



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PROPUESTA DE UNA PLANTA PILOTO  
FILTRO DESINFECTANTE PARA SER  
ACOPLADA A UN SISTEMA DE  
TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS  
RESIDUALES**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERA QUÍMICA**

**P R E S E N T A**

**REBECA ÁLVAREZ BARRÓN**



**CDMX 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE: Profesor: LUNA PABELLO VÍCTOR MANUEL**

**VOCAL: Profesor: GUTIÉRREZ LARA MARÍA RAFAELA**

**SECRETARIO: Profesor: GARCÍA GONZÁLEZ SERGIO ADRÍAN**

**1er SUPLENTE: Profesor: GARCÍA REYNOSO JOSÉ AGUSTÍN**

**2° SUPLENTE: Profesor: GÓMEZ MARTÍNEZ FERNANDO SANTIAGO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**Dr. Víctor Manuel Luna Pabello**

**SUPERVISOR TÉCNICO**

---

**I.Q Fernando Santiago Gómez Martínez**

**SUSTENTANTE**

---

**Rebeca Álvarez Barrón**

## **Agradecimientos Académicos**

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México de la cual me siento orgullosa, por la oportunidad de desarrollarme como persona dentro de las instalaciones de la facultad de Química y por llenarme de enseñanzas y conocimientos a lo largo de mi carrera profesional.

Mi más sincera admiración y gratitud a mi asesor de tesis el Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, por su disponibilidad, por brindarme su apoyo, dirección y por su generosidad y respuestas a mis dudas e inquietudes y por haberme facilitado la información y los medios para la realización de este trabajo.

También deseo agradecer a los profesores Sergio Adrián García González y a la profesora María Rafaela Gutiérrez Lara por sus observaciones, correcciones y comentarios que contribuyeron a la culminación de la presente tesis.

De manera especial expreso mi agradecimiento al Dr. Pedro Magaña por su interés, su respuesta y revisión del presente trabajo.

### **Reconocimiento:**

La tesis se desarrolló en el marco del Proyecto DGAPA/ PAPIIT-IT101922 “Desarrollo de filtro desinfectante a base de agregados minerales para tratamiento aguas residuales parcialmente tratadas”. Se agradecen las facilidades otorgadas por el Ing. Juan Hilario García Gil, Superintendente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>2 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>6</b>
3.1 Objetivo General .....	6
3.2 Objetivos específicos.....	6
<b>4 ESTRATEGIA DE TRABAJO</b> .....	<b>7</b>
<b>5 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>8</b>
5.1 Aguas Residuales y su tratamiento en México .....	8
5.2 Desinfección.....	9
5.2.1 Agentes químicos .....	10
5.2.2 Agentes físicos.....	11
5.2.3 Medios mecánicos.....	11
5.3 Normatividad aplicable .....	16
5.4 Metales como agentes desinfectantes .....	17
5.4.1 Desinfección con plata.....	18
5.5 Mecanismos de desinfección por Ag.....	19
a) Por oxidación catalizada por la plata.....	19
b) Inactivación de bacterias y virus por plata monovalente .....	19
c) Inactivación de bacterias y virus por la plata bivalente y trivalente.....	20
d) Inactivación de Huevos de Helminto usando Ag .....	20
5.6 Factores que afectan la desinfección de aguas con plata .....	21
5.7 Industria minera en México .....	22
5.8 Caracterización de los agregados minerales naturales (AMN).....	24
5.9 Filtración.....	25
5.9.1 Filtración lenta.....	28
5.9.2 Filtros y biopelícula.....	34
5.9.3 Variables del proceso de filtración .....	36
5.10 Mantenimiento y retrolavado de la PPFD.....	44
5.11 Ingeniería conceptual.....	45
5.12 Propósito y sitio seleccionado para para la instalación de la PPFD.....	46

<b>6</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>51</b>
6.1	Materiales	51
<b>7</b>	<b>DESARROLLO DE LA INGENIERÍA CONCEPTUAL</b>	<b>52</b>
7.1	Objetivo	52
7.1.1	Ubicación	52
7.1.2	Reconocimiento del área	53
7.1.3	Características de los servicios auxiliares	54
7.2	Bases de diseño	54
7.3	Descripción detallada del proceso de tratamiento	56
7.3.1	Tratamiento preliminar	56
7.3.2	Tratamiento en la PPF	57
7.3.3	Descripción de la PPF	58
7.4	Diagramas de la PPF	62
<b>8</b>	<b>FILOSOFÍA DE OPERACIÓN</b>	<b>64</b>
8.1	Preparación del lecho filtrante desinfectante	65
8.2	Disposición del AMN del contenedor	65
8.3	Ramal de distribución	65
8.4	Estructura de entrada y salida	66
8.5	Llenado de la PPF	66
8.6	Inicio del proceso de filtración/desinfección	66
8.7	Recomendaciones	67
8.7.1	Limpieza y mantenimiento de la PPF	67
8.7.2	Control del proceso	68
<b>9</b>	<b>FUNCIONAMIENTO</b>	<b>68</b>
9.1	Beneficios	69
<b>10</b>	<b>LISTA DE ACTIVIDADES</b>	<b>69</b>
<b>11</b>	<b>ASPECTOS RELEVANTES DE LA PROPUESTA</b>	<b>71</b>
<b>12</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>73</b>
<b>13</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>74</b>
<b>14</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>88</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre los métodos de desinfección .....	13
Tabla 2 Distribución Elemental en el AMN .....	24
Tabla 3. Velocidad de filtración de acuerdo con el número de tratamientos preliminares .....	29
Tabla 4 Ventajas y Desventajas del filtro lento por gravedad .....	29
Tabla 5 Principales variables que intervienen en el diseño de filtros granulares .....	33
Tabla 6. Especificaciones técnicas.....	60
Tabla 7. Características del medio filtrante para la PPF.....	61
Tabla 8. Criterios de diseño para la PPF.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estrategia de Trabajo .....	7
Figura 2. Sistema de Lodos Activados.....	9
Figura 3. Requerimientos de desinfección para una inactivación del 99%....	12
Figura 4. Valor de producción minera de plata. Valor por entidad (Kilogramos) .....	23
Figura 5. Filtración por Gravedad .....	30
Figura 6. Filtración de lecho profundo .....	33
Figura 7. Estructura del filtro. ....	41
Figura 8 Procesos en la PTAR-CA .....	49
Figura 9. Tren de tratamiento del agua residual desde su captación hasta su reúso para riego de áreas verdes en el campus de ciudad universitaria.....	50
Figura 10. Planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro del Agua. ....	53
Figura 11. Tren de tratamiento incluyendo la instalación de la PPF.....	58
Figura 12. Dimensiones y especificaciones técnicas del tanque de 1100 L a emplear para la construcción de la PPF .....	59
Figura 13. Distribución de las capas de AMN dentro de la PPF .....	61
Figura 14. Componentes de la PPF.....	62
Figura 15. Vista lateral de la PPF.....	63
Figura 16 Lista de Actividades.....	71

## RESUMEN

La necesidad de tratar las aguas residuales es creciente. Entre los sistemas depuradores más empleados a nivel nacional se encuentran los denominados sistemas de lodos activados. La etapa final de este tipo de sistemas implica un proceso de filtración del agua procedente de un sedimentador secundario y una posterior etapa de cloración. Un efecto secundario derivado de la cloración de este tipo de efluentes es la producción de compuestos tóxicos que son potencialmente carcinogénicos. Por ello, propósito de esta tesis fue el diseño de una planta piloto filtro desinfectante (PPFD) a base de agregados minerales naturales (AMN). Los AMN, son materiales pétreos procedentes de terreros de minas de plata. Actualmente no tienen ningún valor comercial, contienen trazas de elementos de interés, dado su poder microbicida, como Ag, Cu, Zn. Estudios previos a nivel de matraz y de laboratorio en pequeñas columnas empacadas, han evidenciado la capacidad para eliminar microorganismos de interés sanitario presentes en los efluentes de sedimentadores secundarios. La finalidad de la PPFD es sustituir el módulo de filtración y de cloración existente en los procesos convencionales de lodos activados, por un sólo módulo que realice la dos funciones: filtrar y desinfectar. Por ello, a partir de los datos existentes en la literatura especializada sobre el tema, así como de la aplicación de ecuaciones de diseño para filtros lentos, se elaboró una propuesta de PPFD. La propuesta incluye, la ingeniería conceptual, filosofía de operación y el listado de actividades previo a un catálogo de conceptos con el que se puede determinar el presupuesto requerido para su instalación en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro de Agua (PTAR-CA) ubicada en Cerro del Agua, Ciudad Universitaria en la Cd de México

# 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, el manejo eficiente de los recursos hídricos ha cobrado importancia ante la demanda y escases de agua, ya que tanto la explotación como el manejo inadecuado tiene consecuencias en la distribución, en los ecosistemas y en la salud pública. La organización mundial de la salud (OMS) reportó que, en 2016 más de 5 millones de personas murieron por problemas relacionados con la contaminación de agua (OMS, 2017). Por ello, la práctica de coleccionar y tratar las aguas residuales antes de su disposición es clave para contribuir a su reutilización. Un sistema de tratamientos de aguas debe contar con una serie de pretratamientos en los que sea posible eliminar materia que por su tamaño y/o naturaleza causen problemas en tratamientos posteriores, sin embargo, los proyectos de plantas potabilizadoras elaborados por empresas resultan ser procesos caros y de lenta construcción ya que al utilizar tecnología convencional en las plantas de tratamiento se incrementa tanto el consumo de energía como los costos de operación debido al traslado de subproductos, así que se requiere que los procesos sean sostenibles para una reutilización de los efluentes (Calderón Mólgora, 2013). En adición, se requiere un proceso de desinfección para evitar la generación de problemas de salud pública ya que no solo en Latinoamérica sino también en países en desarrollo el constante crecimiento poblacional requiere de una calidad de agua segura para consumo por lo cual se estudian e impulsan nuevas prácticas y/o métodos para reutilizar las aguas residuales, incluyendo las zonas rurales donde se requiere satisfacer la demanda para agricultura y ganadería.

Por otra parte, los sistemas de lodos activados son los tratamientos más ampliamente utilizados para el tratamiento de aguas residuales municipales. La etapa final de este tipo de sistemas implica una filtración del agua procedente de un sedimentador secundario y una posterior etapa de cloración. La cloración y otros métodos como la Ozonación y el empleo de luz UV para la desinfección del agua resultan insuficientes ya que no inactivan organismos con estructuras de alta resistencia. La cloración es un método económico y el más utilizado como agente

desinfectante que inactiva organismos patógenos, sin embargo, un efecto secundario derivado de la cloración de este tipo de efluentes es la producción de compuestos tóxicos que son potencialmente carcinogénicos ya que el cloro reacciona con la materia orgánica en el agua, lo cual genera subproductos que pueden tener efectos adversos en la salud pública. Fue en la década de los 70's cuando se descubrió que se generan compuestos orgánicos sintéticos como los trihalometanos (THMs) y ácidos halos acéticos (García Rojas, 2002).

De manera alternativa, históricamente se ha empleado la plata para eliminar, del agua para beber, microorganismos potencialmente dañinos para la salud humana. Lo anterior, aún sin conocer su mecanismo de acción. Por ejemplo, fue utilizada como un germicida natural por culturas antiguas como la persa en Asia, los egipcios en África y los Aztecas en América, quienes observaron que el agua almacenada en contenedores o vasijas de plata permanecía limpia por más tiempo. Gracias al estudio y avance de la tecnología, actualmente se sabe que los iones de plata funcionan como un potente agente antimicrobiano, lo que significa que es capaz de acabar con todo tipo de gérmenes: bacterias, hongos, virus y protozoos. (IBEC 2017). Por lo anterior, se utiliza la plata para la filtración de agua en las albercas, spas, en limpieza de tuberías y en tratamientos de agua potable ya que ayuda a eliminar microorganismos de manera eficiente. En algunos sistemas de filtración se combina plata con cobre ya que en sinergia ambos metales son efectivos contra organismos patógenos (Molloy, 2007) De manera relativamente reciente, se han realizado estudios empleando agregados minerales naturales (AMN) conteniendo trazas de Ag, Cu, Zn y otros elementos con capacidad microbicida. Los AMN, son materiales pétreos procedentes de terreros de minas de plata que no tienen ningún valor comercial. Los estudios previos realizados a nivel de matraz y de laboratorio empleando pequeñas columnas empacadas, han evidenciado la capacidad para eliminar microorganismos de interés sanitario presentes en los efluentes de sedimentadores secundarios (Magaña, 2018) Considerando lo anterior, la presente tesis se enfocó al diseño de una planta piloto filtro desinfectante (PPFD) a base de agregados minerales naturales (AMN) cuya

finalidad sea la sustitución, en una sola etapa, del módulo de filtración y cloración existente en los procesos convencionales de lodos activados, es decir, realizar una doble función de filtración y desinfección.

## **2 JUSTIFICACIÓN**

La crisis hídrica no solo en México si no en todo el mundo exige un aumento en la educación y el conocimiento del reúso de agua para favorecer sectores como la agricultura, la ganadería, además de ver los beneficios sociales en cuanto a la disminución de enfermedades y económicos en cuanto a requerimientos energéticos e infraestructura. Dentro de los procesos unitarios para el tratamiento de agua, la filtración es una etapa clave en la cual se retienen partículas orgánicas o inorgánicas que pueden adsorber otros microorganismos patógenos. Dicha etapa se ha llevado a cabo con medios filtrantes como arena, grava o antracita, entre otros materiales que garantizan calidad en el efluente final, sin embargo, se requiere el empleo de nuevos medios que puedan aportar un valor añadido a esta etapa por lo que es posible considerar la utilización de agregados minerales naturales (AMN) provenientes de minas de explotación metálica. Aunque otros metales exhiben comportamientos germinicidas, la plata es el metal más importante y utilizado en la desinfección del agua potable. El AMN además de la plata contiene otros metales cuyas cantidades no representan un riesgo para usar el material, siendo que por el contrario los metales contenidos en el AMN como el hierro (Fe), cobre (Cu) y Zinc (Zn) puedan presentar efectos desinfectantes sinérgicos. Lo anterior, refuerza la idea de que este material tiene un gran potencial para ser empleado en sistemas de filtración con la capacidad de desinfectar aguas residuales parcialmente tratadas.

Ante la necesidad de contribuir a la búsqueda de soluciones para resolver problemáticas de salud y suministro de agua en zonas rurales de México y con base a los estudios y pruebas que sustentan el poder desinfectante de la Ag, se propone utilizar un filtro desinfectante basado en el uso de partículas de agregados minerales naturales (AMN) de diferente tamaño cuyo contenido de trazas metálicas realicen el efecto microbicida.

La propuesta del término “filtro desinfectante” deriva de que los filtros comúnmente conocidos sólo retienen elementos en su interior lo que implica que en el caso de microorganismos no hay inactivación y, por tanto, se requiere de un proceso posterior de desinfección, el cual precisamente lo proporcionan los metales contenidos en el AMN los cuales pueden estar en diferentes estados de oxidación, proporcionando así diferente capacidad de desinfección.

En este contexto, en el campus Ciudad Universitaria se encuentra la planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro de Agua (PTARCA) la cual fue diseñada para tratar un caudal de 40 L/s, de los cuales 20 L/s serían tratados por el sistema de lodos activados, 10 L/s por un disco biológico rotatorio y los 10 L/s restantes por un filtro percolador.

