

Manual de instalación, operación y mantenimiento de un prototipo a escala de laboratorio, para el tratamiento de agua gris clara (AGC) producida a nivel residencial en una vivienda unifamiliar



Elaborado por:

Karol Daniela Galvis Niño
Estudiante de ingeniería química

Juan Sebastián Rincón García
Estudiante de ingeniería civil

Revisado por:

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña
Profesor planta de Ingeniería Civil

Daniela Cristina Rey Romero
Estudiante de doctorado en ingeniería química

Jessica Patricia Burgos Arias
Estudiante de Maestría en ingeniería civil

Fecha de Revisión:

18/09/2023

Versión del documento:

Versión 1

Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
2023

Tabla de contenido

1	Introducción	1
2	Descripción del tren de tratamiento.....	3
2.1	Sedimentación y trampa de grasas.....	3
2.2	Filtración mediante MUF	4
3	Montaje del tren de tratamiento	5
3.1	Estructuras metálicas y componentes adicionales	5
3.2	Sedimentación y trampa de grasas.....	7
3.3	Filtración mediante MUF	7
3.3.1	Instalación de la MUF	8
3.3.2	Activación de la MUF:.....	9
3.4	Pruebas de flujo.....	11
3.4.1	Pruebas de estanqueidad	11
3.4.2	Prueba de funcionamiento de la membrana.....	11
3.4.3	Determinación de las condiciones de operación	12
3.4.4	Desinfección del tren de tratamiento con solución de NaOCl.....	14
4	Recolección, transporte y análisis del AGC para evaluar el prototipo	14
4.1	Parámetros seleccionados para medición.....	14
4.2	Recolección y transporte del AGCC requerida para realizar las corridas del tren de tratamiento	15
4.2.1	Recolección del AGCC generada en la vivienda.....	15
4.2.2	Transporte del AGCC generada en la vivienda.....	16
4.3	Recolección y transporte de las muestras de AGC a partir de las cuales se determinan los parámetros de calidad del agua.	17
4.3.1	Recolección de las muestras de AGC.....	17
4.3.2	Transporte de las muestras de AGC.....	18
5	Mantenimiento y actividades adicionales	18
5.1	Actividades de mantenimiento diario.....	18
5.2	Actividades de mantenimiento ocasional	20
6	Referencias	20
7	Anexo 1.	1
7.1	Procedimientos realizados en los días de corrida del tren de tratamiento	1
7.1.1	Actividades llevadas a cabo en la vivienda de muestreo.....	1
7.1.2	Actividades llevadas a cabo con el prototipo a escala de laboratorio	2

7.2	Actividades llevadas a cabo para la determinación de los parámetros de calidad de agua analizados en las instalaciones del laboratorio del GPH (pH, CE y turbidez)	5
7.2.1	Determinación del pH y la CE	5
7.2.2	Determinación de la turbidez	6
7.2.3	Calibración de los equipos.....	7

Lista de Figuras

Figura 1.	Esquema de la estructura y contenido de la presente guía.	1
Figura 2.	Diagrama de flujo de las actividades de la fase experimental.....	2
Figura 3.	Etapas del tren de tratamiento.	3
Figura 4.	Prototipo de sedimentador y trampa de grasas.	3
Figura 5.	CUBE Mini FM 045 con accesorio.....	4
Figura 6.	Estructuras metálicas para ensamblaje del tren de tratamiento. a) Primera estructura metálica; b) Segunda estructura metálica.....	5
Figura 7.	Componentes adicionales para realizar el ensamblaje del tren de tratamiento.	6
Figura 8.	Bomba de agua.....	6
Figura 9.	Montaje del STG.	7
Figura 10.	Instalación de MUF en configuración de dos baldes. a) opción propuesta por Martin Membrane Systems (2022); b) montaje realizado.	8
Figura 11.	Conexión etapa de sedimentación a través del tubo plástico y accesorio de goma.	9
Figura 12.	Adaptación del accesorio de goma del módulo de la MUF.	9
Figura 13.	Proceso de activación de la MUF.....	10
Figura 14.	Pruebas de estanqueidad. a) STG; b) recipiente inferior de la MUF.....	11
Figura 15.	Prueba de remoción de la membrana, muestra de la mezcla de agua más arcilla (izquierda) vs muestra del líquido filtrado a través de la MUF (derecha).....	12
Figura 16.	Condiciones de operación del prototipo a escala de laboratorio.	12
Figura 17.	MUF funcionando a tasa de flujo aproximada de 10 L/hora.....	13
Figura 18.	Instalación de recipientes de recolección de AGC. a) y b) embudos y probetas de 1L para los lavamanos; c) tinas de 60 L para las duchas.	15
Figura 19.	Tanque general de recolección de AGC.....	16
Figura 20.	Recipiente de transporte de AGC.....	16
Figura 21.	Muestreo del AGC tratada.....	17
Figura 22.	Mantenimiento diario de la membrana.....	19
Figura 23.	Etiquetado de los recipientes de muestreo.....	19

Lista de Tablas

Tabla 1.	Características principales de la MUF mini CUBE (Martin Membrane Systems, 2023; Ordoñez, 2022).	5
Tabla 2.	Parámetros de calidad del agua seleccionados para la evaluación del tren de tratamiento.....	14
Tabla 3.	Consideraciones para tener en cuenta para el adecuado muestreo del agua.	17

1 Introducción

El objetivo principal de la presente guía es proporcionar la información necesaria para la instalación, operación y mantenimiento de un prototipo a escala de laboratorio, cuyo propósito es el tratamiento de AGC producidas en una vivienda unifamiliar que para el caso de esta guía se encuentra ubicada en el barrio “La Victoria”, en la ciudad de Bucaramanga, Santander, Colombia. El prototipo consiste en una etapa de “sedimentación y trampa de grasas” seguida de una etapa de “filtración mediante membranas de ultrafiltración”, el cual está basado en modificaciones a los diseños del estudio realizado por Álvarez y Bonilla (2020), sin considerar la etapa de desinfección; las modificaciones fueron realizadas por Burgos (2024), autora de proyecto de maestría al cual está vinculada esta investigación, que fue realizado en paralelo con el presente manual.

Este prototipo permitirá evaluar el desempeño del tratamiento de AGC mediante membranas de ultrafiltración (MUF) y tratamientos complementarios con fines de aprovechamiento dentro del marco del trabajo de grado realizado por Galvis y Rincón (2023) titulado “Evaluación del desempeño de membranas de ultrafiltración y tratamientos complementarios a escala de laboratorio para la reutilización de aguas grises claras en el contexto del Área Metropolitana de Bucaramanga”. Adicionalmente, con esta guía se busca facilitar el uso de estos prototipos en futuras investigaciones, así mismo, se articula al marco de Desarrollo Sostenible planteado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para el año 2030, a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 y 11, “agua limpia y saneamiento” y “ciudades y comunidades sostenibles”, respectivamente (ONU, 2014).

En la Figura 1 se presenta un esquema que resume la estructura y el contenido de la presente guía. Caso similar a la Figura 2, donde se presenta un diagrama de flujo que resume como llevar a cabo la fase experimental.

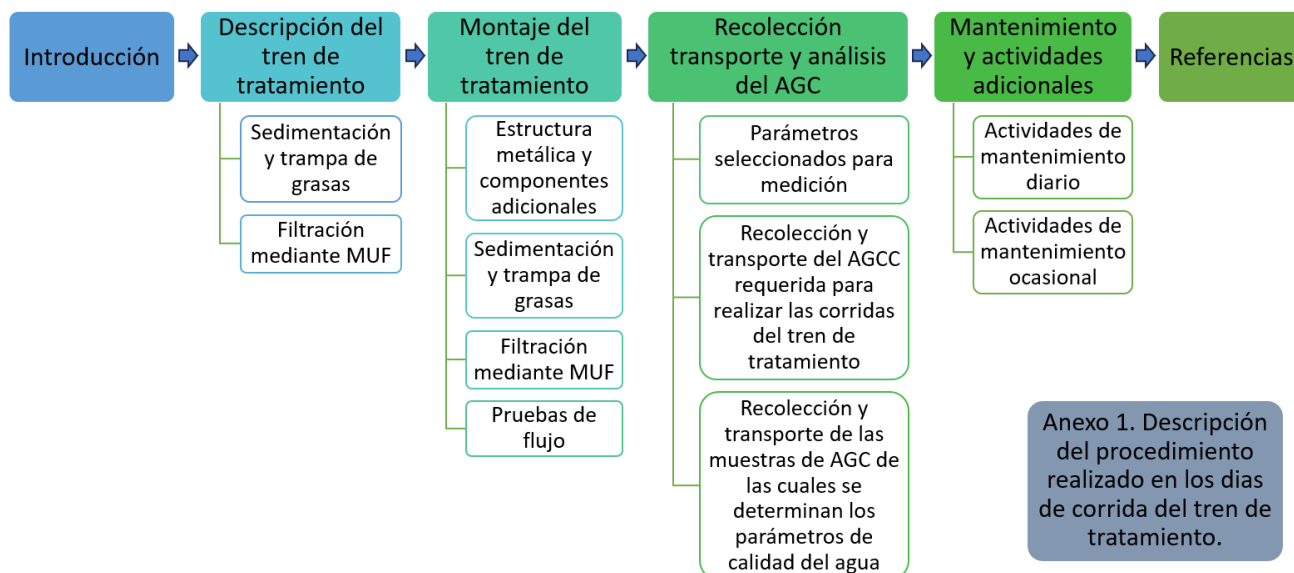


Figura 1. Esquema de la estructura y contenido de la presente guía.

