



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA
Y CIENCIAS DEL AGUA: IITCA

TESIS

“SISTEMA DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES EN LA DESCARGA DEL
INODORO EN VIVIENDA UNIFAMILIAR”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE: MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA

MARENI GALDÁMEZ GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. DAURY GARCÍA PULIDO

CO-DIRECTORES DE TESIS:

DR. CARLOS DÍAZ DELGADO

DR. BORIS MIGUEL LÓPEZ REBOLLAR

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2021





RESUMEN

La escasez del recurso hídrico es un problema con el que cada vez un mayor número de habitantes afronta en distintas comunidades debido al incremento desmedido de la población y contaminación, mismos factores que han propiciado la sobreexplotación de mantos acuíferos y cuerpos naturales de agua dulce, disminuyendo el abastecimiento de agua apta para el consumo humano. Para enfrentar estos problemas de carencia y evitar encontrarse en situaciones desfavorables, se busca el uso de fuentes alternas y ecológicas que permitan preservar el suministro de agua potable para contacto directo con el ser humano, disminuyendo al mismo tiempo el impacto de la huella hídrica, empleando para tal propósito el aprovechamiento de aguas grises de regadera como suministro en el tanque de inodoro en viviendas unifamiliares.

En el presente trabajo, se evaluó el funcionamiento y diseño de un sistema de reutilización de aguas grises de regadera de bajo costo de construcción y mantenimiento con efluentes de calidad apropiada, el cual consistió en un tanque de trampa de grasas, seguido por un proceso de filtración de grava y filtración lenta de arena con filtros de 45 y 30 cm de espesor de medio filtrante, finalizando con un tratamiento de desinfección con hipoclorito de sodio, proponiendo su uso en la descarga del inodoro en viviendas unifamiliares que se encuentren en etapa previa a construcción.

La caracterización físico-química del influente y de los efluentes permitió observar un desempeño similar en ambos filtros lentos de arena, sin embargo, el efluente del filtro con mayor lecho filtrante sin desinfección, tuvo la eficiencia de remoción más alta de turbidez y DQO con 92 ± 5 y $65 \pm 5\%$, respectivamente. Mientras que el efluente del filtro con menor lecho filtrante que recibió tratamiento de desinfección, presentó la mayor remoción en sólidos suspendidos y grasas y aceites con 86 ± 3 y 74% respectivamente.

Derivado del proceso de desinfección, la demanda bioquímica de oxígeno no fue detectada en ambos efluentes, así como la presencia de coliformes totales y coliformes fecales. Esto permitió el cumplimiento de criterios establecidos por la normatividad mexicana e internacional para la calidad del agua empleada para su reutilización en inodoros y riego.



También, se estimó la inversión monetaria que implicó la construcción del tren de tratamiento a nivel laboratorio y se realizó una propuesta para la implementación del sistema de reutilización de aguas grises provenientes de regadera en vivienda unifamiliar de nivel medio para facilitar el desvío y tratamiento del agua empleada en el aseo personal, obteniendo un ahorro de 35 m³ anuales de agua potable.

Palabras clave: reutilización de aguas grises, filtración lenta con arena, descarga en inodoro.



ABSTRACT

The lack of water resources is a problem that an increasing number of inhabitants face in different communities due to the excessive increase in population and pollution, the same factors that have led to the overexploitation of aquifers and natural bodies of fresh water decreasing the supply of water suitable for human consumption. To face this deprivation problems and avoid being in unfavorable situations, it is convenient the use of alternative and ecological sources to preserve the supply of drinking water for direct contact with the human being, at the same time, it reduces the impact of the water footprint, using for this purpose the use of gray water from the shower as a supply in the toilet tank in single-family homes.

In this work, the operation and design of a low-cost construction and maintenance gray water reuse system with effluents of appropriate quality was evaluated, which consisted of a grease trap tank, followed by a gravel filtration process and slow sand filtration with filters of 45 and 30 cm thick filter media, ending with a disinfection treatment with sodium hypochlorite, proposing its use in toilet flushing in single-family homes that are in the pre-construction stage.

The physical-chemical characterization of the influent and the effluents allowed to observe a similar performance in both slow sand filters. However, the filter effluent with the largest filter bed without disinfection had the highest removal efficiency to turbidity and COD with 92 ± 5 y $65 \pm 5\%$, respectively.

While the filter effluent with a smaller filter bed that received disinfection treatment presented the highest removal in suspended solids and fats and oils with $86 + 3$ and 74% , respectively.

Due to the disinfection process, the biochemical oxygen demand was not detected in both effluents, as well as the presence of total coliforms and fecal coliforms. This allowed the fulfillment of criteria established by the mexican and international regulations for the water quality used for its reuse in toilets and irrigation.

Also, the monetary investment involved in the construction of the treatment train at the laboratory level was estimated and a proposal was made for the implementation of gray water from shower reuse system in a medium-level single-family home to facilitate the detour



and treatment of the water used in personal hygiene, obtaining a saving of 35 m³ per year of drinking water.

Keywords: gray water reuse, slow sand filtration, toilet flushing.



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 3 |
| 2.1 Aguas grises, fuentes y su reutilización | 3 |
| 2.2 Calidad del agua..... | 5 |
| 2.3 Normatividad..... | 7 |
| 2.3 Tratamiento de aguas grises..... | 9 |
| 2.3.1 Filtración lenta con arena..... | 9 |
| 3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN..... | 13 |
| 3.1 Justificación..... | 13 |
| 3.2 Hipótesis..... | 14 |
| 3.3 Objetivos..... | 14 |
| 4. MATERIALES Y MÉTODO..... | 15 |
| 4.1 Diseño del sistema de reutilización de AG provenientes de regadera..... | 19 |
| 4.2 Funcionamiento del sistema de reutilización de AG de regadera..... | 23 |
| 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 26 |
| 5.1 Evaluación del sistema de reutilización de AG provenientes de regadera..... | 26 |
| 5.2 Propuesta del sistema de reutilización de AG provenientes de regadera en vivienda unifamiliar de nivel medio..... | 40 |
| 5.3 Inversión inicial y de mantenimiento del tren de tratamiento de AG de regadera..... | 42 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 44 |
| 6.1 Conclusiones..... | 44 |
| 6.2 Recomendaciones..... | 45 |
| 7. REFERENCIAS..... | 46 |
| ANEXOS..... | 51 |



INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Consumo diario de agua para usos al interior de las casas habitación..... | 4 |
| Tabla 2. Resumen caracterización de aguas grises..... | 6 |
| Tabla 2.1. Caracterización de aguas grises por origen..... | 7 |
| Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes..... | 8 |
| Tabla 4. Límites permisibles de características bacteriológicas, físicas y organolépticas..... | 8 |
| Tabla 5. Pautas comparativas de aguas residuales para reutilización urbana en algunos países..... | 9 |
| Tabla 6. Diferencias entre un filtro de arena lento y rápido..... | 10 |
| Tabla 7. Actividades previstas en la etapa 1..... | 16 |
| Tabla 8. Actividades previstas en la etapa 2..... | 16 |
| Tabla 9. Actividades previstas en la etapa 3..... | 17 |
| Tabla 10. Parámetros considerados para la caracterización de AG regadera..... | 18 |
| Tabla 11. Componentes de la trampa de grasas | 20 |
| Tabla 12. Componentes del depósito de alimentación de AG..... | 21 |
| Tabla 13. Componentes del filtro de grava..... | 21 |
| Tabla 14. Componentes de los filtros de arena..... | 22 |
| Tabla 15. Caracterización del influente y efluentes sin cloro de AG provenientes de regadera y criterios internacionales..... | 36 |
| Tabla 16. Caracterización del influente y efluentes con cloro de AG provenientes de regadera y criterios internacionales..... | 37 |
| Tabla 17. Inversión inicial en la construcción del tren de tratamiento de AG de regadera.... | 43 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Crecimiento y sobrevivencia de bacterias en aguas grises..... | 6 |
| Figura 2. Componentes de un filtro de arena..... | 12 |
| Figura 3. Mapa general de actividades..... | 15 |
| Figura 4. Tren de tratamiento de AG de regadera..... | 19 |
| Figura 5. Esquema del sistema de tratamiento de AG de regadera..... | 25 |
| Figura 6. Concentración de contaminantes de acuerdo con el orden del lecho filtrante..... | 27 |
| Figura 7. Medición de turbidez del agua cruda y efluentes de los FLA..... | 28 |
| Figura 8. Medición de DBO ₅ del agua cruda y efluentes de los FLA sin cloro..... | 30 |
| Figura 9. Medición de DQO del agua cruda y efluentes de los FLA..... | 31 |
| Figura 10. Medición de grasas y aceites del agua cruda y efluentes de los FLA..... | 32 |
| Figura 11. Medición sólidos suspendidos del agua cruda y efluentes de los FLA..... | 34 |
| Figura 12. Medición de sólidos disueltos totales del agua cruda y efluentes de los FLA..... | 35 |
| Figura 13. Eficiencia de remoción del TT de AG de regadera en distintos parámetros..... | 39 |
| Figura 14. Propuesta de sistema de reutilización de AG de regadera en vivienda unifamiliar..... | 41 |
| Figura 15. Contenedor y conducto de desagüe trampa de grasas..... | 57 |
| Figura 16. Paredes de separación de acrílico al interior del contenedor..... | 57 |
| Figura 17. Contenedor y conducto de desagüe depósito de alimentación..... | 58 |
| Figura 18. By-pass, influente..... | 58 |
| Figura 19. Contenedor y conductos de desagüe filtro de grava..... | 58 |
| Figura 20. Contenedores, conductos desagüe y sedimentadores FLA..... | 58 |
| Figura 21. Sistema de reutilización de AG de regadera..... | 59 |
| Figura 22. Rejilla metálica..... | 60 |
| Figura 23. Retención de sólidos con rejilla metálica y tela de organza..... | 60 |



NOMENCLATURA

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| AG | Aguas grises |
| AN | Aguas negras |
| AP | Agua potable |
| AR | Aguas residuales |
| DBO ₅ | Demanda bioquímica de oxígeno |
| DQO | Demanda química de oxígeno |
| E ₁ SC | Efluente 1 sin cloro |
| E ₂ SC | Efluente 2 sin cloro |
| E ₁ CC | Efluente 1 con cloro |
| E ₂ CC | Efluente 2 con cloro |
| FLA | Filtros lentos de arena |
| F1 | Filtro 1 |
| F2 | Filtro 2 |
| G y A | Grasas y aceites |
| SDT | Sólidos Disueltos Totales |
| SS | Sólidos Suspendidos |
| TT | Tren de tratamiento |
| UNT | Unidades nefelométricas de turbidez |



1. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población humana y sus actividades, han propiciado la demanda creciente de agua potable, en consecuencia, ello ha incrementado la presión sobre los recursos naturales de agua dulce, cambiando patrones de estilo de vida y urbanización, colocando al mundo en el borde de una crisis de agua en un futuro cercano (Kariuki, 2011). El alto costo de las plantas de tratamiento de aguas residuales ha sido identificado como la principal restricción para expandir este servicio a pequeñas comunidades, incluso, muchas ciudades en México no cuentan ni con las instalaciones suficientes para proporcionar tratamiento al agua de la red municipal. Por otra parte, la plomería instalada en las viviendas no distingue entre aguas grises y aguas negras, sino que las combina y las envía como aguas residuales al alcantarillado, por lo que, a menos que se desvíe o se capture manualmente, el agua gris (AG) se convierte esencialmente en agua negra (AN), dejándola inutilizada hasta que pase por el proceso de tratamiento de aguas residuales (AR) municipales. Asimismo, resulta complicado conseguir mayor valor con las regulaciones de calidad de descarga de aguas residuales y requisitos para la protección del medio ambiente, así que, también se convierte en una limitante (Morel, 2006). Esta situación crea un fuerte estímulo para desarrollar investigación que conduzca a la reutilización del agua doméstica.

Para implementar el desarrollo sostenible, es esencial pensar en las fuentes alternativas para satisfacer las necesidades de agua. Dentro de la demanda de estas fuentes, también se ha destacado considerar la importancia del uso de aguas grises (AG), principalmente en países áridos y/o donde la escasez de agua potable prevalece debido a otros factores. Sin embargo, es de alta relevancia considerar que no es necesario llegar a tal límite en países que aún no presentan ese tipo de condiciones y comenzar a tomar medidas que permitan reservar el agua potable (AP) para usos donde realmente es requerida su calidad. Dejando de lado al agua residual doméstica, existen diversos métodos reportados para los estudios de tratamiento de aguas grises (Jefferson et al. 2000, 2001; Li 2003, 2009; Friedler et al. 2005, 2006; Elmitwalli y Otterpohl 2007; Hernandez et al. 2007, 2008), pero la relación costo-beneficio y la cantidad de materiales de tratamiento utilizados para la proporción de aguas grises tratadas son más importantes para considerar la aplicabilidad del método.



2. ANTECEDENTES

2.1 Aguas grises, fuentes y su reutilización

Las aguas residuales (AR) procedentes de los hogares se pueden clasificar en aguas grises (AG) y aguas negras (AN), según su composición. El AG es el agua residual que se descarga de las duchas, bañeras, lavadoras y fregaderos de cocina, su contenido orgánico se descompone más rápidamente que en el agua negra (AN) y la asimilación es aún más biodegradable, mientras que el AN es el agua residual del inodoro (Paulo et al. 2013; Wurochekke et al. 2014), la que contiene la parte principal de carga orgánica y patógenos, y aunque se produce en menor volumen, presenta el mayor riesgo de contaminación, por lo que necesita estar sujeto a un tratamiento adecuado.

No todas las aguas grises son iguales, ya que el agua que sale del fregadero o del lavavajillas de la cocina presenta alta carga de contaminantes como partículas de comida, aceites, grasa, detergentes, entre otros y tiene el potencial suficiente de albergar patógenos. En algunos lugares las aguas provenientes de la cocina se consideran como AN (Oron et al. 2014) y a menudo son excluidas de ciertos sistemas de tratamiento de AG dado a su alto contenido de aceite y grasa, que pueden obstruir rápidamente un filtro de arena o el lecho de filtración, pero con el sistema adecuado, el uso de AG del fregadero de la cocina es una práctica aceptada, mientras que un lavabo o bañera a menudo tiene cantidades mínimas de residuos orgánicos y residuos de jabón.

Las cantidades de las aguas grises generadas en los países en desarrollo son mayores que las cantidades reportadas en países desarrollados (Prathapar et al. 2005; Jamrah et al. 2008; Efaq et al. 2016). La cantidad de las AG dependen en gran medida de la ubicación, la fuente de donde provienen (Jefferson 2004), hábitos y actividades personales (Eriksson et al. 2002) e incluso, Morel y Diener (2006) mencionan que la estructura de la población e ingresos de los hogares también son influyentes.

De acuerdo con Christova Boal, (1996) la proporción del flujo de AG en un hogar es alrededor del 50% al 80% del flujo total de aguas residuales. Las AG pueden tratarse y reutilizarse mucho más fácilmente que las AR domésticas comunes, ya que, al contener aguas negras, resulta más complicada su reutilización debido a la carga orgánica alta.



Por otro lado, en un estudio realizado en Jordania, Al-Jayyousi (2003) menciona que, el agua proveniente del lavado de platos, la ducha, el lavabo y el agua de lavandería comprenden del 50 al 80% de las aguas residuales domésticas, coincidiendo con Christova Boal. Como ejemplo de caso en México, la Tabla 1 muestra el porcentaje de consumo diario de AP al interior de casas habitación en Unidad Victoria, Toluca, Estado de México.

Tabla 1. Consumo diario de agua para usos al interior de las casas habitación. (Maya 2010)

| | Inodoro (L) | Regadera (L) | Lavadora (L) | Llaves y otros (L) | Total |
|-----------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------------|-------|
| Consumo actual por persona | 19% | 55% | 16% | 10% | 100% |

En algunos casos, el uso de AG es lo suficientemente seguro debido al contacto mínimo con el ser humano. Sin embargo, es importante tratarlas para garantizar su calidad y evitar crecimiento bacteriano, malos olores, cumplir con la normatividad y brindar un buen servicio, si es el caso.

Existen numerosos métodos para el tratamiento de AG, que se diferencian en sus características, formas, grado de contaminación y procedimiento de tratamiento. La selección de la tecnología adecuada depende de las cantidades de AG, contenidos orgánicos, su aplicación final y aceptación de normas.

Edwin (2014), expresa que no existe un diseño establecido para tratamiento de AG a nivel mundial, excepto en unos pocos países como Australia, que es básicamente diseñado en relación con la fuente de AG, así como su calidad y cantidad, condición del sitio y las alternativas de reutilización. Dentro de este marco, Harju, (2010) afirma que algunos autores indicaron que las AG pueden ser sometidas a un período de almacenamiento antes del proceso de tratamiento, sin embargo, se debe realizar un período de almacenamiento por un tiempo corto para evitar crecimiento microbiano.

Los métodos de filtración y desinfección se utilizan principalmente en sistemas de tratamiento de AG, ya sean físicos y/o químicos, mientras que la aireación y los biorreactores de membrana (MBR) son métodos de tratamiento biológicos. La mayoría de



los métodos de tratamiento vistos universalmente son reactores en secuencia por lotes, MBR y filtros biológicamente aireados que pueden tener un alto potencial de producir mayor calidad de las AG, que la calidad generada a partir de los procesos tradicionales como el tratamiento primario y secundario. La gran desventaja se debe a que el consumo de energía y el costo de estos métodos es alto, por lo tanto, Allen, (2010) afirma que no son técnicas apropiadas para países en desarrollo o de ingresos bajos y medianos.

2.2 Calidad del agua

Franco Alvarado, (2007) argumenta que la composición de las aguas grises es un factor variable, dependiente de las costumbres de las personas, sus edades y sexos, de los productos de limpieza ocupados, del número de personas en la vivienda, de las características de agua potable, de la época del año, de la hora del día, del clima, entre otros factores. Estudios realizados en diferentes países han permitido conocer la composición aproximada de las aguas grises. Las diferencias en calidad de agua potable, así como las costumbres entre países, ciudades, pueblos y familias, hacen que no se pueda estandarizar la calidad de las AG, los análisis realizados en diferentes partes del mundo pueden ayudar a tener una idea de las características más marcadas de estas aguas. Los resultados de estos análisis se resumen en la Tabla 2.

