujera y de esta manera también se podría lograr el comportamiento deseado con respecto a los parámetros derivados del nitrógeno. Se sabe que algunos elementos nitrogenados, pueden funcionar como lo mencionan algunos estudios revisados en la presente tesis (Groos et al. 2005, Oktor & Celik 2011, etcétera), como un fertilizante de baja escala, así que habría que encontrar un balance en las concentraciones, un momento en el que los nitritos, los cuales son tóxicos, se oxiden y formen nitratos y la concentración de sólidos y por lo tanto la salinidad no sea tan alta, pues esta última es perjudicial para los suelos.

Es necesario, que más parámetros sean analizados y de una manera más fiable, pues los obtenidos no permiten una comparativa representativa con la normatividad oficial mexicana para estos temas. La NOM-001-SEMARNAT-1996 contempla otros metales pesados y otros parámetros como los sólidos suspendidos totales. Todo esto permitiría saber si las aguas grises tratadas de estos filtros son aptas para su descarga en cuerpos nacionales receptores de agua con fines de reúso. Es importante reiterar, que los límites permisibles para la descarga en suelo, son bastantes permisivos.

El mantenimiento completo de los filtros, se sugiere se realice como mínimo cada 6 meses para evitar la acumulación de lodos que modifiquen altamente el comportamiento del tratamiento, que se concluye aceptable, dadas las características rudimentarias de la fabricación y del sistema del tren de tratamiento, que no responden a ningún cálculo ingenieril. Este mantenimiento contemplaría, el lavado profundo del sistema y el cambio de algunos componentes, así como la sustitución completa del medio filtrante, en este caso arena.

Anexos

Resultados de los análisis reportados por la Asociación Civil Cántaro Azul.

Anexo A



INFORME DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA					
COMUNIDAD:	EL PINAR, CASA CESAR, AGUA RESIDUAL	MUNICIPIO:	-----	ESTADO:	CHIAPAS
FECHA DE COLECTA:	1/DIC/2019	NOMBRE DEL COLECTOR:	-----	FECHA DE ANÁLISIS:	02/DIC/2019

OBSERVACIONES DE FUENTE DEL AGUA

Muestra de agua residual. Casa César.

RESULTADOS BACTERIOLÓGICOS				
PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO (Diluciones seriadas por muestra: 3)	MÉTODO USADO	TIPO DE PROCEDIMIENTO
Coliformes totales	(NMP/100 mL)	>30,075	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B-97, estos métodos son por Coliform y Coliformi TB. Además de la NORMA Oficial Mexicana NOM-210-SSEA-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores.
Escherichia Coli	(NMP/100 mL)	>6180	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	

RESULTADOS FISCOQUÍMICOS				
PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	UNIDADES	MÉTODO	Tipo de procedimiento: Oficial NMX, Alterno autorizado por CONAGUA, Estandarizado internacionalmente Semicuantitativo.
pH	5.60	pH	SONDA MULTIPARAMÉTRICA EXTECH Instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	94.1	mg/L		
Sólidos disueltos totales	139.2	mg/L		
Conductividad	207.8	µS		
Turbidez	88	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	205	Unidades Platino Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	15	mg/L	Método de Diazotización, Reducción de cadmio, Diazotización.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0.02	mg/L		
Dureza	51.3	mg/L	Método de titulación de gota/ EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	5	mg/L	Método SulfaVer 4: Sulfato/Bario	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Arsénico	0.01	mg/L	Método de reacción con bromuro de mercurio y halógenuros. Coincidencia de color de bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	128.2	mg/L	Método de digestión del reactor de manganeso III	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DBO ₅	93.1	mg/L	Manométrico	Estandarizado Internacionalmente - EPA

Calzada Daniel Sarmiento Rojas No. 19 int. 19 A, Col. Los Alcanfores
C.P. 29246, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México

+52 (967) 631 5817

www.cantaroazul.org

Anexo B



cántaro azul

INFORME DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA					
COMUNIDAD:	EL PINAR, CASA CESAR, AGUA TRATADA	MUNICIPIO:	-----	ESTADO:	CHIAPAS
FECHA DE COLECTA:	1/DIC/2019	NOMBRE DEL COLECTOR:	-----	FECHA DE ANÁLISIS:	02/DIC/2019

OBSERVACIONES DE FUENTE DEL AGUA

Muestra de agua tratada. Casa César.