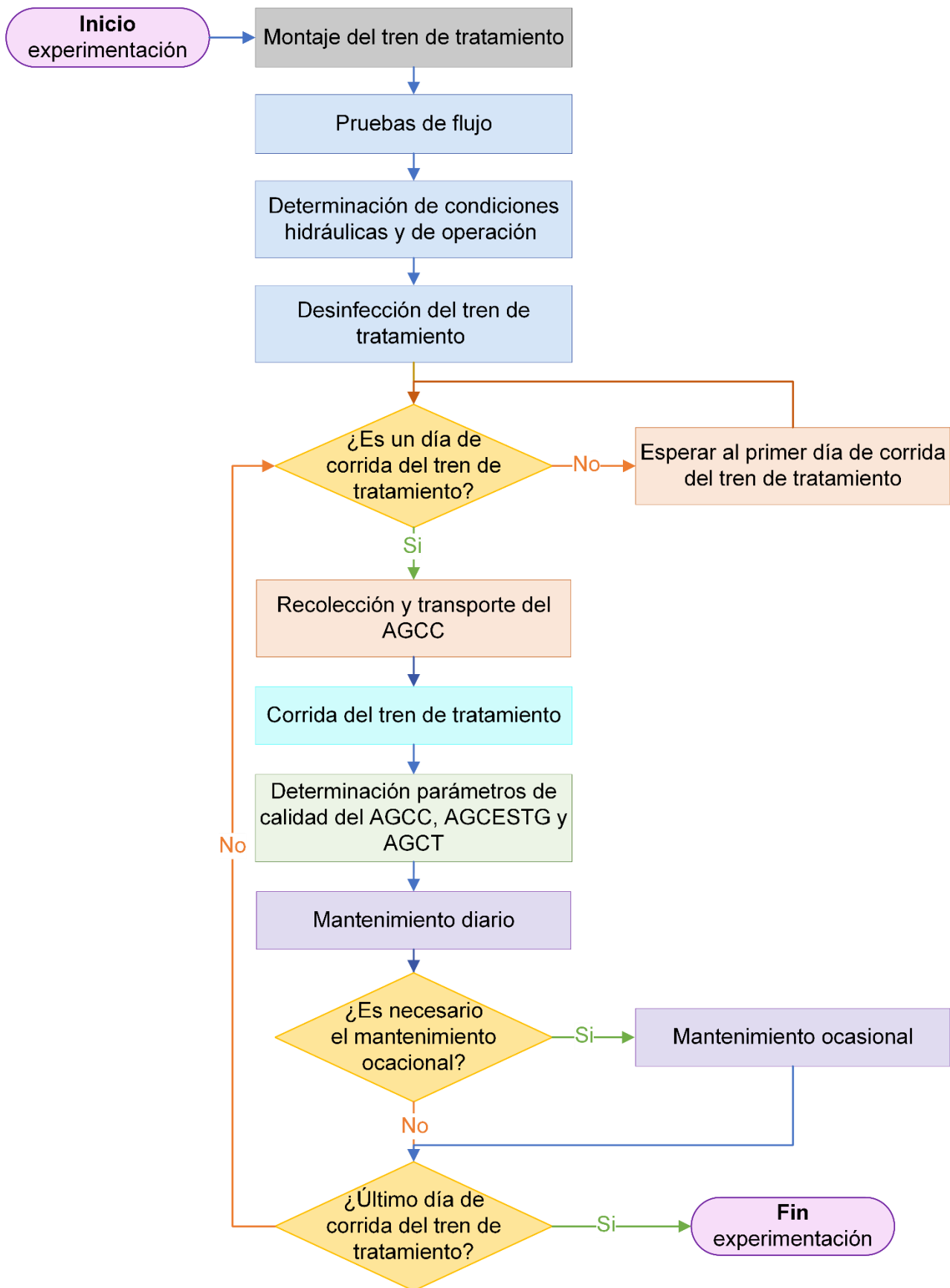


Figura 2. Diagrama de flujo de las actividades de la fase experimental.

2 Descripción del tren de tratamiento

El prototipo de tren de tratamiento descrito en este manual cuenta con dos etapas: “sedimentación y trampa de grasas”, y “filtración mediante MUF”. En la Figura 3 se observa el esquema de las etapas del tren de tratamiento.

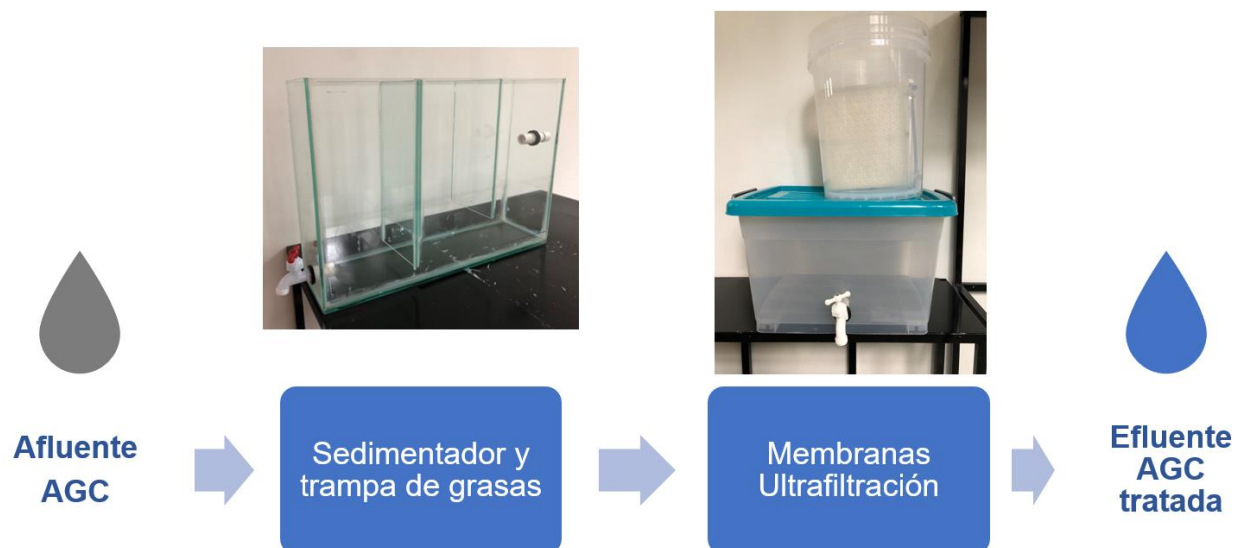


Figura 3. Etapas del tren de tratamiento.

A continuación, se presenta una descripción de los procesos y las tecnologías empleadas en cada etapa.

2.1 Sedimentación y trampa de grasas

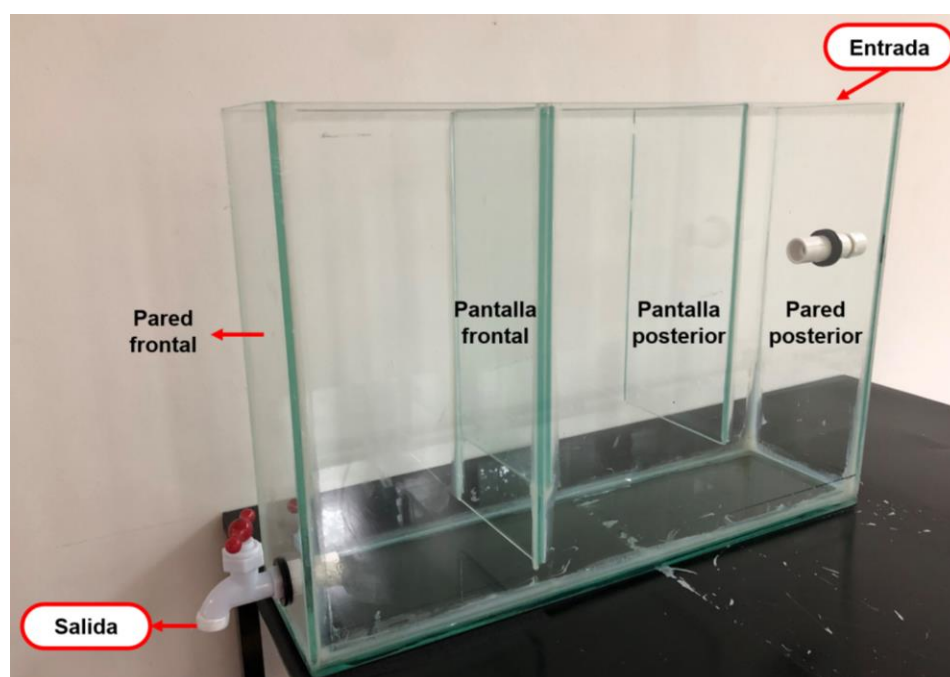


Figura 4. Prototipo de sedimentador y trampa de grasas.

Esta etapa se lleva a cabo mediante un sedimentador y trampa de grasas (STG) (ver Figura 4), el cual es un recipiente de vidrio de dimensiones 61x16x42 cm, con espesor de 2 mm. A su vez, con el objetivo de facilitar la remoción de partículas y ayudar a la remoción de grasas y aceites en las AGC estudiadas, se cuenta con dos pantallas del mismo material. La primera, de dimensiones 16x32 cm, está ubicada a 10 cm del fondo del sedimentador y a 20 cm respecto a la pared posterior; la segunda, de dimensiones 16x39 cm, está ubicada a 3 cm del fondo del sedimentador y a 20 cm respecto a la pared frontal del sedimentador.

En cuanto a conectividad con el sistema de tratamiento, el STG cuenta con un orificio de entrada de diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada centrado en la pared posterior del recipiente a una altura de 26 cm respecto al fondo del sedimentador, donde se puede instalar un tramo de PVC con el propósito de alimentar el sedimentador cuando se opere bajo flujo continuo; en este caso, debido a que se opera en flujo tipo corridas (batch), se puede prescindir de este orificio o instalar un tapón de PVC y suministrar el agua para que choque con la pantalla posterior. Así mismo, se cuenta con un orificio de salida con un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada centrado en la pared frontal del recipiente a una altura de 3 cm respecto al fondo del sedimentador, en el que se instala una llave de paso de $\frac{1}{2}$ pulgada; esta modificación se realiza con el fin de restringir la profundidad a partir de la cual se permita obtener el efluente del sedimentador primario dejando espacio suficiente para la sedimentación de partículas.

2.2 Filtración mediante MUF

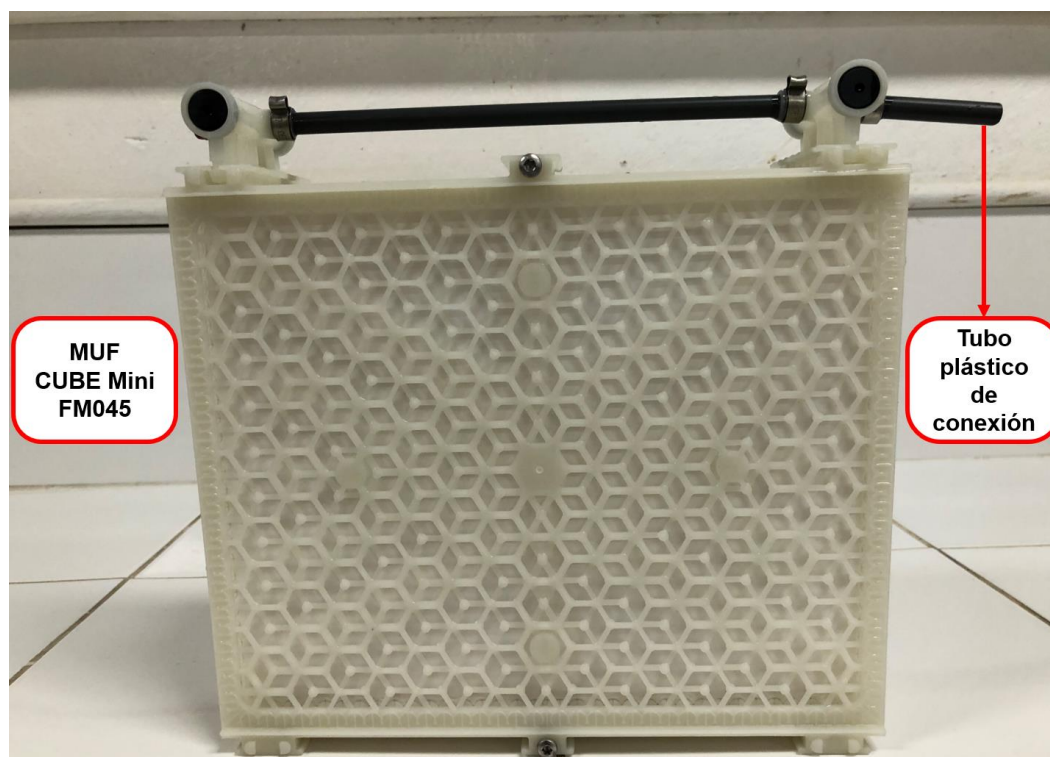


Figura 5. CUBE Mini FM 045 con accesorio.