Cabe mencionar que derivado de algunas evaluaciones físicas donde se determinó que el efluente generado no cumplía con la calidad de agua establecida en la norma NOM-003-SEMARNAT-1997. Por ello en 2010, se propuso llevar a cabo la evaluación de alternativas, dando como resultado, realizar la mejora operativa del sistema de tratamiento de lodos activados y la clausura tanto del sistema de discos biológicos rotatorios, como la del filtro percolador. Al año siguiente (2011) se concluyó con la renovación en la planta, la cual consistió en actualizar el sistema de tratamiento de lodos activados, incorporándole un proceso de ultrafiltración con membrana al final del tratamiento. Actualmente, el problema reside en que el proceso de ultrafiltración no se encuentra en operación debido a que el equipo ya no funciona y el proveedor ha discontinuado su producción, por lo que no se ha obtenido refacciones para proceder a la substitución complicando así su reparación y mantenimiento. Por este motivo, se optó por tratar el efluente de la planta de lodos activados usando nuevamente filtros de arena. Cabe señalar que, en México, en general el uso de este tipo de filtros de arena es la práctica más común para continuar con la depuración de efluentes secundarios, seguida del proceso de desinfección por cloro. Por ello, el estudio de la alternativa de emplear AMN con la doble función de filtrar- desinfectar en una sola etapa, resulta interesante de ser explorada.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo General**

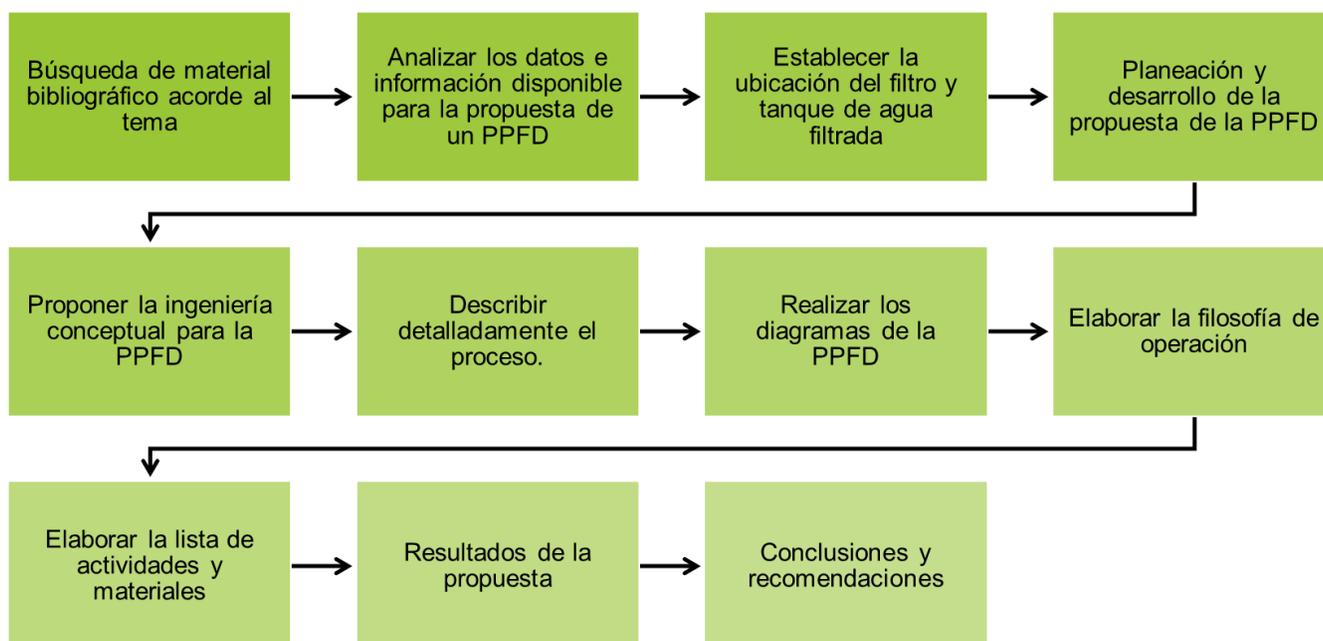
Establecer la línea base y los requerimientos de una propuesta de tecnología de filtración y planta piloto para ser acoplada a un sistema de tratamiento de aguas residuales en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro de Agua en Ciudad Universitaria, mediante la elaboración de la ingeniería conceptual correspondiente.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Describir las características, parámetros y variables de mayor importancia en el proceso de filtración, con información especializada sobre el tema, para elaborar la ingeniería conceptual de la PPF.
- Desarrollar la ingeniería conceptual y la lista de actividades para la PPF empleando como material de empaque agregados minerales naturales para el tratamiento del efluente del sedimentador secundario del sistema de lodos activados de la planta de tratamiento de Aguas Residuales de Cerro de Agua (SLA PTAR-CA) en Ciudad Universitaria.
- Elaborar la filosofía de operación de la PPF acoplada a la SLA PTAR-CA, mediante la descripción de los detalles y criterios para su operación y control.

## 4 ESTRATEGIA DE TRABAJO

A efecto de cumplir con los objetivos planteados, se planificaron de manera priorizada, consecutiva, clara y coherente las actividades y tareas a realizar en el presente proyecto (figura 1).



**Figura 1. Estrategia de Trabajo**  
Elaboración propia

## 5 MARCO TEÓRICO

### 5.1 Aguas Residuales y su tratamiento en México

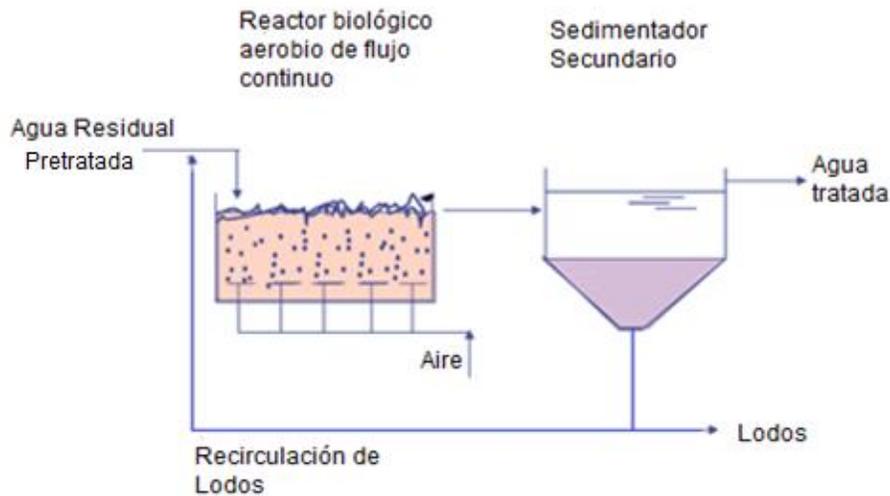
El tratamiento de aguas residuales es un conjunto de operaciones y procesos cuyo objetivo es la reducción de contaminantes de tal manera que cumplan con la normatividad vigente por lo que las aguas residuales pueden ser tratadas combinando diferentes tratamientos.

En México fue durante la década de los años sesenta cuando se construyeron la mayor parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales basadas en el sistema de lodos activados. Los costos asociados a su operación y mantenimiento resultan elevados y este proceso genera la mayor cantidad de lodos residuales, además cabe mencionar que, a escala nacional, se cuenta con 709 plantas con este tipo de proceso (30.34% del total de plantas en operación) (Mantilla Morales et al., 2017).

Básicamente un sistema de lodos activados (SLA) es un reactor biológico aerobio de flujo continuo completamente mezclado que contiene flóculos suspendidos, con recirculación parcial de los lodos generados (Figura 2). De manera general el SLA consiste en un contenedor del agua residual a tratar el cual puede ser aireado por medio de agitadores de superficie o burbujeo de aire. De manera previa, lleva acoplado una criba para separación de materiales sólidos flotantes o suspendidos y un sedimentador primario de arenas y gravas. Posterior al SLA se encuentra un sedimentador secundario que recibe el agua residual parcialmente tratada conteniendo los flóculos microbianos a manera de sólidos suspendidos. En este sedimentador ocurre la separación por gravedad, separa los sólidos suspendidos mediante un proceso de sedimentación. El agua clarificada es enviada a un filtro de arena para que retenga el remanente de sólidos suspendidos que no sedimentaron, incluidas bacterias. El efluente del filtro es enviado a desinfección mediante el uso de un proceso de cloración quedando así disponible para su uso posterior en actividades tales como riego de jardines con contacto directo, relleno de lagos artificiales, lavado de autos, entre otros (Acura, 2022).

Debido a que la presente tesis se enfocó al proceso de desinfección, a continuación, se desarrollarán los aspectos relevantes de este proceso.

En la figura 2, se muestra el proceso general de un sistema de lodos activados



**Figura 2. Sistema de Lodos Activados**  
Fuente: GEDAR (2012) Gestión de Aguas y Residuos

## 5.2 Desinfección

La NOM-127-SSA1-2021 define la desinfección como el proceso físico y/o químico utilizado para la eliminación, inactivación o destrucción de microorganismos patógenos en el agua.

La mayor parte de las aguas aun en el caso de que sean totalmente claras, o se hayan sometido a un tratamiento previo, se encuentran generalmente contaminadas por microorganismos nocivos para el organismo humano, por lo que el agua debe ser sometida a una depuración bacteriológica, la cual se efectúa realizando una desinfección o esterilización, cabe mencionar que esta etapa de tratamiento suele llevar un menor tiempo debido a que en las etapas anteriores se han removido la mayor cantidad de contaminantes por lo que la eficiencia de la desinfección

dependerá en gran manera de la calidad del agua a la que se le aplique el tratamiento.

Los procesos de tratamiento terciario suelen ser tanto físicos como químicos y biológicos y las sustancias o compuestos que generalmente se remueven son:

Sólidos totales y disueltos, fosfatos y nitratos, huevos y parásitos, algas, bacterias, virus, sustancias tensoactivas y radionúclidos.

Los patógenos pueden ser removidos por procesos de filtración con medios granulares o inactivados por agentes de desinfección como el cloro.

### 5.2.1 Agentes químicos

Los agentes químicos que se encargan de eliminar organismos patógenos se conocen como desinfectantes.

#### Cloración

Los compuestos de cloro son agentes químicos que se han utilizado como desinfectantes por su gran capacidad bactericida utilizando dosis pequeñas. Es el reactivo más usado a nivel mundial en sistemas de agua potable y residual (CONAGUA, 2019).

Este proceso se realiza para proteger el agua de posteriores contaminaciones y se utilizan principalmente compuestos de cloro como el hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ), hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ), y dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ).

Al agregar una cantidad considerable de cloro que pueda reaccionar con las sustancias remanentes de materia orgánica y amoníaco, el exceso de cloro agregado quedará como cloro residual libre, el cual es un agente desinfectante muy activo. Sin embargo, como se ha mencionado se forman también compuestos orgánicos clorados, los cuales han demostrado ser altamente carcinogénicos. (Rodríguez 2007).

## Ozonación

Es un gas inestable producido por la disociación de los átomos de oxígeno y es un oxidante altamente reactivo por lo cual es utilizado en la desinfección del agua al estar comprobada su eficacia en oxidación de materia orgánica e inorgánica (hierro y manganeso). El poder oxidante y desinfectante del método de Ozonación resulta ser mayor que el del cloro ya que las bacterias son destruidas debido a la oxidación protoplasmática, dando como resultado la desintegración de la pared de la célula (fisuramiento o lisis de la célula) es decir, que el ozono tiene mejores resultados que un tratamiento con cloro. De esta forma, se consiguen eliminar virus, bacterias y microorganismos en general cloro-resistentes. (Hidritec, 2016)

### 5.2.2 Agentes físicos

#### Radiación ultravioleta

La radiación UV es una potente biocida su longitud de su uso en efluentes de plantas de tratamiento de agua se debe a que no reacciona con los constituyentes del agua y, por tanto, no forma derivados ni cambia las condiciones organolépticas del agua. Es superior comparado con los otros métodos de desinfección, debido a la facilidad de su instalación, la comodidad de uso y mantenimiento, así como a los bajos costos de operación (Remtavarez, 2010).

### 5.2.3 Medios mecánicos

#### Sistema de membranas

Con un sistema de membranas como la Microfiltración (MF), Nanofiltración (NF), Ultrafiltración (UF) y Ósmosis inversa (OI) se tiene la ventaja de elegir la configuración física, tamaño del diámetro de poros, y arreglo hidráulico con el fin de reducir sólidos suspendidos, turbiedad y microorganismos (Fluence, 2019).

## Filtros de arena, carbón u otros medios filtrantes

La filtración es un proceso físico donde una mezcla sólido-líquido pasa a través de un medio más o menos poroso, el cual retiene los sólidos permitiendo así, el paso del fluido (Pérez, 2009).

Se utilizan para cargas de contaminantes bajas o medias y las partículas en el agua serán retenidas por un lecho filtrante de arena, carbón u algún otro material.

En la figura 3 se pueden consultar los requerimientos para la desinfección e inactivación de diferentes organismos empleando cloro, ozono y radiación UV.

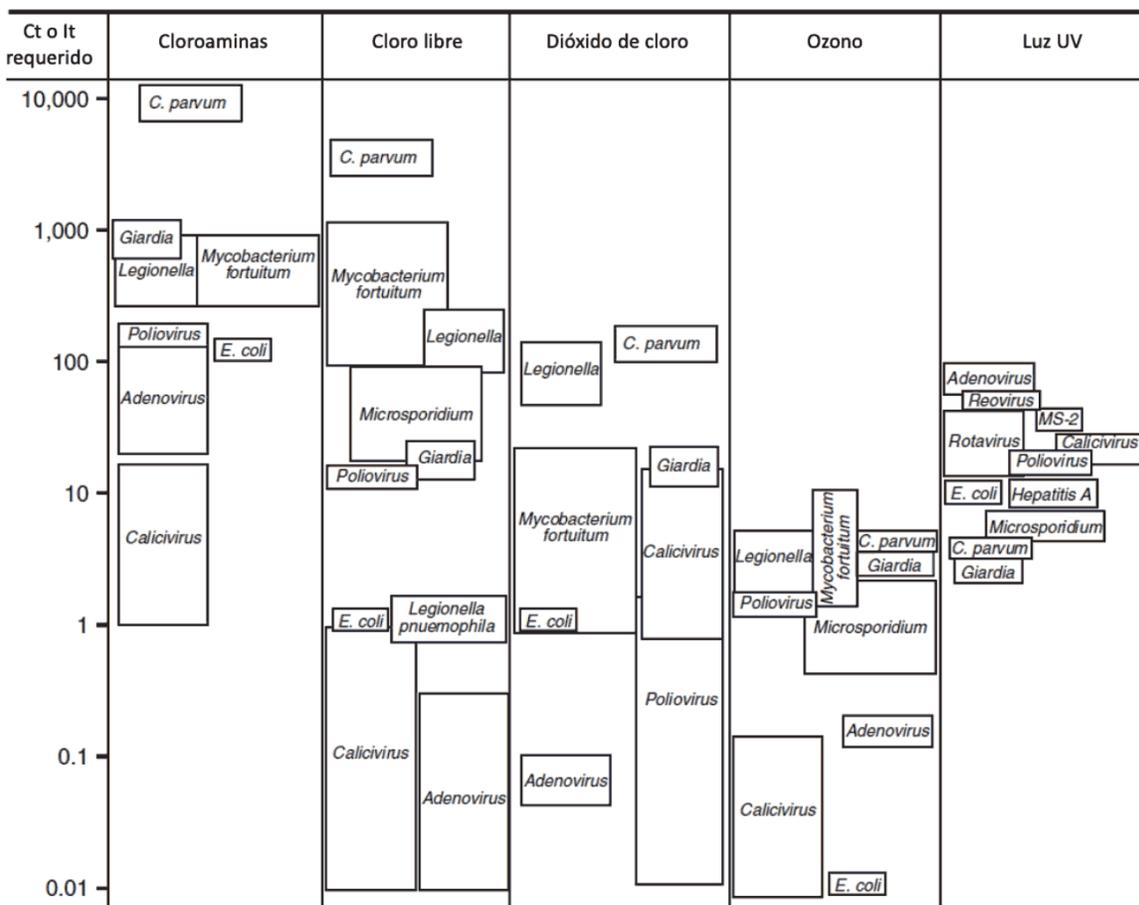


Figura 3. Requerimientos de desinfección para una inactivación del 99%

Fuente: (John et al., 2012).

La desinfección es un proceso clave en cualquier sistema de tratamiento de agua, pero cabe resaltar que la elección de los tratamientos terciarios dependerá de la línea de tratamiento primario y secundario y de la calidad que se exige en la legislación o normatividad vigente.

En la siguiente tabla comparativa (tabla 1) se observan las ventajas y desventajas de los métodos de desinfección anteriormente presentados

**Tabla 1. Comparación entre los métodos de desinfección**

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Cloración</b>	Es el reactivo más empleado en sistemas de desinfección	Su efecto depende del Ph
	Potente reactivo desinfectante	Genera subproductos cancerígenos
<b>Ozonación</b>	Es efectivo contra virus y bacterias	Requiere pH ácido
	Oxida numerosos compuesto orgánicos perjudiciales	No se puede transportar ni almacenar
<b>Radiación</b>	Resulta efectiva para sanitizar el agua	Su eficacia depende de la turbidez y color del agua
	No se originan subproductos químicos	
<b>Membranas</b>	Efecto barrera contra los organismos pequeños	No se consigue desinfección total
<b>Filtración</b>	Bajo costo de operación y simplicidad en la construcción	No se consigue desinfección total
	Se pueden fabricar con materiales disponibles en la zona	*Sin embargo el empleo de los AMN con plata como biocida se propone para el mecanismo de desinfección en el filtro
	Alta eliminación de microorganismos	

**Fuente: Elaboración propia**

### **Parámetros de calidad de agua de interés para el proceso de filtración/desinfección**

A continuación, se describirán brevemente los principales parámetros de interés que pueden afectar el proceso de filtración desinfección. Debe tenerse presente que los tratamientos de aguas residuales eliminan diferentes tipos de contaminantes, por lo que es importante conocer la calidad del agua resultante en cada tratamiento y su posible influencia en procesos subsecuentes, para lo cual se utilizan los parámetros mencionados a continuación.

pH: Indicador de la naturaleza ácida o básica de las aguas residuales

Sólidos suspendidos totales (SST):

Este parámetro es una medida de la concentración de partículas sólidas que se encuentran suspendidas en el agua residual. Incluyen sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables y no sedimentables.

El aumento de los sólidos suspendidos también es resultado de fuentes antropogénicas que incluyen descargas de agua residual, doméstica, industrial y comercial cabe mencionar que estas partículas también transportan contaminantes como metales pesados.

Durante el tratamiento primario se reducen los sólidos en suspensión. Puede llevarse por medio de operaciones como la sedimentación, decantación, coagulación, floculación, etc.

Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO) Es una medida del oxígeno que los microorganismos consumen durante la degradación de sustancias orgánicas. Especialmente del oxígeno que consumen las bacterias y hongos.

La materia orgánica biodegradable es medida en función de la DQO y de la DBO.

La DBO es una medida de oxígeno disuelto que requieren los microorganismos para estabilizar la materia orgánica en 5 días a 20°C.