Vinneras (2002) afirma que las aguas grises poseen nutrientes en cantidades mucho menores que las negras, presentando sólo el 10% del nitrógeno y el 21% del potasio, del total en aguas servidas domésticas. Por otro lado, la OMS (2006) indica que los patógenos se encuentran en bajas cantidades en las aguas grises, siendo generalmente sobreestimada la carga fecal al medir bacterias indicadoras, ya que pueden presentar crecimiento, mostrando en aguas almacenadas un importante incremento de coliformes fecales y totales las primeras 48 horas, señala Rose (2003), como se muestra en la Figura 1.



Tabla 2. Calidad de aguas grises. Diversas fuentes. Tomado de Franco Alvarado (2007)

| PARÁMETROS | UNIDADES | PROMEDIO | MÍN. | MÁX. |
|----------------------------|-----------|-------------------|-----------------|----------------------|
| FÍSICOS | | | | |
| Conductividad | dS/m | - | 0.33 | 1.48 |
| SST | mg/L | 77 | 20 | 1500 |
| SDT | mg/L | - | 420 | 1700 |
| Turbiedad | UNT | 100 | 20 | 200 |
| QUÍMICOS | | | | |
| DBO5 | mg/L | 158.2 | 26 | 550 |
| DQO | mg/L | 515.8 | 77 | 1135 |
| Fósforo (P) | mg/L | 3.3 | 0.28 | 27.3 |
| Nitrógeno Total | mg/L | 10.2 | 1.7 | 50 |
| Nitrato (NO ₃) | mg/L | 4.1 | 0 | 11.5 |
| pH | | 7 | 5 | 8.7 |
| MICROBIOLÓGICOS | | | | |
| Coliformes fecales | ufc/100mL | 3x10 ⁶ | 10 ¹ | 10 ⁷ |
| Coliformes Totales | ufc/100mL | - | 10 ² | 8.03x10 ⁷ |

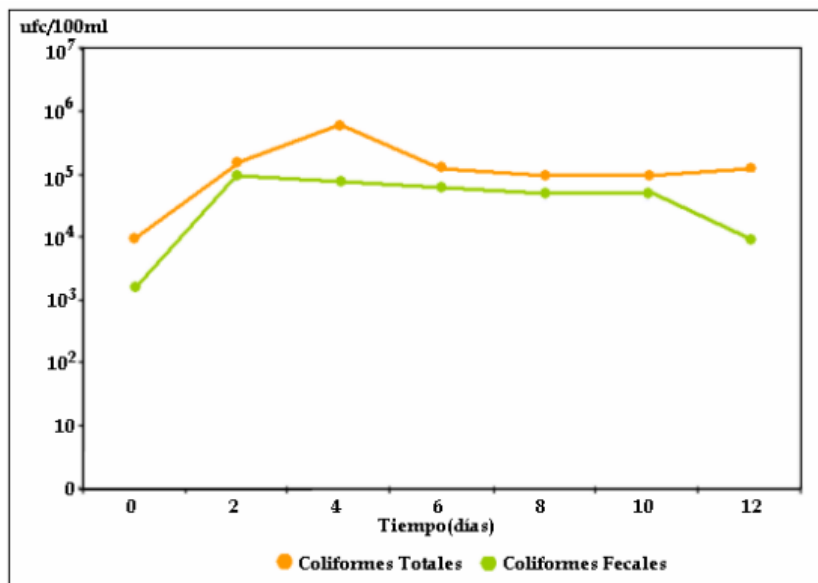


Figura 1. Crecimiento y supervivencia de bacterias en Aguas Grises. Adaptado de Zabrocki (2003).



Como se menciona en un principio, los componentes del AG dependen principalmente de la fuente de la que provienen. La Tabla 2.1 muestra la caracterización del AG según su fuente de origen.

Tabla 2.1. Calidad de aguas grises por origen. Diversas fuentes. Tomado de Franco Alvarado (2007)

| PARÁMETROS | UNIDADES | PROMEDIO | | MÍNIMO | | MÁXIMO | |
|----------------------------|-----------|----------|----------|--------|----------|----------------------|---------------------|
| | | Ducha | Lavadora | Ducha | Lavadora | Ducha | Lavadora |
| FÍSICOS | | | | | | | |
| Conductividad | dS/m | 1.2 | 1.35 | 0.082 | 0.19 | 2 | 2.46 |
| SST | mg/L | 340.8 | 283.3 | 48 | 70 | 470 | 665 |
| SDT | mg/L | 330 | 2385 | 70 | 290 | 530 | 3835 |
| Turbiedad | UNT | 374.7 | 444.3 | 20 | 14 | 539 | 494 |
| QUÍMICOS | | | | | | | |
| DBO ₅ | mg/L | 203.5 | 250.3 | 60 | 48 | 424 | 462 |
| DQO | mg/L | 382 | 508.3 | 72 | 76 | 695 | 1339 |
| Fósforo (P) | mg/L | - | - | 0.1 | 0.1 | 2.2 | 57 |
| Nitrógeno Total | mg/L | - | - | 0.6 | 6 | 7.3 | 21 |
| Nitrato (NO ₃) | mg/L | - | - | 0 | 0.4 | 4.9 | 0.6 |
| pH | | 7.3 | 8.1 | 5 | 7.5 | 8.1 | 10 |
| Surfactantes | mg/L | 10 | 118.3 | <0.5 | 18.8 | 17.6 | 114 |
| MICROBIOLÓGICOS | | | | | | | |
| Coliformes fecales | ufc/100mL | - | - | 9 | - | 4x10 ⁶ | 4x10 ⁶ |
| Coliformes Totales | ufc/100mL | - | - | 70 | 56 | 2.08x10 ⁷ | 8.9x10 ⁵ |

2.3 Normatividad

El AG a reutilizar debe cumplir con la normatividad vigente del país para garantizar su calidad y específicamente, asegurarse de que no causa algún riesgo de salubridad en la población.

En México, aún no existe una norma que rija específicamente la reutilización de AG. Sin embargo, se relaciona la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en servicios al público. Destacando los rubros que indica la Tabla 3.



Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes. Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997.

| TIPO DE REUSO | Coliformes fecales (NMP/100mL) | Huevos de helminto (h/L) | Grasas y aceites (mg/L) | DBO ₅ (mg/L) | SST (mg/L) |
|---|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL | 1,000 | ≤ 5 | 15 | 30 | 30 |

Sin embargo, es importante tener presente la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; salud ambiental, agua para uso y consumo humano – límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, resaltando características principales en la Tabla 4. Además, otros países manejan distintos parámetros e intervalos de rangos, como lo muestra la Tabla 5.

Tabla 4. Límites permisibles de características bacteriológicas, físicas y organolépticas de calidad del agua. (NOM-127-SSA1-1994)

| CARACTERÍSTICA | LÍMITE PERMISIBLE |
|-------------------------------|--|
| Organismos coliformes totales | 2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml |
| Organismos coliformes fecales | No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml |
| Color | 20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto. |
| Olor y sabor | Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico). |
| Turbiedad | 5 UNT o su equivalente en otro método. |
| Cloro residual libre | 0.2 - 1.5 mg/L |
| pH | 6.5 - 8.5 |

NMP: número más probable.



Tabla 5. Pautas comparativas de aguas residuales para reutilización urbana en algunos países. (Winward, 2007)

| REUTILIZACIÓN DE AGUA URBANA | CALIDAD DEL AGUA | MICROBIOLÓGICOS | ufc/100mL |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------------|
| USEPA (2004) | DBO5 < 10 mg/L | Coliformes fecales | ND |
| | Turbiedad < 2 UNT (5 UNT Máx.) | Patógenos | ND |
| | pH = 6 - 9 | | |
| EUA, California (USEPA, 2004) | Turbiedad = 2 UNT (5 UNT Máx) | Coliformes totales | = 2.2 (23 Máx. en 30 días) |
| Alemania (Nolde, 1999) | DBO7 < 5 mg/L | Coliformes totales | < 100 |
| | | Coliformes fecales | < 10 |
| | | Pseudomonas aeruginosa | < 1 |

Máx: Máximo; ND: No Detectado

2.4 Tratamiento de aguas grises

2.4.1 Filtración lenta con arena

A pesar de que la filtración es una de las principales operaciones unitarias empleadas en el tratamiento del AP, la filtración de efluentes procedentes de procesos de tratamiento de aguas residuales es una práctica relativamente reciente. La filtración se emplea, de modo generalizado, para conseguir una mayor eliminación de sólidos en suspensión.

La operación completa de filtración consta de dos fases: filtración y lavado. Mientras la descripción de los fenómenos que se producen durante la fase de filtración es prácticamente idéntica para todos los sistemas de filtración que se emplean para las aguas residuales, la fase de lavado es bastante diferente en función del tipo de filtro que se está usando ya sea lento o filtro rápido (MetCalf, 2003).



Algunas de las diferencias más significativas entre estos dos tipos de filtros se describen en la Tabla 6, destacando que los filtros lentos de arena usan medios de arena cuyo tamaño no necesita ser tan uniforme como en el caso de los filtros rápidos, no necesitan pretratamiento de coagulación ni retrolavado, sino que, en lugar de lavarse a contracorriente, el filtro se drena y se raspa la parte superior del medio de 1 a 2 centímetros.

Tabla 6. Comparación entre un filtro de arena lento y rápido.

| FILTROS LENTOS | FILTROS RÁPIDOS |
|--|---|
| Utiliza arena fina como medio filtrante. | El medio filtrante es considerablemente más grueso. |
| El agua cruda permanece durante varias horas en el espacio sobre el medio. | El agua está en contacto con el lecho durante algunos minutos. |
| Eficiente para eliminar partículas suspendidas | Opera a tasas 20-50 veces más rápidas |
| Su diseño es más fácil al requerir pequeñas tuberías/equipo especiales. | Las impurezas se depositan más rápidamente en el medio. |
| Su diseño simple facilita el uso de materiales y habilidades locales en su construcción. | Los intersticios entre los granos son más grandes permitiendo velocidades más altas. |
| El costo de operación radica casi en su totalidad en la limpieza de los lechos filtrantes. | La necesidad de limpieza ocurre en intervalos frecuentes. |
| No se requiere de aire comprimido, agitación mecánica o altas presiones para el retrolavado. | El lavado consiste en empujar el agua a presión alta contracorriente usando aire comprimido, principalmente. |
| El lavado puede ser realizado por personal no calificado utilizando herramientas mecánicas o manuales. | Se utilizan con frecuencia junto con tratamiento químico, floculación y sedimentación, que eliminan la mayoría de las impurezas del agua cruda antes de que llegue al filtro. |

No obstante, la principal ventaja de la filtración lenta con arena es que los filtros son fáciles de operar y puede funcionar sin supervisión constante, por lo tanto, la simplicidad de este tratamiento puede hacer que sea apropiado en los países en desarrollo. En la filtración lenta con arena, la baja tasa de filtración en conjunto con los granos menos uniformes, hacen que las partículas se eliminen en los centímetros superiores del lecho.

En la superficie del lecho se forma una capa de material biológico, llamada schmutzdecke, la cual se considera como una capa de filtración adicional que se encarga de las partículas más pequeñas del influente formando una comunidad biológica compleja que degrada parte



de la materia orgánica. El ciclo de operación y raspado se puede repetir muchas veces, a menudo durante un período de varios años, antes de que la arena deba ser reemplazada.

Un filtro con nuevo lecho filtrante típicamente tiene un período de maduración que puede durar varios días e incluso meses, durante los cuales se forma la capa schmutzdecke y la calidad del efluente mejora (Montgomery, 1985).

Dentro del contenedor que forma al filtro, debe existir una capa sobrenadante de agua cruda, cuya función principal es mantener una altura constante de agua por encima del medio filtrante, esta altura proporciona la presión que lleva el agua a través del filtro. Enseguida se encuentra el lecho de medio filtrante dentro y sobre el cual se lleva a cabo el proceso de tratamiento, normalmente se usa arena libre de arcilla y de materia orgánica.

Sin embargo, para eliminar los granos más finos debe lavarse previamente e incluso ocupar una criba con aberturas muy pequeñas, así disminuye el coeficiente de uniformidad y al mismo tiempo se eleva el diámetro promedio de los granos de arena.

Montgomery, (1985), destaca que el diámetro efectivo de las partículas de arena debe estar en el rango de 0.25 – 0.35 mm considerando que para agua con menor turbidez son útiles los medios gruesos a mayor velocidad con diámetro efectivo de 0.4mm.

Asimismo, sugiere que el máximo valor del coeficiente de uniformidad (CU) calculado mediante la ecuación (1) no debe ser mayor a 2.5 para minimizar la pérdida de carga a través del medio filtrante. Además, para evitar la pérdida de material hacia el sistema de drenaje

y para sostener todo el peso de la arena, se añade una capa de soporte compuesta por grava y/o gravilla graduada exenta de polvo, arena y materia orgánica.

$$CU = \frac{D_{60}}{D_E} \quad (1)$$

Donde D_{60} representa el diámetro medio del tamaño de los granos de arena y D_E la abertura de malla de tamiz que deja pasar el 10% del material, conocido también como D_{10} .

Al momento en que se presenta la mínima obstrucción dentro del cuerpo del filtro, por la parte inferior, el agua tratada emerge hacia el exterior para su recolección. Este es el propósito de un sistema de drenaje y para cumplir con los criterios que involucra un filtro de

arena, es necesario conocer el caudal de trabajo, el cual puede ser calculado a través de la ecuación 2.

$$Q = A * v_f \quad (2)$$

Donde:

A = área (m^2)

v_f = velocidad de filtración (m/s)

Por último, un sistema de válvulas de control es indispensable para regular la velocidad del flujo a través del lecho y evitar que el nivel en el depósito de agua cruda caiga por debajo del flujo mínimo predeterminado durante el funcionamiento y también, para permitir que los niveles de agua se ajusten y se llene de agua nuevamente cuando el filtro reinicie su funcionamiento, (Huisman, 1974). Los componentes anteriormente mencionados se ilustran en la Figura 2.

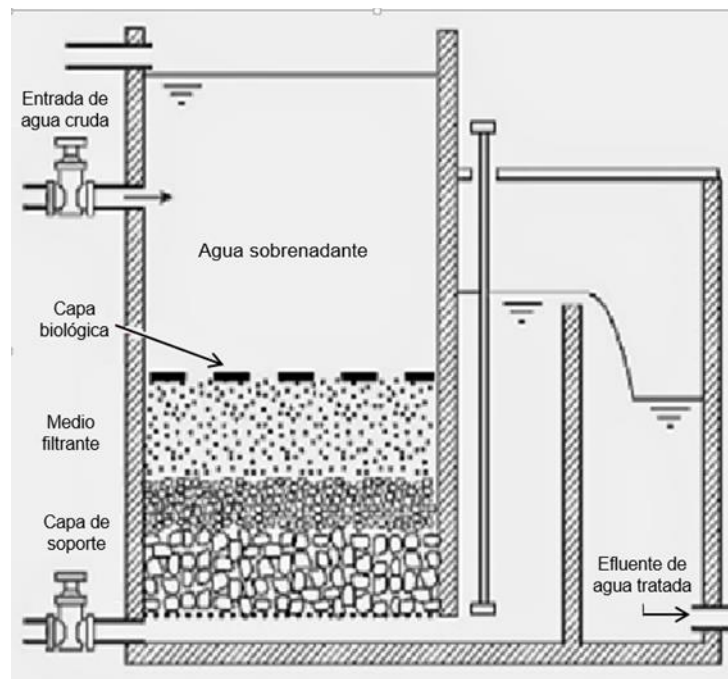


Figura 2. Componentes de un filtro lento de arena. Fuente: Adaptado de OMS (2000).



3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 JUSTIFICACIÓN

Un problema latente por el que pasan distintas regiones del mundo es la disponibilidad de agua potable por distintas razones, donde destacan la explosión demográfica y la ausencia de cultura sobre la importancia y conservación del recurso hídrico. La adquisición y mantenimiento de herramientas que permiten la potabilización del agua es una opción que se encuentra al alcance de países desarrollados, puesto que el costo puede ser cubierto con facilidad. Siendo México un país en vías de desarrollo, la situación sobre la disponibilidad de agua potable se torna aún más complicada. Por ello, es de gran interés tomar medidas al respecto que se encuentren al alcance de las posibilidades de la población y/o del gobierno.

La reutilización de aguas grises que contienen bajas cantidades de contaminantes y materia orgánica a nivel doméstico, como el agua procedente de la lavadora y la regadera, involucra la disminución de suministro de agua potable al ser sustituida en fuentes donde no es requerida tal calidad para el contacto directo con el usuario, principalmente en la descarga de inodoro. Asimismo, el nivel de explotación de agua subterránea y fuentes naturales se ve beneficiado al reducirse y conservarse por un tiempo mayor.

A lo largo de los años, se han realizado un gran número de investigaciones sobre los procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas (Jefferson, 2001), donde existe una amplia variedad de tratamientos de aguas grises empleados en la metodología científica, sin embargo, la mayoría de estos trenes de tratamiento, involucran operaciones unitarias donde el equipo y su mantenimiento son de alto costo. También, en otras referencias se ocupa un espacio amplio para llevar a cabo la experimentación y de esta manera, no resulta viable implementar un sistema de ese tipo en una sola vivienda para operación continua.

Dentro de este trabajo, se proponen el diseño de un sistema de reutilización de aguas grises, contemplando un tren de tratamiento que permita implementarse con facilidad en viviendas en etapa de construcción, para contribuir a la disminución de suministro de agua potable a nivel doméstico.



3.2 HIPÓTESIS

Es factible el suministro de agua alterno al depósito del inodoro mediante la reutilización de aguas grises procedentes de regadera, mediante la implementación de un sistema económico en viviendas en etapa de construcción, con efluentes de calidad apropiada.