Para la etapa de filtración se utilizó una MUF elaborada por la empresa Martin Membrane Systems, específicamente, un prototipo de la MUF CUBE Mini FM 045, también conocida como “mini CUBE” y uno de sus accesorios (ver Figura 5). A continuación, en la Tabla 1 se presentan algunas de las características principales de la MUF.

Tabla 1. *Características principales de la MUF mini CUBE* (Martin Membrane Systems, 2023; Ordoñez, 2022).

Características principales de la MUF mini Cube	
Separación	Ultrafiltración
Tamaño de poro, nominal	35 nm aprox.
Tamaño de poro, máximo	0.1 μm
Área de la membrana	0.45 m^2
Espaciamiento entre los módulos	6 mm
Largo	250 mm
Ancho	75 mm
Alto	260 mm
Material	PES Type 2

3 Montaje del tren de tratamiento

Las especificaciones necesarias para realizar el montaje del prototipo a escala de laboratorio para el tren de tratamiento de AGC se describen detalladamente a continuación.

3.1 Estructuras metálicas y componentes adicionales

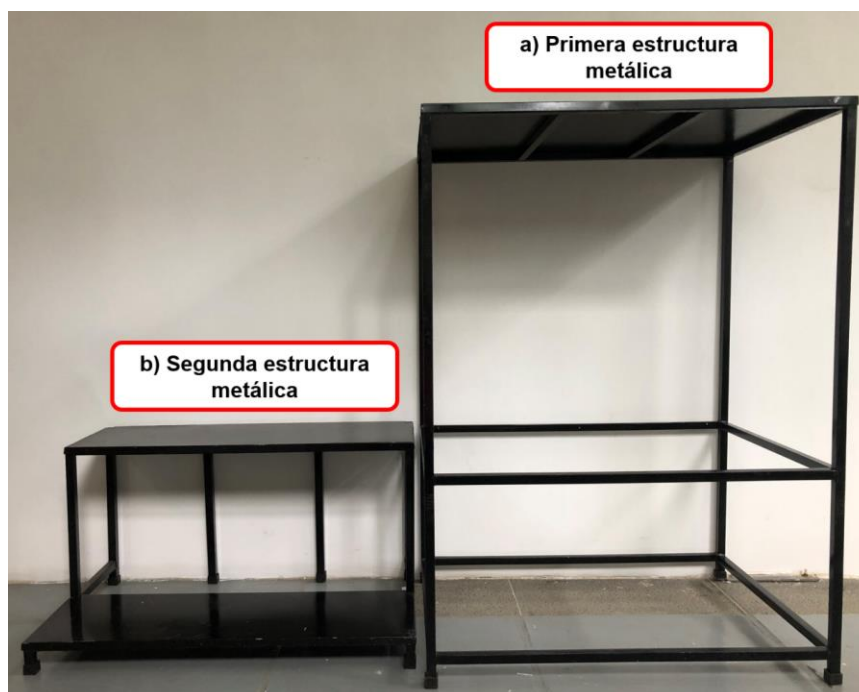


Figura 6. *Estructuras metálicas para ensamblaje del tren de tratamiento. a) Primera estructura metálica; b) Segunda estructura metálica.*

Con el objetivo de facilitar el montaje del prototipo a escala de laboratorio y que el sistema funcione por acción de la gravedad, se adaptan dos estructuras metálicas, tal y como se observa en la Figura 6. En la primera estructura de dimensiones 1.01x1.40x0.71 m, se ubica el STG (ver Figura 6.a.); mientras que la segunda cuenta con dos niveles, en el nivel superior con dimensiones de 1.01x0.33x0.20 m se sitúan los baldes necesarios para llevar a cabo el proceso de filtración (ver Figura 6.b.), mientras que el nivel inferior cuenta con las siguientes dimensiones 1.01x0.08x0.33 m. Ambas estructuras se encuentran ensambladas por conexiones soldadas de tubería cuadrada de 1 pulgada.

En el caso práctico de esta guía, para asegurar el correcto funcionamiento del prototipo, es necesario añadir otros componentes adicionales tales como los detallados en la Figura 7. La bomba de agua utilizada (ver Figura 7b y 8) cuenta con una potencia de 9.3 W que permite operar a una tasa de flujo máxima de 10.2 L/min y elevar el agua hasta una altura máxima de 1.08 m.



Figura 7. Componentes adicionales para realizar el ensamblaje del tren de tratamiento.
a) Manguera plástica; b) Bomba de agua; c) Conexión tipo “Y”; d) Abrazadera de metal;
e) Empaques; f) Cinta de teflón.



Figura 8. Bomba de agua.

3.2 Sedimentación y trampa de grasas

El STG se ubica en la parte superior de la primera estructura metálica (ver Figura 9), donde por medio de una manguera conectada a la bomba se suministra el afluente, ya sea agua potable (de la red de distribución domiciliar) para las pruebas de flujo, o AGC cruda (AGCC) recolectada en la vivienda, requerida tanto para las pruebas de flujo como para las corridas del tren de tratamiento. En la llave se conecta un accesorio tipo “Y” de ½ pulgada de PVC, donde se adapta una manguera que va hasta el primer recipiente del proceso de filtración mediante MUF y otra manguera más corta dirigida al proceso de filtración realizado a partir de un filtro lento de arena (FLA), este último hace parte de la investigación realizada en paralelo a la cual está vinculado este manual, pero no pertenecen a los alcances de este manual en específico.

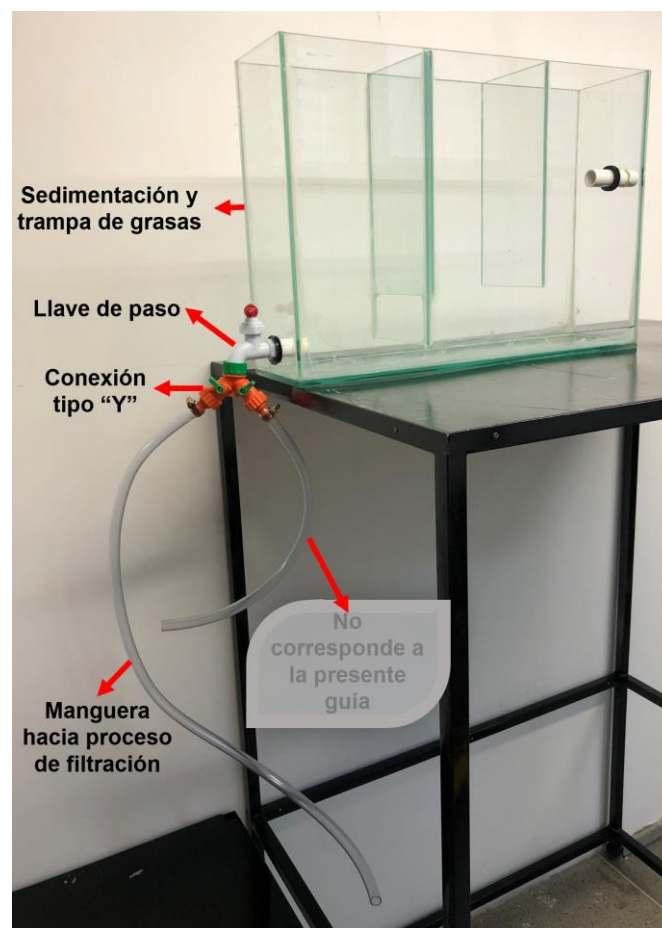


Figura 9. Montaje del STG.

3.3 Filtración mediante MUF

Las consideraciones para la instalación, operación y mantenimiento de la etapa de filtración mediante MUF, se basan en las indicaciones de funcionamiento y las recomendaciones brindadas por la empresa Martin Membrane Systems, donde se menciona que es necesario realizar dos procesos previos a la implementación de la membrana en el tren de tratamiento, los cuales son la instalación y activación de la MUF.

3.3.1 Instalación de la MUF

La instalación de la MUF puede ser realizada de acuerdo con diferentes configuraciones según la necesidad de tratamiento. En este caso, para la etapa de filtración se utiliza la configuración de dos baldes conectados verticalmente (ver Figura 10), el montaje realizado cuenta con el recipiente superior (con un volumen de 18 L) en el que se encuentra el módulo de filtración, el cual tiene contacto con el agua proveniente del STG de la etapa anterior; y el recipiente inferior (con un volumen de 40 L) encargado de recolectar el agua filtrada como efluente de la MUF.