RESULTADOS BACTERIOLÓGICOS				
PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO (Diluciones seriadas por muestra: 3)	METODO USADO	TIPO DE PROCEDIMIENTO
Coliformes totales	(NMP/100 mL)	>25,115	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	<small>Método EPA 9223B y 9223B 97, estos métodos son por Collety y Collety 11. Además de la NORMA Oficial Mexicana NOM-210-S/SA-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos coliformes.</small>
<small>BacteriMGA Col</small>	<small>(NMP/100 mL)</small>	<small>346</small>	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	

RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS				
PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	UNIDADES	MÉTODO	Tipo de procedimiento: Oficial NMX, Alternativo autorizado por CONAGUA, Estandarizado internacionalmente Semicuantitativo.
pH	7.21	pH	<small>SONDA MULTIPARAMÉTRICA EXTECH Instruments ExStk EC 500</small>	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	165	mg/L		
Sólidos disueltos totales	242	mg/L		
Conductividad	346	µS		
Turbidez	31	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	160	Unidades Platino Cobalto	<small>Hanna Instruments 217 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto</small>	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	2	mg/L	<small>Método de Diazotización, Reducción de cadmio, Diazotización.</small>	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/L		
Dureza	307.8	mg/L	<small>Método de titulación de gota/ EDTA-bulk powder</small>	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	3	mg/L	<small>Método SulfaVer 4: Sulfato/Bario</small>	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Arsénico	0	mg/L	<small>Método de reacción con bromuro de mercurio y halógenos Coincidencia de color de bandas de prueba.</small>	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	37.1	mg/L	<small>Método de digestión del reactor de manganeso III</small>	
DBO ₅	14.3	mg/L	<small>Manométrico</small>	

Calzada Daniel Sarmiento Rojas No. 19 int. 19 A, Col. Los Alcanfores
C.P. 29246, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México

+52 (967) 631 5817

www.cantaroazul.org



cántaro
azul

INFORME DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA					
COMUNIDAD:	EL PINAR, CASA TUMIN, AGUA RESIDUAL	MUNICIPIO:	-----	ESTADO:	CHIAPAS
FECHA DE COLECTA:	1/DIC/2019	NOMBRE DEL COLECTOR:	-----	FECHA DE ANÁLISIS:	02/DIC/2019

OBSERVACIONES DE FUENTE DEL AGUA

Muestra de agua residual. Casa Tumin.

RESULTADOS BACTERIOLÓGICOS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO (Diluciones seriadas por muestra: 3)	METODO USADO	TIPO DE PROCEDIMIENTO
Coliformes totales	(NMP/100 mL)	>30,075	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	Método EPA 822B y 822B 97, estos métodos son por Collett y Collett 1E. Además de la NORMA Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores.
Escherichia coli	(NMP/100 mL)	>1680	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	

RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS

PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	UNIDADES	MÉTODO	Tipo de procedimiento: Oficial NMX, Alternativo autorizado por CONAGUA, Estandarizado internacionalmente Semicuantitativo.
pH	5.85	pH	SONDA MULTIPARAMÉTRICA EXTECH Instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	631	mg/L		
Sólidos disueltos totales	892	mg/L		
Conductividad	1277	µS		
Turbidez	226	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	500	Unidades Platino Cobalto	Hanna Instruments 227 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	10	mg/L	Método de Diazotización, Reducción de cadmio, Diazotización.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/L		
Dureza	750	mg/L	Método de titulación de gota/ EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	10	mg/L	Método SulfaVer 4: Sulfato/Bario	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Arsénico	0	mg/L	Método de reacción con bromuro de mercurio y halógenos Coincidencia de color de bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	157.9	mg/L	Método de digestión del reactor de manganeso III	
DBO ₂	105.5	mg/L	Manométrico	