La prueba de DBO es utilizada por las siguientes razones:

- 1.- Mide la eficiencia de algunos procesos de tratamiento.
- 2.-Determina la cantidad aproximada de oxígeno que será requerido para la estabilización biológica de la materia orgánica presente.
- 3.-Permite dimensionar las instalaciones del tratamiento biológico de las aguas residuales

Demanda química de oxígeno: (DQO)

Es una medición indirecta de contenido de materia orgánica que se obtiene mediante la medición de la cantidad de oxígeno necesario para oxidar toda la

materia orgánica presente. La prueba se realiza con un oxidante fuerte como el dicromato de potasio en condiciones ácidas. La DQO es equivalente a las mediciones de  $DBO_5$  ya que ambas miden el contenido de materia orgánica, sin embargo, los valores obtenidos en la DQO tienen la ventaja de obtenerse en un par de horas a diferencia de la  $DBO_5$  que requiere cinco días (Barrera, 2016).

Fósforo:

El fósforo en aguas residuales puede encontrarse como polifosfato, ortofosfato y como fosfato orgánico. Dichas formas del fósforo provienen de productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos entre otros (Nuevo, 2022).

El fósforo total existe en forma orgánica e inorgánica. El fósforo en el agua natural es una fuente de eutrofización.

Nitritos y nitratos: Son las formas más oxidadas del nitrógeno amoniacal.

Coliformes Totales: Organismos aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a  $35^{\circ}\text{C}$  en un medio líquido de lactosa con producción de ácido y gas en un periodo de 48 h.

Coliformes Fecales:

Los coliformes son bacterias que se encuentran en suelo, plantas, animales y seres humanos. Los coliformes fecales son indicadores de bacterias patógenas y pueden eliminarse por medio de la sedimentación, filtración, muerte natural o radiación ultravioleta. Su origen generalmente es fecal.

Grupos de organismos coliformes que pueden fermentar la lactosa a  $44-45^{\circ}\text{C}$ . Incluyen bacterias del género *Escherichia* y también especies de *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*.

Metales: Los metales pesados son frecuentemente añadidos al agua residual derivado de actividades comerciales e industriales.

Huevos de helminto:

Los huevos de helminto son considerados los organismos con mayor resistencia debido a la gran cantidad de capas de protección que posee (cuatro capas) la capa de vitelina le da resistencia y a su vez lo protege contra los agentes oxidantes y detergentes, entre otros.

### **5.3 Normatividad aplicable**

Para el reúso de aguas residuales tratadas se deben cumplir ciertos parámetros para su uso seguro. Las normas sobre el agua de reúso pueden diferir, en naturaleza y forma, en cada país y región por lo que no hay un procedimiento único que pueda aplicarse de forma universal, para desarrollar un marco reglamentario, es fundamental que cada país examine sus necesidades y capacidades. En México, la demanda de agua tanto en las ciudades como en otras zonas se ha incrementado por lo que es de interés común el desarrollo de programas que permitan un uso racional para la conservación y reúso de este recurso hídrico.

En México las normas relacionadas a la presente tesis serían:

- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-2021, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN CUERPOS RECEPTORES PROPIEDAD DE LA NACIÓN.
- 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.

A efecto de cumplir con la normatividad aplicable, específicamente en lo concerniente a la no presencia de microorganismos de interés sanitario, se presenta información relevante del efecto de los metales en la desinfección del agua.

#### **5.4 Metales como agentes desinfectantes**

No solo la plata si no también otros metales fueron utilizados por civilizaciones antiguas para la conservación de alimentos y el transporte de agua y otros líquidos, ya que observaban que permanecían limpios y frescos por más tiempo.

Con el avance tecnológico y científico se han realizado estudios que permiten explicar las costumbres de utilizar metales para dichos fines.

Las propiedades biocidas de los iones de plata y cobre en medios acuosos como albercas, fuentes decorativas, agua potable y desechos acuosos de hospitales que están contaminados por microorganismos, han sido descritas por diversos investigadores (Richards, 1981; Domek et al., 1987; Kutz et al., 1988; Landeen et al., 1989b; Thurman y Gerba, 1989; Yahya et al., 1990; Martínez, 2022).

De diversos estudios se sugiere que la propiedad desinfectante de los metales se debe a la liberación de iones que pueden interaccionar a nivel proteico, enzimático y genético dentro de los organismos (Vázquez, 2018). De manera reciente, se están realizando estudios para dilucidar el mecanismo de acción desinfectante que ejercen los metales sobre los microorganismos de interés sanitario como *Escherichia coli* y huevos de helminto de forma que se pueda eficientizarse el uso práctico de los metales, como los AMN, en sistemas de desinfección a escala real (Luna Pabello y Vázquez Aguilar, 2022).

Dada la capacidad microbicida de la Ag y su importancia para esta tesis, a continuación, se desarrolla este aspecto.

#### 5.4.1 Desinfección con plata

##### **Propiedades fisicoquímicas**

La plata es un elemento metálico color blanco-grisáceo, con símbolo Ag, número atómico 47 y peso atómico de 107.87. Después del oro resulta ser el metal más maleable, dúctil y es también un excelente conductor de calor y electricidad.

Actualmente se emplea para uso en joyería, aleaciones, electrónicos y otros componentes eléctricos, además de que en el tratamiento de agua se utiliza como desinfectante (Carbotecnia, 2013).

El empleo de compuestos de plata para el tratamiento y desinfección de agua no genera ningún efecto nocivo en la salud cuando se encuentra en concentraciones menores a 0.05 mg/L y tampoco afecta el olor y sabor del agua.

Resulta ser poco tóxica para animales ya que la mayor parte de la plata que se ingiere o que se inhala sale del cuerpo a través de las heces, aunque también se ha encontrado plata en orina. La excreción depende de las condiciones de exposición, del tipo de compuesto y del organismo al que se exponga, pero se ha concluido que el uso y consumo de plata y sus derivados no representan un daño tóxico para el ser humano (Coutiño, 2007).

##### Uso de la plata

Desde hace más 4,000 años fue utilizada por culturas antiguas como germinicida natural. En años recientes se han realizado estudios del efecto de la plata no solo como desinfectante del agua, sino también como desinfectante de suelos y fungicida de semillas.

Asimismo, se ha utilizado para la desinfección del agua reciclada en la estación espacial MIR (Silver, 2000).

En tanto que su empleo para la purificación de agua para consumo humano se ha limitado a casas habitación en donde se suelen utilizar filtros de carbón activado recubiertos de plata y resinas de intercambio iónico (Carbotecnia, 2015).

De manera más reciente, el uso de nanopartículas de plata ha evidenciado ser uno de los agentes desinfectantes de agua más efectivos y que no producen subproductos nocivos en la desinfección de agua potable. Las nanopartículas de plata tienen un efecto oligodinámico natural que permite matar microbios resistentes a antibióticos sin afectar las células de mamíferos (Bhardwaj et al., 2021).

## 5.5 Mecanismos de desinfección por Ag

La Ag posee los estados de oxidación  $Ag^0$ ,  $Ag^{1+}$ ,  $Ag^{2+}$ ,  $Ag^{3+}$  donde  $Ag^0$ ,  $Ag^{1+}$  se encuentran de forma estable mientras que  $Ag^{2+}$ ,  $Ag^{3+}$  no se encuentran fácilmente ya que solo se han obtenido vía electrolítica y de manera natural en rocas. En su estado de oxidación  $Ag^{3+}$  se observa un mayor poder desinfectante (Magaña, 2010).

### a) Por oxidación catalizada por la plata

La plata tiene la propiedad de adsorber oxígeno molecular del aire en su superficie, el cual se introduce en los huecos de la estructura octaédrica de la plata.

Cuando la plata es puesta en medio acuoso, el oxígeno contribuye al poder oxidativo de la plata debido a que al entrar en contacto con la materia orgánica instantáneamente la oxida. La desinfección ocurre cuando el oxígeno se une a los pares de grupos sulfhidrilo  $-SH$  de la superficie de las bacterias o virus, reemplazando a los átomos de hidrógeno (como agua) lo cual bloquea completamente la respiración y la transferencia electrónica provocando citólisis (Miranda, 2005).

### b) Inactivación de bacterias y virus por plata monovalente

La plata es estable como  $Ag^0$  y  $Ag^{+1}$  y debido a su electronegatividad se favorece su interacción con la superficie de los microorganismos (Le Ouay y Stellacc, 2015).

Se ha demostrado que  $Ag^{+1}$  reacciona con los grupos amino ( $-NH_2$ ), carboxilo ( $-COOH$ ) y sulfhidrilo ( $-SH$ ) Estas interacciones modifican los mecanismos de transporte de membrana y promueven la formación de complejos con plata que

inactivan enzimas superficiales que interfieren con la respiración de los organismos. (Miranda, 2005)

Los iones de plata actúan como veneno que al combinarse con las proteínas de las células resultan en la unión de átomos de azufre formando enlaces R-S-S-R e interrumpiendo así la transferencia de electrones y la transcripción de material genético, también impide la unión a las bases ribosas y grupo fosfatos al sustituirse los iones hidrógeno por enlaces tipo S-Ag que son más estables y bloquean la respiración del organismo provocando su muerte.

c) Inactivación de bacterias y virus por la plata bivalente y trivalente

El óxido de plata posee propiedades desinfectantes. La molécula de óxido de plata está formada por cuatro átomos de plata y cuatro átomos de oxígeno ( $\text{Ag}_4\text{O}_4$ ) El átomo de plata en esta configuración presenta dos estados de oxidación, el uno y el tres por lo que se le conoce como óxido de plata polivalente.

Los iones de plata son tres veces más efectivos en la eliminación de patógenos que los iones de plata obtenidos electrolíticamente (Miranda, 2005). Concentraciones bajas de iones de plata bastan para destruir la mayor parte de los microorganismos en un tiempo suficiente.

Mientras que generada electrolíticamente con cobre se ha demostrado que elimina la bacteria *Legionella* spp, presente en los sistemas de agua caliente de los hospitales (Blanc et al., 2005) y en conjunto con cloro se emplea para la desinfección en albercas.

Por su parte la plata coloidal es la más efectiva para eliminar *Vibrio cholerae* y *E. coli* (García, 2002)

d) Inactivación de Huevos de Helminto usando Ag

Los iones desinfectantes atacan a los radicales de la superficie de la cubierta, con lo cual se daña la respiración celular mediante el bloqueo de la transferencia electrónica, lo que impide el intercambio de energía metabólica y por ende la de la actividad de las vías anabólicas y catabólicas. Otra explicación está basada en la

naturaleza de la modificación de enzimas específicas, las cuales son requeridas para que la actividad bioquímica (tipo redox) se lleve a cabo. La inactivación del HH por la Ag es consecuencia de la formación de sulfoaminoxidasas, las cuales son favorecidas por el rompimiento del tegumento externo del huevo de helminto. (Magaña, 2018)

También se ha demostrado que la inactivación puede darse por la penetración natural, a través de las fisuras o fracturas existentes en HH, lo cual favorece la penetración del metal hasta un nivel nuclear, ocasionando daño estructural irreparable con lo que impacta de manera directa en la pérdida de su viabilidad (Magaña-López et al., 2016)

## **5.6 Factores que afectan la desinfección de aguas con plata**

Las partículas suspendidas, la materia orgánica, compuestos inorgánicos, el pH, la turbidez, tiempo de exposición y temperatura son algunos factores que podrían disminuir la capacidad de los agentes desinfectantes. Es por ello, por lo que se debe tomar en cuenta la calidad del agua a tratar antes de llevar a cabo el proceso de desinfección.

### **a) Materia orgánica**

Los aminoácidos y proteínas forman complejos con la plata antes de que pueda reaccionar con otros microorganismos. Lo anterior, resulta en la formación de subproductos conocidos como proteínatos de plata, los cuales no poseen capacidad desinfectante y que, además reducen la cantidad de plata disponible que puede reaccionar con las bacterias (Starodub y Trevors, 1990; Wang et al., 2003).

Materia orgánica + Ag<sup>+</sup> = Proteínatos de Ag

### **b) Turbidez**

Las partículas suspendidas sirven como protección para los microorganismos, además de que algunas partículas reaccionan y consumen plata antes de que esta puede atacar a los microorganismos.

c) Compuestos inorgánicos

Los iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ ), hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfatos interfieren en la inactivación de microorganismos ya que son reactivos con la plata (Ag) por lo que su disponibilidad disminuye.

d) pH

El pH y el potencial determinan el estado de oxidación en el cual se encuentra la plata y por tanto su capacidad desinfectante.

e) Tiempo de exposición

Se necesitan tiempos determinados para que ocurra ya que las reacciones son a nivel proteico.

f) Temperatura

La temperatura influye en la capacidad desinfectante.

Considerando la importancia de la plata y otros metales como agentes microbicidas a bajas concentraciones y la posibilidad de contar con terreros de minas de plata que contienen trazas de los metales de interés, a continuación, se proporcionara una breve información sobre el aspecto minero. (Magaña, 2011)

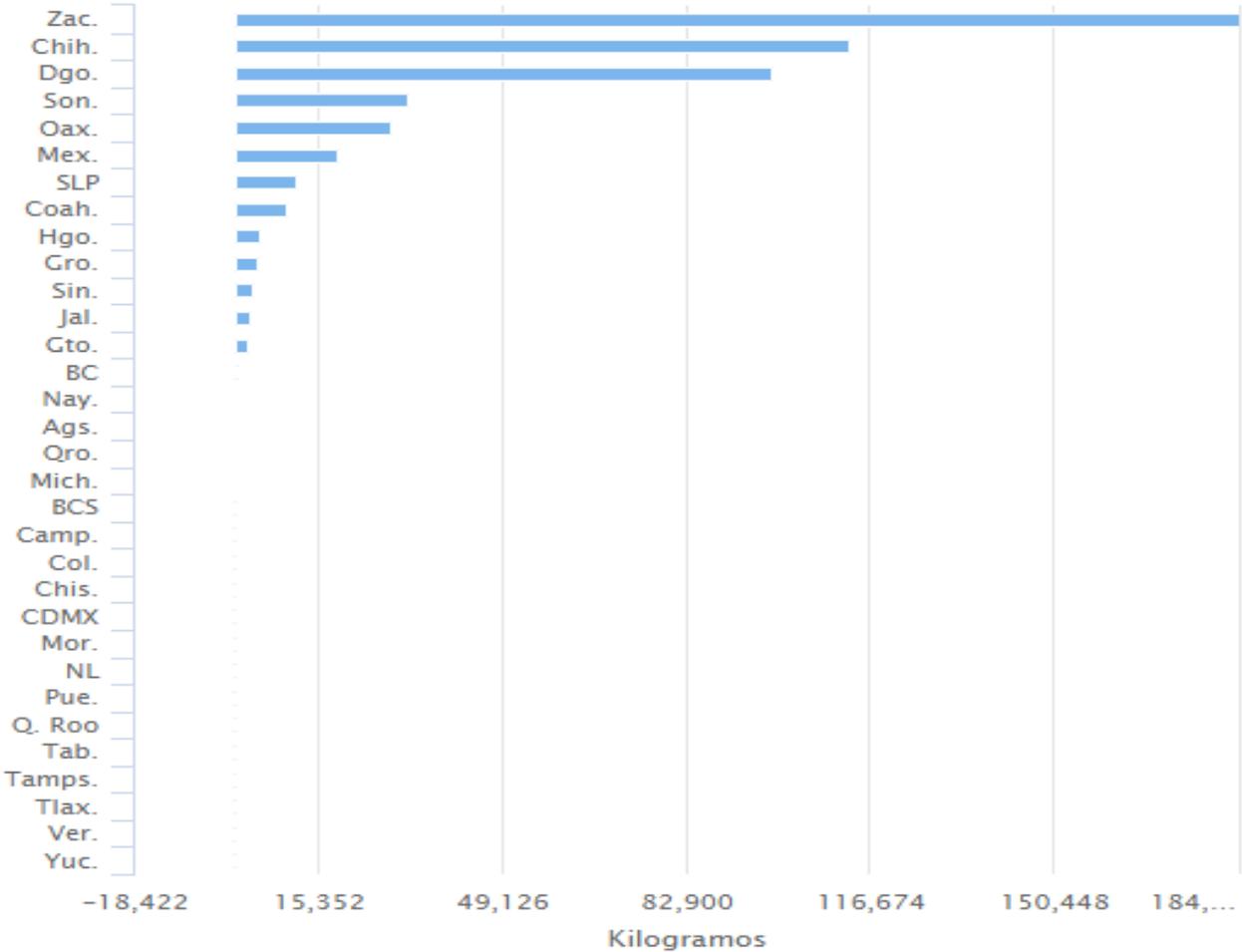
## 5.7 Industria minera en México

La minería tiene su origen desde épocas prehispánicas pero su importancia económica y social se suscitó en la época colonial con el descubrimiento de vetas de plata en 1546 (Calzada, 2015).

Actualmente, México es el principal productor de plata en el mundo y ha ocupado el puesto por varios años incluso pese a que en el año 2020 como consecuencia de la pandemia del COVID 19 se detuvieron las operaciones mineras.

A nivel nacional, diversos estados producen plata, pues los yacimientos se localizan a lo largo de la Sierra Madre Occidental, así como en la altiplanicie mexicana.

En la figura 4 se presenta el valor de la producción de plata por estado de acuerdo con datos oficiales del INEGI, correspondientes a los últimos datos de octubre del 2022 y tal como se observa, Zacatecas es el estado líder a nivel nacional en cuanto a la producción de plata, le siguen los estados de Chihuahua, Durango, Sonora, Oaxaca, Edo de México, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Jalisco e Hidalgo, los cuales cuentan con diversos distritos mineros



**Figura 4. Valor de producción minera de plata. Valor por entidad (Kilogramos)**

Fuente: INEGI, 2022

Con una amplia distribución de estados mineros en el país, se originan los terreros de minas de plata de donde se obtienen los agregados minerales naturales conteniendo trazas de metales sin valor comercial asociado, pero con alto potencial microbicida para la desinfección de aguas residuales. En consecuencia, la recolección del material de interés para el presente trabajo se considera que esta ampliamente disponible, tomando en cuenta la cantidad de minas metálicas en el país y su actividad en extracción de plata, cobre y hierro, entre otros.