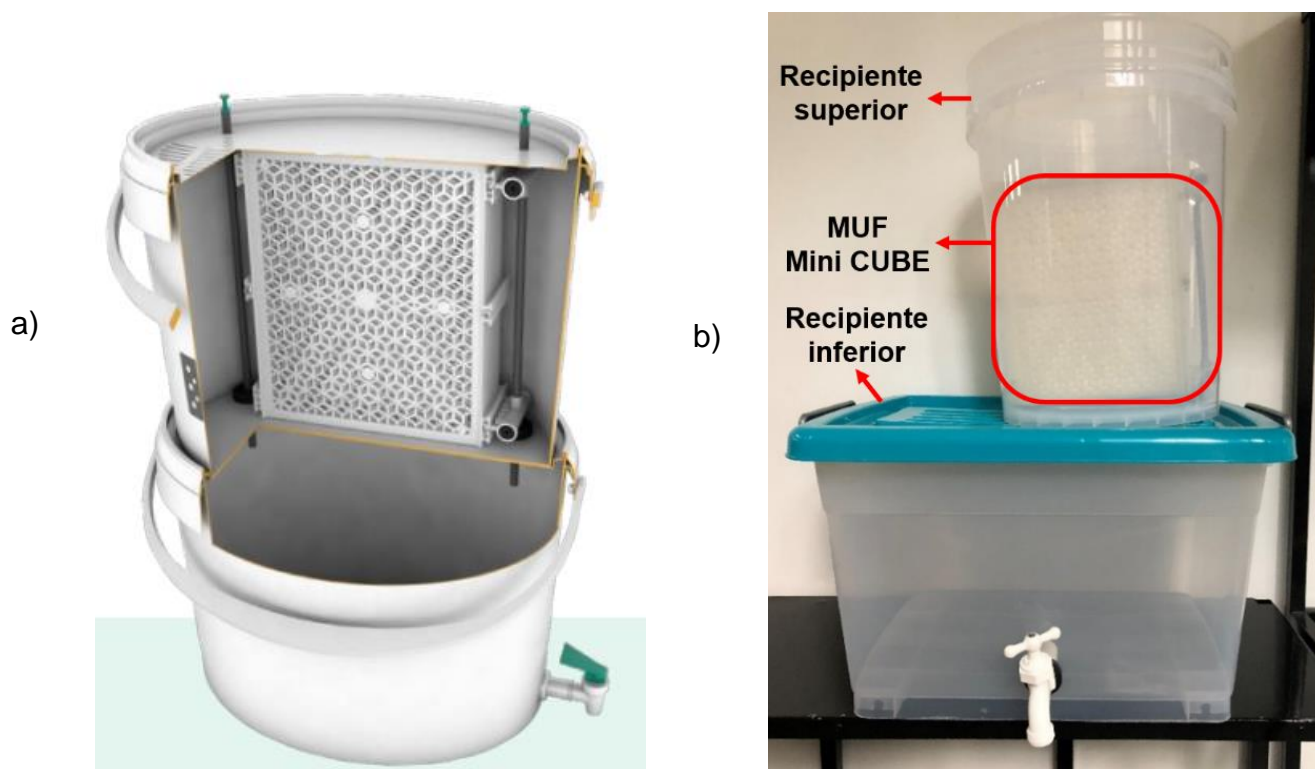


Figura 10. Instalación de MUF en configuración de dos baldes. a) opción propuesta por Martin Membrane Systems (2022); b) montaje realizado.

El recipiente superior se conecta con el inferior a través de un tubo plástico de 8 mm de diámetro (incluido por el fabricante) que se inserta en la membrana (ver Figura 11). Para ello, es necesario realizar un orificio de 20 mm de diámetro en la base del recipiente superior, donde se adapta un accesorio de goma (incluido por el fabricante) que permite el paso del tubo plástico evitando fugas en la conexión (ver Figura 12). Del mismo modo, en la tapa del recipiente inferior se realiza un orificio de 8 mm de diámetro (alineado con el orificio del recipiente superior) que permita insertar el tubo plástico por donde saldrá el agua filtrada y posteriormente, será recolectada en el recipiente inferior. Así mismo, el recipiente inferior cuenta con una llave de paso de PVC con diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada para permitir el flujo del AGC tratada mediante la MUF.

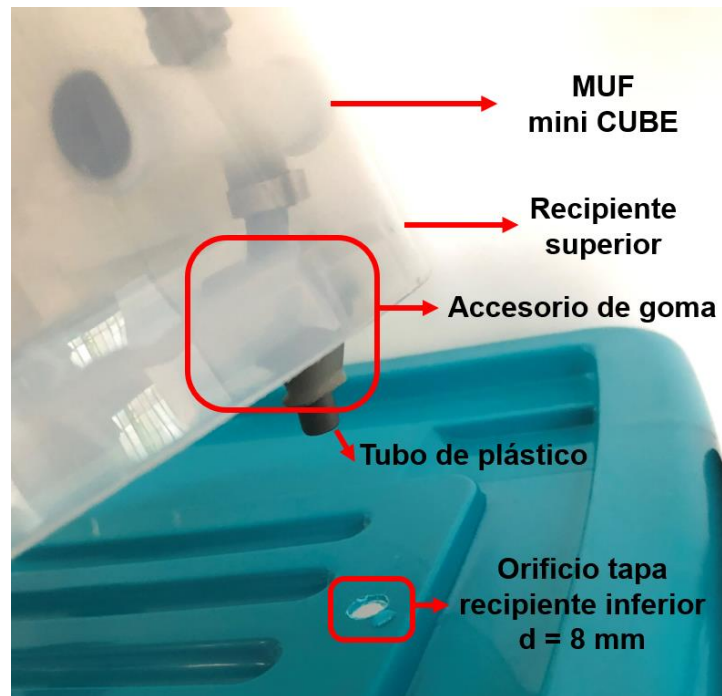


Figura 11. Conexión etapa de sedimentación a través del tubo plástico y accesorio de goma.

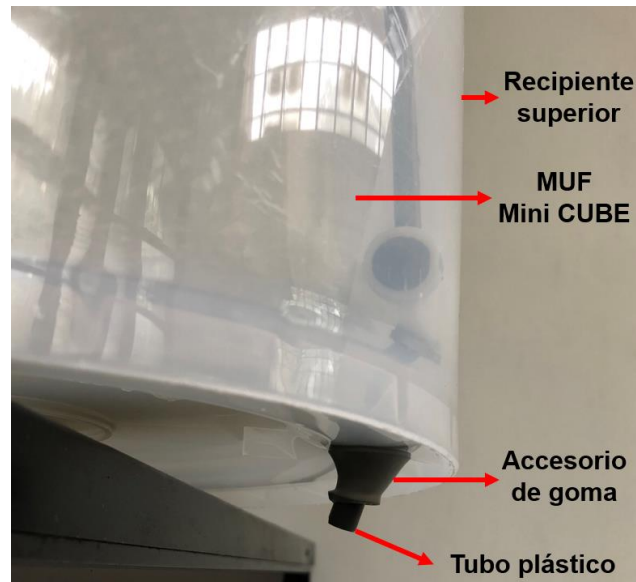


Figura 12. Adaptación del accesorio de goma del módulo de la MUF.

3.3.2 Activación de la MUF:

El proceso de activación de la MUF (ver Figura 13) se realiza con el fin de asegurar el flujo completo a través de la membrana. Así mismo, permite limpiar la membrana, eliminando posibles contaminantes patógenos contenidos en ella. Con este propósito, se debe sumergir la MUF en una solución de hipoclorito de sodio (NaOCl) de 500 ppm, a 20°C durante 3 horas (Martin Membrane Systems, 2018). A continuación, se describen las actividades necesarias para realizar dicho proceso:

1. Lavar el recipiente de activación con agua potable, una esponja blanda de limpieza y jabón neutro. Es importante destacar que dicho recipiente debe tener una altura adecuada (mínimo de 31 cm), de modo que la MUF quede totalmente sumergida y se aseguren los 5 cm de columna de agua para su correcto funcionamiento (para más información sobre esta condición consultar la sección 3.4.3.).
2. Preparar una solución de hipoclorito de sodio (NaOCl) de 500 ppm (C_2). Para ello, se diluye solución de cloro doméstico, el cual tiene una concentración inicial de 5.25% de NaOCl, equivalente a 52.500 ppm (C_1); el volumen de la solución resultante debe ser equivalente a los 18 L (V_2) de la capacidad del recipiente de activación. Para encontrar la cantidad de cloro que se debe añadir (V_1), se utiliza la siguiente relación:

$$V_1 \cdot C_1 = V_2 \cdot C_2 ; \text{ de la cual se obtiene } V_1 = 0.17 \text{ L}$$

3. Introducir la MUF dentro del recipiente de activación asegurando que quede completamente sumergida en la solución preparada anteriormente durante un tiempo de 3 horas, procurando mantener una temperatura de 20°C durante este proceso.
4. Después del período de contacto con la solución de NaOCl, retirar la MUF del recipiente y sumergir en un recipiente con agua potable, de manera que se puedan remover residuos de la solución empleada en la activación. Así mismo, durante las pruebas de flujo se debe realizar al menos una corrida de filtración con agua potable para asegurar que haya una limpieza adecuada de la MUF previo a su operación con el AGC.
5. Desde que se realice la activación de la MUF mediante el procedimiento descrito anteriormente, se debe mantener sumergida en agua potable hasta su posterior uso; asegurando que el agua donde se encuentre debe ser cambiada en un periodo no mayor a un mes.



Figura 13. *Proceso de activación de la MUF.*

3.4 Pruebas de flujo

Se deben realizar pruebas de flujo con el fin de determinar las condiciones hidráulicas y de operación tales como tasas de flujo, tiempos de retención hidráulica, presiones de operación, entre otras; las cuales son requeridas en cada etapa para operar de manera eficiente durante el proceso de tratamiento. Así mismo, se verifica que no existan fisuras, fugas o fallas en el sistema. Cabe mencionar que la mayoría de las pruebas de flujo se realizan con agua potable a no ser que se exprese lo contrario.

3.4.1 Pruebas de estanqueidad

Las pruebas de estanqueidad se realizan con el fin de verificar que el sistema no presente fallas tales como fisuras, derrames, fugas, etc. Para ello, se llena el STG (ver Figura 14a) y el recipiente inferior de la MUF (ver Figura 14b) hasta una altura considerable que permita evidenciar y controlar que no presente ninguna de las fallas mencionadas anteriormente durante un periodo de 24 horas. Llegado el caso de presentar alguna falla se debe verificar la necesidad de incluir algún accesorio o mejorar la calidad de la conexión en cuestión.

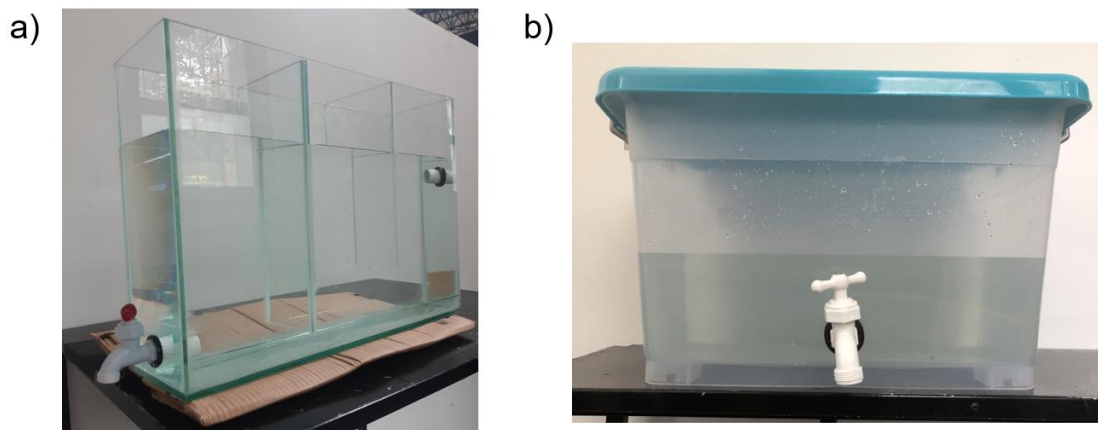


Figura 14. Pruebas de estanqueidad. a) STG; b) recipiente inferior de la MUF.