3.3 OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el funcionamiento y diseño de un sistema de reutilización de aguas grises procedentes de regadera para minimizar el uso del agua potable dentro de una vivienda unifamiliar.

Objetivos específicos

- Caracterizar el flujo de la fuente de agua a reutilizar (regadera) para cuantificar la eficiencia del sistema de tratamiento.
- Caracterizar el efluente tratado por el sistema elegido para realizar una comparación con los parámetros establecidos en la normatividad mexicana vigente y con criterios sugeridos por la literatura especializada para asegurar que se cumple con la calidad requerida en su reutilización.
- Analizar la viabilidad del sistema diseñado para implementarlo en viviendas unifamiliares de nivel medio en etapa de construcción comparando la inversión inicial y de mantenimiento con el beneficio que se obtiene.



4. MATERIALES Y MÉTODO

El trabajo de investigación se clasificó en 3 etapas para desglosar las actividades que fueron realizadas para cumplir con los objetivos establecidos. En la Figura 3 se muestra el contenido de cada etapa.

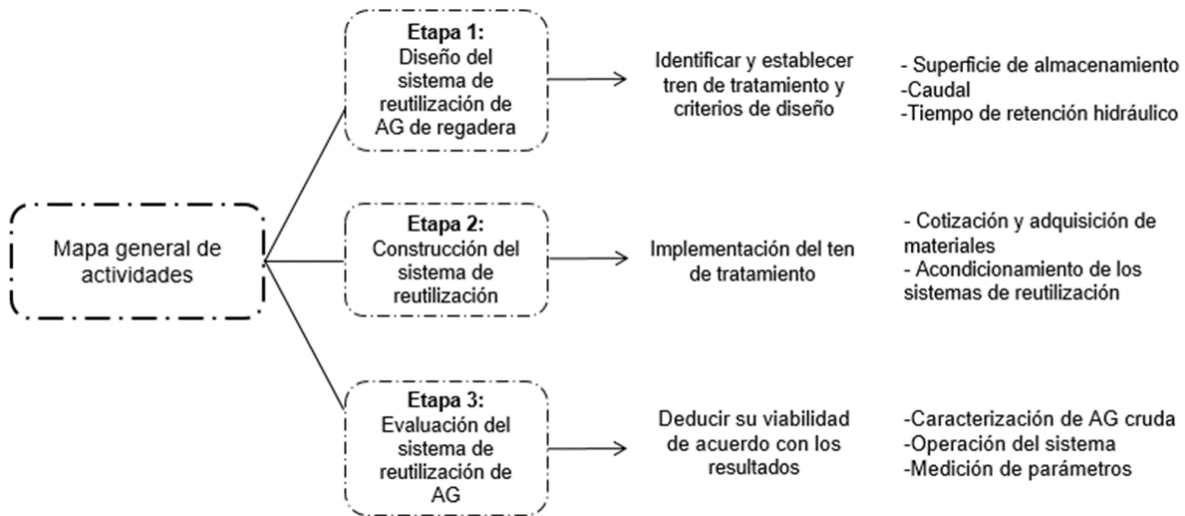


Figura 3. Mapa general de actividades.

Etapa 1: Diseño del sistema de reutilización de AG provenientes de regadera

En la primera etapa se planteó el tren de tratamiento detalladamente y se establecieron los criterios de diseño de las operaciones unitarias para determinar el tipo de material a utilizar, teniendo en cuenta distintas alternativas con precios accesibles, alta calidad y fáciles de adquirir, como se indica en la Tabla 7.



Tabla 7. Actividades previstas en la etapa 1.

| | ACTIVIDADES | JUSTIFICACIÓN | PRODUCTOS GENERADOS |
|----------------|---|---|--|
| ETAPA 1 | 1.1 Plantear detalladamente el tren de tratamiento | Es el principal factor para ejecutar el proyecto de investigación | Asignación del tipo de materiales a utilizar en la construcción del tren |
| | 1.2 Establecer criterios de diseño de las operaciones unitarias en el tren de tratamiento | Facilitar la adaptación del sistema en viviendas unifamiliares | Diseño del sistema de reutilización de AG procedentes de regadera |

Etapa 2: Construcción del sistema de reutilización a nivel laboratorio

Algunos materiales empleados en la construcción del tren ya se tenían en existencia y esto facilitó la identificación los materiales faltantes que serían necesarios. Sin embargo, se consideraron como nuevos en la inversión inicial incluyendo sus costos. Las actividades que implica la segunda etapa se describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Actividades previstas en la etapa 2.

| | ACTIVIDADES | JUSTIFICACIÓN | MÉTODO | PRODUCTOS GENERADOS |
|----------------|--|--|--|---|
| ETAPA 2 | 2.1 Cotización de precios y compra de materiales a utilizar en el tren | Brindar un sistema con materiales y mantenimiento de costo accesible | Comparación de costos en distintos comercios | Identificación del establecimiento que ofrece el mejor precio para adquirir material y equipo |
| | 2.2 Construcción del tren de tratamiento para AG originarias de regadera | Dimensionar el espacio ocupado por el tren de tratamiento | Con orientación de personal especializado en temas de construcción | Propuesta del sistema de reutilización de AG regadera en vivienda previa a construcción |

Para construir el sistema de reutilización de AG provenientes de regadera a nivel laboratorio, fue necesario implementarlo en casa propia para evaluar su funcionamiento.



Etapa 3: Evaluación del sistema de reutilización

Dentro de la evaluación del sistema de tratamiento, se contempló la caracterización del influente, así como de los efluentes, como lo señala la Tabla 9.

Tabla 9. Actividades previstas en la etapa 3.

| | ACTIVIDADES | JUSTIFICACIÓN | MÉTODO | PRODUCTOS GENERADOS |
|----------------|--|---|--|--|
| | 3.1 Recolección de muestras AG regadera | Flujo que se busca tratar para su reutilización | Proceso de ducha dentro de una tina amplia | Influente en el tren de tratamiento |
| | 3.2 Caracterización de AG cruda de regadera | Conocer el nivel de cantidad de contaminantes que se van a tratar | Por medio de pruebas físico-químicas de acuerdo con la norma correspondiente de cada parámetro | Identificación de los principales contaminantes del AG |
| ETAPA 3 | 3.3 Poner en marcha el sistema de tratamiento de AG | Identificar posibles modificaciones en el diseño | Mediante el traslado de la muestra hacia la ubicación del tren | Certeza del funcionamiento del tren de tratamiento |
| | 3.4 Medición de parámetros del efluente de los trenes e AG | Contrastar el porcentaje de disminución de contaminantes | Por medio de pruebas químicas de acuerdo con la norma correspondiente de cada parámetro | Eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes |
| | 3.5 Comparación de valores medidos en los efluentes | Evaluar el funcionamiento del tren de tratamiento | Gráficamente contrastando el porcentaje de variación en cada uno de los resultados | Demostración de la viabilidad del sistema en viviendas unifamiliares |

El AG cruda de regadera fue caracterizada antes de aplicar el tratamiento correspondiente para conocer la cantidad de contaminantes a tratar. Las muestras para cada tren de tratamiento fueron obtenidas de casa propia debido a la disponibilidad que se tiene; fueron recolectadas el mismo día que se realizaron los análisis microbiológicos para evitar una alteración en los resultados debido a la proliferación de microorganismos.

Posterior al tratamiento correspondiente aplicado, los efluentes fueron caracterizados para observar la disminución de la cantidad de contaminantes en el agua tratada.



Los parámetros medidos en el AG cruda y en el AG tratada proveniente de regadera se muestran en la Tabla 10, así como el método correspondiente empleado.

Tabla 10. Parámetros considerados para la caracterización de AG precedente de regadera.

| Parámetro | Referencia / Método de prueba |
|----------------------|-------------------------------|
| pH | NMX-AA-008-SCFI-2000 |
| DQO | NMX-AA-030-SCFI-2001 |
| DBO ₅ | NMX-AA-028-SCFI-2001 |
| Turbidez | NMX-AA-038-SCFI-2001 |
| SDT | NMX-AA-034-SCFI-2001 |
| Coliformes totales | NMX-AA-042-SCFI-2015 |
| Coliformes fecales | NMX-AA-042-SCFI-2015 |
| Alcalinidad | NMX-AA-036-SCFI-2001 |
| Acidez | NMX-AA-036-SCFI-2001 |
| Dureza Total | NMX-AA-072-SCFI-2001 |
| Cloro residual libre | Estuche colorimétrico |

Finalmente, esta parte da lugar a la evaluación del sistema, donde las mediciones de los efluentes fueron comparadas con la normatividad mexicana y algunos criterios recomendados en la literatura para determinar la eficiencia del funcionamiento de los trenes de tratamiento y calcular la estimación de la eficiencia de ahorro de AP que se obtendría al implementarlos en un hogar unifamiliar de nivel medio, determinando si su implementación resulta viable.

Cabe mencionar que el número de pruebas de cada parámetro estuvo sujeto al periodo de funcionamiento de los FLA, es decir, hasta lograr su colmatación, muestreando cada tercer día alternando los efluentes con y sin desinfección, considerando también, un presupuesto ajustado adecuándose a las posibilidades del laboratorio de calidad del agua del IITCA y priorizando los parámetros que podrían arrojar valores más significativos en el análisis de resultados, al ser los principales en las normas mexicanas.



4.1 Diseño del sistema de reutilización de AG provenientes de regadera

El tren de tratamiento empleado para depurar las aguas domésticas provenientes de la regadera consta de diferentes etapas mostradas en la siguiente Figura.

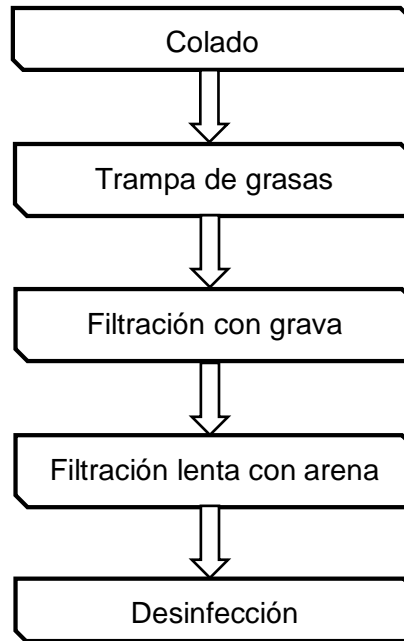


Figura 4. Tren de tratamiento de aguas grises de regadera.

El proceso de la ducha se llevó a cabo dentro de una tina amplia, de esta manera fue posible coleccionar el agua cruda de regadera.

Posteriormente, en un recipiente fue vaciado el volumen de AG requerido para trasladarlo hacia el lugar en donde se ubicaba el tren de tratamiento, comenzando con el colado, el cual fue realizado manualmente vertiendo el AG a través de una malla con aberturas de 2 mm para cumplir con la función de la rejilla que se encuentra en la regadera de un hogar para separar el agua de las partículas sólidas que pueda contener, en este caso cabellos, trozos pequeños de jabón, etc.



Dado que las AG de regadera provienen del aseo físico personal, se adicionó una trampa de grasas para evitar que este tipo de sustancias desprendidas del cuerpo humano avanzaran hacia el filtro de arena e influyeran en su periodo de carrera. La trampa de grasas fue armada como se describe en la Tabla 11.

Tabla 11. Componentes de la trampa de grasas.

| COMPONENTE | ELEMENTOS |
|-----------------------|---|
| Contenedor | Cubeta de 19 L, 35 cm de altura. |
| Paredes de separación | Láminas de acrílico de 3 mm de espesor. 1 lámina con 20 cm y 2 láminas con 25 cm de altura. |
| Conducto de desagüe | Bomba de agua para lavadora. |

Asimismo, un filtro de grava sílica fue agregado al tren de tratamiento para retener los sólidos suspendidos y de esta manera, retirar partículas cuyo tamaño sea mayor a 0.01 mm antes de la filtración lenta con arena.

Para realizar la construcción del sistema de tratamiento de aguas grises precedentes de regadera, se adquirieron materiales de costo accesible disponibles en la mayoría de las ferreterías. Principalmente, tubo de PVC sanitario de 4" de diámetro (10.16 cm), como contenedor del lecho filtrante del filtro de grava y de los FLA. Por lo tanto, el área de los filtros es de 0.008 m².

Las características del depósito que recibe el efluente proveniente de la trampa de grasas y alimenta al filtro de grava, se describen en la Tabla 12. Mientras que en la Tabla 13 se especifican cada uno de los componentes del filtro de grava.



Tabla 12. Componentes del depósito de alimentación de AG.

| COMPONENTE | ELEMENTOS |
|---------------------|--|
| Contenedor | Cubeta de 19 L, 35 cm de altura. |
| Conducto de desagüe | Válvula de compuerta ubicada en la base del contenedor con manguera plástica de $\frac{3}{8}$ " que permite conducir el flujo regulado hacia el filtro de grava. |
| By-pass | Manguera plástica de $\frac{3}{8}$ " de diámetro que permite desviar el flujo excedente hacia el contenedor de la trampa de grasas, indicando el nivel del agua dentro del depósito de alimentación. |

Tabla 13. Componentes del filtro de grava.

| COMPONENTE | ELEMENTOS | ESPESOR |
|---------------------|---|---------|
| Contenedor | Tubo de PVC sanitario de 10 cm de diámetro con altura de 55 cm y una rejilla metálica para fregadero en el borde superior. | |
| Lecho filtrante | Grava natural de 6 mm de diámetro. | 15 cm |
| | Grava natural para acuario de 4 mm de diámetro. | 7 cm |
| Soporte | Grava de mármol de 13 mm de diámetro. Con una tapa plástica para coladera en el fondo del tubo para sostener el peso de la grava. | 10 cm |
| Conducto de desagüe | Tubo múltiple de PVC sanitario de $\frac{1}{2}$ " de diámetro con válvulas de la misma medida. | |

El efluente del filtro de grava se divide en dos flujos descendentes que alimentan a dos FLA con distinto espesor de lecho filtrante como se explica en la Tabla 14.



Dentro de la filtración lenta con arena se incluyeron 2 filtros con distinto espesor de lecho filtrante para realizar una comparación de la calidad del agua filtrada y concluir cual es el espesor que cuente con mayor remoción de contaminantes.

Tabla 14. Componentes de los filtros de arena.

| COMPONENTE | ELEMENTOS | ESPESOR |
|-----------------|---|---------|
| Contenedor | F1: Tubo de PVC sanitario de 10 cm de diámetro con altura de 80 cm y una rejilla metálica en el borde superior. | |
| | F2: Tubo de PVC sanitario de 10 cm de diámetro con altura de 70 cm y una rejilla metálica en el borde superior. | |
| Lecho filtrante | F1: Arena sílice gruesa con diámetro efectivo $D_e = 1\text{ mm}$. | 20 cm |
| | Arena sílice con diámetro efectivo $D_e = 0.36\text{ mm}$ y coeficiente de uniformidad $CU = 1.47$. | 25 cm |
| | F2: Arena sílice gruesa con diámetro efectivo $D_e = 1\text{ mm}$. | 10 cm |
| | Arena sílice con diámetro efectivo $D_e = 0.36\text{ mm}$ y coeficiente de uniformidad $CU = 1.47$. | 20 cm |
| Soporte | Gravilla natural para acuario de 4 mm de diámetro. | 5 cm |
| | Grava natural para acuario de 6 mm de diámetro. | 5 cm |
| | Grava de mármol para acuario de 13 mm de diámetro. | 10 cm |
| | Tapa plástica para coladera ubicada en el fondo del contenedor para sostener el peso de la grava y del lecho filtrante, evitando que el material traspase el contenedor. | |
| Drenaje | Tubo de PVC sanitario de $\frac{1}{2}$ " de diámetro con 10 perforaciones de 0.5 cm de diámetro, que permiten la salida del agua filtrada. | |
| Sedimentador | Tubo de PVC sanitario de $\frac{1}{2}$ " de diámetro con 5 cm de altura y válvula ubicada en la parte inferior, que permite desechar partículas que llegaran a asentarse. | |



Con base en el experimento realizado por Gautam, (2021) se modificó el orden de la arena dentro de los filtros, depositando en primer lugar la arena fina para que la arena gruesa se posicionara en la parte superior y así, prolongar el tiempo de vida de ambos filtros. Llevando a cabo la misma modificación en el filtro de grava, localizándose la gravilla de 4 mm de diámetro en la parte media del filtro y la grava de 6 mm de diámetro encima de ésta.

Es importante señalar que las rejillas metálicas que se agregaron sobre el filtro de grava y los FLA cuentan con una capa de tela de organza encima, con la finalidad de retener sólidos grasos. En el Anexo 1, se visualiza un ejemplo de la cantidad de contaminantes que es capaz de retener en un día y también se ilustra cada uno de los elementos que componen el TT de AG de regadera.

4.2 Funcionamiento del sistema de reutilización de AG provenientes de regadera

En primer lugar, el funcionamiento del TT se llevó a cabo con AP para permitir una configuración apropiada del sistema. Después, el volumen de agua cruda a tratar se obtuvo mediante una muestra compuesta de 4 habitantes adultos donde 3 de ellos son del género masculino y 1 femenino. Una vez teniendo la muestra completa, el AG se vertió a través de una malla en el tanque de la trampa de grasas localizado a nivel de piso, para retirar partículas consideradas de alto grosor. Al realizar el vertido del agua, las sustancias de menor densidad se ubicaban en la parte superior y eran removidas con una red hecha con tela de organza, mientras que las partículas con mayor peso que lograban atravesar la malla, teóricamente se sedimentaban en el fondo del tanque permitiendo al agua avanzar con menor cantidad de contaminantes después de 1 hora de reposo mediante una bomba que, desde este punto, la elevaba hacia el depósito de alimentación situado en la parte superior.

La previa simulación con AP permitió configurar el sistema de manera que, cada hora aproximadamente después de iniciar su operación, la bomba era conectada entre 5 y 8 minutos para que el nivel del AG en el depósito de alimentación no afectara el caudal que suministraba por gravedad al filtro de grava, regulando el gasto con ayuda de una válvula de compuerta, alcanzando en el interior del filtro una altura de 20 cm sobre el nivel del lecho filtrante para proporcionar la carga suficiente a las válvulas alimentadoras de los filtros de arena y alcanzar el caudal correspondiente.