### 5.8 Caracterización de los agregados minerales naturales (AMN)

El AMN no solo está compuesto por plata si no por otros metales y minerales cuyas cantidades o presencia variara dependiendo del lugar de recolección del material. De acuerdo con los resultados reportados en Magaña López (2010, 2018) se obtuvo una densidad del material de entre 1.67-2.43 g/cm<sup>3</sup>. Cabe señalar que dicho intervalo es similar a lo reportado para medios empleados en la filtración lenta tales como la arena (≈1.65 43 g/cm<sup>3</sup>), antracita (≈1.80 g/cm<sup>3</sup>), caliza (≈2.68 g/cm<sup>3</sup>), y grava (≈3.11 g/cm<sup>3</sup>) (Turbidex, 2010).

De acuerdo con los datos reportados en Magaña (2011) la composición porcentual de elementos encontrados en el AMN es de 18 elementos, como se ha mencionado,

**Tabla 2. Distribución Elemental en el AMN**

Elemento	Prevalencia en el AM (%)
C	10.5
O	26.3
Mg	36.8
Al	63.2
Si	78.9
P	5.3
Si	36.9
K	47.4
Ti	5.3
V	5.3
Fe	84.2
Cu	10.5
Zn	15.8
As	26.3
Ag	15.8
Au	26.3
Hg	5.3
Pb	31.6

Fuente: Tomado y modificado de Magaña (2010)

al extraer los AMN de minas metálicas se garantiza la presencia de la Ag y de otros metales de interés para el propósito de la desinfección (Tabla 2).

En cuanto a la porosidad reportada, el intervalo se encuentra entre 30 y 50%, valores que favorecen el contacto con los fluidos y con lo cual se contribuye a la desinfección propuesta en el presente trabajo, basada en filtración desinfección en una sola etapa. En este sentido, a continuación, se describen los aspectos relevantes del proceso de filtración.

## **5.9 Filtración**

La filtración es un proceso de separación de sólidos suspendidos de una fase líquida por medio de materiales porosos cuya finalidad es conseguir una remoción de partículas desde arenas hasta partículas más pequeñas como coloides u organismos patógenos presentes en efluentes que han sido tratados por procesos biológicos y químicos. Con la filtración se incrementa la remoción de sólidos suspendidos, fosforo, DBO, DQO, metales pesados, asbestos, bacterias, algas, virus, huevos de helmintos, hongos, aunque la eficiencia estará en función del tipo de material que se utilice para el proceso.

Los objetivos principales de la filtración son:

- Purificación de agua que es extraída del subsuelo y de la superficie, para llegar a una calidad apta para consumo.
- Tratamientos avanzados de agua potable, para aplicaciones industriales específicas, por ejemplo, la destilación de agua, producción de vapor o uso de agua para refrigeración.
- Tratamiento de agua de fuentes no convencionales para aumentar la cantidad de agua disponible, como lo son la recolección de agua de lluvia, aguas grises y el reciclaje de aguas municipales (Sutherland, 2012).

Para que el agua sea filtrada debe pasar a través del medio filtrante aplicando alguna fuerza motriz, que puede ser gravedad, centrifugación, aplicación de presión sobre el fluido por encima del filtro u otros procesos en los cuales es necesario utilizar bombas, válvulas y tuberías para ejercer la presión que empuje al agua a través del filtro.

Así mismo, debe haber una diferencia de diámetros entre el filtrado y el medio filtrante que en combinación con un espacio poros e intersticial adecuados, así como una buena capacidad de interacción con el medio son factores determinantes para que el material filtrado se quede retenido en el espacio intersticial o en el hueco del poro.

La filtración puede ocurrir a través de un sólo lecho filtrante o de varios lechos superpuestos y puede ser de uno o más materiales filtrantes.

El agua es tratada en sistemas de filtración con lechos de materiales granulares que retienen los contaminantes presentes en el agua. La elección del tipo de filtro debe basarse en las características del agua y costo total del sistema de filtración. Los filtros se han utilizado como un método importante para la purificación de agua, sin embargo, cabe mencionar que por sí solos no brindan agua potable ya que es necesario un pretratamiento adecuado y un tratamiento posterior de desinfección utilizando generalmente cloro.

### Clasificación de filtros

Se pueden clasificar teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

Tipo de medio filtrante, dirección del flujo, velocidad del flujo, fuerza motriz del flujo y método de clarificación.

#### Tipo de medio filtrante

Medio único: Sólo se emplea un medio de material filtrante que puede ser, grava, arena, carbón activado, antracita, zeolita, etc.

Medio dual: Se conforman de dos tipos de materiales filtrantes.

Medio múltiple: Se conforma por más de dos tipos de materiales filtrantes.

### Dirección del flujo

Ascendente: dirección de flujo de abajo hacia arriba

Descendente: dirección de flujo de arriba hacia abajo

Biflujo o flujo mixto: Conformado por una parte ascendente y otra descendente

### Velocidad de flujo

Filtros rápidos: La tasa de filtración es de 120 a 360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d

Filtros lentos: La tasa de filtración es de 2-9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d para agua altamente contaminada con alta carga de materia orgánica.

En la filtración lenta se tiene como objetivo la purificación de aguas más contaminadas por lo que estos filtros están compuestos de tal forma que el agua fluya muy despacio a través del lecho filtrante.

### Fuerza motriz del flujo

Por gravedad: El agua escurrirá por acción de la gravedad

A presión

### Método de clarificación

Filtración directa: No hay un tratamiento previo a la filtración

Filtración después de sedimentación

El medio filtrante se selecciona basándose en la calidad de agua filtrada que se desea obtener. El medio filtrante ideal es aquel de una determinada granulometría que requiera una mínima cantidad de agua para ser lavado, que sea capaz de remover la mayor cantidad de partículas suspendidas y que, por tanto, se obtenga un efluente de buena calidad (Blacio Ordoñez, 2011).

Los filtros utilizados convencionalmente eliminan hasta un 95% de la mayoría de sólidos suspendidos, sin embargo, gran parte de la eficiencia del proceso está dada en función del tipo de material que se utilice.

#### 5.9.1 Filtración lenta

La filtración lenta de arena fue el primer tipo de filtración granular usado en el tratamiento de aguas a nivel municipal. Las primeras instalaciones de este tipo fueron construidas en Escocia e Inglaterra a principios del siglo XIX. Mientras que la primera planta con sistemas de filtración lenta de arena de la que se tiene conocimiento fue desarrollada en Nueva York en 1872. A pesar de que las profundidades del lecho de arena para estos filtros oscilan entre 0.9 y 1.5 m, la mayoría de los filtros lentos diseñados para comunidades tienen una profundidad típica de 0.76 m (Cadavid Rodríguez, 2009).

La filtración lenta se caracteriza por ser un sistema sencillo, limpio y a la vez eficiente para el tratamiento de agua debido a su bajo costo de operación y mantenimiento resulta ideal para su instalación en zonas rurales y pequeñas comunidades.

No requiere aplicarse ninguna sustancia química, pero requiere un buen diseño.

El objetivo de esta filtración es el tratamiento de aguas con concentraciones bajas de sólidos en suspensión.

Cuando el filtro lento es el único tratamiento por aplicar, la velocidad de filtración a utilizar es de 0.10 a 0.20 m/h. Si hay un proceso preliminar se puede aumentar la velocidad.

Debido a que en estos filtros el agua fluye a velocidad lenta a través del lecho quedan retenidas en la superficie las partículas de mayor tamaño por lo que se favorece la formación de una capa biológica porosa (biopelícula) y delgada, pero con una gran superficie de contacto lo cual favorece la adsorción de impurezas.

La velocidad de filtración se encuentra en un rango de 0.1-0.5 m/h y variará de acuerdo con el número de tratamiento preliminares, tal como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Velocidad de filtración de acuerdo con el número de tratamientos preliminares**

<b>Procesos</b>	<b>V<sub>f</sub> (m/h)</b>
Filtración Lenta	0.10-0.20
Sedimentación o prefiltración	0.15-0.30
Sedimentación+prefiltración + filtración lenta	0.30-0.50

Fuente: Blacio Ordoñez (2011). Filtros biológicos para la potabilización del agua

El agua influente al filtro debe tener baja turbidez y valores de sólidos en suspensión (SS) < 15 mg/L y una turbidez <5 NTU En caso de tener valores más altos de estos parámetros se sugiere utilizar tratamientos previos.

El material filtrante debe tener un tamaño efecto de (D<sub>10</sub>) entre 0.15 y 0.35 mm

El coeficiente de uniformidad Cu deber ser de preferencia <2 A continuación, en la tabla 4 se enlistan las ventajas y desventajas del filtro lento por gravedad

**Tabla 4. Ventajas y Desventajas del filtro lento por gravedad**

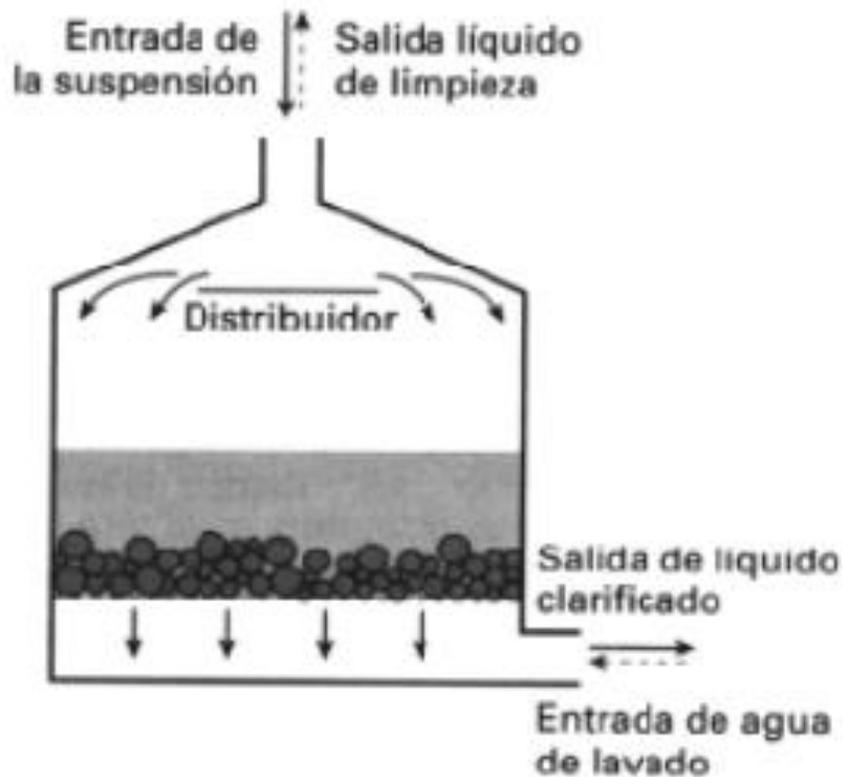
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Fácil construcción, y costos accesibles	Los costos dependen del país y la zona
No se añaden reactivos químicos	Se necesita un terreno amplio
Mantenimiento y control sencillo	El filtro es sensible a los cambios de calidad del agua afluente
Reducción de turbidez y coliformes de 90-99%	El desarrollo de la biopelícula colmata el filtro
La calidad del agua obtenida es elevada	En climas fríos podría ser necesario cubrir el filtro lo cual implica un costo adicional

Fuente: Elaboración propia

La eficiencia de remoción del lecho de arena depende más de su madurez biológica que de la profundidad. En estudios se ha demostrado que la mayor parte de remoción de contaminantes se lleva a cabo dentro de los primeros centímetros de la parte superior del lecho debido a que la actividad biológica es mayor (Blacio Ordoñez, 2011).

En diversos estudios de filtros de arena se ha concluido que son eficientes en la remoción de bacterias y virus, así como en valores de turbiedad obtenidos de entre 0.1 y 0.2 NTU (Cadavid Rodríguez, 2009).

En la figura 5 se presenta un esquema general de la filtración por gravedad



*Figura 5. Filtración por Gravedad*

Fuente: Diaz Restrepo y Niño Lozada (2018) Evaluación del comportamiento de materiales alternativos para lechos filtrantes

## Mecanismos que intervienen en la filtración

Los mecanismos de filtración están en función del tamaño de partículas y su densidad.

Las partículas de menor diámetro que los poros del medio filtrante entran libremente al material granular y tienen que atravesar una distancia relativamente grande antes de poderse adherirse a los granos que forman dichos poros por lo cual es importante mencionar que el proceso de filtración ocurre en dos etapas distintas:

### Transporte de partículas dentro de los poros

Donde los mecanismos a considerar para la realización del transporte son: a) Cernido, b) Sedimentación, c) Intercepción, d) Difusión y e) Impacto inercial.

### Adherencia a los granos dentro del medio

Los mecanismos de adherencia son: Fuerzas de Van Der Waals, fuerzas electrostáticas y puente de químico.

Mecanismos biológicos: Los microorganismos forman una película biológica en el lecho.

Resulta difícil identificar cuál mecanismo es el que controla el proceso de filtración, ya que además de que más de uno se lleva a cabo, no todos actúan al mismo tiempo, contribuyendo en mayor o menor proporción en función de las características del agua a tratar (Blacio Ordoñez, 2011).

## Funcionamiento

Los filtros pueden clasificarse en continuos y semicontinuos. Los filtros semicontinuos se mantienen en funcionamiento hasta que se empieza a deteriorar la calidad del efluente o hasta que se produce exceso de pérdida de carga en el filtro por lo que, al llegar a este punto, se debe detener la operación del filtro y proceder a realizar un lavado para eliminar los sólidos acumulados en los poros del material, por su parte en los filtros continuos los procesos de filtración y lavado se llevan a cabo de manera simultánea.

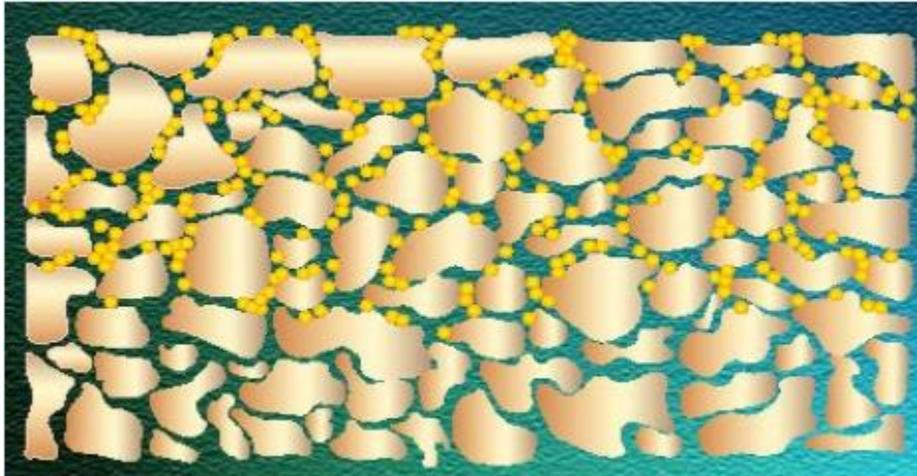
Algunos factores de importancia para el diseño de filtros lentos de arena son: tipo de partículas del medio de empaque, la profundidad del lecho o lechos si es multicapa, la tasa de carga orgánica e hidráulica, y la frecuencia y duración de la dosificación. Aunque en la literatura varían las consideraciones de diseño para los filtros de arena, se busca que los resultados sean eficientes y se satisfagan las necesidades para lo cual se diseña el filtro, siendo así que queda a criterio del diseñador las variables que considerará.

### Filtración de lecho profundo

Cuando las partículas en suspensión tienen un tamaño suficiente, los sólidos quedan retenidas en superficie, recibiendo el nombre de filtración superficial, en torta o sobre soporte; mientras que, si las partículas tienen un tamaño inferior, penetran a través del material y pueden quedar adsorbidas en el interior de la masa porosa, denominándose en este caso filtración en profundidad o sobre lecho filtrante (Pérez López, 1995). Este proceso tiene la ventaja de retener una mayor cantidad de partículas antes de taparse o colmatarse y de requerir retro lavado.

Los filtros de medios granulares que son de profundidad es decir que realizan su función a lo largo de cierta profundidad usualmente se diseñan con una altura de cama de entre 15 y 30 pulgadas. Estos filtros pueden operar a gravedad o a presión. (Carbotecnia, 2013).

Tal como se observa en la figura 6, las partículas contaminantes son atrapadas tanto en la superficie como en grueso del medio filtrante por lo que aumenta la retención de contaminantes.



**Figura 6. Filtración de lecho profundo**

Fuente: Sánchez (2016) Conceptos básicos de filtración.

El proceso de filtración actúa sobre la calidad física, química y bacteriológica del agua sin la necesidad de adicionar compuestos químicos.

En este tipo de filtración se pueden instalar una o más capas con diferentes materiales granulares. A continuación, en la tabla 5 se muestran las principales variables para el diseño de filtros granulares.