3.4.2 Prueba de funcionamiento de la membrana

En el caso particular de esta guía, durante el proceso de determinación de las condiciones hidráulicas de operación (sección 3.4.3), se observó una tasa de flujo acorde al funcionamiento esperado. Tras verificar que no se presentaban fallas en el montaje, se contactó con el proveedor de esta, quien sugirió realizar una prueba de remoción de turbidez para comprobar que la MUF estuviera operando correctamente llegado el caso en que el porcentaje de remoción fuera alto (ver Figura 15). La prueba consistió en preparar una mezcla de agua potable con arcilla y hacer fluir esta mezcla a través de la membrana, con el objetivo de medir la turbidez antes y después de pasar por la MUF, y de esta manera conocer la eficiencia de remoción de turbidez de esta, concluyendo que esta MUF funcionaba correctamente.

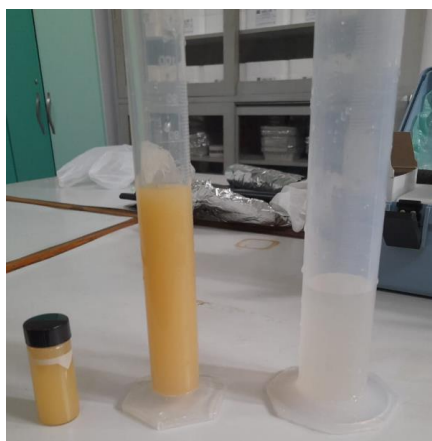


Figura 15. Prueba de remoción de la membrana, muestra de la mezcla de agua más arcilla (izquierda) vs muestra del líquido filtrado a través de la MUF (derecha).

3.4.3 Determinación de las condiciones de operación

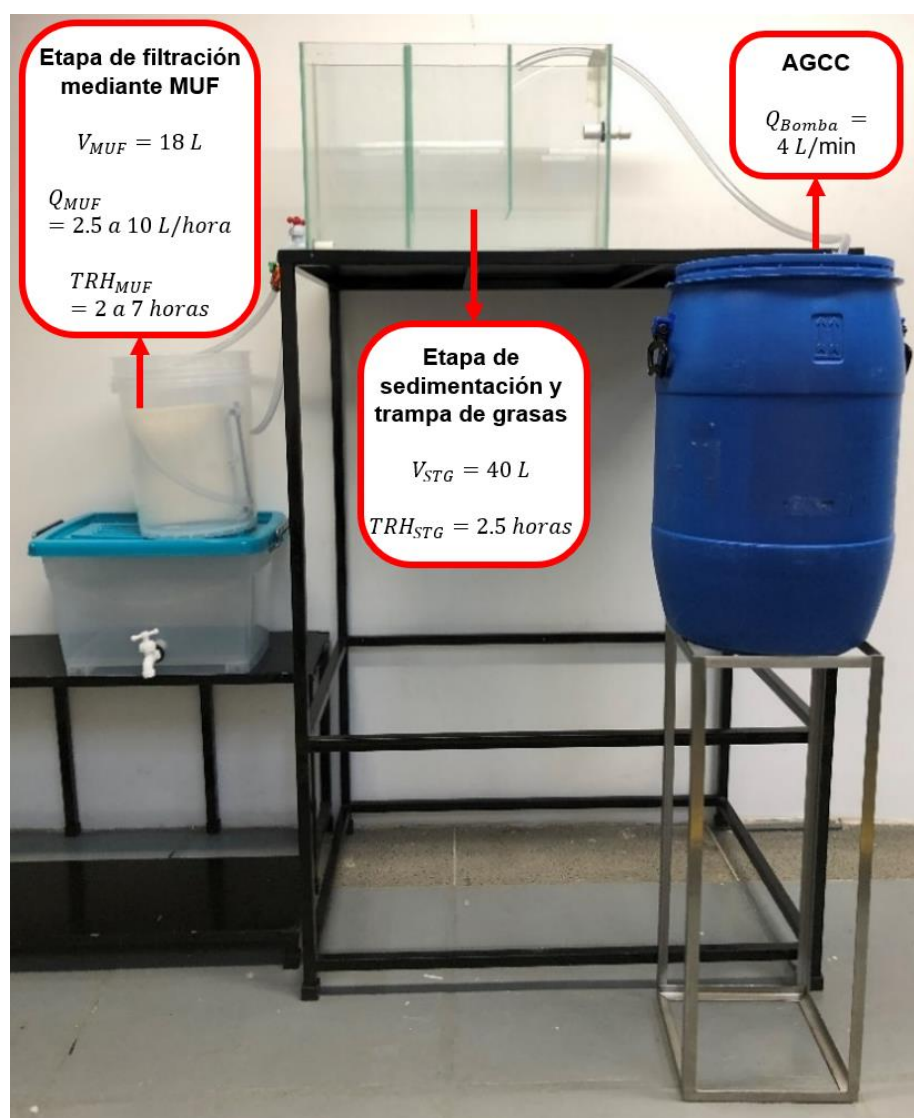


Figura 16. Condiciones de operación del prototipo a escala de laboratorio.

Dentro de las condiciones de operación del prototipo a escala de laboratorio (ver Figura 16) es muy importante tener en cuenta la **tasa de flujo**, los **tiempos de retención hidráulica**, y la **presión de operación**. Ya que con ellos se puede realizar un balance de masas para determinar si el sistema debe funcionar a flujo continuo (cuando la tasa de flujo del STG y la de la MUF sean similares, lo cual permita que las condiciones de operación de la membrana se mantengan a lo largo del tiempo), o, como en el caso de esta guía, funcionar con flujo tipo batch. A partir de las pruebas de flujo se determinaron las siguientes características del tren de tratamiento:

- ✓ La bomba cuenta con una tasa de flujo aproximada de 4 L/minuto, lo que le permite llenar el STG en 10 minutos.
- ✓ El STG cuenta con una capacidad aproximada de 40 L, obtenida al llenarlo hasta una altura de 41 cm respecto al fondo, así mismo, cuenta con un tiempo de retención hidráulica de 2.5 horas. Estas condiciones permiten asentar una parte de los sólidos en suspensión presentes en el AGCC a tratar.
- ✓ La MUF cuenta con tasas de flujo entre 2.5 y 10 L/hora aproximadamente (ver Figura 17) correspondientes a tiempos de retención hidráulica de 2 a 7 horas aproximadamente (debido a los 18 L de volumen del recipiente superior de la MUF), que varían especialmente en relación con la presión de operación y la carga contaminante del agua. En este caso, el fabricante de la MUF utilizada recomienda que para trenes de tratamiento que operen bajo flujo continuo, se debe mantener la presión de operación entre el rango de 200 a 2000 mbar, correspondientes a 20 y 200 cm de columna de agua respectivamente (medida desde la lámina de agua hasta la parte superior de la membrana). En el caso de esta guía, y según la recomendación de personal capacitado de Martin Membrane Systems para operar el módulo bajo flujo tipo batch, se mantuvo una columna de agua de 5 cm durante los primeros minutos de la etapa.

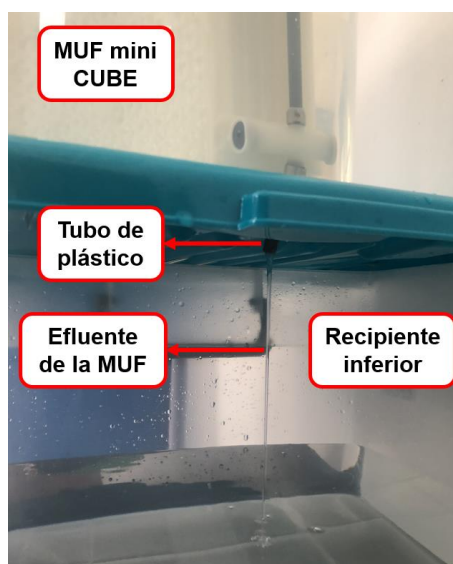


Figura 17. MUF funcionando a tasa de flujo aproximada de 10 L/hora.

3.4.4 Desinfección del tren de tratamiento con solución de NaOCl

Previo a llevar a cabo las corridas del tren de tratamiento y con el objetivo de eliminar posibles patógenos presentes en cada uno de los componentes que tengan contacto con el AGC, y que sean utilizados en la operación del prototipo (tanques, mangueras y accesorios, etc); es necesario realizar un procedimiento similar al de activación de la MUF, donde cada componente se sumerge en una solución de NaOCl de 500 ppm durante 3 horas a temperatura ambiente. Posterior a ello, los componentes son lavados dos veces con el fin de eliminar rastros de esta solución; la primera lavada se realiza con agua potable, una esponja blanda de limpieza y jabón líquido convencional (multiusos), mientras que la segunda se realiza con agua potable, una esponja blanda de limpieza y jabón neutro.

4 Recolección, transporte y análisis del AGC para evaluar el prototipo

Para evaluar el prototipo del tren de tratamiento a escala de laboratorio es necesario determinar los parámetros de calidad del agua en diferentes etapas del tren de tratamiento a partir de: muestras de AGCC, muestras de AGCESTG y muestras de AGCT (efluente del tren de tratamiento). Así mismo, dado que el sitio de producción del AGC es diferente a los sitios donde se encuentra el prototipo y/o donde se analizan las muestras, es necesario realizar actividades que permitan recolectar y transportar el AGC en condiciones adecuadas hasta llegar a su destino. Por tal motivo, a continuación, se presentan algunos aspectos importantes sobre los parámetros seleccionados para medición y, la metodología llevada a cabo para la recolección y transporte tanto del AGCC requerida para realizar las corridas del tren de tratamiento, como de las muestras de AGC a partir de las cuales se determinan los parámetros de calidad del agua con los que se evalúa el tren de tratamiento.

4.1 Parámetros seleccionados para medición

En la Tabla 2 se presenta información sobre los seis parámetros seleccionados para evaluar el tren de tratamiento: pH, conductividad eléctrica (CE), turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Los análisis de estos parámetros se realizan de acuerdo con los protocolos de los Métodos Estándar para Análisis de Aguas y Aguas Residuales (APHA-AWWA-WEF, 2017).