Para llevar a cabo el proceso de filtración lenta con arena, se trabajó con una velocidad de filtración de 7.2m/d (0.30 m/h), representando un valor intermedio dentro del rango de velocidades de acuerdo con los datos expuestos por Montgomery (1985), el cual indica que la velocidad de filtración lenta es de 3-15 m/d. Siendo así, se definió el caudal a partir de la ecuación 2:

$$V_f = 0.30 \frac{m}{h} \quad (3)$$

$$Q = (0.016 \text{ m}^2) (0.30 \frac{m}{h}) = 4.8 \times 10^{-3} \frac{m^3}{h} \quad (4)$$

$$(4.8 \times 10^{-3} \frac{m^3}{h}) (\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}) = 4.8 \frac{L}{h} \quad (5)$$

$$(4.8 \frac{L}{h}) (\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}}) (\frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}}) = 80 \frac{\text{mL}}{\text{min}} \quad (6)$$

El valor de velocidad se estableció para que de esta manera el volumen filtrado en el sistema durante 8 horas correspondiera a 38.4 L/d, similar al consumo de agua en la regadera por una persona, 37 L/hab/d, de acuerdo con un estudio realizado por Maya (2010), además de que es un diseño piloto. Dado que se trabajó simultáneamente con los dos filtros de arena, las válvulas se calibraron de modo que cada una trabajara con un flujo descendente de $40 \frac{\text{mL}}{\text{min}}$ para cumplir con el valor del caudal teórico. Para evitar el desbordamiento en ambos filtros, se instaló una tubería de demasías para enviar el agua excedente hacia el tanque de la trampa de grasas.

El efluente de cada uno de los FLA fue recolectado en un contenedor situado a nivel del piso donde culmina el TT con la desinfección, la cual era llevada a cabo con ayuda de una jeringa suministrando 4 mg/L de hipoclorito de sodio de acuerdo con Bernstein, (2021).

El proceso de filtración se realizó en lotes, tratando un volumen diario de 38.4 L hasta alcanzar la colmatación de ambos FLA.

La Figura 5 representa el esquema general del sistema de tratamiento de AG provenientes de regadera.

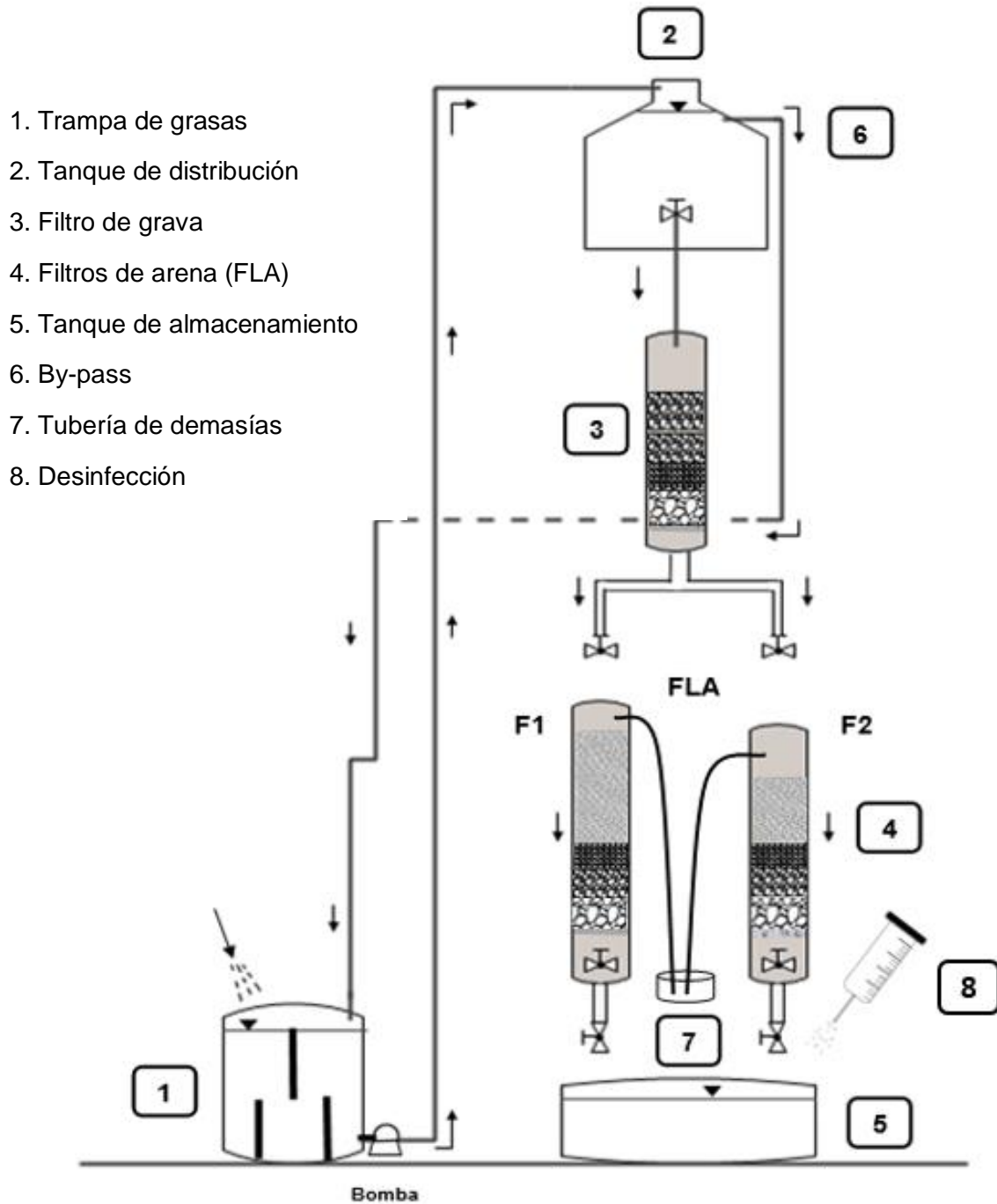


Figura 5. Sistema de tratamiento de AG de regadera.

En el Anexo 1 se muestra el sistema de tratamiento de AG que fue construido para el presente trabajo.



5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Evaluación del sistema de reutilización de AG provenientes de regadera

La eficiencia del tren de acondicionamiento de AG de regadera se evaluó, comparando los resultados obtenidos de la caracterización del influente con los resultados de los efluentes de los dos FLA, calculando de esta manera, la eficiencia de remoción de contaminantes del tren de tratamiento.

La filtración por lotes de 38.4 L diarios de AG que se realizó en el sistema de tratamiento para AG de regadera, tuvo una corta duración para ambos FLA. Puesto que, conforme se aproximaba su colmatación, el flujo de los efluentes se aminoraba poco a poco hasta que el desagüe dejaba de trabajar, dicho de otro modo, hasta que el flujo en los efluentes era nulo.

El filtro uno (F1) fue el primero en alcanzar su colmatación, teniendo una carrera de 10 días, mientras que el ciclo de vida del filtro dos (F2), con menor espesor de lecho filtrante, fue de 11 días. Enfatizando en que los lapsos de tiempo previamente mencionados, fueron mayores a los obtenidos cuando la arena fina se ubicaba en la superficie, dejando a la arena gruesa en el medio.

Debido al corto lapso de tiempo entre la operación y la obstrucción de los FLA por sólidos jabonosos, no se generó la capa biológica (schmutzdecke), puesto que es necesario un proceso de maduración de varias semanas e incluso meses (Montgomery, 1985) para que los microorganismos proliferen en la superficie del lecho filtrante y comience el tratamiento biológico.

Durante la limpieza profunda que se realizó al medio filtrante del filtro de grava como a los FLA, en la primera ocasión se encontró la mayor parte de contaminantes dispersa en la grava de 4 mm de diámetro, mientras que la grava de 6 mm de diámetro se observaba con menor grado de contaminación en comparación con la anterior. En el siguiente ciclo de filtración, al intercambiar de lugar la grava de 4 y 6 mm de diámetro y al lavar nuevamente los medios filtrantes, se observó que a lo largo de todo el espesor (15 cm) correspondiente a la grava de 6 mm, contenía suciedad al igual que toda la grava de 4 mm.



El mismo efecto ocurrió con ambos FLA, hallando toda la arena fina sucia y la arena gruesa poco contaminada. Después de la permuta de las camas filtrantes, se observó contaminación en ambas capas de arena, coincidiendo con el procedimiento de tratamiento de AG propuesto por Gautam, (2021). Este efecto se resume en la Figura 6.



Figura 6. Concentración de contaminantes de acuerdo con el orden del lecho filtrante.

La reducción de turbidez entre el agua cruda y el agua tratada, se aprecia en la Figura 7, distinguiendo cada uno de los efluentes con el tratamiento de desinfección.

La mayor disminución de turbidez se presentó en el efluente 1 sin cloro (E_1SC) con un valor mínimo de 7.5 UNT en el segundo día de funcionamiento. La eficiencia de remoción fue de $92 \pm 5\%$ mostrando un desempeño constante, logrando 11.3 UNT al término de la carrera del filtro. Mientras que el porcentaje de remoción en el efluente 2 sin cloro (E_2SC), disminuyó alcanzando el $88 \pm 6\%$ finalizando con 20.2 UNT.

Además, la remoción de turbidez del efluente 1 con cloro (E_1CC) fue del $90 \pm 2\%$ con un valor mínimo de 20.8 UNT dejando en última instancia al efluente 2 con cloro (E_2CC) cuyo porcentaje de remoción fue del $85 \pm 4\%$ reportando 32 UNT como valor más bajo.

Pese al corto porcentaje de diferencia entre los efluentes sin cloro y los efluentes con cloro, en la Figura 7 se observa la afectación que tiene el hipoclorito de sodio en los niveles de turbidez del agua, siendo una diferencia mínima.



La turbidez fue uno de los parámetros donde se obtuvo mayor eficiencia, sin embargo, la USEPA (2012) exigentemente establece un valor máximo de 5 UNT en su estándar de reutilización urbana de agua aplicado a riego de campos de golf u y jardines, parques recreativos, protección contra incendios y descarga de inodoros.

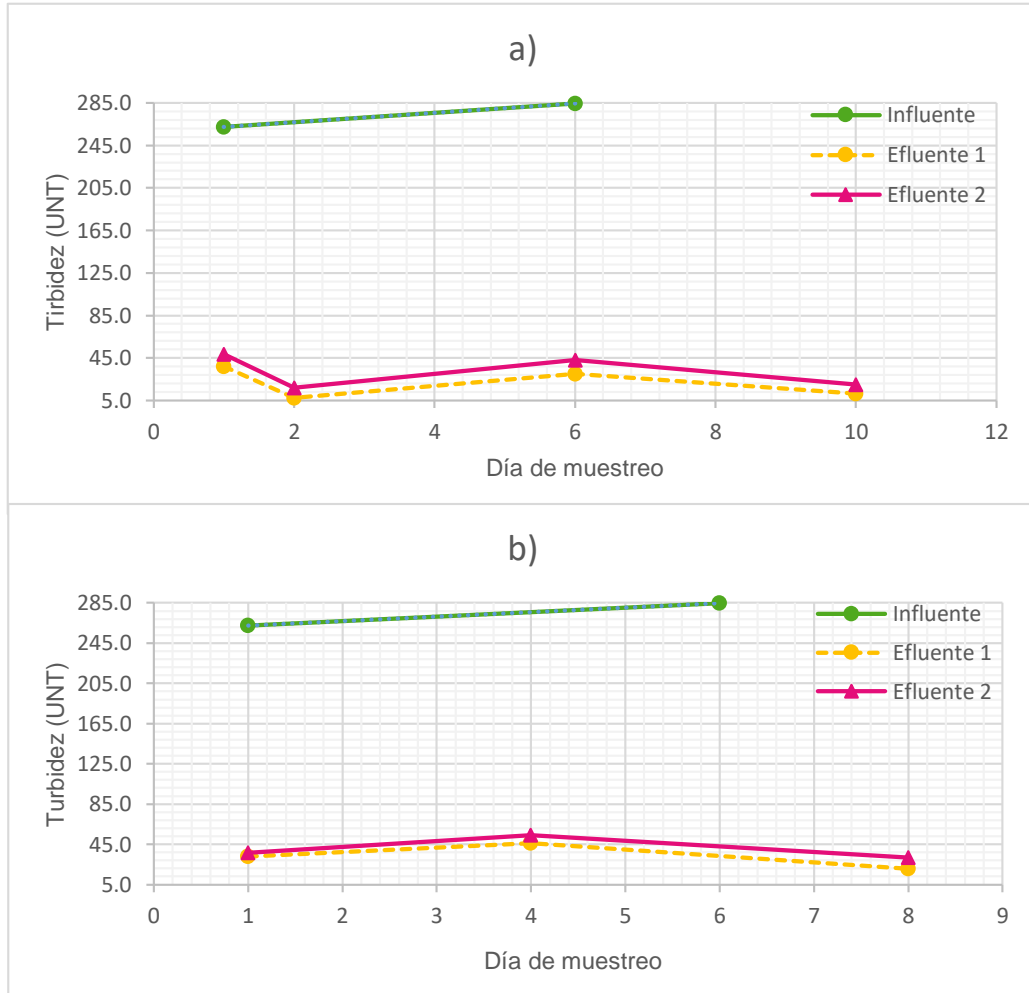


Figura 7. Medición de turbidez del agua cruda y efluentes de los FLA. a) Sin cloro; b) Con cloro.

Kai Siang, (2017) expresa que es crucial monitorear la turbidez para controlar el estado estético de las AG tratadas, y, de acuerdo con la corta variación entre los valores de cada efluente, ambos FLA efectuaron un buen desempeño de los niveles de turbidez, que visiblemente, podría ser aceptado por el usuario al no mostrar un color desagradable.



Al mismo tiempo, los efluentes 1 y 2 sin cloro presentaron una actuación similar en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) al indicar porcentajes de remoción de 60 y 58% respectivamente, con 111.3 (mg/L) como valor mínimo correspondiente al efluente del FLA 1, como se observa en la Figura 8, obteniendo valores más bajos a los reportados por Gautam (2021), cuya propuesta de tratamiento tiene como diferencia la ausencia de la trampa de grasas y la presencia de carbón activado y algodón, considerando que además de agua de regadera, el influente también se alimenta con agua proveniente de lavadora y fregadero.

Por otro lado, estos valores arrojados, generalmente indican que la calidad de agua de los efluentes es “medianamente” contaminada, puesto que rebasa el rango para ser considerada poco contaminada por 11 unidades, de acuerdo con los criterios establecidos por Nihon, (2017), los cuales indican entre 20 y 100 mg/L para considerar el agua poco contaminada y 100-500 mg/L para agua medianamente contaminada. Es importante destacar que la ausencia de la capa schmutzdecke en la superficie de la arena influye en la remoción de contaminantes, pues al contar con el tratamiento biológico, los microorganismos correspondientes habrían digerido en mayor proporción la materia orgánica biodegradable.

Los dos valores correspondientes a la DBO_5 del TT propuesto en el presente trabajo, se muestran por encima de los 30 mg/L estipulados por la normatividad mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997). No obstante, en los efluentes con adición de hipoclorito de sodio no se detectaron valores correspondientes a la DBO_5 debido a la inhibición de crecimiento que éste causa en los microorganismos encargados de la oxidación de materia orgánica, por lo tanto, ambos efluentes con cloro cumplen con el criterio establecido por la normatividad mexicana y las guías de reutilización de EUA, China y Japón.

A pesar de la fluctuación del influente, se obtuvo un decremento considerable en la concentración de DQO en los efluentes, obteniendo un porcentaje de $65 \pm 5\%$ y $59 \pm 7\%$ para los efluentes 1 y 2 sin cloro, los cuales presentan similitud con los efluentes 1 y 2 con cloro, cuyos porcentajes fueron $61 \pm 9\%$ y $62 \pm 4\%$, respectivamente, indicando la disminución de gran parte de los contaminantes orgánicos biodegradables y no biodegradables contenidos en el agua jabonosa de regadera.

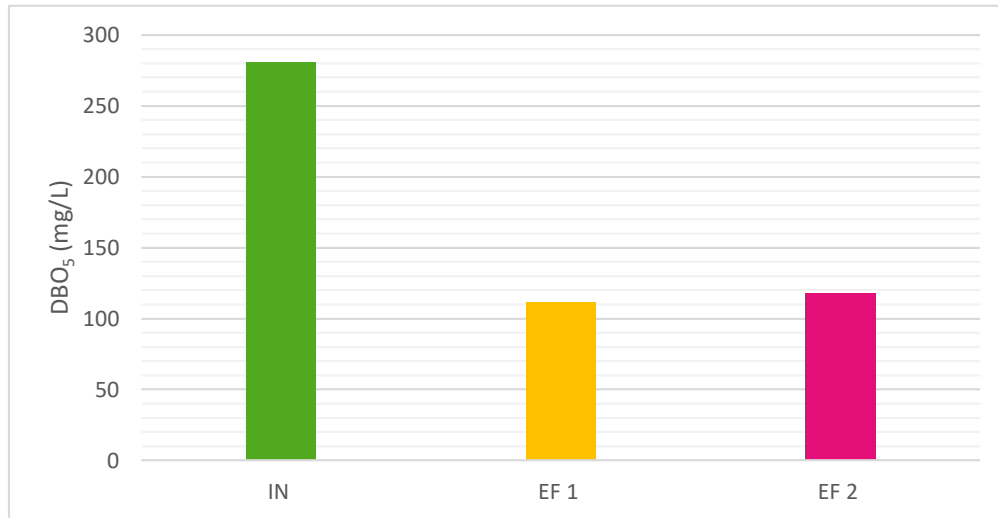


Figura 8. Medición de DBO₅ del agua cruda y efluentes de los FLA sin cloro.