**Tabla 5 Principales variables que intervienen en el diseño de filtros granulares**

<b>Variable</b>	<b>Importancia</b>
Características del medio filtrante (tamaños de grano, forma, densidad,	Afecta la eliminación de partículas y al aumento de la pérdida de carga
Porosidad del lecho filtrante	Determina la cantidad de sólidos almacenados en el filtro
Profundidad y/o altura de las capas	Afecta la pérdida de carga y a la duración del filtro
Velocidad de filtración	Sirve para calcular la pérdida de carga con agua

Fuente: Otero Calviño (2009). Filtración de aguas residuales para reutilización

Cabe mencionar que no hay una forma definitiva y única para el diseño de filtros pues dicho diseño dependerá de otros factores como la disponibilidad del material de empaque, el terreno y tanto la calidad de agua que se requiera tratar como la deseada en el efluente.

### 5.9.2 Filtros y biopelícula

Para el tratamiento de aguas residuales se han desarrollado sistemas de filtros con formación de biopelícula o biofiltros (Flores, 2006), los cuales depuran las aguas residuales mediante procesos de tratamiento físico y biológico ya que se atrapan los contaminantes sólidos suspendidos en el agua en el medio filtrante, permitiendo así la formación de una capa de microorganismos denominada biopelícula. Esta estructura es capaz de reducir la concentración de sólidos y promover la estabilización de la materia orgánica a través de la actividad de los microorganismos. Para el caso del filtro desinfectante que se propone, se trata precisamente de un medio que cumple con dos funciones: 1) retención de partículas, entre ellas microorganismos de interés sanitario; 2) eliminación, inactivación o destrucción de los microorganismos contenidos en el agua a tratar, retenidos o no en el medio filtrante. Por este motivo, es indeseable la formación de biopelícula en el filtro ya que su presencia reduciría la interacción de los metales del medio filtrante con los microorganismos que se pretende remover, ocasionando la necesidad de dar mayor mantenimiento (Rico, 2020).

### Ley de Darcy

En todos los casos, los mecanismos de filtración se rigen por la ley de Darcy, la cual indica que la velocidad del fluido en medio poroso es directamente proporcional al gradiente hidráulico a través del coeficiente de permeabilidad.

A la velocidad del agua que circularía por todo el medio poroso se le denomina velocidad de Darcy o velocidad de flujo. Actualmente, se expresa mediante la siguiente ecuación (Flujo en medios porosos, 2008).

$$q = -K \left( \frac{dh}{dl} \right) \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

q: Q/sección (caudal o flujo que circula por m<sup>2</sup> de sección)

K= conductividad hidráulica

dh/dl= gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales, el signo negativo expresa la dirección hacia los Ah decrecientes.

*K<sub>h</sub>: Conductividad hidráulica*

Su magnitud indica la velocidad con que transita el agua en el medio poroso o bien la resistencia que ofrece el medio a la circulación del agua. Este parámetro toma en cuenta las características físicas y granulométricas del medio poroso, así como las características viscosas del fluido, pues dichas características afectan la velocidad.

El régimen de movimiento de un fluido puede conocerse a través del número adimensional de Reynolds (Re) que relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas se expresa mediante la ecuación:

$$Re = \frac{\rho_w v d}{\mu} \dots\dots\dots Ecuación 2$$

Donde:

v= velocidad del flujo (m/s)

d= tamaño medio del diámetro de las partículas (m)

ρ<sub>w</sub>= densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

μ=viscosidad dinámica (kg/ms)

Cuando dominan las fuerzas viscosas el flujo es laminar y si por el contrario dominan las fuerzas de inercia el flujo pasa a ser un régimen turbulento.

La ley de Darcy es únicamente válida cuando predominan fuerzas viscosas, es decir cuando hay régimen laminar.

En medio poroso es válida la ley de Darcy cuando el número de  $Re < 1-10$

Por lo anterior, las definiciones de la ecuación de Darcy se pueden considerar para el diseño de filtros de lecho profundo.

### 5.9.3 Variables del proceso de filtración

Las características del material, de la cama o lecho filtrante, el tipo de agua a tratar y el entorno son algunos factores para considerar que afectan el proceso de filtración.

#### Selección de las capas filtrantes

La filtración está en función tanto del tamaño de partícula del medio filtrante como de la altura de los lechos. Se considera que la remoción de los contaminantes generalmente es mejor con mayores alturas de cama y con menores tamaños de partícula. En general, mientras más grueso es un medio filtrante, permite un mayor tiempo de filtrado entre retro lavados.

Cuando se pretende instalar un filtro de dos o tres medio granulares, en la parte superior se coloca el medio granular de partículas más grandes y de menor densidad de partícula mientras que en la parte inferior se coloca el medio de partículas más pequeñas y de mayor densidad de partícula, esto con el fin de evitar que se mezclen las capas, así como para mantener su posición durante el proceso de filtración y de retro lavado (Carbotecnia, 2023).

El medio granular superior retendrá partículas suspendidas de mayor tamaño presentes en el agua y el inferior, las de menor tamaño. La ventaja de esta configuración es que al realizar el retro lavado los medios se expanden y posteriormente vuelven a su tamaño y/o posición original. Por esta razón, los filtros

multicapa tardan un tiempo mayor en taparse y por tanto un mayor tiempo en requerir retro lavado.

### Porosidad

La porosidad se expresa como la fracción del volumen total absorbida por el espacio poroso (Moret, Fernández, 2015) y se expresa con la ecuación:

$$\phi = V_i/V_T \dots\dots\dots\text{Ecuación 3}$$

Donde:

$V_i$ : volumen del espacio poroso

$V_T$ : Volumen total de la muestra

### Características del influente

La composición del agua a filtrar es fundamental en el comportamiento del filtro, las características más importantes del agua a filtrar son la cantidad de sólidos en suspensión, tamaño y distribución de las partículas, un agua coagulada, floculada y sedimentada ve mejorada la calidad antes de filtrar.

### Área del filtro

Se calcula con la siguiente ecuación (Blacio Ordoñez, 2011)

$$A_f = \frac{Q}{v_f} \dots\dots\dots\text{Ecuación 4}$$

Donde:

$A_f$ : Área del filtro ( $m^2$ )

$Q$ : Caudal o flujo de diseño

$v_f$ : Velocidad de filtración (m/h)

### Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El TRH es un parámetro esencial. Es el tiempo en el cual el agua tiene contacto con el medio filtrante y hasta su salida del sistema (Anda, 2021)

Para el cálculo de este parámetro se utiliza la siguiente ecuación

$$TRH = \frac{V}{Q} \dots\dots\dots\text{Ecuación 5}$$

Donde:

TRH: Tiempo de retención hidráulico(h)

V: volumen del filtro(m<sup>3</sup>)

Q: caudal de diseño (m<sup>3</sup>/h)

Carga hidráulica (Calderón, 2013)

Se refiere a la velocidad del agua a través del área y profundidad del lecho

Se calcula con la ecuación:

$$CH = \frac{Q}{Af} \dots\dots\dots\text{Ecuación 6}$$

Donde

CH: Carga hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h)

Q: flujo o caudal de diseño (m<sup>3</sup>/h)

Af: Área del filtro (m<sup>2</sup>)

El agua influente a un sistema de filtración no debe tener una concentración de sólidos superior a cierto límite para evitar el mal funcionamiento y explotación del filtro por lo que con pretratamientos como la coagulación, floculación, sedimentación y la decantación previos, se obtienen mejores resultados en la filtración.

Lecho del medio filtrante

Su función es remover los contaminantes del agua, su tipo y tamaño de partícula conforman la hidráulica ya que el lecho debe ser adecuado para proporcionar condiciones óptimas de velocidad de infiltración, tiempo de residencia y conductividad hidráulica. Por su parte, los materiales filtrantes se identifican de acuerdo con los siguientes parámetros (Calle, 2019).

Granulometría:

**Díámetro efectivo:** Determina la eficacia de filtrado y es la abertura de una malla por la cual únicamente pasa 10% en peso del material filtrante

**Forma de los granos:** Angulares o redondos

Peso específico: El peso específico será igual al peso de los granos de un material dividido por el volumen efectivo que ocupan estos granos.

Coefficiente de uniformidad (Cu) Es la relación de los tamaños pertenecientes al 60% en peso de una muestra del material filtrante entre una abertura de malla donde solo pasa 10% de la muestra del material ( $d_{60}/d_{10}$ ).

El medio filtrante se describe en función de su diámetro efectivo y el coeficiente de uniformidad. Normalmente se elige un tamaño efectivo de 0.15 a 0.35 mm mientras que el Cu puede ser menor a 3 pero se recomienda se encuentre en un intervalo de 1.8 a 2.0.

Las partículas contaminantes son atrapadas tanto en la superficie como en el grueso del medio filtrante por lo que aumenta la retención de contaminantes.

Para que el proceso de remoción sea eficiente la altura del lecho filtrante debe ser de 0.6 m como mínimo a 0.75 m. Sin embargo, algunos filtros operan con un espesor mínimo de 0.30 m.

La vida útil de medios granulares es de entre 2 a 10 años, pero dependerá de la operación y de la erosión del medio durante los retro lavados.

#### Elementos básicos del filtro

- 1) Caja de filtro: Se conforma por el lecho filtrante, la capa de soporte, sistema de drenaje, altura del agua sobrenadante y borde libre.
- 2) Contenedor para el medio filtrante:
- 3) Sistema de drenaje y tuberías: Tubos de cloruro de polivinilo (PVC) cédula 40.
- 4) Sistema para la alimentación, distribución del líquido a tratar y recolección uniforme del agua filtrada.

La dosificación es una variable de importancia para obtener un buen efluente. Por lo anterior, se requiere de un sistema de dosificación el cual trabaje por presión o gravedad, de forma que se garantice una distribución uniforme en el medio.

Algunos de los sistemas empleados para la dosificación cuentan con boquillas de aspersión, cangilones inclinados y moldes especiales de plástico.

5) Medio filtrante (tamaño de las partículas del material granular).

6) Medio de soporte: Debe ser de mayor granulometría que las capas del lecho para evitar pérdidas del medio filtrante y obstrucciones en la salida del filtro.

7) Dispositivos de regulación y control: Válvulas y dispositivos de medición de caudal.

### Estructura del Filtro

Medio filtrante: Material de granulometría determinada que llevará a cabo la retención de contaminantes, incluidos los microbianos.

Zona de saturación o almacenamiento: El paso del agua es reducido y se eleva la pérdida de carga.

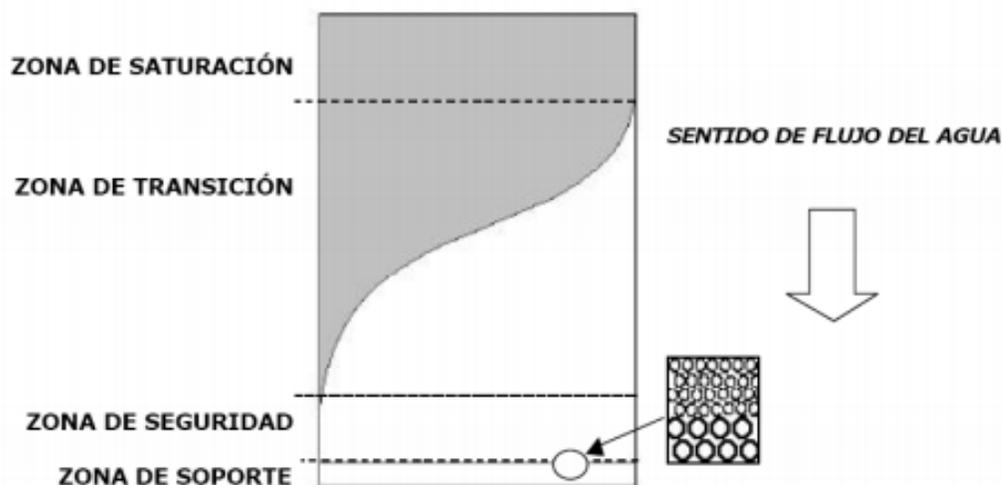
Zona de transición o transferencia: El medio filtrante o lecho contiene una cierta cantidad de materia en suspensión y aun retiene la mayor parte de sólidos.

Zona de seguridad: El medio sólo recibe agua limpia.

Zona de soporte: Se recoge el agua filtrada y se compone del mismo material que el medio filtrante, pero de mayor granulometría.

Cuando la pérdida de carga de filtro es máxima, es momento de un retrolavado para eliminar los contaminantes y desprender la biopelícula en los poros del medio filtrante ya que si el proceso de filtración continua bajo esas condiciones, no se obtendrá el agua de la calidad esperada (Pérez de la Cruz, 2009).

En la figura 7, se muestran las zonas que componen a un filtro granular.



**Figura 7. Estructura del filtro.**

Fuente: Pérez de la Cruz (2009) Abastecimiento de aguas, Filtración.

### Biopelícula

La biopelícula son comunidades de microorganismos que se desarrollan por una matriz extracelular que les permite la adhesión sobre superficies vivas e inertes (Ortega y Hernández, 2018). Cuando las bacterias se unen a la superficie de los gránulos del material filtrante se alimentan de la materia orgánica retenida en el filtro, se reproducen a gran velocidad y desarrollan la biopelícula que posteriormente es colonizada también por otras especies de bacterias, virus, protozoos, entre otros, originando un proceso de sucesión con eventual desprendimiento de la biopelícula formada. En este contexto, el filtro puede propiciar la presencia de microorganismos patógenos, incluidos *Legionella*, *Pseudomonas aeruginosa* o *Mycobacterium* (Higiene Ambiental, 2021).

Para el presente estudio, resulta contraproducente la formación de biopelícula dentro del filtro desinfectante ya que afectaría tanto su función filtrante como de desinfección al ocluir el paso del agua y al evitar la acción de los metales sobre los microorganismos, En consecuencia, el rendimiento de un filtro lento, como el que se propone, se reduciría por la presencia de biopelícula sobre el medio de empaque.

Propiciando la sobrevivencia de los microorganismos presentes en el agua, como es el caso de las coliformes fecales. Por este motivo, si se aplica una carga orgánica elevada, la tasa de crecimiento microbiano aumentará, reduciendo con ello la capacidad desinfectante del filtro propuesto. Esta condición originaría la retención de la biopelícula formada, lo que a su vez podría provocar la colmatación total del sistema de filtración-desinfección. Cabe señalar que la circulación del agua a baja velocidad es un factor que propicia la formación de la biopelícula en la capa superficial del medio filtrante, lo cual debe tenerse presente para la operación del filtro desinfectante.

#### Influencia del tipo de desinfectante sobre la biopelícula

Cualquier agente desinfectante que se utilice tiene un efecto sobre la velocidad de desarrollo de la biopelícula que pueda formarse sobre el medio filtrante. La diferencia radica en la manera en la que actúan los diferentes desinfectantes. Por ejemplo, el cloro al ser un agente altamente oxidante que reacciona rápidamente con la materia orgánica, cuando ataca la biopelícula reacciona con el material extracelular que producen las bacterias de manera que se consume y no alcanza a atacar de forma efectiva a los microorganismos presentes en el agua. El transporte de cloro en la biopelícula ocurre principalmente por difusión y es efectivo contra virus y bacterias, pero no resulta tan eficiente contra protozoos. Es importante señalar que utilizando concentraciones de cloro libre mayores a 0.3 mg/L se puede prevenir el crecimiento y formación de la biopelícula. No obstante, al ser altamente reactivo, se pueden formar subproductos indeseados como los trihalometanos (THMs) de los cuales ya se ha hecho mención anteriormente. Por el contrario, a bajas concentraciones, el cloro puede generar problemas de sabor y olor, además de que no resulta efectiva en su acción contra la biopelícula. Choi (2003) demostró que el nivel de cloro tiene un efecto insignificante sobre el crecimiento de *E. coli* en las biopelículas razón por la cual se considera que el cloro debe utilizarse con otro tipo de desinfectante para obtener una mejor y mayor desinfección (Casierra et al., 2016).

Por otro lado, debe tenerse presente que las mono cloraminas actúan de forma más lenta y se difunden mejor en la biopelícula. Tienen un mayor potencial para la inactivación de las bacterias, resultando muy eficientes en la remoción de bacterias coliformes. No obstante, dichos compuestos son tóxicos para los seres humanos por lo que deben usarse a bajas concentraciones. Aún con niveles aceptables de agentes desinfectantes, no se garantiza el no crecimiento de la biopelícula. Se ha demostrado que a pesar de la presencia de niveles considerables de desinfectantes el desarrollo microbiano lleva a cabo su formación. Por ejemplo, usando niveles de desinfectante residual de 12.5 – 19.0 mg/L de peróxido de hidrógeno, 0.8 – 1.0 mg/L de mono cloramina y 0.2- 0.5 mg/L de cloro residual, las bacterias podían seguir desarrollándose (Momba, 2000). En consecuencia, no resulta recomendable el uso de cualquiera de esos desinfectantes como elemento de apoyo para el mantenimiento del filtro- desinfectante que se propone.

#### Efecto bactericida de la plata en la formación de la biopelícula

La formación de la biopelícula en la superficie del lecho potencia el efecto filtrante, sin embargo, al emplear un AMN con contenido de plata como medio filtrante resulta importante señalar que debido a su efecto desinfectante la formación y crecimiento de microorganismos se verá minimizado (Magaña, 2011) ya que la plata, así como otros metales microbicidas, tienden a reaccionar con la materia orgánica de las aguas residuales, lo cual inhibe la acción bactericida. Por ello, debe prevenirse la formación de la biopelícula. Pese a que se requieren estudios del efecto biocida de la plata en la formación de la biopelícula se puede decir que, dado la velocidad de filtración lenta propuesta para la planta piloto, si se favorecerá el desarrollo de la biopelícula. Asimismo, aunque el AMN contenga iones de plata y de otros metales con propiedades bactericidas, no existe garantía de que se inhiba el crecimiento de la biopelícula. Debe tenerse en cuenta que la presencia de oxígeno contribuye al poder oxidativo de la plata y otros metales, oxidando rápidamente la materia orgánica y con ello aumentando su efecto desinfectante.