Tabla 2. Parámetros de calidad del agua seleccionados para la evaluación del tren de tratamiento.

Parámetro	Unidad de medición	Protocolo de medición	Entidad encargada de la medición
pH	-	SM 4500-H ⁺ B	Laboratorio de investigación del GPH
CE	μS/cm	SM 2510 B	Laboratorio de investigación del GPH
Turbidez	NTU	SM 2130 B	Laboratorio de investigación del GPH
SST	mg/L	SM 2540 D	Laboratorio externo acreditado*

DQO	mgO ₂ /L	SM 5220 D	Laboratorio externo acreditado*
DBO₅	mgO ₂ /L	SM 5210 B	Laboratorio externo acreditado*

NTU: Unidad Nefelométrica de Turbidez (de sus siglas en inglés “Nephelometric Turbidity Units”).

SM: de sus siglas en inglés “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA-AWWA-WEF, 2017).

GPH: Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

*: Siana Ltda. - laboratorio acreditado por el IDEAM, para toma de muestras y análisis Físicoquímicos, microbiológicos e hidrobiológicos en aguas según Resolución 0833 del 2016, Extensión resolución 0144 del 2018.

4.2 Recolección y transporte del AGCC requerida para realizar las corridas del tren de tratamiento

4.2.1 Recolección del AGCC generada en la vivienda

Con el objetivo de recolectar las AGCC generadas en la vivienda seleccionada, es necesario realizar las siguientes instalaciones a las fuentes de producción de AGC:

1. Recipientes de recolección del AGC para cada actividad de producción. Para recolectar el agua generada en cada fuente, se cuenta con embudos y probetas de 1 L (ver Figuras 18a y 18b) y tinajas de 60 L (ver Figura 18c) para las duchas.

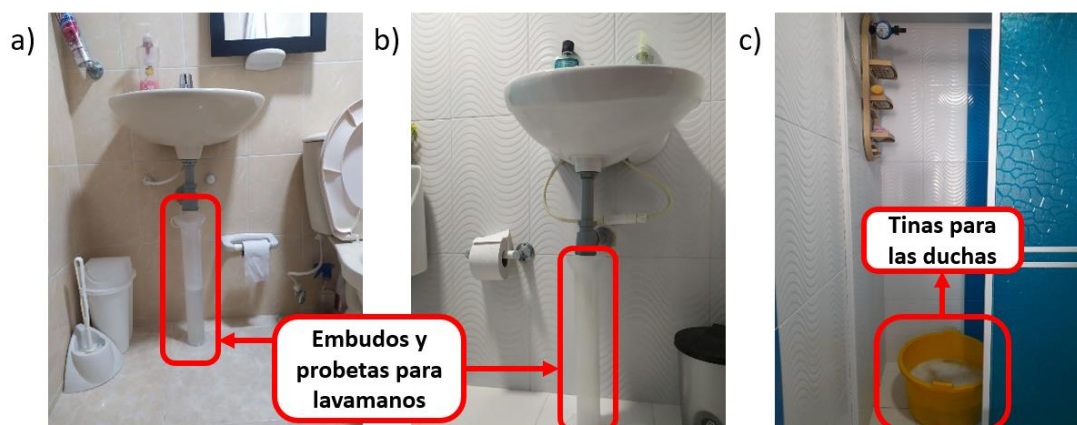


Figura 18. Instalación de recipientes de recolección de AGC. a) y b) embudos y probetas de 1L para los lavamanos; c) tinajas de 60 L para las duchas.

2. Tanque de recolección general de AGC. En este balde se mezcla el agua recolectada que se genera debido al uso de los aparatos sanitarios durante la franja horaria de 5:00 am a 8:00 am; la recolección se realiza mediante los recipientes mencionados anteriormente, generando así una mezcla compuesta del AGC producida en el hogar durante tres horas. Esta franja horaria ha sido seleccionada a conveniencia con el fin de brindar tiempo suficiente tanto para la producción, recolección y transporte del AGCC, así como para realizar la operación del tratamiento y determinación de los parámetros de calidad del agua en el mismo día. En este caso se utiliza un recipiente de plástico HDPE de 200 L, tal como se observa en la Figura 19.



Figura 19. *Tanque general de recolección de AGC.*

4.2.2 Transporte del AGCC generada en la vivienda

Con el fin de evitar la manipulación del AGC que pudiera ocasionar alguna alteración en los parámetros fisicoquímicos evaluados u ocasionar posible afectación a la salud del investigador, es necesario realizar un procedimiento de transporte adecuado. Por tal motivo, en el caso de esta guía se bombean 45 L de AGCC hacia un recipiente de 60 L (ver Figura 20), el cual será transportado mediante vehículo particular (con aire acondicionado) hasta el lugar donde se encuentra el prototipo del tren de tratamiento (en este caso, el laboratorio de investigación del GPH de la UIS).



Figura 20. *Recipiente de transporte de AGC.*

4.3 Recolección y transporte de las muestras de AGC a partir de las cuales se determinan los parámetros de calidad del agua.

4.3.1 Recolección de las muestras de AGC

Se busca que las muestras de AGC recolectadas para determinar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la calidad del agua, cuenten con la menor alteración posible. Por ello, en la tabla 3 se presentan algunas especificaciones para llevar a cabo este muestreo, con la aclaración de que las muestras deben estar refrigeradas a 4°C desde su recolección hasta su análisis en laboratorio, considerando que este análisis es llevado a cabo el mismo día.

Tabla 3. Consideraciones para tener en cuenta para el adecuado muestreo del agua.

Parámetro	Unidad de medición	Volumen requerido (mL)	Etapas de medición	Especificaciones del recipiente
pH	-	200	C, ESTG, T	Plástico no estéril
CE	$\mu\text{S/cm}$	200	C, ESTG, T	Plástico no estéril
Turbidez	NTU	200	C, ESTG, T	Plástico no estéril
SST	mg/L	1000	C, T	Plástico no estéril
DQO	mgO_2/L	200	C, ESTG, T	Plástico no estéril
DBO₅	mgO_2/L	1000	C, T	Plástico no estéril

NTU: Unidad Nefelométrica de Turbidez (de sus siglas en inglés “Nephelometric Turbidity Units”).

UFC: Unidades Formadoras de Colonias.

C: Muestra del AGCC.

ESTG: Muestra del AGCESTG.

T: Muestra del AGCT.

En la Figura 21 se muestra un ejemplo de recolección de las muestras de AGCT.

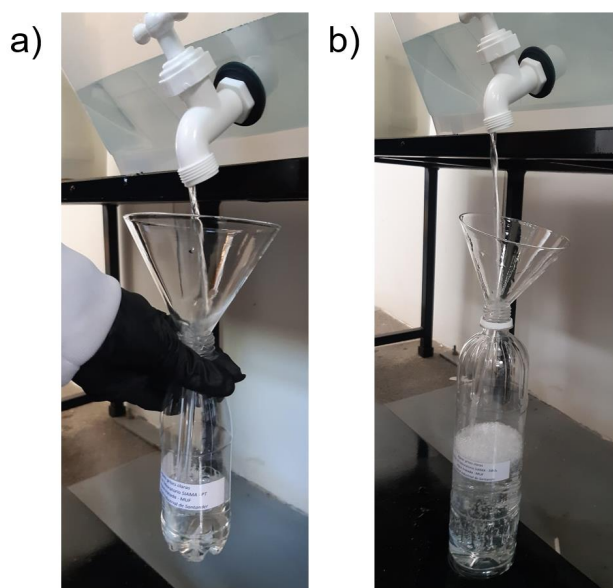


Figura 21. Muestreo del AGC tratada.

4.3.2 Transporte de las muestras de AGC

Las muestras recolectadas se transportan en neveras portátiles mediante vehículo particular hasta el laboratorio donde son analizadas, ya sea el laboratorio de investigación del GPH para los parámetros de pH, CE y turbidez; o al laboratorio externo acreditado (SIAMA Ltda) para los SST, DQO y DBO₅.

5 Mantenimiento y actividades adicionales

Las actividades de mantenimiento pretenden mantener el prototipo del tren de tratamiento en las mejores condiciones posibles, y con ello, prolongar la vida útil de los componentes y mejorar el desempeño en la remoción de contaminantes presentes en el agua. Adicionalmente, debido a que se pretende evaluar experimentalmente la eficiencia del tren de tratamiento mediante corridas tipo batch, es necesario brindar un adecuado mantenimiento al sistema para disminuir la posibilidad de que las condiciones del día anterior alteren los resultados del día siguiente. Por tal motivo, se tienen en cuenta dos tipos de actividades de mantenimiento: las diarias, tales como lavado de recipientes de operación del prototipo, lavado de accesorios y elementos de laboratorio, actividades de mantenimiento diario de la MUF, preparación de los recipientes de muestreo; y las ocasionales, como mantenimiento ocasional de la MUF y de la bomba. A continuación, se describen las actividades de mantenimiento y actividades adicionales para la evaluación del tren de tratamiento a escala de laboratorio:

5.1 Actividades de mantenimiento diario

1. Lavado de elementos de laboratorio: al finalizar cada corrida, se debe realizar limpieza (lavado y secado) de los elementos de laboratorio utilizados para facilitar la recolección de muestras o los utilizados para determinar los parámetros de calidad de las muestras de agua. Para realizar este lavado se emplea agua potable, una esponja blanda de limpieza y jabón neutro. Seguido a ello, se realiza lavado con agua destilada en las paredes internas y externas de los accesorios. Para el secado se dejan escurrir y se retira el excedente con paños de algodón.
2. Lavado de accesorios: al finalizar cada corrida, se debe realizar limpieza (lavado y secado) de la bomba y la manguera que se conecta a esta, del accesorio de conexión tipo “Y” y las dos mangueras que se conectan a este. Para realizar este lavado se emplea agua potable, una esponja blanda de limpieza y jabón neutro. Seguido a ello, se realiza lavado con agua destilada en las paredes internas y externas de los accesorios. Para el secado se dejan escurrir.
3. Lavado de recipientes de operación del prototipo: al finalizar cada corrida, se debe realizar limpieza (lavado y secado) del tanque del sedimentador primario y de los recipientes utilizados en la etapa de filtración. Para realizar este lavado se emplea agua potable, una esponja blanda de limpieza y jabón neutro. Para el secado se dejan escurrir.

4. Mantenimiento diario de la MUF: al finalizar cada corrida, se debe lavar la MUF haciendo fluir agua con ayuda de una manguera a baja presión, y lavar el recipiente superior (con el procedimiento descrito en la sección 6.1.3.). Seguido a ello, se acopla la MUF al recipiente superior y se filtra agua potable por la membrana durante 1 hora (ver Figura 22). Posteriormente, pasado el tiempo de filtrado de agua potable, se vuelve a lavar tanto la MUF con ayuda de la manguera, como el recipiente superior; cabe aclarar que la membrana debe estar sumergida completamente en un balde con agua hasta su próximo uso. Durante esta actividad se utiliza agua potable durante todo el procedimiento.