Sin embargo, también se observa que, en el primer día de muestreo, que fue el mismo día en comenzar el proceso de tratamiento, los efluentes sin cloro presentaron valores de concentración más altos que los efluentes con cloro y, en la Figura 9 se observa que la tendencia en los siguientes días de muestreo es variable al presentarse un cambio de concentración de los efluentes, lo cual podría ser consecuencia de la misma variabilidad del influente, adicionando factores no controlables en el TT como el cambio climático, la trampa de grasas, el de alimentación y los recipientes de los efluentes se cubrían, el TT se encontraba a la intemperie al no contar con una cubierta.

Los resultados de la concentración de DQO de los efluentes tanto como los del influente, son altos si se comparan con los obtenidos por el sistema de H.I. en 2014, el cual es alimentado con el efluente de un tanque de sedimentación primaria con tiempo de retención hidráulico de 1 hr, logrando una concentración de 50 mg/L en el efluente con una profundidad de medio filtrante de 1 m incluyendo únicamente arena de entre 1-2 mm de diámetro efectivo. Contrastando que en el TT propuesto no pudo completarse el tiempo de sedimentación debido a inconvenientes de tiempo, además de que el espesor del lecho filtrante es 50% menor que el empleado por H.I. (2014).

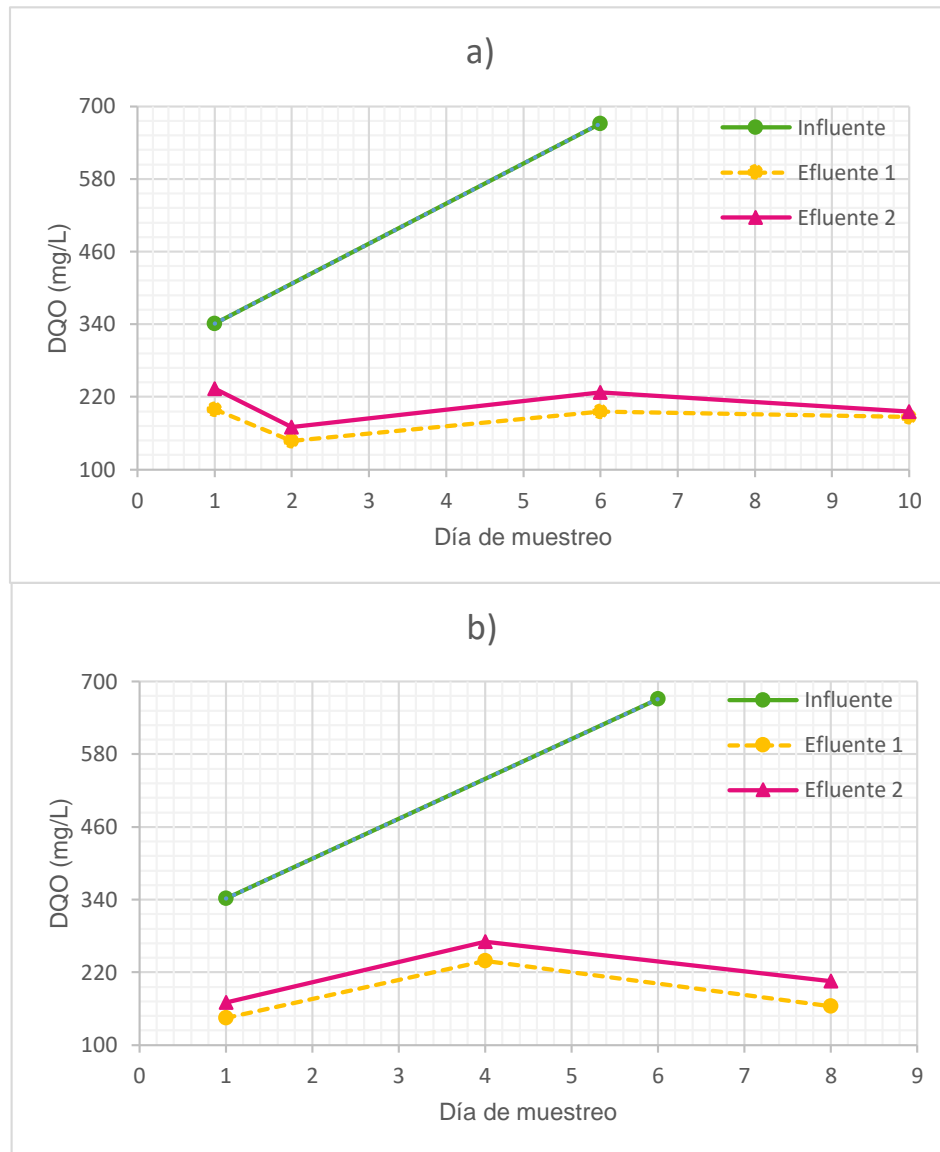


Figura 9. Medición de DQO del agua cruda y efluentes de los FLA. a) Sin Cloro; b) con Cloro

También, los efluentes 1 y 2 con cloro tuvieron un rendimiento de remoción de grasas y aceites más alto, en comparación con los efluentes sin desinfección, donde el efluente 2 con cloro (E₂CC) destacó aminorando un 74% la concentración de grasas y aceites, mientras que el efluente 1 con cloro (E₁CC) logró un 67% de remoción, el efluente 1 sin cloro (E₁SC) apenas un 11% y finalmente, el E₂SC 34% de remoción.



Lo anterior indica que el hipoclorito de sodio juega un papel importante en la disminución de grasas y aceites. Sin embargo, el resultado del E₂CC es poco más del doble comparado con el mismo sistema de H.I. (2014) descrito previamente, tomando en cuenta distintos aspectos, comenzando por desconocer el origen del AG tratada en ese estudio, puesto que lo único mencionado es que las AG se recolectaron de las casas de un vecindario de doce familias, además de que su valor de grasas y aceites en el influente fue de 150 mg/L, una concentración a tratar menor a la concentración del influente del presente proyecto, que fue 224 mg/L. Los 57 mg/L arrojados por el E₂CC sobrepasa el criterio de reutilización establecido por la normatividad mexicana, la cual indica un valor de 15 mg/L.

La intervención del cloro en la digestión de las grasas se ilustra en la Figura 10b.

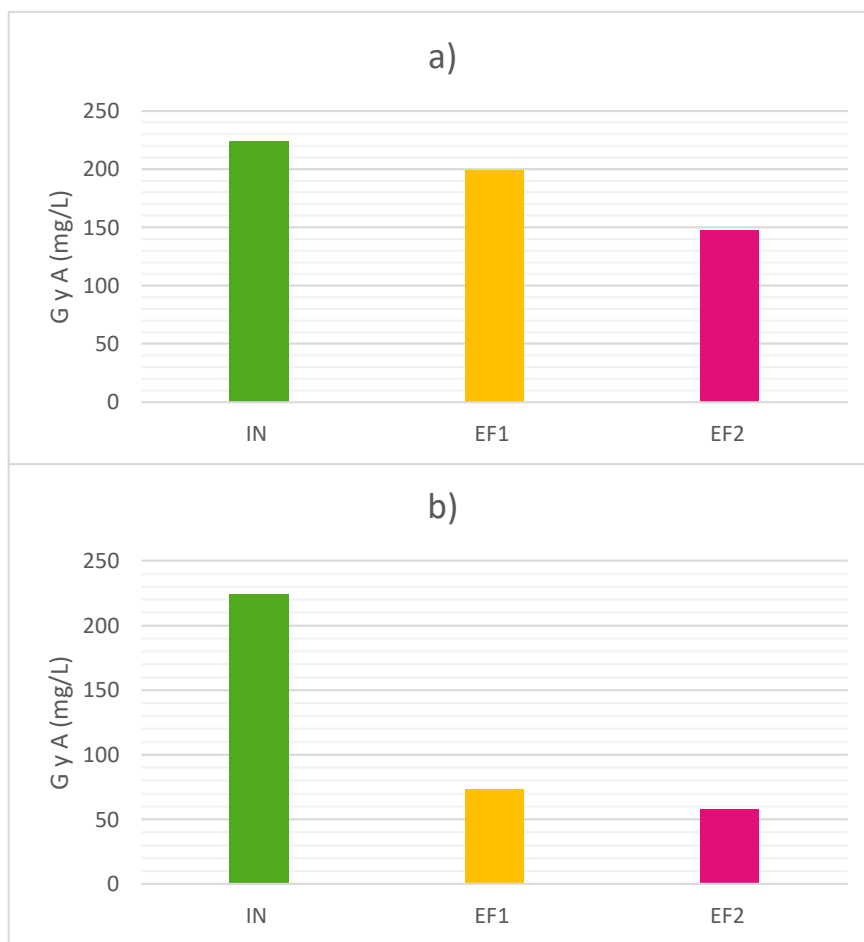


Figura 10. Medición de grasas y aceites del agua cruda y efluentes con cloro de los FLA.
a) Sin Cloro; b) con Cloro



Posteriormente, en la Figura 11, se observa la disminución correspondiente a sólidos suspendidos desde el primer día de funcionamiento del TT, destacando más eficientemente los efluentes con tratamiento de desinfección (Figura 11b) con una tendencia casi igual, donde resalta la eficiencia del E₂CC con un $86 \pm 3\%$ de remoción, el cual comienza a diferir del E₁SC en los últimos días de funcionamiento, evidenciando el principio de la colmatación del F1. En general, el F2 logró una mayor eliminación de sólidos suspendidos, además de que el E₂CC arrojó 11 mg/L como concentración mínima, siendo menor a la concentración reportada por H.I. Abdel, (2014) en uno de sus TT conformado por un filtro de grava y uno de arena de flujo descendente con 16 mg/L en el efluente.

Respecto a la remoción de sólidos disueltos totales (SDT), se presentó la situación contraria a los sólidos suspendidos en la mayoría de los días de muestreo. En la Figura 12a, se presentó una disminución de concentración que tuvo el E₁SC en el segundo día de funcionamiento sin tomar en cuenta que la diferencia fue del 1 %, mientras que el E₂SC sólo demostró 2 escenarios de reducción de SDT con 4 y 6% de remoción.

La concentración en todos los efluentes fue mayor al agua contaminada en el influente, lo cual puede atribuirse a distintas situaciones externas, como la variación de la calidad diaria del influente, la cual es alterada por el número de participantes en el proceso de ducha, su estilo de vida, actividades realizadas, tipo de productos usados (jabones, shampoo sólido/líquido, crema de afeitar, aceites corporales) e incluso el protocolo de muestreo aplicado, mismos factores que menciona Noutsopoulos, (2018). Además, fue alta la posibilidad de encontrar impurezas en la arena al estar expuesta al ambiente directamente después de ser lavada en ciclos anteriores.

El valor más alto en este parámetro fue de 973 mg/L en el E₁CC, sin embargo, cumple con el requisito de calidad para uso de agua recuperada para regular y garantizar la seguridad de los usos del agua (GB/T 18920-2002) establecido por el gobierno de China, con 1,500 mg/L como valor estipulado específicamente en los estándares de calidad del agua para la descarga de inodoros.

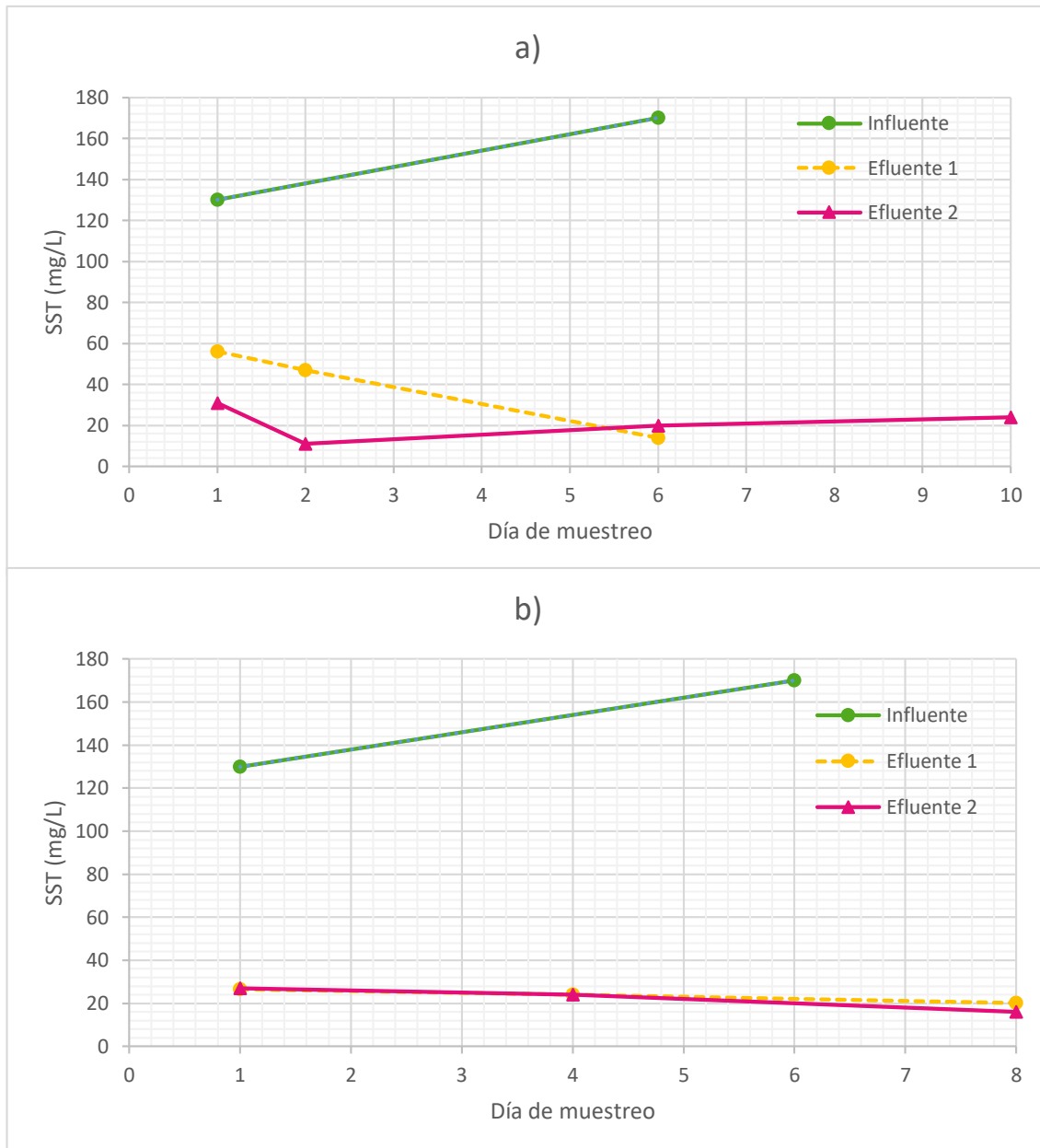


Figura 11. Medición de sólidos suspendidos del agua cruda y efluentes de los FLA. a) Sin cloro; b) Con cloro.

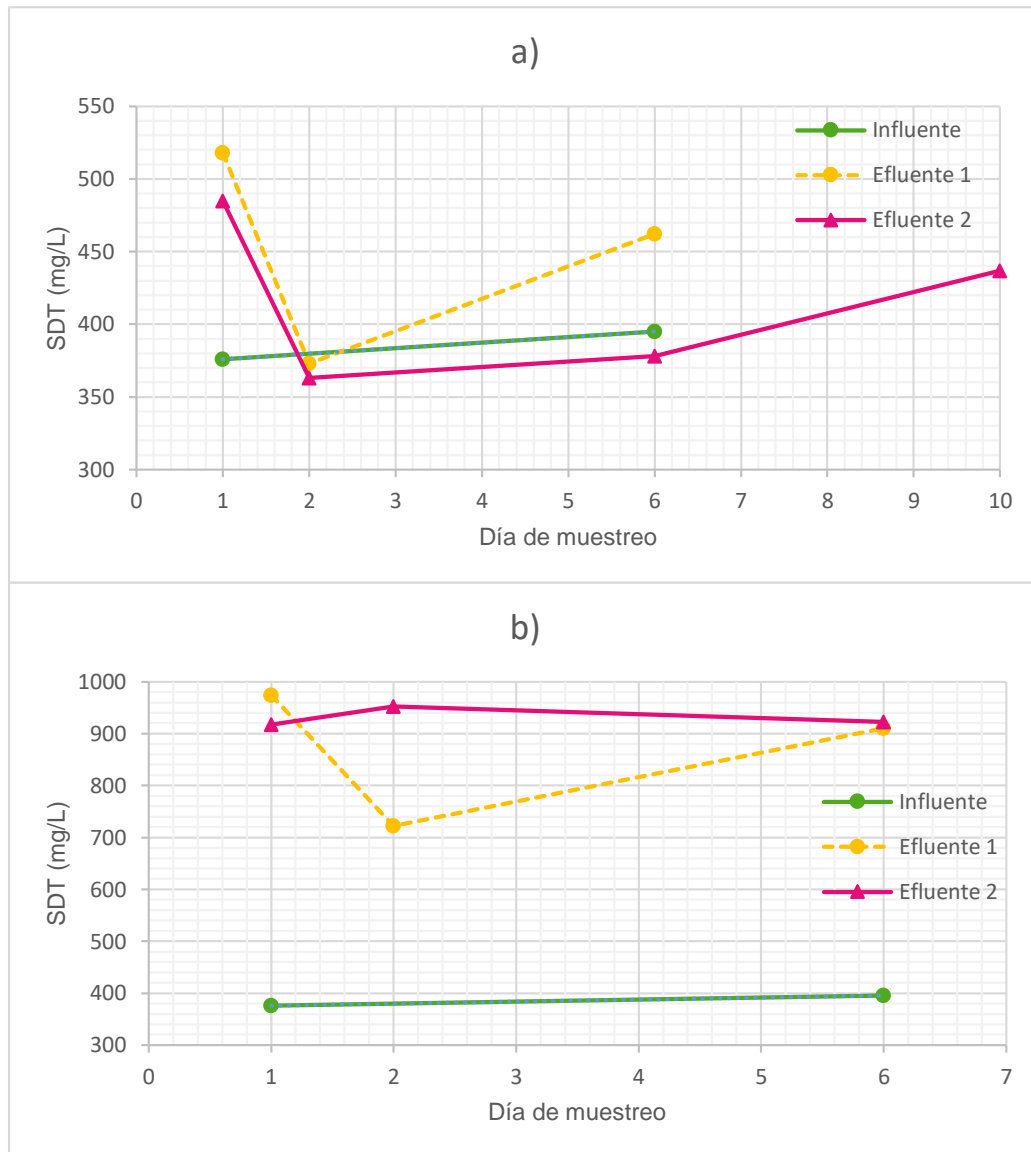


Figura 12. Medición de sólidos disueltos totales del agua cruda y efluentes de los FLA. a) Sin cloro; b) Con cloro.