El lento proceso de formación de la biopelícula alargara el proceso de operación del filtro antes de que se requiera efectuar un retrolavado. Posiblemente, la acción de vaciado del filtro, al inducir la entrada de aire en el medio de empaque, contribuya al aumento de óxidos de metales y con ello a una mayor desinfección del agua a tratar.

### **5.10 Mantenimiento y retrolavado de la PPF**

Con el proceso de filtración resulta inevitable que los poros del material filtrante se saturen de contaminantes y acumulen impurezas, lo cual causará una colmatación parcial del filtro, por lo que cuando el filtro se atasca debe procederse al lavado del lecho filtrante para garantizar la eficiencia y calidad del filtrado. Sin embargo, con el lavado el lecho filtrante no debe perder sus cualidades iniciales, de lo contrario perdería eficacia y sería necesario retirar el material filtrante para su limpieza completa o, en su caso, ser reemplazado. El retro lavado es necesario para la remoción de los sólidos adheridos en la superficie del material granular del filtro, por lo que se hace fluir agua en forma inversa a como fluye el agua durante la filtración. El flujo de agua debe ser lo suficientemente grande como para remover los sólidos del material granular. Cabe mencionar que elegir materiales granulares con baja densidad no implica que se requerirá menor velocidad de flujo de retro lavado para expandir la cama y que se ahorre agua. Por el contrario, al emplear velocidades de flujo bajas, los sólidos serán arrastrados de forma lenta y el retro lavado tomaría mayor tiempo y, por tanto, se emplearían grandes cantidades de agua. Para efectuar un retro lavado se requiere hacer fluir agua de forma inversa al flujo del agua durante el proceso de filtración, por lo que se espera que se desprendan los sólidos que obstruyen el material granular. La velocidad del flujo de retro lavado debe expandir la cama y desprender la suciedad acumulada o la biopelícula ya que, si no se logra expandir la cama, los, gránulos no se separarán entre sí, los poros no se destaparán y no se retendrán de forma eficaz las partículas y/o sólidos.

Por otra parte, si el retro lavado se realiza con velocidades altas de flujo se corre el riesgo de que los medios se desplacen y tapen la entrada de agua o bien salgan arrastrados con el agua de retro lavado. Cuando se realiza en tiempo y en forma precisa esta operación, se garantiza tanto la eficiencia en la filtración como a una vida útil larga para el sistema. A efecto de contribuir en la propuesta de alternativas viables para la desinfección del agua residual procedente del sedimentador secundario de un sistema de lodos activados, mediante un proceso con doble función filtración desinfección, se requiere del desarrollo de las ingenierías correspondientes, como es el caso de la ingeniería conceptual.

### **5.11 Ingeniería conceptual**

La ingeniería conceptual es la primera etapa de un proyecto ya que marca la pauta para el desarrollo de la ingeniería básica y de detalle. En la ingeniería conceptual se identifica si el proyecto es factible, así como los requerimientos de proceso y equipos.

Dicha etapa no es constructiva ya que los planos se desarrollan en la ingeniería básica cuya etapa sirve para la evaluación de la obra o proyecto, es decir, el cronograma de trabajo, valoración económica y trabajos de montaje (Coll Xavier, 2018).

Los lineamientos que se toman en cuenta para la ingeniería conceptual son:

- Productos y capacidad de producción
- Normativa y regulación
- Descripción del proceso
- Descripción general de instalación
- Diagramas
- Lista de materiales preliminar

## **5.12 Propósito y sitio seleccionado para para la instalación de la PPFD**

Implementar el uso de agregados minerales naturales (AMN) como material de empaque con la doble función (filtración - desinfección) que complemente o substituyan los procesos de filtración actualmente en operación y como alternativa económica y eficiente en la desinfección de efluentes secundarios. Esta propuesta de PPFD está basada en el funcionamiento de un filtro lento de arena con el fin de remover e inactivar partículas y microorganismos no eliminados en los tratamientos previos. El lugar de instalación de la PPFD será dentro de las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales de cerro de agua (PTAR-CA) que se encuentra en el campus de Ciudad Universitaria, colonia Universidad Nacional Autónoma de México, Alcaldía Coyoacán, Cd. Mx. La PTAR-CA empezó a diseñarse a finales de los años 1970's, a construirse en 1981 y entro en operaciones en septiembre de 1982. Se construyó con tres procesos biológicos: Lodos activados; discos biológicos rotatorios y filtro percolador.

La PTAR-CA capta las aguas residuales provenientes de distintas zonas provenientes del campus universitario, mediante dos colectores denominados por su procedencias como "Zona Antigua Casco Viejo" la cual está conformada por el Estadio Olímpico, la Facultad de Ingeniería, Facultad de Química, Facultad de Arquitectura, Facultad de Medicina de Institutos y zona "Colector Circuito Exterior, conformada por el Anexo de Ingeniería, Facultad de Contaduría y Administración, Escuela Nacional de Trabajo Social, Facultad de Ciencias y la Facultad de Veterinaria, también recibe el caudal colector de la colonia Copilco el Alto (PUMAGUA, 2008). La red de drenaje y alcantarillado del campus corresponde a un sistema de tipo combinado entre agua residual y agua pluvial y tiene una longitud aproximada de 23 km y una antigüedad de más de 60 años mientras las redes de drenaje de Ciudad Universitaria conducen el agua residual a las tres plantas de tratamiento de agua residual con las que cuenta el campus de Ciudad Universitaria UNAM, las cuales son: Planta de Tratamiento de Agua Residual Cerro del Agua (PTAR-CA), Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (PTAR-CPS) y Planta de Tratamiento de Agua Residual del edificio 12 del Instituto de Ingeniería (PTAR-E12).

Como antecedente del tratamiento de agua que se reutilizaba en la UNAM cabe mencionar que hasta el año de 2009 se tenían en funcionamiento 26 plantas de tratamiento tipo BRAIN (Bio-Reactor Anaerobio Integrado), las cuales fueron clausuradas en ese mismo año debido a que el volumen procesado no cumplía con norma (NOM-003-SEMARNAT-1997) de calidad de los efluentes (PUMAGUA, 2009).

Los objetivos de la planta fueron:

- Tratar aguas residuales de Ciudad Universitaria
- Reutilizar el agua para su uso en el riego de áreas verdes con contacto directo
- Apoyar en actividades de docencia e investigación

La planta fue diseñada para tratar aproximadamente 40 L/s (3,456 m<sup>3</sup>/día). En julio de 1986, se reportó que la planta estaba operando a 23 L/s y que no se había logrado operar la planta a su capacidad de diseño. Para este momento la planta no operaba con el sistema de filtros debido a que los operadores desconocían su manejo, esto pese a que este sistema resultaba indispensable para el pulimento al efluente de los sedimentadores. En 2011, se realizó un diagnóstico completo de la planta donde se encontró que operaba a 21.8 L/s de los cuales:

a) Lodos activados

Operaba a 10 L/s y su máximo caudal de tratamiento era de 11 L/s (limitado por la aireación y el sedimentador secundario)

b) Disco biológico

Operaba a 6 L/s lo cual es su límite máximo

c) Filtro percolador

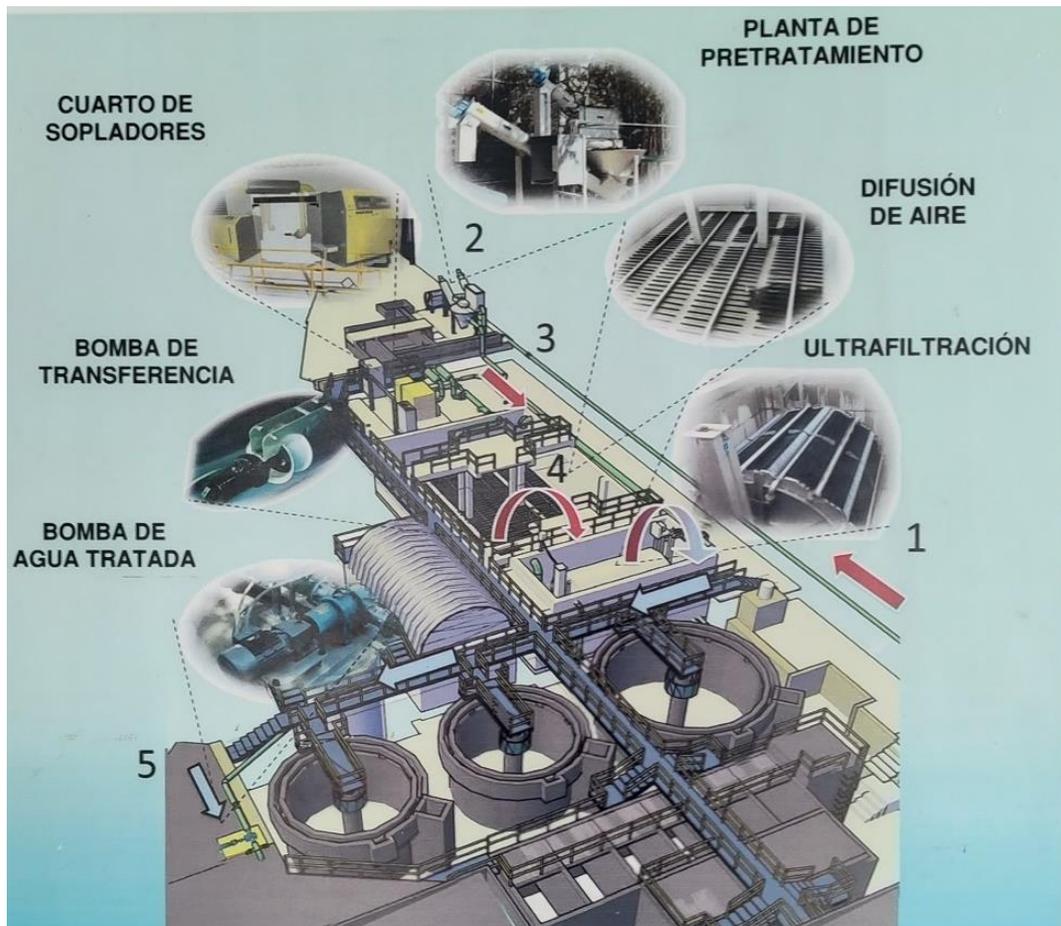
Operaba a 5.8 L/s y su caudal debía encontrarse entre 0.75 y 2.5 L/s

A partir del año 2010 y hasta el 2012, se realizó un proyecto de renovación al sistema de tratamiento en la planta. Las modificaciones dejaron en desuso el tanque desarenador, los medidores Parshall, el disco biológico, el filtro percolador y los sedimentadores secundarios y de arena. En su lugar se modernizó el sistema de lodos activados y se instaló una planta compacta Ro 5C que hace el trabajo de una criba fina y un desarenador, así como una membrana de ultrafiltración del agua proveniente del tanque de aireación al final del tratamiento. El sistema de membranas sumergidas de polietersulfona contaba con un tamaño de poro de 0.038  $\mu\text{m}$ .

El agua cruda llega por el colector y después del cribado grueso se bombea a la entrada de la planta compacta de tratamiento

- 1) En el pretratamiento se retiran los sólidos grandes y se sedimentan las arenas. Ambos residuos sólidos se drenan y compactan.
- 2) El agua residual entra al reactor biológico, donde con ayuda de la difusión de aire, los microorganismos pueden usar la contaminación del agua como fuente de energía.
- 3) El mezclado de agua y lodo biológico se bombea a la celda de la membrana de ultrafiltración.
- 4) La membrana de ultrafiltración es una barrera física para partículas más grandes que 38 nm. El agua se filtra a través de la membrana y se bombea al tanque de agua tratada para su desinfección y uso en riego de áreas verdes.

La descripción general de esta modificación se puede observar en la figura 8.



**Figura 8 Procesos en la PTAR-CA**  
Fuente Instituto de Ingeniería, UNAM

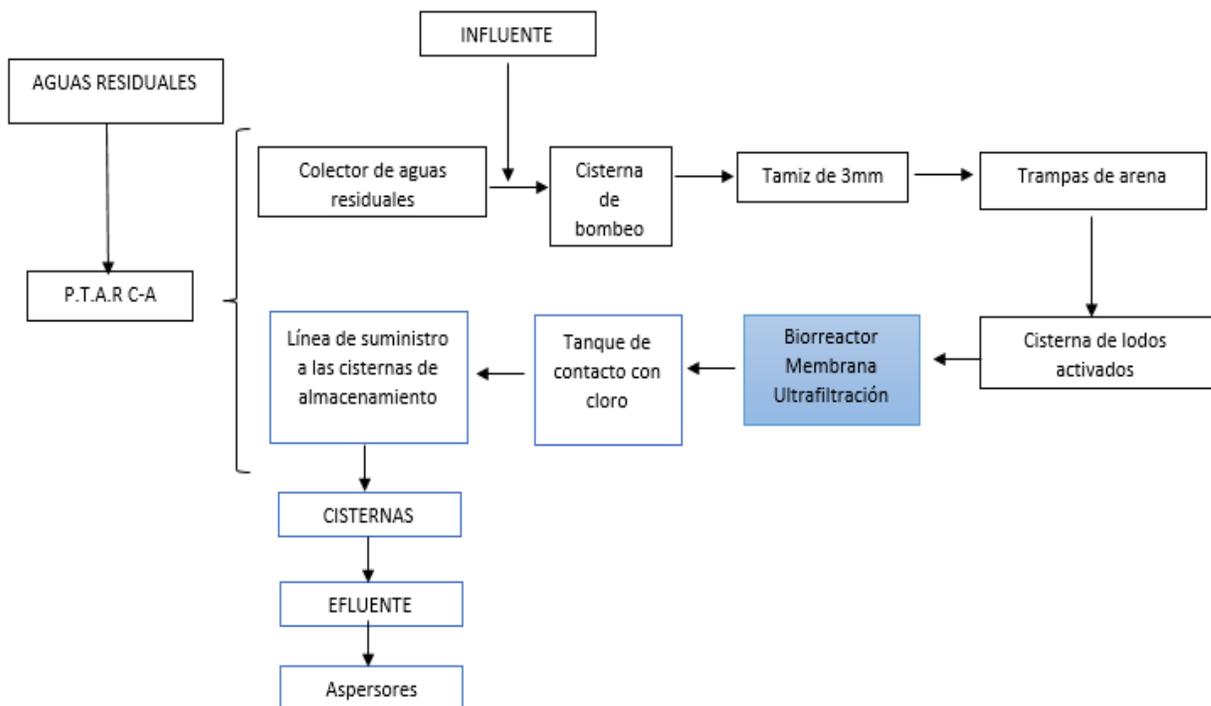
### Tren de tratamiento PTAR-CA

Debido a que actualmente la planta trata de 18 a 20 L/s y la membrana de ultrafiltración ya no se encuentra en operación, se reactivó el uso de los sedimentadores y filtros de arena, los cuales tienen una profundidad de casi 6 m. En este contexto, resulta importante evaluar alternativas de mejoramiento de la calidad del agua, específicamente en lo concerniente a la reducción, a niveles de norma, de los microorganismos presentes en el efluente para reúso. Por ello, la importancia de evaluar el funcionamiento de una PPFD como eventual alternativa. La PTAR-CA genera el volumen de agua tratada que se utiliza para el riego de áreas verdes. Son cerca de 200 hectáreas la extensión del campus de ciudad universitaria pero sólo aproximadamente 50 hectáreas son regadas con aguas residuales

tratadas en el periodo de secas que comprende de noviembre a junio por lo que la PTAR-CA únicamente cumple con la norma en esa temporada.

Como una alternativa interesante de evaluar, se propone que el acoplamiento de la PPFD sea realice posterior al sedimentador secundario, o bien, del sistema de filtración existente. Lo anterior, según el contenido de materia orgánica y de microorganismos prevaeciente.

En el diagrama de la figura 9, se presenta el proceso de la PTAR-CA, incluido el sistema de ultrafiltración.



**Figura 9. Tren de tratamiento del agua residual desde su captación hasta su reúso para riego de áreas verdes en el campus de ciudad universitaria**  
**Fuente: Tomado y modificado de Orta et al., 2012**

## 6 METODOLOGÍA

De acuerdo con la estrategia planteada, se llevó a cabo la revisión bibliográfica de artículos y libros sobre la materia disponibles en línea, así como el análisis de datos y resultados de tesis de licenciatura y posgrado. A partir del análisis realizado, se logró obtener información útil para el desarrollo de la ingeniería conceptual del filtro desinfectante, la cual incluye los requerimientos y especificaciones básicas, (criterios de diseño) cálculos y lista de materiales y actividades del proyecto.

### 6.1 Materiales

En esta sección se debe considerar la tubería; herramientas para instalación; dispositivos de operación y control; contenedor del medio filtrante – desinfectante para la PPF; el AMN de diferentes tamaños de partícula. Dada la relevancia de este último se proporcionará más información a este respecto.

Material de empaque AMN con contenido de Ag

Cabe mencionar que el uso de AMN como material de empaque es un nuevo campo de estudio en cuanto a desinfección de agua residual. El AMN provendrá de una mina dedicada a la extracción de plata (Ag) con lo que se garantizará la presencia de este metal.