Figura 22. Mantenimiento diario de la membrana.

5. Preparación de los recipientes de muestreo: según las exigencias requeridas por el laboratorio externo acreditado, los recipientes de muestreo deben estar correctamente identificados tal y como se observa en la Figura 23, adicionalmente, se deben diligenciar y presentar unos formatos proporcionados por el laboratorio.



Figura 23. Etiquetado de los recipientes de muestreo.

5.2 Actividades de mantenimiento ocasional

1. Mantenimiento ocasional de la MUF: En comunicación personal con el ingeniero Ordoñez, experto de Martin Membrane Systems (Ordoñez, 2023), recomendó que la frecuencia de los mantenimientos ocasionales fuese cada año o cada dos años, acorde al agua a tratar. Para las condiciones residenciales con moderada carga contaminante, se recomienda realizar mantenimientos preventivos una vez al año para verificar que el sistema esté funcionando correctamente (BSI, 2010). Otros criterios admisibles para definir la frecuencia de la necesidad de mantenimiento pueden ser la eficiencia de remoción de partículas, la disminución en la tasa de flujo de la membrana o, en el caso que se monitoreen las condiciones de operación de la membrana, cuando se obtengan presiones cercanas a -200 mbar, lo que significaría que el módulo mini Cube se encuentra colmatado (Ordoñez, 2022).

En respuesta a la necesidad de mantenimiento, existen diferentes procedimientos de limpieza que se realizan a la membrana (ya sean físicos, químicos o biológicos) con el fin de mantenerla en condiciones adecuadas, propiciando la tasa de flujo y la remoción de contaminantes propuestas por los fabricantes (Shi et al., 2014). Normalmente, los procedimientos de limpieza de una membrana colmatada se dividen en dos categorías, métodos físicos y métodos químicos (Yang et al., 2021). Para el caso de la presente guía, el procedimiento de limpieza física recomendado es el lavado a contraflujo, el cual consiste en variar la hidrodinámica dentro de la membrana para forzar cinemáticamente la remoción de material acumulado dentro de la misma; para realizarlo, se debe expulsar una corriente de flujo de agua en sentido inverso para retirar la capa de sólidos acumulados en la MUF. Llegado el caso de que este procedimiento no presente resultados efectivos, se recomienda realizar un lavado químico, llevando a cabo un procedimiento similar al realizado para la etapa de activación de la MUF (Shi et al., 2014).

Finalmente, un requisito para prolongar la vida útil de la MUF plantea que esta debe permanecer totalmente sumergida en agua potable durante el tiempo en que no se esté haciendo uso de ella, también, el agua donde se sumerge se debe cambiar cada mes.

2. Mantenimiento ocasional de la bomba: en ocasiones, la bomba se puede obstruir por la carga contaminante presente en el AGC. Por lo tanto, se debe desmontar la bomba, eliminar lo que impida su adecuado funcionamiento y volver a ensamblarla.

6 Referencias

Álvarez, J. D., & Bonilla, B. D. (2020). *Propuesta de opciones tecnológicas para el tratamiento y reúso de aguas grises provenientes de ducha y lavamanos en una vivienda unifamiliar del Área Metropolitana de Bucaramanga AMB*. Universidad Industrial de Santander.

- APHA-AWWA-WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23er edition, Vol. 1). (WEF) Water Environment Federation, (APHA) American Public Health Association.
- BSI. (2010). *BS 8525-1:2012 - greywater systems-part 1: code of practice* (Vol. 1).
- Burgos, J. (2024). *Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga, caso de estudio: Barrio La Victoria* [Proyecto de grado en maestría de investigación]. Universidad Industrial de Santander.
- Galvis, K., & Rincón, J. (2023). *Evaluación del desempeño de membranas de ultrafiltración y tratamientos complementarios a escala de laboratorio para la reutilización de aguas grises claras en el contexto del Área Metropolitana de Bucaramanga* [Trabajo de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Martin Membrane Systems. (2022). *Membrane solutions for drinking water*. https://www.martin-membrane.de/fileadmin/user_upload/Downloads/2022-Trinkwasserbroschuere-EN-web.pdf
- Martin Membrane Systems. (2018). *Household filter based on gravity driven membrane - GDM Installation manual in 2 buckets*. <https://doi.org/10.09.2018>
- Martin Membrane Systems. (2023). *CUBE mini Filter*. <https://www.martin-membrane.de/products/cube-mini-filters/?web=1>
- ONU. (2014). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Organización de Las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Ordoñez, J. (2022). *Water supply in rural areas by membrane filters*.
- Shi, X., Tal, G., Hankins, N. P., & Gitis, V. (2014). Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 1, 121–138. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.04.003>
- Yang, J., Monnot, M., Ercolei, L., & Moulin, P. (2021). Impact of chlorinated-assisted backwash and air backwash on ultrafiltration fouling management for urban wastewater tertiary treatment. *Membranes*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/membranes11100733>

7 Anexo 1.

Descripción del procedimiento realizado en los días de corrida del tren de tratamiento

7.1 Procedimientos realizados en los días de corrida del tren de tratamiento

7.1.1 Actividades llevadas a cabo en la vivienda de muestreo

En este apartado se detallan las actividades a desarrollar en la vivienda de muestreo.

1. Llegar a la vivienda de muestreo y disponer adecuadamente de los implementos necesarios mencionados a continuación:
 - a. Vehículo particular con aire acondicionado
 - b. Recipiente de transporte de AGC
 - c. Bomba con manguera plástica conectada
 - d. Nevera tipo cava
 - e. Recipientes de muestreo para determinación de los seis parámetros de calidad del agua a analizar: pH, conductividad eléctrica (CE), turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno a los cinco días de reacción (DBO₅).
 - f. Elementos de protección personal (EPP's).
2. Introducir la bomba dentro del tanque general de recolección de AGC y, desde el otro extremo de la manguera, recolectar las muestras de agua con las que se determinan los parámetros de calidad del AGC cruda (AGCC). Se deben tener en cuenta los requisitos y protocolos de muestreo para cada parámetro. Así mismo, las muestras se introducen ya sea en la primera nevera tipo cava destinada al laboratorio externo acreditado, o en la segunda nevera tipo cava destinada al laboratorio del grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH).
3. Introducir el otro extremo de la manguera hacia el recipiente de transporte de AGCC para bombear agua hasta recolectar un volumen aproximado de 45 L de AGCC. Este volumen alimentará al tren de tratamiento a través del STG.
4. Transportar el agua hasta su destino. En este caso, las muestras de AGCC que se analizan en un laboratorio externo certificado (SST, DQO y DBO₅) se entregan al laboratorio en cuestión (Siama Ltda.), mientras que las muestras que se analizan en el laboratorio de investigación del GPH (pH, CE y turbidez) y el volumen de AGCC con el que se alimenta el tren de tratamiento son transportados a las instalaciones del laboratorio del GPH.

7.1.2 Actividades llevadas a cabo con el prototipo a escala de laboratorio

En este apartado se detallan las actividades a desarrollar para operar el prototipo a escala de laboratorio.

1. Alimentación del prototipo de tren de tratamiento con AGCC: para realizar esta actividad se debe destapar el recipiente de transporte de AGCC e introducir la bomba a la que previamente se le ha conectado la manguera (ver Ilustración 1). Luego, encender la bomba y sujetar el extremo de la manguera para suministrar 40 L de agua al sedimentador y trampa de grasas (STG).



Ilustración 1. Alimentación del prototipo de tren de tratamiento con AGCC.

2. Determinación de los parámetros de calidad del AGCC analizados en el laboratorio del GPH (ver Ilustración 2). Posterior a la alimentación del prototipo de tren de tratamiento, se deja reposar el agua en el STG durante dos horas y treinta minutos (correspondientes a un tiempo de retención hidráulico de 2.5 horas). Durante este tiempo es recomendable determinar los parámetros de calidad del agua pH, CE y turbidez, según lo descrito en las secciones 7.2.1. y 7.2.2. del presente anexo.

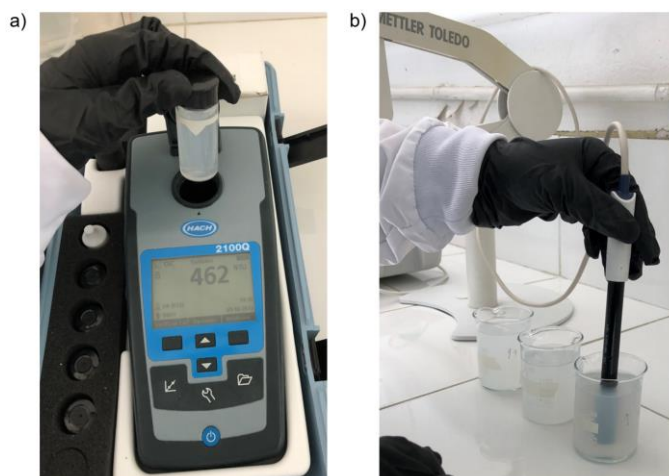


Ilustración 2. Determinación dos de los parámetros de calidad del AGCC analizados en el laboratorio del GPH. a) turbidez; b) CE.

3. Recolección de muestras de la etapa de STG: transcurrido el tiempo de retención hidráulica, se procede a recolectar las muestras de AGC efluente de la etapa de STG (AGCESTG) para análisis de pH, CE, turbidez y DQO. Estas muestras se refrigeran hasta ser enviadas al laboratorio externo acreditado (en el caso de la muestra de DQO) o hasta ser analizadas en el laboratorio (para las muestras de pH, CE y turbidez).
4. Alimentación de la etapa de filtración mediante membranas de ultrafiltración (MUF) con AGCESTG (ver Ilustración 3). Posterior a la recolección de las muestras de la etapa de sedimentación, se suministran 18 L de AGCESTG al recipiente superior de la etapa de filtración. Este volumen permite un adecuado funcionamiento del módulo de MUF al asegurar 5 cm de columna de agua (medidos desde la parte superior del módulo) durante los primeros minutos de la etapa.