Los resultados de la caracterización del AG de regadera se resumen en las Tablas 15 y 16 junto con los criterios establecidos por distintos países. En el Anexo 3 se indican las mediciones de los parámetros para cada una de las muestras tomadas del TT.



Tabla 15. Caracterización del influente y efluentes sin cloro de AG provenientes de regadera y criterios internacionales.

| Parámetro | AGUA GRIS CRUDA | | AGUA GRIS TRATADA | | GUÍAS PARA LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA | | | |
|----------------------------------|-----------------|-------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------|-------|--------|
| | Influente | E1SC | E2SC | NOM-003-SEMARNAT-1997 | EUA | Australia | China | Japón |
| pH | 6.6 ± 0.2 | 7.7 ± 0.5 | 7.6 ± 0.5 | NR | 6-9 | NR | 6-9 | NR |
| Turbidez (UNT) | 274 ± 11 | 21 ± 15 | 32 ± 16 | NR | <2 | NR | 5 | NR |
| DBO5 (mg/L) | 281 ± 4 | 110.1 ± 1.2 | 116.7 ± 0.6 | 30 | <10 | NR | 10 | ≤ 20 |
| DQO (mg/L) | 506 ± 165 | 182 ± 17 | 207 ± 180 | NR | NR | <20 | NR | NR |
| ST (mg/L) | 536 ± 30 | 493 ± 73 | 435 ± 81 | NR | NR | NR | NR | NR |
| SST (mg/L) | 150 ± 20 | 39 ± 25 | 22 ± 9 | 30 | NR | <30 | NR | NR |
| SDT(mg/L) | 386 ± 9 | 451 ± 67 | 416 ± 53 | NR | NR | NR | 1,500 | NR |
| Grasas y Aceites (mg/L) | 224 | 199 | NR | 15 | NR | NR | NR | NR |
| Cloro libre residual (mg/L) | NR | NR | NR | NR | >1 | NR | >1 | NR |
| Alcalinidad | 148.23 | 201.3 | 203.13 | NR | NR | NR | NR | NR |
| Acidez | 5.94 | 3.96 | 3.96 | NR | NR | NR | | NR |
| Dureza (mg/L CaCO ₃) | 101.2 | 110 | 107.8 | NR | NR | NR | NR | NR |
| Coliformes totales (NMP/100mL) | NR | NR | NR | NR | NR | NR | 3 | ≤ 1000 |
| Coliformes fecales (NMP/100mL) | NR | NR | NR | 1000 | 0 | <10 | NR | NR |

NR: valor no reportado

Alkhatib et al. (2006), afirma que, a pesar de las ventajas reportadas sobre la reutilización de AG, no existe norma internacional para controlar la calidad de las aguas grises con fines de reutilización. No obstante, muchos países han elaborado individualmente sus propias pautas de reutilización del agua en función de sus necesidades (Pidou *et-al.* 2007). Países como Australia, Estados Unidos de América, China, Reino Unido, Israel, entre otros, han desarrollado pautas sobre la calidad de las aguas grises recuperadas, cuyos criterios se comparan en las Tablas 15 y 16.



Tabla 16. Caracterización del influente y efluentes con cloro de AG provenientes de regadera y criterios internacionales.

| Parámetro | AGUA GRIS CRUDA | AGUA GRIS TRATADA | | | GUÍAS PARA LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA | | | |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|-----------|-----------------------|--------------------------------------|-----------|-------|--------|
| | Influente | E1CC | E2CC | NOM-003-SEMARNAT-1997 | EUA | Australia | China | Japón |
| pH | 6.6 ± 0.2 | 8.3 ± 0.1 | 8.3 ± 0.1 | NR | 6-9 | NR | 6-9 | NR |
| Turbidez (UNT) | 274 ± 11 | 33 ± 16 | 41 ± 9 | NR | <2 | NR | 5 | NR |
| DBO5 (mg/L) | 281 ± 4 | ND | ND | 30 | <10 | NR | 10 | ≤ 20 |
| DQO (mg/L) | 506 ± 165 | 182 ± 18 | 215 ± 45 | NR | NR | <20 | NR | NR |
| ST (mg/L) | 536 ± 30 | 892 ± 108 | 953 ± 23 | NR | NR | NR | NR | NR |
| SST (mg/L) | 150 ± 20 | 24 ± 2 | 22 ± 5 | 30 | NR | <30 | NR | NR |
| SDT(mg/L) | 386 ± 9 | 868 ± 105 | 931 ± 21 | NR | NR | NR | 1,500 | NR |
| Grasas y Aceites (mg/L) | 224 | 73.5 | 57.5 | 15 | NR | NR | NR | NR |
| Cloro libre residual (mg/L) | NR | 7 | 10 | NR | >1 | NR | >1 | NR |
| Alcalinidad | 148.23 | 841.8 | 1098 | NR | NR | NR | NR | NR |
| Acidez | 5.94 | ND | ND | NR | NR | NR | NR | NR |
| Dureza (mg/L CaCO ₃) | 101.2 | 112.2 | 88 | NR | NR | NR | NR | NR |
| Coliformes totales (NMP/100mL) | NR | ≤ 3 | ≤ 3 | NR | NR | NR | 3 | ≤ 1000 |
| Coliformes fecales (NMP/100mL) | NR | ≤ 3 | ≤ 3 | 1000 | 0 | <10 | NR | NR |

NR: valor no reportado; ND: no detectado

Uno de los parámetros de la caracterización del AG de regadera que se encuentra dentro del rango establecido por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (USEPA, 2004) es el pH, teniendo un valor muy cercano al neutro de 6.6 en la entrada del TT, finalizando con un valor de 7.7 en los efluentes sin cloro. Además, también cumple con el criterio estipulado por el gobierno de China. Esta calidad de agua se debe a que el suministro de AP en la regadera proviene directamente de la red municipal, la cual cuenta con un pH de 6.5-8.5 de acuerdo con los límites permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano que establece la NOM-127-SSA1-1994.



Mientras que el AG que recibió tratamiento de desinfección presentó un valor alcalino de 8.3, este pequeño aumento puede ser causado por la presencia del hipoclorito de sodio, puesto que el pH de la solución desinfectante se encuentra entre 11 y 13 de acuerdo con el porcentaje de su concentración. Asimismo, los resultados del pH también cumplen con el límite permisible de agua para uso y consumo humano, según la NOM-127-SSA1-1994.

Los sólidos suspendidos no son un parámetro considerado en los criterios para la reutilización de agua por la mayoría de los países, no obstante, Australia y México sí lo incluyen, coincidiendo con el valor establecido de no mayor a 30 mg/L, esto significa que los efluentes correspondientes al TT propuesto en el presente trabajo también cumplen con este requerimiento, excluyendo únicamente al E₁SC (sin cloro), ya que su resultado rebasa el límite de la guía australiana y la normatividad mexicana. También, los valores obtenidos en los SDT se encuentran por debajo de los estándares de calidad de agua recuperada con uso específico en la descarga de inodoro en China, estipulando 1,500 mg/L.

Por otro lado, la USEPA, (2012) y el gobierno de China recomiendan un valor mayor a 1 mg/L de cloro residual libre, el cual fue alcanzado, sin embargo, los 7 mg/L de cloro residual libre en los efluentes con desinfección indican que la dosis de hipoclorito de sodio suministrada fue alta, por lo tanto, es conveniente disminuir la dosis de cloro en un 60% menos para que el valor de cloro residual libre en el efluente sea menor y se encuentre dentro del rango de 0.2-1.5 mg/L tal y como lo estipula la NOM-127-SSA1-1994 corroborando este dato posteriormente en una prueba de determinación de cloro residual. Asimismo, se reduciría el costo en este aspecto haciendo más duradera la solución desinfectante

Gracias al agente desinfectante no se detectó la presencia de ningún tipo de coliformes, cumpliendo con el límite establecido por la normatividad mexicana, así como con los criterios establecidos por las guías de reutilización de EUA, Australia, China y Japón.

Esto significa que el usuario del TT propuesto tendría la garantía de mantener libre de bacterias y patógenos al agua tratada que suministraría su depósito de WC y de la misma manera, no habría proliferación de microorganismos durante el almacenamiento, lo cual es un aspecto de alta relevancia a considerar en el tratamiento de aguas.

Después de obtener los resultados de la caracterización del influente, se cuantificó la eficiencia de remoción del TT en cada parámetro considerando el efluente que presentó la mayor remoción de contaminantes en cada parámetro, como se ilustra en la Figura 13.

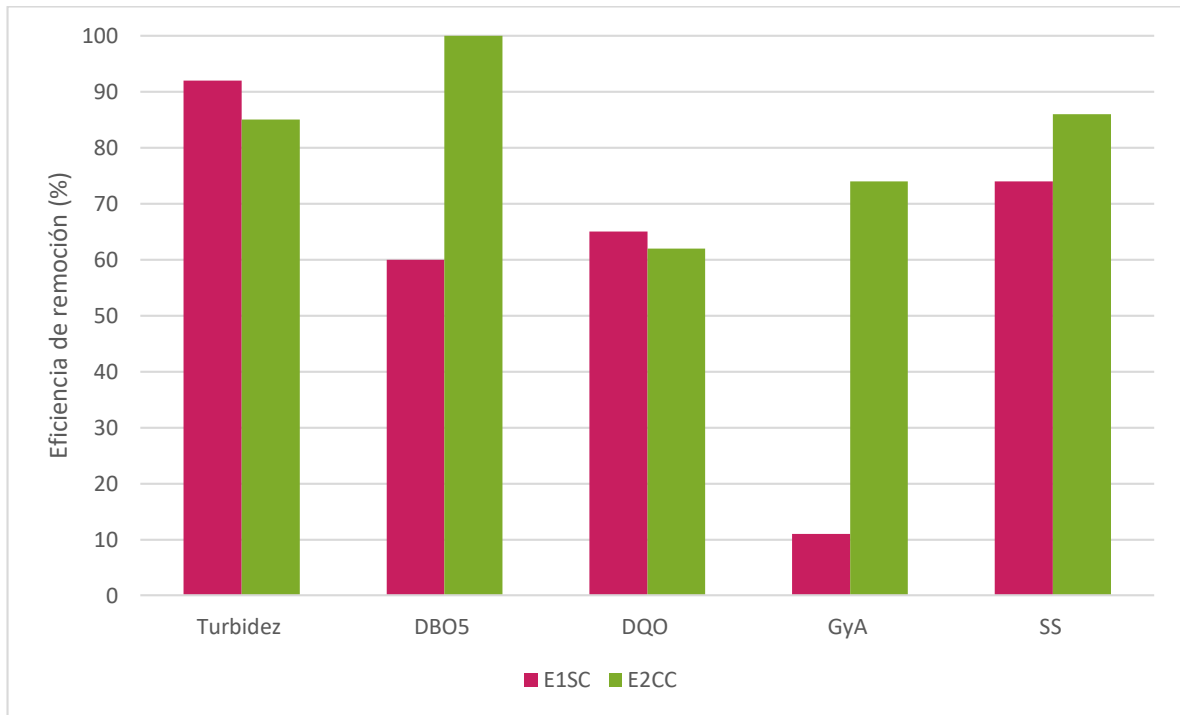


Figura 13. Eficiencia de remoción del tren de tratamiento de AG de regadera en distintos parámetros.

Se observa en la figura anterior que, tanto el FLA 1 con 45 cm medio filtrante, como el FLA 2 con 30 cm de profundidad presentaron altos porcentajes de remoción en distintos parámetros, lo cual indica que ambas opciones representan una buena elección al momento de optar por uno solo, puesto que ambos cuentan con un sencillo funcionamiento y operación, además de que pueden construirse con materiales de fácil adquisición y por el mismo usuario, en comparación con otros tratamientos donde se ocupan reactores y/o equipo amplio y sofisticado. Otra de las ventajas del TT de AG es que, en la parte experimental se trabajó con agua de regadera auténtica, por lo tanto, los resultados se asemejan a un caso real.

Mientras que, para un hogar establecido, el ahorro de AP puede enfocarse en la reutilización de AG provenientes de lavadora empleada en un segundo ciclo de lavado, sin embargo, debido a la situación mundial sanitaria, fue posible trabajar únicamente con AG de regadera.



5.2 Propuesta del sistema de reutilización de AG provenientes de regadera en vivienda unifamiliar de nivel medio

El objetivo principal del presente trabajo fue disminuir el uso del AP dentro de una vivienda unifamiliar sustituyendo su consumo en áreas donde no es requerida tal calidad debido al contacto indirecto que se tiene, como es el caso del depósito del inodoro. Por lo tanto, para aplicar el tren de tratamiento para AG de regadera en un caso real, se realizó una propuesta del sistema de reutilización de AG implementado en una vivienda unifamiliar en condiciones previas de construcción con el fin de facilitar la aplicación del tren de tratamiento, puesto que la proposición sugiere la construcción de un contenedor de AG de concreto y una modificación en la tubería interna de las instalaciones. Tomando en consideración el modelo de una vivienda con planta alta y planta baja de nivel medio para cuatro habitantes con sala, comedor, cocina cerca del área de lavado, dos e incluso tres recámaras y garaje.

El funcionamiento del sistema de reutilización de AG precedentes de regadera consiste en una red de distribución totalmente independiente a la red municipal de AP, comenzando con la coladera que comúnmente se ubica a nivel de piso para impedir el paso de cabellos, recolectando el agua de la ducha en un contenedor de concreto con forma similar a un rectángulo adaptado con una pendiente de 5 cm y ubicado como un escalón con pequeñas paredes interiores de separación para que las sustancias grasas desechadas del aseo personal se mantengan en suspensión y las partículas que logren traspasar la malla de la coladera, se sedimenten por gravedad localizándose en la parte profunda del contenedor. De esta forma, el flujo libre de grasas avanza mediante tubería convencional o de PVC hacia uno de los lados laterales externos de la vivienda para alimentar al filtro de grava. Posteriormente, el flujo atraviesa el cuerpo del filtro de arena sílice donde se removerán la mayor parte de los contaminantes y el efluente será dirigido hacia una cisterna donde se llevará a cabo la desinfección.

Con la ayuda de una bomba, operando cada 12 horas aproximadamente, el agua tratada dentro de la cisterna circulará hacia la parte más alta de la vivienda vertiéndose en un contenedor de alimentación exclusivo de agua tratada que estará conectado con el depósito de los inodoros.

El esquema general de la propuesta se muestra en la Figura 14.

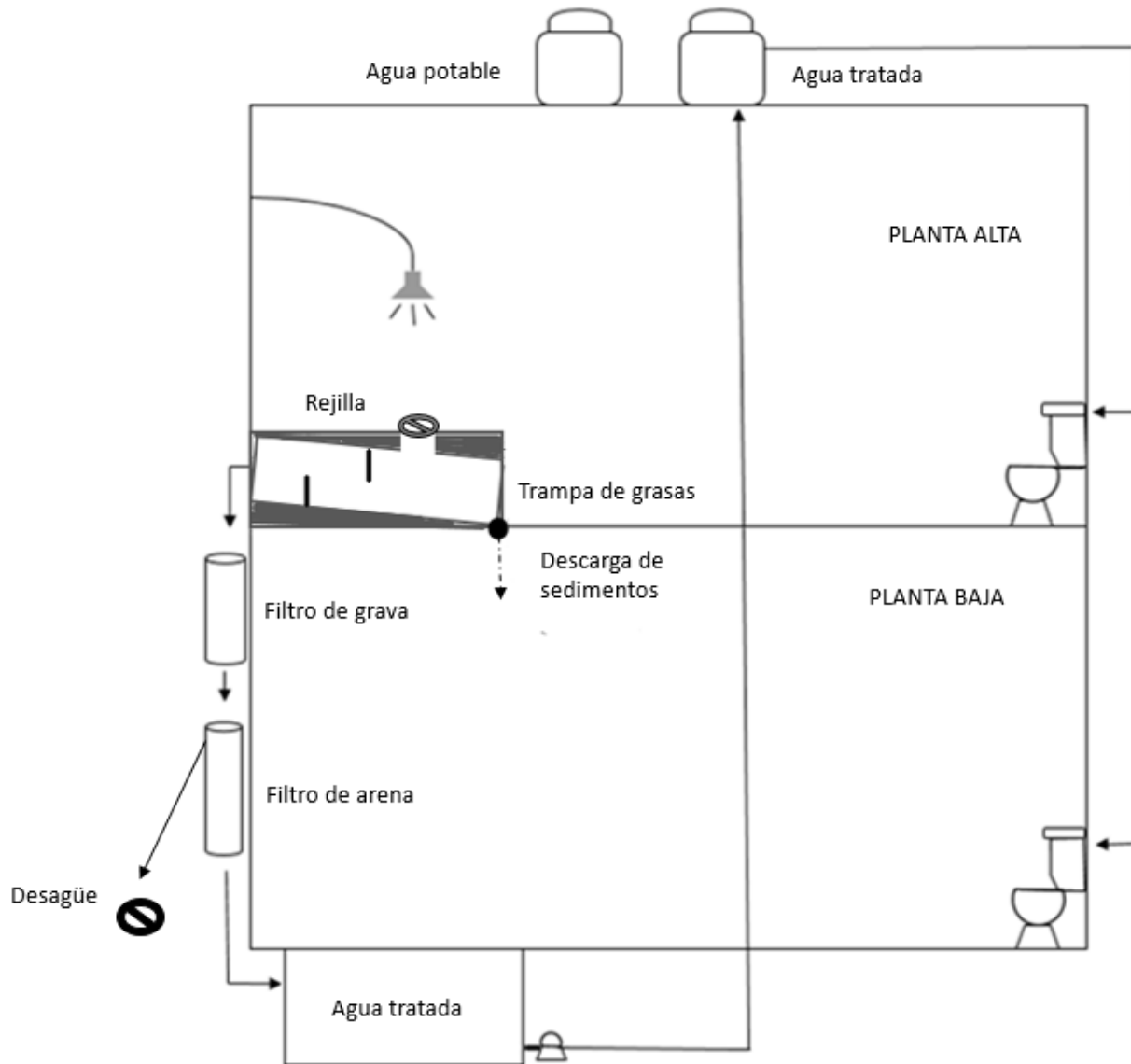


Figura 14. Propuesta de sistema de reutilización de AG de regadera en vivienda unifamiliar.