Calzada Daniel Sarmiento Rojas No. 19 int. 19 A, Col. Los Alcanfores
C.P. 29246, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México

+52 (967) 631 5817

www.cantaroazul.org

cántaro azul

INFORME DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA					
COMUNIDAD:	EL PINAR, CASA TUMIN, AGUA TRATADA	MUNICIPIO:	-----	ESTADO:	CHIAPAS
FECHA DE COLECTA:	1/DIC/2019	NOMBRE DEL COLECTOR:	-----	FECHA DE ANÁLISIS:	02/DIC/2019

OBSERVACIONES DE FUENTE DEL AGUA

Muestra de agua tratada. Casa Tumin.

RESULTADOS BACTERIOLÓGICOS				
PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO (Diluciones seriadas por muestra: 3)	METODO USADO	TIPO DE PROCEDIMIENTO
Coliformes totales	(NMP/100 mL)	>30,075	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B 97, estos métodos son por Coliform y Coliform 18. Además de la NOMMA Oficial Mexicana NOM 210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores.
Escherichia Coli	MP /n 100 ml)	545	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	

RESULTADOS FISICOQUÍMICOS				
PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	UNIDADES	MÉTODO	Tipo de procedimiento: Oficial NMX, Alternativo autorizado por CONAGUA, Estandarizado internamente Semicuantitativo.
pH	5.17	pH	SONDA MULTIPARAMÉTRICA EXTECH Instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	276	mg/L		
Sólidos disueltos totales	400	mg/L		
Conductividad	572	µS		
Turbidez	155	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado internamente - EPA
Color	350	Unidades Platino Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado internamente - EPA
Nitratos	20	mg/L	Método de Diazotización, Reducción de cadmio, Diazotización.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/L		
Dureza	188.1	mg/L	Método de titulación de gota/ EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	8	mg/L	Método SulfaVer 4: Sulfato/Bario	Estandarizado internamente - EPA
Arsénico	0	mg/L	Método de reacción con bromuro de mercurio y halógenos. Coincidencia de color de bandas de prueba.	Estandarizado internamente - EPA
DQO	28.9	mg/L	Método de digestión del reactor de manganeso III	
DBO ₂	17.3	mg/L	Manométrico	

Calzada Daniel Sarmiento Rojas No. 19 int. 19 A, Col. Los Alcanfores
C.P. 29246, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México

+52 (967) 631 5817

www.cantaroazul.org



INFORME DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA					
COMUNIDAD:	JOLTOJTIK, DON JOSÉ, AGUA RESIDUAL	MUNICIPIO:	-----	ESTADO:	CHIAPAS
FECHA DE COLECTA:	1/DIC/2019	NOMBRE DEL COLECTOR:	-----	FECHA DE ANÁLISIS:	02/DIC/2019

OBSERVACIONES DE FUENTE DEL AGUA

Muestra de agua residual. Casa Don José.

RESULTADOS BACTERIOLÓGICOS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO (Diluciones seriadas por muestra: 3)	METODO USADO	TIPO DE PROCEDIMIENTO
Coliformes totales	(NMP/100 ml)	>30 075	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	Método EPA 922B y 922B-97, estos métodos son por Colilert y Colilert 18. Además de la NORMA Oficial Mexicana NOM-210-SAG-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos patógenos. <small>Desarrollado en colaboración con el INEGI.</small>
Escherichia Coli	(NMP / 100 ml)	>26 545	Número Más Probable (NMP) Método por Sustrato Cromogénico	

RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS

PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	UNIDADES	MÉTODO	Tipo de procedimiento: Oficial NMX, Alternativo autorizado por CONAGUA, Estandarizado internacionalmente Semicuantitativo.
pH	7.65	pH	SONDA MULTIPARAMÉTRICA EXTECH Instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	490	mg/L		
Sólidos disueltos totales	702	mg/L		
Conductividad	1001	µS		
Turbidez	164	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	375	Unidades Platino Cobalto	Hanna Instruments 717 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	8	mg/L	Método de Diazotización, Reducción de cadmio, Diazotización.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/L		
Dureza	68.4	mg/L	Método de titulación de gota/ EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	15	mg/L	Método SulfaVer 4: Sulfato/Bario	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Arsénico	0	mg/L	Método de reacción con bromuro de mercurio y halógenos Coincidencia de color de bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	201.7	mg/L	Método de digestión del reactor de manganeso III	
DBO ₅	164.8	mg/L	Manométrico	