Una vez que se obtenga el material este debe ser procesado en una trituradora para generar los diámetros de partícula requeridos. De acuerdo con trabajos previos, existen algunas granulometrías en las que se han observado buenos resultados en cuanto a desinfección de agua sin materia orgánica, inoculada con coliformes fecales.

Pese a no contar con datos específicos del diámetro efectivo y coeficiente de uniformidad del AMN, al presentar características similares a materiales granulares empleados como medios filtrantes como la grava, se considera se encuentra en los intervalos adecuados para ser utilizado como un material potencial para sistemas de filtración.

El AMN como se ha mencionado, además de contener Ag, contiene otros metales en muy bajas concentraciones, por lo cual su uso no constituye un riesgo para la salud. No obstante, esas concentraciones de Fe, Cu y Zn pueden ocasionar efectos desinfectantes sinérgicos. Por lo anterior, se reafirma que este material tiene un gran potencial para ser empleado en sistemas de filtración para la desinfección de aguas residuales parcialmente tratadas. El AMN se propone para el proceso de filtración desinfección debido a:

- Su contenido de plata y otros metales con efecto microbicida lo hace un material innovador con potencial desinfectante.
- Su superficie y porosidad lo hacen adecuado para la adherencia de partículas y microorganismos.
- En México abundan los distritos mineros de extracción de plata por lo que el material (AMN) sería relativamente fácil de obtener.
- Se cuentan con estudios previos que avalan la inactivación de microorganismos de alta resistencia debido al efecto de la plata y también en combinación con Cu y Zn.

## **7 DESARROLLO DE LA INGENIERÍA CONCEPTUAL**

Una vez definida la necesidad de contar con la PPF, es necesario proceder al desarrollo de la ingeniería conceptual correspondiente, a fin de concretar su eventual instalación en la PTAR-CA.

### **7.1 Objetivo**

Proponer la ingeniería conceptual de una planta piloto filtro desinfectante (PPF) a base de agregados minerales naturales con información disponible en la literatura, para desinfectar el efluente del sedimentador secundario de la PTAR-CA.

#### **7.1.1 Ubicación**

La localización geográfica de la planta de tratamiento es:

Latitud: N 19°20'01.4"

Longitud: W 99°10'42.2"

Altitud: 2261 m  $\pm$  10 m

En la figura 10, se presenta una fotografía de las instalaciones de la PTARCA



**Figura 10. Planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro del Agua.  
Fuente: Pumagua**

#### 7.1.2 Reconocimiento del área

El día 31 de agosto del año 2022 se realizó una visita a la PTAR CA donde se pudo verificar que el sistema de ultrafiltración de la planta no se encuentra en operación debido a que el equipo correspondiente ya no funciona y el proveedor de este discontinuó la venta de los equipos.

Actualmente, no se cuenta con el proyecto original, por lo que se desconocen las bases de diseño, los criterios empleados y las memorias de cálculo (García Gill, 2007).

La PPF se considera que puede instalarse después del proceso de sedimentación secundaria cuyo objetivo es la separación de sólidos, es decir, los lodos activados del líquido de la mezcla. En este proceso, se obtiene un efluente con bajo contenido de DBO, DQO y sólidos totales.

### 7.1.3 Características de los servicios auxiliares

Es necesario contar con agua corriente para el retro lavado del sistema de filtración.

## 7.2 Bases de diseño

Variables de operación y control de proceso para la propuesta de la PPF

### 1) Material para separar

Filtración convencional

El proceso de lavado se llevará a cabo una vez que aumenta el contenido de sólidos en el material granular y por tanto se produzca una pérdida de carga a través del lecho.

### 2) Fuerza impulsora

Filtración por gravedad. En el caso del presente trabajo la PPF el filtro funcionara por gravedad, es decir, que el agua escurrirá y pasará a través del medio filtrante por acción de la gravedad

### 3) Tipo de flujo

Filtración a flujo constante

Se controla el flujo de entrada para mantener una capa de agua sobrenadante constante y así promover la formación de la biopelícula y la acción de los metales como agentes desinfectantes

### 4) Mecanismo de retención

Filtro de profundidad (en volumen, sobre lecho filtrante). Cuando las partículas tienen un tamaño pequeño quedan adsorbidas en el interior de los poros del material granular.

## **5) Características del influente**

Al ser la sedimentación o la filtración convencional, la etapa del tratamiento previa al acoplamiento de la PPFD se espera menor presencia tanto de partículas como de materia orgánica, lo cual beneficiará el efecto desinfectante del AMN y con ello la eficiencia de la PPFD. En consecuencia, el buen desempeño de la PPFD depende directamente de la calidad de agua del tratamiento previo.

## **6) Porosidad**

La porosidad prevista corresponderá al 50%. Este valor se encuentra dentro del intervalo aceptado para medios filtrantes los cuales oscilan entre 30 a 50% (Crites y Tchobanoglous, 2000) así como con los datos obtenidos en trabajos previos sobre la caracterización de agregados minerales.

## **7) Velocidad de filtración**

La velocidad de infiltración seleccionada es de 0.3 m/h, la cual corresponde a valores para una filtración lenta cuyo influente provenga de tratamientos previos.

## **8) Características del lecho filtrante (tamaños de partícula, profundidad y distribución)**

La selección tanto de las alturas de los horizontes o capas de material filtrante, como del tamaño y arreglo de las partículas es responsabilidad del diseñador y estará en función de la calidad del agua que se requiera tratar y la que se desee obtener.

Los tamaños de agregados minerales naturales de diferente granulometría recomendables para cada capa del sistema de filtración se encuentran en la tabla 7.

### 9) Flujo o caudal de diseño

1.24 m<sup>3</sup>/h

El cálculo del caudal se encuentra en el anexo correspondiente

### 10) Frecuencia y duración de la dosificación

La dosificación será regulada hasta que se forme el agua sobrenadante, se recomienda mantener constante el nivel del agua.

### 11) Tiempo de retención hidráulico

0.5 horas. El cálculo se encuentra en el anexo correspondiente

## 7.3 Descripción detallada del proceso de tratamiento

De manera general el proceso consta de las siguientes etapas de tratamiento

- Tratamiento preliminar
- Tratamiento en la PPFD

### 7.3.1 Tratamiento preliminar

En la PTAR-CA, la criba y desarenador tienen una capacidad de 25 (L/s) mientras que el sistema de lodos activados opera a 20 (L/s) en promedio por lo que 5 (L/s) se encuentran disponibles como caudal. Sin embargo, debido al tamaño del filtro propuesto se considera un caudal de diseño de 0.83 m<sup>3</sup>/d.

- 1) El agua cruda llega por el colector y después de un cribado grueso se bombea a la entrada de la planta compacta de tratamiento, su función es mover sólidos grandes y arena que arrastra el drenaje, su instalación en una planta de tratamiento es para detener el paso de materia inorgánica y objetos que produzcan atascamientos en tuberías, canales o medios filtrantes.

- 2) En el pretratamiento se retiran los sólidos más grandes a 3 mm y se sedimentan las arenas. Ambos residuos se drenan y compactan. Después de que el agua pasa por el desarenador el fluente se conduce a través de tres canales Parshall, precedidos por tres compuertas que sirven para medir y controlar el gasto. Cada uno de estos canales conduce las aguas residuales a líneas de tratamiento.
- 3) La línea correspondiente al sistema de lodos activados consta de tres cuerpos principales que son el tanque de aireación, el sedimentador secundario y el cárcamo de recirculación de lodos.

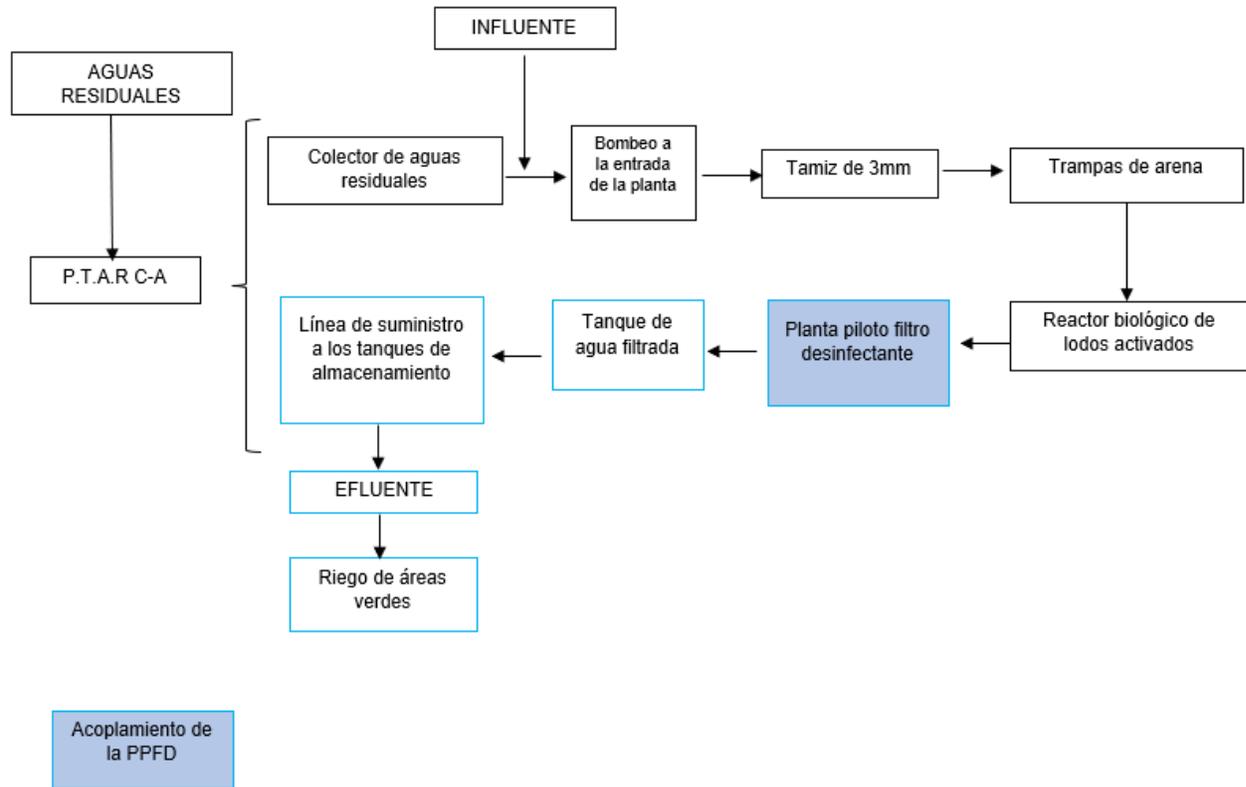
### 7.3.2 Tratamiento en la PPF

- 4) Después del sedimentador secundario se instalará el ramal de tubería para la instalación de la PPF.
- 5) El agua llega a la PPF a través de una tubería ubicada la parte superior del filtro existente. La distribución del agua se hace a través de una boquilla de aspersión que distribuye el agua uniformemente en toda el área de la PPF. El agua fluirá a través de los lechos por acción de la gravedad.
- 6) El agua filtrada será captada en un tanque de almacenamiento.

A partir de que el agua a tratar tiene contacto con el AMN colocado en la parte superior de la PPF, se inicia su distribución a través de las capas inferiores.

La primera capa retendrá la mayoría de los sólidos suspendidos y los restantes serán retenidos en las capas inferiores.

En la figura 11, se presenta el tren de tratamiento actual de la PTAR-CA y la inclusión de la PPFD



**Figura 11. Tren de tratamiento incluyendo la instalación de la PPFD**  
Fuente: Elaboración propia

### 7.3.3 Descripción de la PPFD

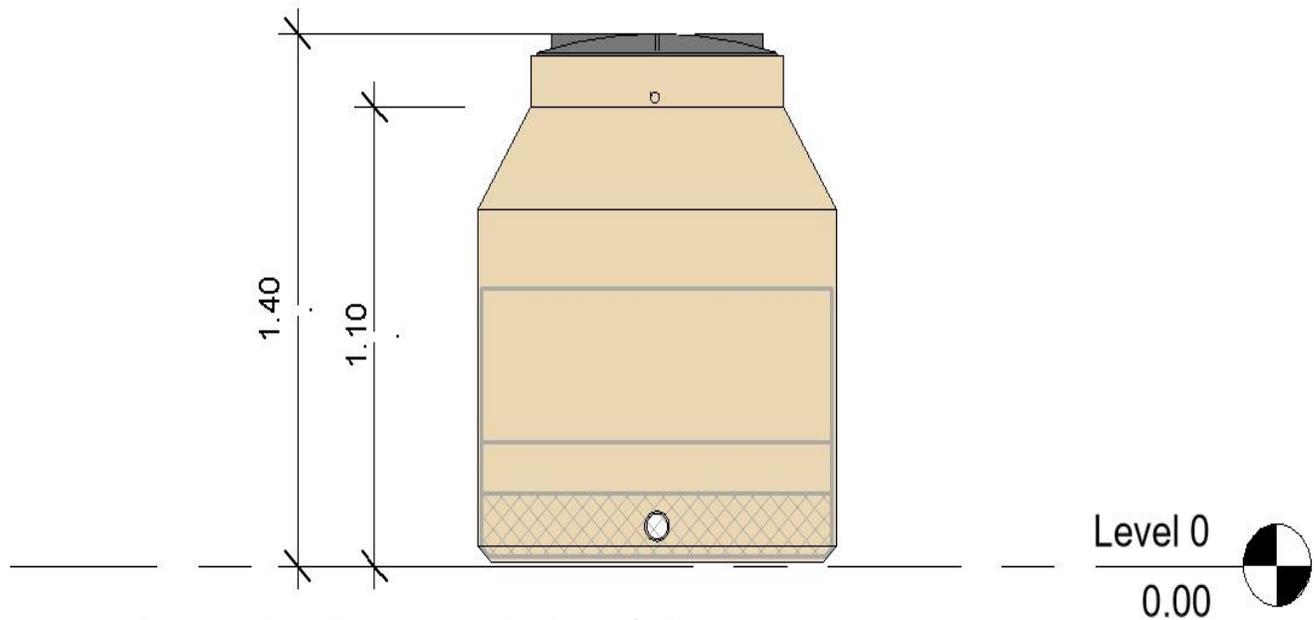
Al no existir una única manera para determinar el número de capas ni de sus alturas dentro del cuerpo del filtro (tinaco Rotoplas de 1000 L) se requiere la realización de estudios a escala piloto o a escala real para contar con datos sobre el material filtrante (AMN) y proceder con el diseño de un filtro con el cual se obtengan los resultados buscados.

Por lo anterior, las alturas, tamaños y número de capas se basaron en las recomendaciones para diseños de filtros lentos de arena y grava.

El filtro desinfectante propuesto se clasifica con un filtro lento con velocidad de filtración entre 0.2 y 0.6 m/h con el cual se pretende simular uno filtro común de arena, grava o antracita. Considerando las características del agua a tratar, así como de los tratamientos preliminares del agua influente para la PPF, en la presente propuesta se ha decidido utilizar una velocidad de filtración de 0.3 m/h.

Se propone una profundidad de 0.65 m ya que la profundidad de los lechos se elige de acuerdo con las recomendaciones de altura de entre 0.3 a 0.8 m (Blacio Ordoñez, 2011).

Se consideró como factor de seguridad una altura de 0.30 m debido a que una variable difícil de predecir es la expansión de los lechos al someterse al flujo ascendente para el retro lavado, esto considerando que la expansión de las camas es fundamental para dicha operación y también a que cada material filtrante tendrá diferentes formas de grano o partícula. En la figura 12, se presenta el esquema de las dimensiones del tinaco Rotoplas de 1100 L a emplear para la presente propuesta. Las especificaciones técnicas del mismo se presentan en la Tabla 6.



**Figura 12. Dimensiones y especificaciones técnicas del tanque de 1100 L a emplear para la construcción de la PPF**  
**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 6. Especificaciones técnicas**

Capacidad(L)	Diámetro (m)	Altura (m)	Material
1100	1.1	1.4	Polietileno

**Fuente: Elaboración propia**

El medio filtrante estará relleno por los AMN de manera que la capa inferior será de 30-40 mm de tamaño de partícula, con una altura de 0.15 m, cubriendo el ramal de distribución.

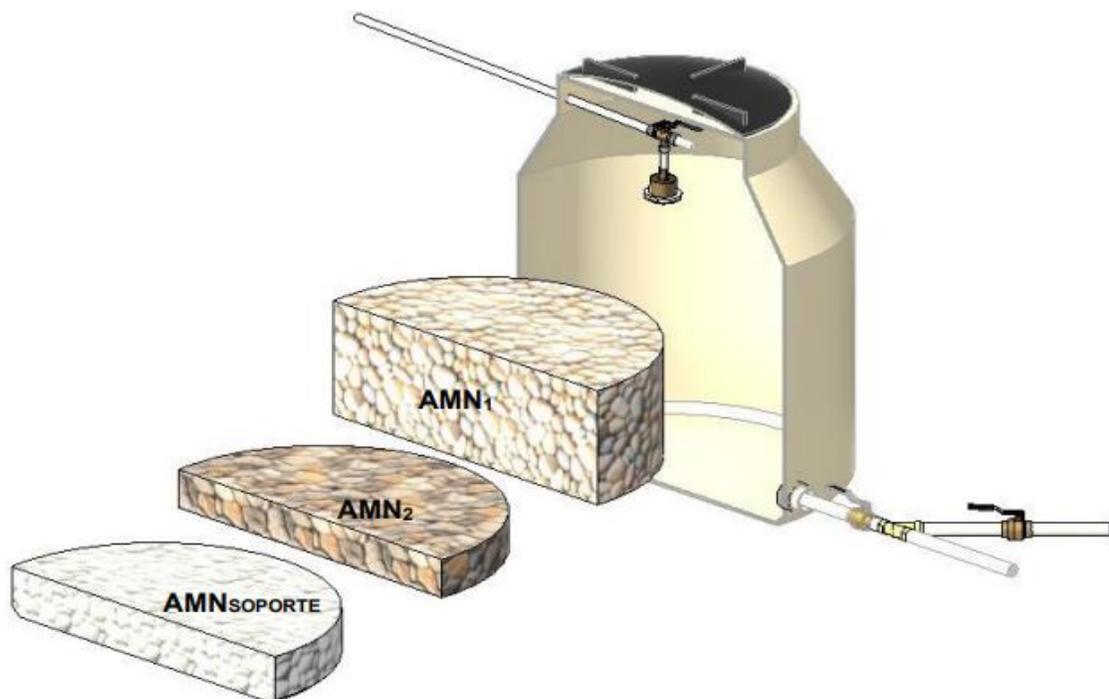
La segunda capa de material a colocar es la del AMN de 10 mm de tamaño de partícula hasta cumplir una altura de 0.20 m.