De acuerdo con los valores obtenidos por Maya (2010) el consumo de AP en el inodoro es de 24 L/hab/d y así como el valor de consumo de AP en la regadera (37 L/hab/d), pertenecen a una vivienda tipo medio del municipio de Toluca. Por lo tanto, el volumen precedente del aseo personal es suficiente para abastecer el flujo del depósito de inodoro. Las dimensiones del contenedor de concreto para caso real son 116 x 100 x 8 cm, recolectando el volumen de consumo de agua requerido para abastecer la descarga de inodoro contemplando un total de 96 L/d para 4 habitantes.



La medida de los materiales utilizados para construir el sistema de reutilización de AG de regadera depende del volumen de agua a tratar. Para tratar un flujo correspondiente al consumo de agua diario de 4 habitantes (148 L/d) es necesario que el diámetro de los tubos de pvc del filtro de grava y arena sea de 11 pulgadas, mientras que para 185 L/d equivalente al consumo de agua diario de 5 personas, los contenedores de los filtros son de 12 pulgadas.

5.3 Inversión inicial y de mantenimiento del tren de tratamiento de AG de regadera

Para realizar la construcción del TT se consideraron materiales de costo accesible adquiridos en ferreterías locales, donde se consiguió un mejor precio a diferencia de tiendas de autoservicio. La Tabla 17 indica el precio unitario de los materiales, así como el importe total que equivale a la inversión inicial del TT a nivel laboratorio.

Puesto que el lavado del lecho filtrante es muy laborioso, el costo de mantenimiento del TT incluye el reemplazo del FLA por uno nuevo estimando un costo de 310 pesos aproximadamente cada 10 días, sin embargo, una vez adquirido el FLA de repuesto, el costo de mantenimiento se reduce considerablemente debido a que no es necesario la construcción de otro FLA, sino únicamente se contempla el lavado del contenedor y medio filtrante. Aunque, por otro lado, para aumentar la practicidad, es necesario realizar algunas modificaciones en el diseño de los FLA, como, por ejemplo, un cartucho con el medio filtrante que sea sustituido cada vez que se alcance el punto de colmatación para facilitar el reemplazo o bien, una adaptación de entrada al filtro para instalar una bomba que permita el retrolavado de la cama filtrante sin trasladarla de lugar.

También, es importante destacar que el precio indicado en la Tabla 17 es de menudeo y, la adquisición de materiales por mayoreo es otro factor que permitiría la reducción de costos. Además, el beneficio obtenido al instalar el sistema de reutilización de AG propuesto en una vivienda unifamiliar para 4 habitantes en etapa de construcción, es una constante disminución de consumo de AP en el inodoro que se refleja principalmente a mediano y largo plazo al obtener un ahorro de 2.88 m³ al mes y 35 m³ de AP al año reduciendo la huella hídrica en el planeta. Sin embargo, otros factores que pueden influir en la aceptación pública de la reutilización de AG son sociodemográficos, edad, nivel de educación, religión, disponibilidad de agua, fuente de influente, conciencia ambiental, ingresos (Pham, 2011).



Tabla 17. Inversión inicial en la construcción del tren de tratamiento

| Materiales | Precio Unitario | Importe |
|---|------------------------|-----------------|
| 4 adaptadores hembra de pvc de 1/2" | 4 | 16 |
| 8 adaptadores macho de pvc de 1/2" | 4 | 32 |
| 1 tuerca de fierro galvanizado de 1/2" | 3 | 3 |
| Cinta teflón | 6 | 6 |
| 1 bomba de agua para lavadora | 250 | 250 |
| 2 piezas de pegamento instantáneo | 25 | 50 |
| Bicarbonato de sodio | 10 | 10 |
| 1 válvula de compuerta con cuerda interior | 150 | 150 |
| 6 m de manguera plástica de 3/8 " de diámetro | 9 | 54 |
| 1 m tubo de pvc sanitario de 1/2" | 10 | 10 |
| 2 m tubo de pvc sanitario de 4" | 80 | 160 |
| 3 codos de 90° de 1/2" | 4 | 12 |
| 1 tee de pvc sanitario de 1/2" | 5 | 5 |
| 6 válvulas de pvc de 1/2" | 30 | 180 |
| 3 rejillas plásticas para coladera de 4" de diámetro | | 1 |
| 5 coples de pvc sanitario de 4" | 3 | 15 |
| 3 tapas de pvc sanitario de 4" | 10 | 30 |
| 6 pijas | 0.5 | 3 |
| 3 abrazaderas omega de 4" | 5 | 15 |
| 2 tapones 1/2" | 8 | 16 |
| 3 rejillas para fregadero | 45 | 135 |
| 1 bolsa grava de mármol de 13 mm de diámetro | 200 | 200 |
| 2 bolsas grava natural para acuario de 6 mm de diámetro | 73 | 146 |
| 2 bolsas grava natural para acuario de 4 mm de diámetro | 73 | 146 |
| 8.5 kg arena sílice gruesa con diámetro efectivo de 1 mm y 0.36mm | 20 | 170 |
| 3 botes ácido muriático | 30 | 90 |
| 1 bote pegamento para pvc | 93 | 93 |
| 1 tubo silicón hidráulico | 66 | 66 |
| 3 pares de mensulas | 750 | 750 |
| TOTAL: | | 2,814.00 |



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Es esencial el desarrollo y maduración de la capa biológica (schmutzdecke) en la superficie de cada uno de los FLA, para obtener una mayor remoción de contaminantes, principalmente en la concentración de DBO_5 en los efluentes sin desinfección.

La eficiencia de remoción más alta del TT, fue del 92 ± 5 , 100 , 65 ± 5 , 86 ± 3 y 74% referentes a turbidez, DBO_5 , DQO, SS y grasas y aceites, respectivamente.

La eficiencia de remoción más alta respecto a turbidez y DQO fue del 92 ± 5 y $65 \pm 5\%$ para el caso del efluente 1 sin cloro (E_1SC), resultando insuficiente para los criterios que establecen EUA y China para la reutilización de aguas grises en usos urbanos y descarga de inodoro.

El efluente 2 con cloro (E_2CC) tuvo una eficiencia de remoción del 85 ± 4 y $62 \pm 4\%$ de turbidez y DQO, respectivamente y obtuvo la mayor eficiencia de remoción de grasas y aceites con 74% y SS con $86 \pm 3\%$.

El FLA 2, con menor espesor de medio filtrante (30 cm), junto con el hipoclorito de sodio son indispensables para reducir la concentración de grasas y aceites en el efluente, para garantizar la calidad del agua en SS, que estipula México para uso de contacto indirecto y DBO_5 y la inhibición del crecimiento de bacterias que China especifica para la descarga del inodoro.

El pH, DBO_5 , SS, SDT, cloro residual, CT y CF se encuentran por debajo de los valores permisibles establecidos por la normatividad mexicana y por EUA, China, Japón y Australia para reutilización de AG en usos urbanos y descarga en inodoros, por lo que resulta viable la implementación del sistema de tratamiento propuesto en este trabajo para viviendas en etapa de construcción.

Es posible reducir el consumo de agua potable mediante el sistema de reutilización de aguas grises propuesto en el presente trabajo hasta en un 19% del consumo total por persona en una vivienda unifamiliar de nivel medio.



6.2 RECOMENDACIONES

Ubicar el TT en un lugar cerrado donde se eviten corrientes de aire y cambios bruscos de temperatura o factores que puedan influir en la calidad del efluente.

Realizar nuevamente pruebas del laboratorio para corroborar los datos obtenidos.

Añadir otros procesos antes de la filtración con grava o incluso, reemplazar esta filtración con un proceso de coagulación-floculación para evitar hacer más largo el TT.

Modificar el diseño del FLA de manera que, el medio filtrante se encuentre dentro de cartuchos reemplazables.

Utilizar jabones biodegradables y productos amigables con el medio ambiente como parte de su rutina en el aseo personal el empleo de dispositivos ahorradores de agua.

Realizar un análisis de costo del dispositivo y evitar comparar el costo de producción de agua tratada contra el que suministra la red municipal de agua potable.



7. REFERENCIAS

Abusam A (2008) Reuse of greywater in Kuwait. *International Journal of Environmental Studies*, 65:1, 103-108

Alaziz AIA, Al-Saqer NF (2014) The reuse of greywater recycling for high rise buildings in Kuwait Country. *International Journal of Engineering Research and Applications*.

Al-Jarallah R. (2013) The potential for reusing grey water and its generation rates for sustainable potable water security in Kuwait. *Journal of Engineering Research*.

Al-Jayyousi, O. (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, 156,181-192.

Alkhatib, R., Roesner, L., Marjoram, C., (2006) An Overview of Graywater Collection and Treatment Systems, World Environmental and Water Resource Congress 2006 Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns. ASCE, pp. 1-10.

Antonopoulou, G., Kirkou, A., & Stasinakis, A. S. (2013). Quantitative and qualitative greywater characterization in Greek households and investigation of their treatment using physicochemical methods. *Science of the Total Environment*, 454, 426-432.

ACT: Australian Capital Territory. Greywater Use: Guidelines for residential properties in Canberra. (2004). Australian Capital Territory. Australia: Canberra.

Bernstein, A., Siebner, H., Kaufman, A. G., & Gross, A. (2021). Onsite Chlorination of Greywater in a Vertical Flow Constructed Wetland—Significance of Trihalomethane Formation. *Water*, 13(7), 903.

Borges, Zabrocki. (2003). Caracterização da água cinza para promoção da sustentabilidade dos recursos hídricos. Departamento de Engenharia Ambiental/Universidade Federal do Paraná.

Chaillou, K., Gérente, C., Andrès, Y., & Wolbert, D. (2011). Bathroom greywater characterization and potential treatments for reuse. *Water, Air, & Soil Pollution*, 215(1), 31-42.

Christova-Boal, D., Eden, R. y McFarlane, S. (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106,391-397

Edwin, G. A., Gopalsamy, P. & Muthu, N. (2014). Characterization of domestic graywater from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review. *Appl. Water Sci.* 4 (1), 39–49.

Efaq, A. N., Adel, A. S. & Mohamed, R. M. S. R. (2016) Current status of greywater in Middle East countries. A glance at the world. *Waste Manage J.* 49, 1–4.



- Elmitwalli T, Otterpohl R (2007) Anaerobic biodegradability and treatment of grey water in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Water Res* 41(6):1379–1387.
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., and Ledin, A., (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4, 85–104.
- Friedler, E., Katz, I., & Dosoretz, C. G. (2008). Chlorination and coagulation as pretreatments for greywater desalination. *Desalination*, 222(1-3), 38-49.
- Friedler E, Kovalio R, Galil N (2005) On-site greywater treatment and reuse in multi-story buildings. *Water Sci Technol* 51(10):187–194
- Gautam, S., Makhitha, L. M., Gupta, A., Brema, J., James, E. J., & Chellaiah, G. (2021). Treatment and Effective Utilization of Greywater: A Preliminary Case Study. *Applied System Innovation*, 4(1), 16.
- Ghaitidak, D. M. y Yadav, K. D. (2015) Reuse of greywater: effect of coagulant. *Desalin. Water Treat.* 54 (9), 2410–2421
- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2015). Effect of coagulant in greywater treatment for reuse: selection of optimal coagulation condition using analytic hierarchy process. *Desalination and Water Treatment*, 55(4), 913-925.
- Ghaitidak, D. M., Yadav, K. D. (2016). Greywater treatment for reuse: comparison of reuse options using analytic hierarchy process. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 6(1), 108-124.
- H.I. Abdel-Shafy, M.A. El-Khateeb & M. Shehata (2014) Greywater treatment using different designs of sand filters, *Desalination and Water Treatment*, 52:28-30, 5237-5242.
- Hernandez L, Zeeman G, Temmink H, Buisman C (2007) Characterization and biological treatment of grey water. *Water Sci Technol* 56(5):193–200.
- Hernandez L, Zeeman G, Temmink H, Marques A, Buisman C (2008) Comparison of three systems for biological greywater treatment. In: Proc. IWA conference on Sanitation challenges, Wageningen, Netherlands, May 19–22.
- Huisman L (1974). Slow sand filtration. Ginebra, Suiza: World Health Organization.
- Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Prathapar, S. & Harrasi, A. A. (2008) Evaluating greywater reuse potential for sustainable water resources management in Oman. *Environ. Monit. Assess.* 137, 315–327
- Jefferson B, Laine A, Parsons S, Stephenson T, Judd S (2000) Membrane bioreactors and their role in wastewater reuse. *Water Sci Technol* 41(1):197–204
- Jefferson B, Laine A, Parsons S, Stephenson T, Judd S (2001) Advanced biological unit processes for domestic water recycling. *Water Sci Technol* 43(10):211–218



Jefferson B, Palmer A, Jeffrey P, Stuetz R, Judd S (2004) Grey water characterization and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Sci Technol* 50(2):157–164

Kai Siang Oh, Janet Yip Cheng Leong, Phaik Eong Poh, Meng Nan Chong, Ee Von Lau (2017) A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia, *Journal of Cleaner Production* .

Kariuki Francis W., Kotut Kiplagat y Ngángá Victor G (2011) The Potential of a Low Cost Technology for The Greywater Treatment. *The Open Environmental Engineering Journal*, 2011, 4, 32-39

Li Fangyue., K. Wichmann, R. Otterpohl, Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses, *Sci. Total Environ.* 407 (2009) 3439–3449.

Li Z, Gulyas H, Jahn M, Gajurel D, Otterpohl R (2003) Greywater treatment by constructed wetlands in combination with TiO₂-based photocatalytic oxidation for suburban and rural areas without sewer system. *Water Sci Technol* 48(11–12):101–106.

Madany, I. M., Al-Shiryán, A., Lori, I. & Al-Khalifa, H. (1992) Public awareness and attitudes toward various uses of renovated water. *Environment International* 18 (5), 489–495.

Maeda, M., Nakada, K., Kawamoto, K., & Ikeda, M. (1995). Areawide Use of Reclaimed Water in Tokyo, Japan. In A. Angelakis, T. Asano, E. Diamadopoulos, y G. Tschobanoglous (Eds.), *Proceedings of the Second International Symposium on Wastewater Reclamation and Reuse* (pp. 55±62). October 17±20, 1995, Iraklio, Crete, Greece (Reimpresión del libro del simposio 1)

Maya Rueda, Violeta. (2010). Evaluación de la conservación y eficiencia del consumo de agua mediante el uso de tecnologías de ahorro en el sector urbano. Tesis de maestría. CIRA, Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4th Edition, Ed: McGraw-Hill, New York.

Montgomery J., Consulting Engineers, Inc. (1985). *Water treatment principles and design*. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.

Morel, A. y Diener, S., (2006). *Greywater Management in Low and Middle-Income Countries*. Water and sanitation in developing countries (Sandec). Eawag, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Dübendorf, Switzerland.

Nihon Kasetsu Co, (2017). *DBO y DQO para caracterizar aguas residuales*. <https://nihonkasetu.com/es/dbo-y-dqo-para-caracterizar-aguas-residuales/>. Consultado el 02/11/21.

Nolde E (1999) Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-story buildings-over ten years experiences in Berlin. *Urban Water* 1(4):275–284.



Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Noutsopoulos, C., Andreadakis, A., Kouris, N., Charchousi, D., Mendrinou, P., Galani, A., Koumaki, E. (2018). Greywater characterization and loadings—physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of environmental management*, 216, 337-346.

Oron Gideon, Adel Mike, Friedler Eran (2014) Greywater use in Israel and worldwide: Standards and prospects. *Water research* 58, 92-101.

Pham, T. T. N., Ngo, H. H., Guo, W., Dang, H. P. D., Mainali, B., Johnston, A., & Listowski, A. (2011). Responses of community to the possible use of recycled water for washing machines: A case study in Sydney, Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(5), 535-540.

Pidou, M., Memon, F. A., Stephenson, T., Jefferson, B. & Jeffrey, P. (2007) Greywater recycling: treatment options and applications. *Landscape 2*, 1000.

Prathapar, S., Jamrah, A., Ahmed, M., Al Adawi, S., Al Sidairi, S.y Al Harassi, A. (2005) Overcoming constraints in treated greywater reuse in Oman. *Desalination* 186, 177–186.

Paulo, P., Azevedo, C., Begosso, L., Galbiati, A. y Boncz, M. (2013). Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. *Ecological Engineering*, 50, 95–100.

Simon Jabornig (2014) Overview and feasibility of advanced greywater treatment systems for single households, *Urban Water Journal*, 11:5, 361-369.

USEPA (United State Environmental Protection Agency), (2012). Guidelines for Water Reuse. Report EPA/625/R-04/108. USEPA, Washington D.C., USA.

Vinitha, E. V., Mansoor Ahammed, M., & Gadekar, M. R. (2018). Chemical coagulation of greywater: modelling using artificial neural networks. *Water Science and Technology*, 2017(3), 869-877.

Winward, G. P. (2007). Disinfection of Greywater. Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Cranfield University Centre for Water Sciences, Department of Sustainable systems, School of Applied Sciences, p-189.

Wurochekke A. A., Harun, N. A., Mohamed R. M. S. R. y Kassim, A. H. B. M. (2014) Constructed Wetland of *Lepironia Articulata* for household greywater treatment. *APCBEE Proc.* 10, 103–109.



Wurochekke A. A., Mohamed R. M. S., Al-Gheethi A. A., Hauwa Atiku, H. M. Amir Y Matias-Peralta H. M. (2016). Household greywater treatment methods using natural materials and their hybrid system. *Journal of Water and Health* 914-928.