Calzada Daniel Sarmiento Rojas No. 19 int. 19 A, Col. Los Alcanfores
C.P. 29246, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México

+52 (967) 631 5817

www.cantaroazul.org



INFORME DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA

COMUNIDAD:	JOLTOJTIK, DON JOSE, AGUA TRATADA	MUNICIPIO:	-----	ESTADO:	CHIAPAS
FECHA DE COLECTA:	1/DIC/2019	NOMBRE DEL COLECTOR:	-----	FECHA DE ANÁLISIS:	02/DIC/2019

OBSERVACIONES DE FUENTE DEL AGUA

Muestra de agua tratada. Casa Don José.

RESULTADOS BACTERIOLÓGICOS

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO (Diluciones seriadas por muestra: 3)	METODO USADO	TIPO DE PROCEDIMIENTO
Coliformes totales	(NMP/100 mL)	>30,075	Número Más Probable (NMP) Método por Substrato Cromogénico	Método EPA 9223B y 9223B 97, estos métodos son por Coliform y Coliform 18. Además de la NORMA Oficial Mexicana NOM-210-SAG-2016, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos.
Escherichia Coli	(NMP / 100 mL)	960	Número Más Probable (NMP) Método por Substrato Cromogénico	Determinación de microorganismos indicadores.

RESULTADOS FISCOQUÍMICOS

PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	UNIDADES	MÉTODO	Tipo de procedimiento: Oficial NMX, Alternativo autorizado por CONAGUA, Estandarizado Internacionalmente Semicuantitativo.
pH	8.21	pH	SONDA MULTIPARAMÉTRICA EXTECH Instruments ExStik EC 500	Cuantitativo para uso en campo
Salinidad	403	mg/L		
Sólidos disueltos totales	585	mg/L		
Conductividad	820	µS		
Turbidez	205	NTU	Nefelometría (Absorptometric Method)	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Color	500	Unidades Platino Cobalto	Hanna Instruments 727 - Adaptación de los Métodos Estándares para la examinación de agua y aguas residuales, Edición 21, Método colorimétrico escala Platino-Cobalto	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Nitratos	16	mg/L	Método de Diazotización, Reducción de cadmio, Diazotización.	Cuantitativo para uso en campo
Nitritos	0	mg/L		
Dureza	85.5	mg/L	Método de titulación de gota/ EDTA-bulk powder	Cuantitativo para uso en campo
Sulfatos	55	mg/L	Método Sulfá/Ver 4; Sulfato/Bario	Estandarizado Internacionalmente - EPA
Arsénico	0.01	mg/L	Método de reacción con bromuro de mercurio y halogenuros Coincidencia de color de bandas de prueba.	Estandarizado Internacionalmente - EPA
DQO	33.4	mg/L	Método de digestión del reactor de manganeso III	
DBO ₅	24.6	mg/L	Manométrico	