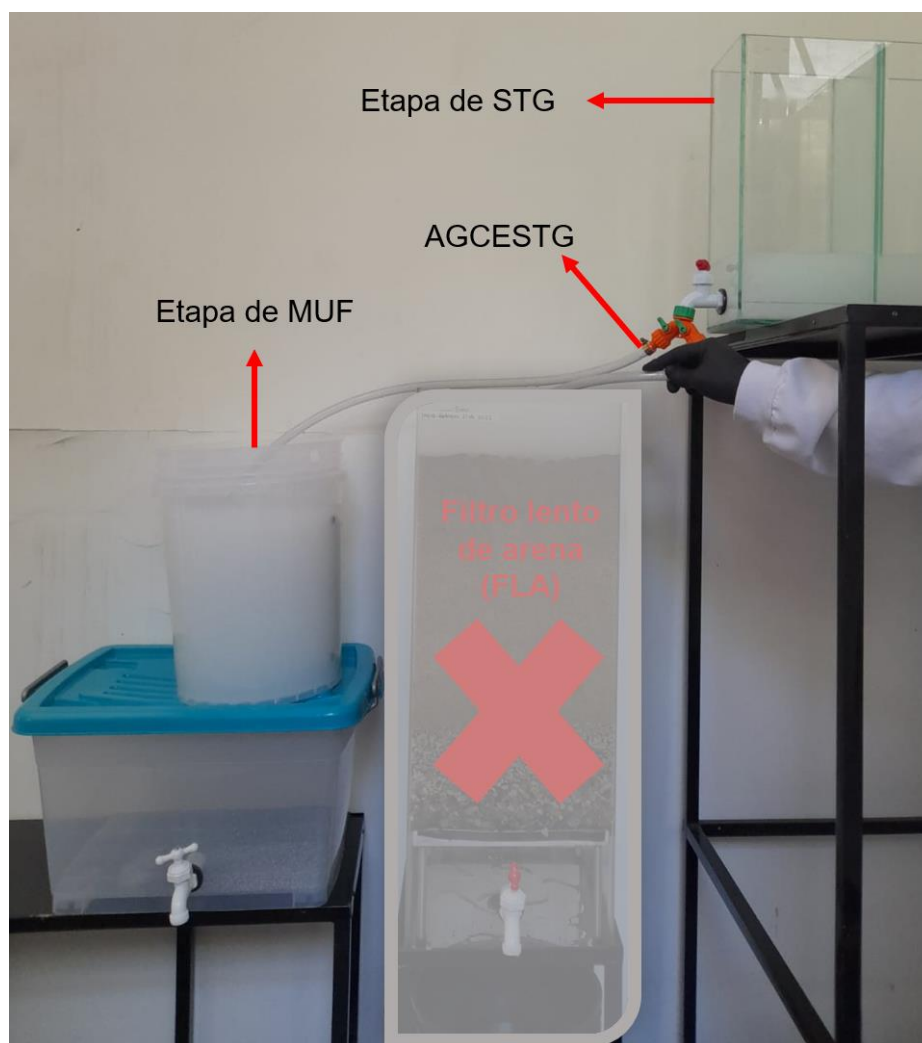


Ilustración 3. Alimentación de la etapa de filtración mediante MUF con AGCESTG.

Nota: el filtro lento de arena (FLA) no pertenece a los alcances de este manual en específico dado que concierne a una investigación realizada en paralelo. Para más información por favor consultar Burgos (2024).

5. Determinación de los parámetros de calidad del AGCESTG analizados en el laboratorio del GPH. Mientras el agua fluye por la etapa de filtración, es recomendable determinar los parámetros de calidad del agua de pH, CE y turbidez.
6. Recolección de muestras del efluente del tren de tratamiento (ver Ilustración 4). Se procede a recolectar las muestras del AGCT (pH, CE, turbidez, SST, DQO y DBO₅) con ayuda de la llave de paso del recipiente inferior. Estas muestras se refrigeran a 4°C hasta ser enviadas al laboratorio externo acreditado (en el caso de las muestras de SST, DQO y DBO₅) o hasta ser analizados en el laboratorio (para las muestras de pH, CE y turbidez).

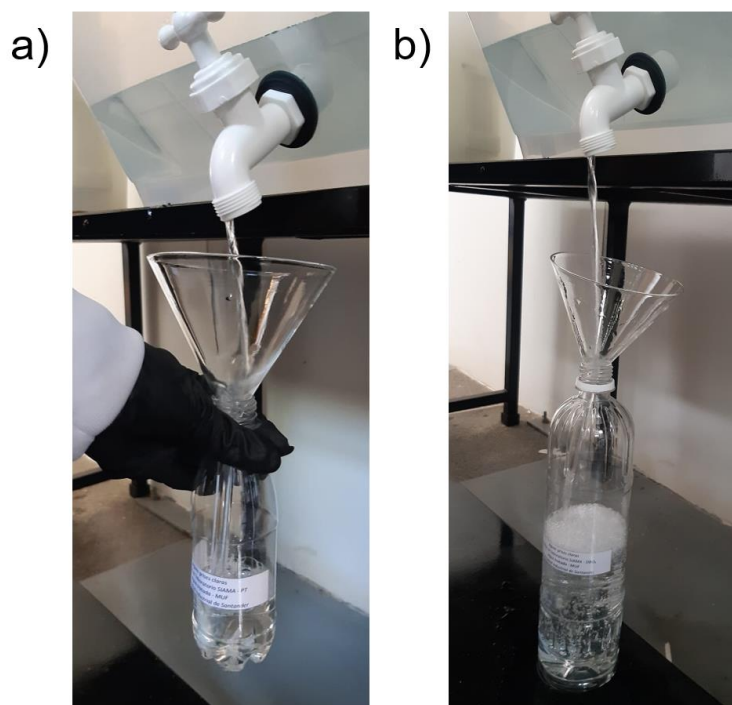


Ilustración 4. Recolección de la etapa de filtración mediante MUF. a) recipiente de muestreo de DQO; b) recipiente de muestreo de DBO₅.

7. Transporte de las muestras de AGC que se analizan en un laboratorio externo acreditado. Al finalizar la recolección de las muestras de AGCESTG y AGCT, las muestras para analizar los parámetros de SST, DQO y DBO₅) son nuevamente transportadas y entregadas al laboratorio externo acreditado.
8. Determinación de los parámetros de calidad del AGCT analizados en el laboratorio del GPH. Al finalizar el tren de tratamiento se determinan los parámetros de calidad del agua de pH, CE y turbidez para el AGCT.
9. Mantenimiento del tren de tratamiento: al finalizar la corrida del tren de tratamiento es necesario realizar limpieza y actividades complementarias para preparar el próximo día de corrida del tren de tratamiento.

7.2 Actividades llevadas a cabo para la determinación de los parámetros de calidad de agua analizados en las instalaciones del laboratorio del GPH (pH, CE y turbidez)

En este apartado se detallan las actividades llevadas a cabo dentro de las instalaciones del laboratorio del GPH, orientadas a la determinación de los parámetros de calidad del agua de pH, CE y turbidez; donde cada lectura se toma por triplicado.

7.2.1 Determinación del pH y la CE



Ilustración 5. Multiparámetro Mettler Toledo SevenGo Duo pH/Ion/Cond meter SG78.

Para determinar los parámetros de calidad del agua de pH y CE se utiliza un equipo multiparámetro de la marca Mettler Toledo, específicamente el modelo SevenGo Duo pH/Ion/Cond meter SG78 (ver Ilustración 5). El procedimiento para analizar el pH y la CE se detalla en los pasos mencionados a continuación:

1. Colocar las baterías del equipo.
2. Conectar las sondas de pH y CE mientras el equipo aún sigue apagado.
3. Encender el equipo.
4. Cambiar el modo de medición para analizar. Este equipo permite elegir entre determinar ambos parámetros al tiempo pH y CE, o determinar cada parámetro por separado (únicamente pH ó únicamente CE). Esto se logra al mantener presionado el botón “Mode/Exit” durante algunos segundos hasta que se actualice la pantalla del equipo. Para el caso de la presente guía se analizaron ambos parámetros por separado.
5. Llenar tres vasos de precipitado con el AGC a analizar.

6. Limpiar la sonda (especialmente la del pH) aplicando agua destilada, luego, se retira el exceso con paños de algodón cuidadosamente hasta que la sonda quede totalmente seca.
7. Introducir la sonda en el vaso con la muestra y presionar el botón de “read” (medición en inglés).
8. Una vez haya finalizado la medición (aparecerá un símbolo de \sqrt{A} , refiriéndose a que el punto final automático ha sido determinado) se debe registrar el valor obtenido. Posteriormente se realiza limpieza de la sonda aplicando agua destilada, luego se retira el exceso con paños de algodón cuidadosamente hasta dejar la sonda seca.
9. Repetir los pasos 6 y 7 con los dos vasos de precipitado que contienen las muestras restantes para finalizar con las muestras triplicadas del primer parámetro.
10. Posterior al análisis del primer parámetro, repetir los pasos 4, 6, 7 y 8 para analizar el segundo parámetro en caso de ser analizados por separado.
11. Una vez finalizada la medición se debe apagar y retirar las baterías del equipo.
12. Guardar el equipo dentro de la caja protectora y mantener el equipo en un ambiente oscuro sin cambios bruscos de temperatura o humedad.

7.2.2 Determinación de la turbidez



Ilustración 6. Turbidímetro HACH 2100Q.

Para determinar este parámetro de calidad del agua se utiliza un turbidímetro de la marca HACH, específicamente el modelo 2100Q (ver Ilustración 6). El procedimiento para analizar la turbidez se detalla en los pasos mencionados a continuación:

1. Colocar las baterías para encender el equipo.
2. Configurar el equipo para medir la turbidez en unidades de NTU.
3. Llenar tres de tubos de muestras para turbidímetro con el AGC a analizar.
4. Limpiar el exterior de cada tubo de muestras con paños de algodón.
5. Agitar el tubo con la muestra e insertarlo en el turbidímetro, cerrar la tapa y presionar “medición”.
6. Una vez haya finalizado la medición (sonara un pitido) se deben registrar los valores obtenidos y retirar el tubo de muestra.
7. Repetir los pasos 4-6 con los dos tubos de muestra restantes.
8. Una vez finalizada la medición se debe apagar el equipo y retirar las baterías.
9. Lavar los tubos de muestras con jabón neutro y enjuagar con agua destilada. Cuando se encuentren secos deben ser guardados en la caja protectora.
10. Mantener el equipo en un ambiente oscuro, sin cambios bruscos de temperatura o humedad.

7.2.3 Calibración de los equipos

Llegado el caso de que en las muestras analizadas por triplicado se obtengan valores que varíen considerablemente respecto a las otras mediciones. por ejemplo, que una muestra analizada por triplicado obtenga valores de 200, 100 y 410 [unidades], esto podría indicar que los equipos se encuentran descalibrados, y por ello, se debe realizar la calibración de estos de acuerdo con lo descrito en los manuales de los equipos, haciendo uso de los viales de calibración con los que se cuente.