ANEXOS

ANEXO 1: Construcción del sistema de reutilización de AG regadera a nivel laboratorio

Para facilitar la descripción de la construcción del sistema de reutilización de AG precedentes de regadera, se elaboró un manual de instrucciones presentado a continuación.

Manual de instrucciones: sistema de reutilización de aguas grises de regadera

Materiales:

- 2 cubetas de 19 L c/u
- 1 placa de acrílico de 20 x 28 cm
- 2 placas de acrílico de 25 x 28 cm
- 4 adaptadores hembra de pvc de 1/2"
- 8 adaptadores macho de pvc de 1/2"
- 1 tuerca de fierro galvanizado de 1/2"
- Cinta teflón
- 1 bomba de agua para lavadora
- Pegamento instantáneo
- Bicarbonato de sodio
- 1 válvula de compuerta con cuerda interior de ambos lados
- 6 m de manguera plástica de 3/8 " de diámetro
- 2 m tubo de pvc sanitario de 1/2"
- 3 codos de 90° de 1/2"
- 1 tee de pvc sanitario de 1/2"



- 6 válvulas de pvc de $\frac{1}{2}$ "
- 3 tapas plásticas para coladera de 4" de diámetro
- 1 tubo de pvc sanitario de 4", 55 cm de altura
- 1 tubo de pvc sanitario de 4", 80 cm de altura
- 1 tubo de pvc sanitario de 4", 70 cm de altura
- 5 coples de pvc sanitario de 4"
- 3 tapas de pvc sanitario de 4"
- 6 pijas
- 3 abrazaderas omega de 4"
- 2 tapones $\frac{1}{2}$ "
- Grava de mármol de 13 mm de diámetro
- Grava natural para acuario de 6 mm de diámetro
- Grava natural para acuario de 4 mm de diámetro
- Arena sílice gruesa con diámetro efectivo de 1 mm
- Arena sílice gruesa con diámetro efectivo de 0.36 mm
- Ácido muriático
- Pegamento para pvc
- Silicón hidráulico
- Broca de manita de $\frac{3}{4}$ "
- 3 pares de ménsulas

Herramientas:

- Taladro



- Segueta
- Desarmador cruz / plano

Instrucciones:

Es importante tomar en cuenta que los medios filtrantes, así como el soporte (arena y grava), deben de encontrarse completamente limpios. Se recomienda lavar la grava primeramente con agua y jabón dejándola remojar por varios días para eliminar la suciedad fácil de remover. Este proceso debe repetirse las veces que sean necesarias y en caso de que las impurezas continúen adheridas a la grava, se puede aplicar cuidadosamente ácido muriático al agua natural y continuar remojando el medio filtrante hasta remover la suciedad con el equipo de seguridad apropiado (cubre bocas, guantes y lentes).

Trampa de grasas

1. Con ayuda del taladro y la broca de manita de $\frac{3}{4}$ ", perforar una de las cubetas por el centro 4 cm arriba del extremo inferior.
2. Aplicar pegamento para pvc en el adaptador macho de pvc de $\frac{1}{2}$ " del lado donde se encuentra la cuerda e introducirlo hasta el fondo en la perforación de la cubeta girándolo moderadamente. Enseguida, insertar la tuerca de fierro galvanizado hasta topar con la pared interior de la cubeta. Esperar algunos minutos el secado del pegamento en el material.
3. Con ayuda de la segueta, cortar 5 cm de tubo de pvc de $\frac{1}{2}$ ". Aplicar pegamento en un extremo e introducirlo en el adaptador macho girándolo moderadamente. Esperar algunos minutos el secado del pegamento del material.
4. Una vez que todo esté completamente seco, aplicar pegamento para pvc en el extremo libre del tubo de pvc de $\frac{1}{2}$ " e introducir cuidadosamente la bomba para lavadora de manera que la conexión para manguera se sitúe en la parte superior colocando una base debajo de la bomba para sostenerla. Esperar lo suficiente el secado del pegamento.
5. Introducir la manguera de $\frac{3}{8}$ " en la bomba, una vez dentro, aplicar pegamento instantáneo alrededor, seguido de bicarbonato de sodio manteniendo estática la



manguera. El bicarbonato de sodio debe agregarse rápidamente previniendo el secado del pegamento.

6. Aplicar pegamento (silicón hidráulico o pegamento instantáneo con bicarbonato) en los laterales y en la parte inferior de una placa de acrílico de 25 cm de altura para introducirla cerca de la orilla de la cubeta.
7. Realizar la función 6 con la segunda placa de acrílico de 25 cm de altura e introducirla en la orilla opuesta.
8. Aplicar pegamento (silicón hidráulico o pegamento instantáneo con bicarbonato) en los laterales de la placa de acrílico de 20 cm de altura e introducirla cuidadosamente en el medio de la cubeta sosteniéndola hasta asegurar el secado.

Tanque de distribución

1. Con ayuda del taladro y la broca de manita de $\frac{3}{4}$ ", perforar una de las cubetas por el centro 4 cm arriba del extremo inferior.
2. Aplicar 3 capas de cinta teflón alrededor del extremo de cuerda de un adaptador macho de $\frac{1}{2}$ " e introducirlo hasta el fondo en la perforación de la cubeta girándolo moderadamente e introducir por la parte interior de la cubeta, uno de los adaptadores hembra.
3. Cortar 5 cm de tubo de pvc de $\frac{1}{2}$ ", aplicar pegamento para pvc en uno de los extremos e introducirlo en el adaptador macho previamente enroscado en la cubeta y dejar secar.
4. Aplicar pegamento para pvc en el interior de un adaptador macho de $\frac{1}{2}$ " e introducirlo el extremo libre del tubo de $\frac{1}{2}$ " que se menciona en el paso 5. Esperar el secado del pegamento en el material.
5. Aplicar 3 capas de cinta teflón en la parte de la cuerda del adaptador macho mencionado en el paso 4 y enroscar cuidadosamente la válvula de compuerta de manera que la válvula se encuentre alineado con la manija en la parte superior.
6. Con otro de los adaptadores macho, aplicar 3 capas de cinta teflón en la parte de la cuerda e introducirlo en el otro extremo de la válvula girándolo 180° , aproximadamente.
7. Cortar 5 cm de tubo de pvc de $\frac{1}{2}$ ", aplicar pegamento para pvc en uno de los extremos e introducirlo en el adaptador macho conectado a la válvula de compuerta.



8. Aplicar pegamento para pvc en la parte interior de uno de los codos de pvc de 90° e introducirlo en el extremo libre del tubo de 1/2" mencionado en el paso 7. Esperar el secado del pegamento en el material.
9. Aplicar silicón hidráulico en uno de los extremos de la manguera de 1/2" e introducirla en el codo de 90° manteniéndola estática hasta cerciorarse que haya pegado correctamente.
10. Realizar dos perforaciones laterales (una en cada lado) con una broca de 3/8".
11. Situar el tanque de distribución en la parte más alta del sistema sobre un par de ménsulas previamente montadas sobre el muro e introducir con silicón el extremo de la manguera de 3/8 conectada a la bomba (en la trampa de grasas).
12. Realizar la misma acción del paso 11 pero del lado opuesto de la cubeta, introduciendo los 3 metros restantes de la manguera de 3/8", que desemboca en la trampa de grasas para indicar el nivel del agua en el tanque (by-pass)

Filtro de grava

1. Realizar la perforación correspondiente en el muro para empotrar el par de ménsulas que serán el sostén del filtro.
2. Aplicar pegamento sobre uno de los extremos del tubo pvc de 55 cm de altura e introducir rápidamente un cople de 4" girándolo moderadamente. Esperar el secado del pegamento.
3. Perforar un orificio justo en medio de la tapa de pvc de 1/2" e introducir uno de los adaptadores macho con cuerda.
4. Introducir una tapa plástica para coladera hasta el fondo del tubo de 4" quedando sostenida a la mitad del cople.
5. Meter cuidadosamente la grava de 13 mm cuidando que el espesor se mantenga uniforme, seguida de la grava de 4 mm y al final, la grava de 6 mm para. Situar el tubo sobre las ménsulas para facilitar el proceso restante.
6. Cortar 5 cm de tubo de pvc de 1/2", aplicar pegamento para pvc en uno de sus extremos e introducirlo en el adaptador macho. Una vez seco, realizar la misma acción para introducir otro adaptador macho en el tubo.
7. Conectar la tee de pvc de 1/2" en el adaptador macho del paso 6.



8. Cortar 4 fragmentos de tubo de $\frac{1}{2}$ " de 8 cm, 2 de estos conectados en cada uno de los laterales de la tee de pvc y conectar a cada tubo su respectivo codo de 90° .
9. Introducir los 2 fragmentos de tubo restantes en cada uno de los codos para finalmente añadir las 2 válvulas de $\frac{1}{2}$ " que alimentarán los filtros de arena.
10. Colocar una rejilla metálica en el borde del filtro. Cortar un pedazo de tela de organza de 10 cm de diámetro y pegarlo encima de la rejilla.

Filtros de arena

1. Realizar la perforación correspondiente en el muro para empotrar el par de ménsulas que serán el sostén de cada filtro.
2. Aplicar pegamento sobre uno de los extremos del tubo pvc de 70 cm de altura e introducir rápidamente un cople de 4" girándolo moderadamente. Mientras finaliza el secado, cortar 15 cm de tubo de 4" y pegarlo a otro cople. Una vez seco el pegamento, unir el tubo de 15 cm con el cople pegado al tubo de 70 cm. Mantener estático para completar el secado.
3. Perforar un orificio de $\frac{1}{2}$ " a la mitad de la parte superior del cople que sostiene a todo el tubo.
4. Cortar 23 cm de tubo de $\frac{1}{2}$ " y realizar 10 perforaciones de 0.5 cm de diámetro a través del tubo para permitir la salida del agua. Posteriormente, introducir el tubo en el orificio del cople previamente realizado y pegar el tapón de $\frac{1}{2}$ " en uno de los extremos para evitar la salida de agua.
5. Pegar una válvula de $\frac{1}{2}$ " al tubo pequeño.
6. Perforar un orificio de $\frac{1}{2}$ " en el centro de una tapa de pvc 4" e introducir un adaptador macho ajustándolo con un adaptador hembra por la parte interior.
7. Pegar la tapa de pvc en la parte inferior del último cople del tubo de 4".
8. Unir un fragmento pequeño de tubo al adaptador macho y pegar una válvula de $\frac{1}{2}$ " "como purga de lodo".
9. Situar el filtro sobre una base apoyada en las ménsulas y meter una de las rejillas plásticas para coladera para evitar que el medio de soporte se traspase.

10. Acomodar uniformemente la grava de 13 mm, seguido de la grava de 6 mm y la grava de 4 mm. Finalmente, añadir cuidadosamente la arena fina y encima, la arena gruesa.
11. Colocar una rejilla metálica para fregadero en el borde del filtro. Cortar un pedazo de tela de organza de 10 cm de diámetro y pegarlo encima de la rejilla.

Llevar a cabo las mismas instrucciones para construir el segundo filtro. La única diferencia será el espesor del lecho filtrante.

ANEXO 2: Sistema de tratamiento de reutilización de AG de regadera y componentes

Dispositivo de la trampa de grasas



Figura 15. Contenedor y conducto de desagüe trampa de grasas.



Figura 16. Paredes de separación de acrílico en el interior del contenedor.

Depósito de alimentación de AG



Figura 17. Contenedor y conducto de desagüe.



Figura 18. By-pass (lado derecho). Influyente (lado izquierdo)

Filtro de grava



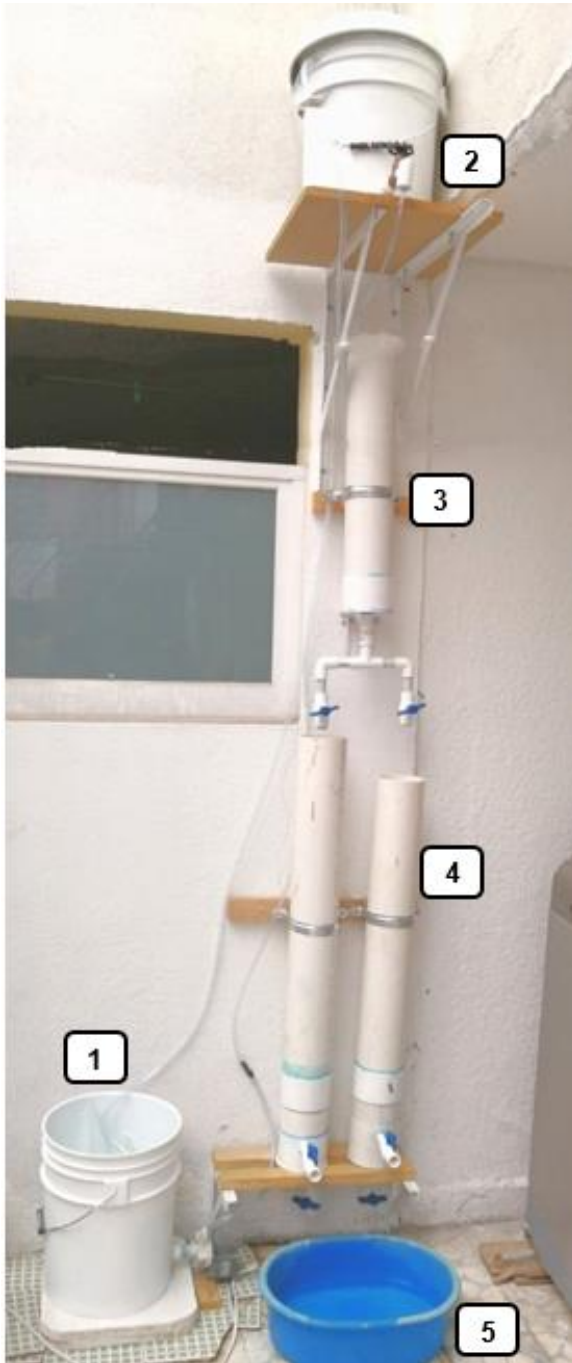
Figura 19. Contenedor y conductos de desagüe.

Filtros de arena (FLA)



Figura 20. Contenedores, conductos de desagüe y sedimentadores FLA.

Sistema de reutilización de AG de regadera



1. Trampa de grasas
2. Depósito de alimentación
3. Filtro de grava
4. Filtros de arena
5. Recolección del efluente

Figura 21. Sistema de reutilización de AG provenientes de regadera



Figura 22. Rejilla metálica.



Figura 23. Retención de sólidos con rejilla metálica y tela de organza.



ANEXO 3: Medición de parámetros de AG de regadera

| Identificación y fecha de muestreo | | Día de funcionamiento | Parámetro | | | | | |
|------------------------------------|--------------|-----------------------|------------|----------------|-----|-----------|-----------|------------|
| | | | DQO (mg/L) | TURBIDEZ (UNT) | pH | ST (mg/L) | SS (mg/L) | SDT (mg/L) |
| SIN CLORO | | | | | | | | |
| Efluente 1 | | | | | | | | |
| A | IN 03sep21 | 1 | 341.5 | 262.3 | 6.3 | 506 | 130 | 376 |
| L | IN 08sep21 | 6 | 671 | 284.7 | 6.9 | 565 | 170 | 395 |
| B | EF 1 03sep21 | 1 | 199.5 | 37 | 6.6 | 574 | 56 | 518 |
| F | EF 1 04sep21 | 2 | 147.5 | 7.5 | 8.2 | 420 | 47 | 373 |
| J | EF 1 08sep22 | 6 | 195.5 | 29.9 | 7.8 | 476 | 14 | 462 |
| O | EF 1 12sep21 | 10 | 187 | 11.3 | 8.1 | 503 | -- | -- |
| Efluente 2 | | | | | | | | |
| C | EF 2 03sep21 | 1 | 233.5 | 48.8 | 6.8 | 516 | 31 | 485 |
| G | EF 2 04sep21 | 2 | 170.5 | 17.1 | 8.1 | 363 | 11 | 363 |
| K | EF 2 08sep21 | 6 | 227 | 42.9 | 7.6 | 398 | 20 | 378 |
| P | EF 2 12sep21 | 10 | 195.5 | 20.2 | 7.9 | 461 | 24 | 437 |
| CON CLORO | | | | | | | | |
| Efluente 1 | | | | | | | | |
| D | EF 1 03sep21 | 1 | 144.5 | 32.97 | 8.4 | 1000 | 26.5 | 973.5 |
| H | EF 1 06sep21 | 4 | 239 | 46.3 | 8.2 | 746 | 24 | 722 |
| M | EF 1 10sep21 | 8 | 163.5 | 20.8 | 8.3 | 930 | 20.1 | 909.9 |
| Efluente 2 | | | | | | | | |
| E | EF 2 03sep21 | 1 | 170.5 | 36.3 | 8.6 | 944 | 27 | 917 |
| I | EF 2 06sep21 | 4 | 270.5 | 53.8 | 8.5 | 976 | 24 | 952 |
| N | EF 2 10sep21 | 8 | 205 | 32 | 8.4 | 939 | 16 | 923 |

| Identificación y fecha de muestreo | | Día de funcionamiento | Parámetro | | | | |
|------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | | DBO ₅ (mg/L) | G y A (mg/L) | Alcalinidad (mg/L CaCO ₃) | Acidez (mg/L CaCO ₃) | Dureza (mg/L CaCO ₃) |
| SIN CLORO | | | | | | | |
| Efluente 1 | | | | | | | |
| A | IN 03sep21 | 1 | 280.8 | 224 | 148.23 | 5.94 | 101.2 |
| B | EF 1 03sep21 | 1 | 111.3 | 199.039488 | 201.3 | 3.96 | 110 |
| C | EF 2 03sep21 | 1 | 117.3 | 3492.08473 | 203.13 | 3.96 | 107.8 |
| D | EF 1 03sep21 | 1 | ND | 73.5106383 | 841.8 | ND | 112.2 |
| E | EF 2 03sep21 | 1 | ND | 57.5170843 | 1098 | ND | 88 |
| ND: no detectado | | | | | | | |