Bibliografía

- Aparicio, F. J. (2010). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Ciudad de México: LIMUSA.
- Armstrong, F. (1982). Bioquímica. In *El agua: disolvente de la vida* (pp. 23–26).
- Aznar, A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de la calidad de las aguas. *Gestión Ambiental*, 2(23), 12–19.
- Bencala, K., Hains, R., Nogueira, T., Segán, D., & Stevens, S. (2006). *Desarrollo de un Plan de Administración Sostenible para la Cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México*. University of Santa Barbara.
- Cántaro Azul A.C. (2019). Trayectoria. Retrieved from <https://www.cantaroazul.org/trayectoria>
- Cantillo, P. (2018). Brecha de desigualdad, incontenible; se divide más el país. *Excelsior*, p. 1. Retrieved from <https://www.excelsior.com.mx/nacional/2018/01/08/1212165>
- CEPIS. (2005). *Guía para diseño de tratamiento de filtración en múltiples etapas*. Lima.
- Comité de Cuenca Valle de Jovel;, H. Ayuntamiento de San Cristóbal de Las Casas;, & CONAGUA. (2010). *Plan de gestión integral de la cuenca del valle de Jovel*. San Cristóbal de Las Casas.
- Comité de Cuenca Valle de Jovel. (2013). Misión, Visión. Retrieved from <http://www.cuencavalledejovel.org/index.php/acerca-de/mision-vision>
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del agua en México, edición 2018*. (S. general de Planeación, Ed.). Ciudad de México.
- Diaper, C., & Sharma, A. K. (2007). Innovative sewerage solutions for small rural towns. *Water Science and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.561>
- Espíritu, G. (1998). *Evaluación de la disponibilidad de agua mediante análisis geográfico en la cuenca San Cristóbal, Chiapas*. ECOSUR.

- Estrada, J., Trucios, R., Villanueva, J., Cerano, J., & Constante, V. (2013). *Manejo sustentable de los recursos naturales en la cuenca de San Cristóbal de las Casas*, Chiapas. San Cristóbal de Las Casas.
- Finley, S. (2008). *Reuse of Domestic Greywater for the Irrigation of Food Crops*. McGill University.
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C. (2018). ¿Qué es el agua? Retrieved February 1, 2019, from <https://agua.org.mx/que-es/>
- Galdos-Balzategui, A., De La Torre, J. C., Sánchez-Pérez, H. J., López, J. J. M., Dosal, A. T., & Urbina, S. G. (2017). Evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico por consumo de agua en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(1), 133–153. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-10>
- Gómez, G. M., Ángel, M., Santiago, C., Martín, D., Bonifaz, D., & Pérez, A. V. (2008). Vulnerabilidad y riesgo por inundación en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, 23(67), 83–122.
- Gross, A., Azulai, N., Oron, G., Ronen, Z., Arnold, M. A., & Nejdat, A. (2005). Impacto ambiental y riesgos de salud asociados a la irrigación con aguas grises: Un caso de estudio. *Water Science and Technology*, 10. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0251>
- Hanna Instruments. (2019). Fósforo: Comprender los diferentes tipos de fósforo y los métodos utilizados para medirlo. Retrieved from <https://www.hannainst.es/blog/category/page/4>
- Hernández, L., Temmink, H., Zeeman, G., & Buisman, C. J. N. (2011). Characterization and anaerobic biodegradability of grey water. *Desalination*, 270, 111–115.
- Huisman, L., Azevedo, J. M., Sundaresan, B. B., Lanoix, J. N., & Hofkes, E. H. (1988). *Sistemas de abastecimiento para pequeñas comunidades - Tecnología de Pequeños Sistemas de Abastecimiento de Agua en Países en*

Desarrollo. La Haya.

Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., & Judd, S. (2004). Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Science and Technology*, *50*, 157–164.

Li, Z., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *DES*, *260*(1–3), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.035>

Lossio, M. (2012). *Sistema de abastecimiento de agua potable para cuatro poblados rurales del distrito de Lancones*. Universidad de Piura.

Madani, K. (2015, June). Water: Think again [Video file]. Tedx Talks. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=NSL_xx2Qnyc

Maina, S., Anyango, V., Yan, X., Wahiti, R., Wang, Q., & Wang, J. (2019). Health risk assessment by consumption of vegetables irrigated with reclaimed waste water : A case study in Thika (Kenya). *Journal of Environmental Management*, *231*(January 2018), 576–581. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.088>

Maldonado, V. (2004). Filtración. In L. Andrade (Ed.), *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría* (p. 83). Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Mandujano, I. (2016, November). Niños indígenas de Chiapas exigen atender muertes por males gastrointestinales y desnutrición. *Proceso*, *1*. Retrieved from <https://www.proceso.com.mx/461396/ninos-indigenas-chiapas-exigen-atender-muertes-males-gastrointestinales-desnutricion>

Muñoz, H., & Baumann, J. (2017). Remoción de bacterias coliformes en un sistema de lodos activados y humedal construido. *Ecosistemas y Recur. Agropecuarios*, *4*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.19136/era.a4n11.913>

NESC. (2000). Filtración lenta con arena. Morgantown: NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER.

- Oktor, K., & Çelik, D. (2019). Treatment of wash basin and bathroom greywater with *Chlorella variabilis* and reusability. *Journal of Water Process Engineering*, 31(April). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100857>
- OMS. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. Organización Mundial de la Salud.
- Rodda, N., Salukazana, L., Jackson, S. A. F., & Smith, M. T. (2011). Use of domestic greywater for small-scale irrigation of food crops : Effects on plants and soil. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(14–15), 1051–1062. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.08.002>
- Roque, S., & Ochoa, Y. (2018). *Estudio Hidrogeofísico para la localización del sitio de perforación de un pozo profundo como apoyo social en la comunidad “El Palmar” en Papantla, Veracruz: Método de transitorio electromagnético*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Salgot, M., & Folch, M. (2003). Reutilización de aguas residuales. In C. Diaz (Ed.), *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas* (1st ed., pp. 212–224). Buenos Aires: RIPDA-CYTED.
- Santiago, J. A., Manco, J. F., Choque, B., Ramírez, C. A., & Valencia, E. (2016). Modelación de los efectos del cambio climático en la Cuenca del Valle de Jovel, Chiapas, México. *Caos Conciencia*, (Ciencias ambientales), 12.
- Schenerock, A. (2014, April 19). Mujeres rurales y acceso al agua. *La Jornada Del Campo*. Retrieved from <https://www.jornada.com.mx/2014/04/19/cam-indigenas.html>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1980). *NMX-AA-003-1980*. Ciudad de México.
- SEDESOL. (2013). *Cátalogo de Comunidades*. Retrieved October 21, 2019, from <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=07&mun=023>

- SEMARNAT. (2018). Diferencia entre sostenible y sustentable. Retrieved from <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/diferencia-entre-sustentable-y-sostenible>
- Soares, D. (2007). Acceso, abasto y control del agua en una comunidad indígena chamula en Chiapas. Un análisis a través de la perspectiva de género, ambiente y desarrollo. *REGIÓN Y SOCIEDAD*, XIX(38), 26–50.
- Soto, R. (2012). *Manual para la elaboración de proyectos de sistemas rurales de abastecimiento de agua potable y alcantarillado. Tesis UNAM*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra - Una introducción a la Geología Física. Pearson education* (8th ed., Vol. 1). Madrid. [https://doi.org/10.1016/0196-0709\(91\)90073-O](https://doi.org/10.1016/0196-0709(91)90073-O)
- Teh, X. Y., Poh, P. E., Gouwanda, D., & Chong, M. N. (2015). Decentralized light greywater treatment using aerobic digestion and hydrogen peroxide disinfection for non-potable reuse. *Journal of Cleaner Production*, 99, 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.015>
- Universidad de Barcelona. (n.d.). Filtración.
- Vargas, C. (1996). Características microbiológicas de las aguas residuales. In *III Curso “Lagunas de estabilización” Teoría, diseño, construcción, operación, evaluación y mantenimiento* (p. 14). Lima.
- Villafuerte, C. (2018, December 20). Hay siete tarifas domésticas en SAPAM. *La Foja Coleta*, p. 1,2.
- Webmaster Infonomía ECOSUR. (2015). Acreditaciones. Retrieved from <https://www.ecosur.mx/laboratorios/acreditaciones/>
- Wolfram Alpha LCC. (2019). Water. Retrieved February 1, 2019, from <https://www.wolframalpha.com/input/?i=water>
- Zipf, M. S., Pinheiro, I. G., & Conegero, M. G. (2016). Simplified greywater

treatment systems : Slow fi lters of sand and slate waste followed by granular activated carbon. *Journal of Environmental Management*, 176, 119–127.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.035>