La capa superior del AMN será de 15 mm de tamaño de partícula, la cual debe tener una altura de 0.45 m, tal como puede observarse en el diagrama de la figura 14.

El tamaño de partícula se eligió considerando que con tamaños mayores a 6 mm la potencia y frecuencia del retro lavado disminuyen lo que implica costos menores de operación, así también a que, con mayores tamaños de partícula, mayor será el área disponible para la circulación del flujo.

En la figura 13, se puede observar la representación de las diferentes capas que componen la PPF.

El espesor de cada capa y el tamaño de partícula del material se muestra en la tabla 7.



**Figura 13. Distribución de las capas de AMN dentro de la PPFD**  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7. Características del medio filtrante para la PPFD**

Capa	Espesor (m)	Tamaño de partícula (mm)
AMN1	0.45	15
AMN2	0.2	10
AMN de soporte	0.15	20-50

Fuente: Elaboración propia

Al ser la cama superior de mayor altura que la inferior, se garantiza que se retengan partículas mayores ya que la filtración se llevará a cabo en los primeros 20 cm de cama, mientras que las capas inferiores del filtro garantizaran la calidad del agua filtrada. Conforme el medio se vaya ensuciando y/o tapando, la altura del agua aumentará y se incrementará la pérdida de carga.

La red de drenaje comprende la tubería que se ubicará en el fondo del tinaco Rotoplas y que soportará el lecho filtrante.

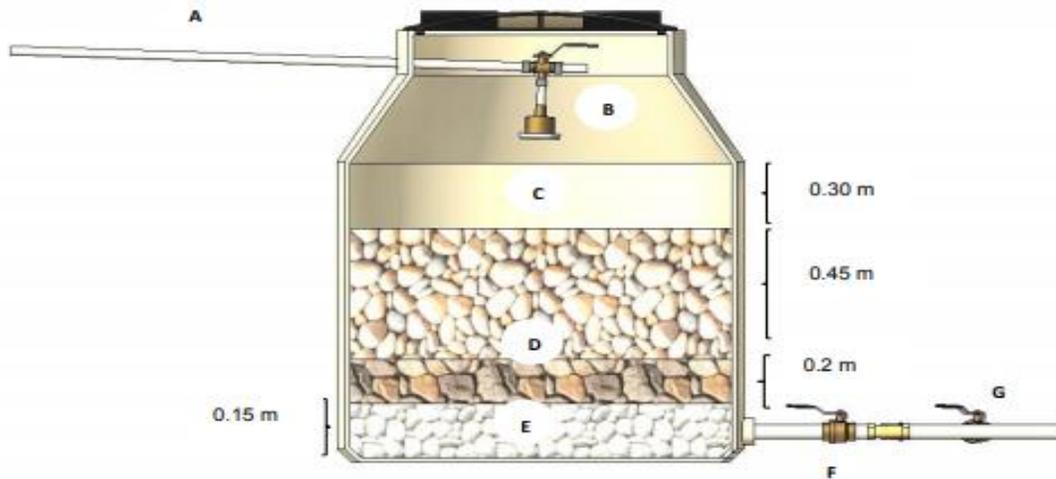
Se instalará una boquilla de aspersion en el tubo PVC de entrada para garantizar una distribución uniforme del agua en el lecho.

El área filtrante está limitada a 4.15 m<sup>2</sup> con base a las estructuras para filtros lentos y al tinaco Rotoplas de 1100 L como recipiente disponible.

El volumen del filtro desinfectante será de 617 L, de acuerdo con los cálculos realizados

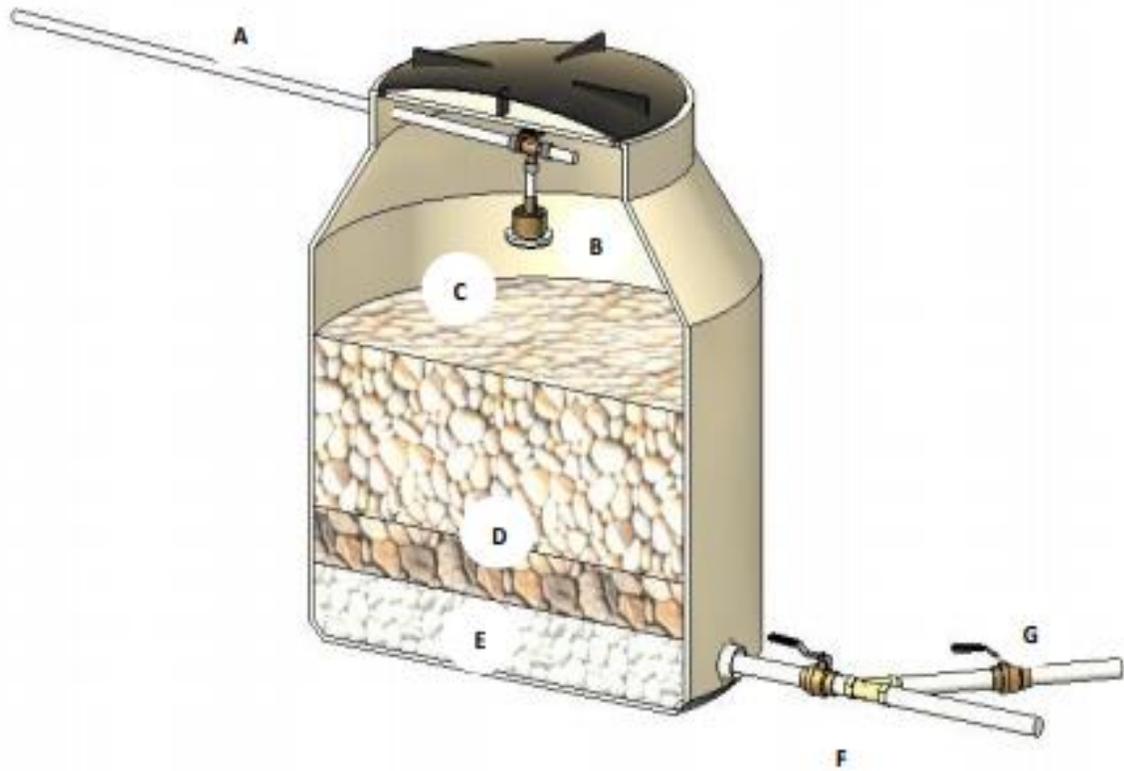
En la figura 14, se presenta el diagrama de la PPFD con la disposición de las capas, así como los componentes de este. En la figura 15, se muestra una vista lateral de la PPFD.

#### 7.4 Diagramas de la PPFD



- A: Tubería de entrada
- B: Boquilla de aspersion
- C: Zona de saturación
- D: Capas del lecho filtrante de AMN
- E: Zona de soporte de material filtrante de AMN
- F: Tubería de salida
- G: Desviación para mantenimiento

**Figura 14. Componentes de la PPFD**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 15. Vista lateral de la PPFD**  
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8, se presentan los criterios de proceso, desinfección y limitantes empleados para diseño de la PPFD.

**Tabla 8. Criterios de diseño para la PPF**

Proceso	Filtración lenta por gravedad	Características del medio filtrante						
		Tamaño partícula (mm)	Espesor de las capas (m)	Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /h)	Velocidad de infiltración (m/h)	Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h)	Tiempo de contacto (h)	Porosidad %
		10 - 15	0.45 y 0.20	1.24	0.3	0.3	2.17	50
Desinfección	Empleo de AMN con contenido de Ag y otros metales como Cu, Fe y Zn los cuales actuaran como biocidas Por tratamientos previos a la filtración Por transporte y adherencia de las partículas							
Limitaciones	La instalación depende de la zona y de la disponibilidad del área Los filtros lentos no deben operar con aguas cuya turbiedad sea mayor a los 20 NTU Las bajas temperaturas reducen la eficiencia del filtro debido a la disminución de actividad biológica El filtro es sensible a los cambios de concentración de los contaminantes							

**Fuente: Elaboración propia**

## 8 FILOSOFÍA DE OPERACIÓN

Se entiende como filosofía de operación a la descripción de los detalles y criterios para la operación y control de la PPF. A continuación, se explican los principios y secuencias de la instalación e inicio de operación de la PPF, lo cual comprende desde la preparación del lecho filtrante desinfectante, hasta el inicio propiamente dicho del proceso de filtración y su funcionamiento.

En primer lugar, el sitio debe estar preparado para abastecer el sistema de filtración desinfección y debe considerar el peso del sistema ya empacado. Para la instalación del drenaje, se requiere un croquis de la planta para realizar el diseño del ramal de tubos a instalar, así como las longitudes y accesorios que se necesitaran antes de cortar y ensamblar los tubos. Lo anterior con el fin de optimizar el uso del material. Los tubos de PVC se cortarán a la medida de acuerdo con el diseño y el área disponible.

Para la construcción del sistema de filtración desinfección, hay que tomar en cuenta que el ensamble de las piezas requiere de un proceso de soldadura para evitar las obstrucciones y/o posibles fugas de agua que pudieran interferir con el proceso de filtrado.

### **8.1 Preparación del lecho filtrante desinfectante**

Antes de empezar a empacar el tinaco o cuerpo de la PPF, debe verificarse que el interior de este se encuentre limpio para colocar el material. De igual forma, se debe revisar que el AMN se encuentre debidamente separado por tamaño de partícula y lavado para que no contenga polvos que obstruyan indebidamente el flujo del agua a tratar.

### **8.2 Disposición del AMN del contenedor**

El contenedor del material filtrante desinfectante debe estar colocado en la zona elegida dentro de la PTAR-CA. Previo a su empaque, se debe marcar el nivel de cada una de las capas de AMN que va a contener el filtro desinfectante. Una vez empacado con el AMN se procederá a realizar la conexión de entrada junto con una válvula flotador la cual evitará que el nivel del agua sobrepase la altura preestablecida.

### **8.3 Ramal de distribución**

La cantidad del material AMN será determinada luego de seleccionar el lugar para la instalación del contenedor. Por su parte, el contenedor del AMN (PPF) tendrá dos perforaciones, una en la parte superior de 1/2" y otra en la parte inferior de 1 1/2" las cuales corresponden a la entrada y salida del agua, respectivamente, además de una desviación para mantenimiento. Previo al ensamblaje, los tubos de PVC deben ser limpiados por dentro y por fuera con alcohol o gasolina. La tubería se coloca sobre el medio granular con agujeros hacia arriba para impedir que el material sea transportado por el sistema de drenaje y de tal forma que se asegure

la distribución y recolección uniforme del agua filtrada. Para terminar la instalación de entrada del agua a la PPF, se utilizará una válvula de flotador.

#### **8.4 Estructura de entrada y salida**

La distribución del agua debe ser uniforme sobre el área del lecho filtrante y la velocidad de ingreso del agua entrante debe ser baja para evitar perturbaciones en la capa de agua sobrenadante. Se instalará un dispositivo de medición de flujo. La altura del agua sobrenadante se graduará por medio de la válvula flotador. Dado que la estructura de salida de agua del filtro desinfectante se necesita poder cerrar y abrir, se incluirá una válvula de compuerta que pueda conducir el agua filtrada desinfectada hacia un recipiente colector. Cabe señalar que la idea de esta propuesta es disponer del agua filtrada desinfectada de manera inmediata a su salida de la PPF.

#### **8.5 Llenado de la PPF**

Una vez terminada la instalación se procede a llenar la PPF. Para mantener constante tanto la tasa de filtración como el nivel de agua a tratar en el filtro desinfectante se instala la válvula de flotador. Verificar la turbulencia del agua para evitar la erosión de las capas superficiales. Finalmente, se colocará la tapa en el tanque para evitar el contacto del interior del filtro desinfectante con contaminantes del exterior. Se recomienda realizar orificios pequeños en la tapa del tanque para ventilación.

#### **8.6 Inicio del proceso de filtración/desinfección**

El proceso iniciará con el efluente del sistema de lodos activados de la PTAR-CA donde el agua ya ha pasado por un pretratamiento.

El agua será conducida a la PPF por el sistema de tuberías y el flujo será regulado con una válvula de compuerta, posteriormente el influente ingresa al filtro desinfectante a través de la tubería de entrada que se encuentra en la parte superior

del tanque donde se instaló la boquilla de aspersión, la cual distribuirá el agua de manera uniforme en el lecho superior.

A partir de que el agua tiene contacto con la parte superior el filtro desinfectante, se inicia el trayecto y la distribución por gravedad a través de las capas del AMN.

En la descarga (parte inferior) igualmente se pondrá una válvula de compuerta para controlar el retiro del agua tratada.

## **8.7 Recomendaciones**

### **8.7.1 Limpieza y mantenimiento de la PPF**

Para realizar el retro lavado se debe cerrar la entrada del filtro desinfectante e ingresar un flujo de agua a través de la salida, es decir, ingresando un flujo ascendente a través del lecho filtrante desinfectante y saliendo a través de la entrada. Se realizará con una velocidad del flujo de agua tal que haya una agitación que propicie que las impurezas salgan junto con dicho flujo ascendente. La vida útil del material filtrante desinfectante será según el uso y la demanda de llenado, pero se estima que sea de poco más de un año, aproximadamente.

Para el mantenimiento de la PPF se recomienda suspender la operación para remover impurezas en el material del lecho con retrolavado.

Es necesario realizar revisiones periódicas de las uniones de las tuberías tanto para limpieza de estas como para evitar fugas, así también el posible cambio del medio filtrante para seguir garantizando una buena calidad en el efluente.

Las tuberías deberán limpiarse con un flujo de agua para remover sedimentos y organismos y, posteriormente, desinfectar con una solución de cloro.

En las primeras semanas de operación de la PPF se recomienda verificar la calidad del agua filtrada antes de utilizarla, a efecto de decidir si ya puede ser utilizada limpieza o riego de áreas verdes con contacto indirecto. Lo anterior debido a que la operación aún no se encontrará estable.

Para este tipo de filtros desinfectantes, es importante evitar la formación de biopelícula para así mantener su actividad desinfectante. Por ello, se deben realizar

los análisis fisicoquímicos y microbiológicos tanto en el influente como en el efluente del sistema para verificar la remoción de contaminantes y determinar la eficiencia de la desinfección debido a los metales presentes en el material. La calidad del agua obtenida se comparará con la indicada normatividad vigente para así establecer el uso que se le dará, preferentemente para uso en riego de áreas verdes con contacto directo.

#### 8.7.2 Control del proceso

Es fundamental optimizar el funcionamiento del filtro desinfectante por lo que una vez puesto en marcha se debe conocer la carrera del filtro, es decir el tiempo que transcurre entre la operación del filtro y hasta que se requiera realizar un lavado. Si los intervalos de tiempo en los que se requiere lavar el filtro son cortos, el material se desgatará con mayor rapidez y necesitará prevenir su eventual sustitución.

## 9 FUNCIONAMIENTO

Como se ha mencionado el filtro desinfectante propuesto en el presente trabajo es basado en un filtro lento de arena por lo que el agua fluye por acción de la gravedad a través del medio de empaque. Durante el proceso de filtración, al fluir lentamente el agua a tratar a través del medio de empaque, se busca garantizar que las partículas sólidas y organismos presentes en el agua tengan contacto con los metales presentes en la superficie del AMN a lo largo del arreglo de las diferentes capas que lo componen, reteniendo y desinfectando por acción de la plata y otros metales microbicidas presentes.

Las partículas de menor tamaño que los poros del medio filtrante desinfectante se desplazarán libremente en el material granular mientras que, las partículas de mayor tamaño serán retenidas en el lecho superior. El proceso de retención y desinfección ocurre en los primeros centímetros de la primera capa del lecho filtrante.

Durante el proceso de filtración la materia orgánica acumulada en el medio filtrante desinfectante será descompuesta por los microorganismos presentes y también se

espera la acción de los metales presentes en el material filtrante como agentes desinfectantes se vea disminuida por la presencia de materia orgánica disuelta.

El agua en tratamiento continuará su avance a través del medio filtrante hasta la capa inferior de soporte y será recolectada mediante una tubería de salida.

Pese al tiempo de maduración del filtro desinfectante, la elección del diseño propuesto está basado en la facilidad de operación, en el aspecto económico y de disponibilidad del material para su uso en comunidades rurales, así como en su mecanismo de remoción y desinfección.

Una vez empezado el servicio del filtro desinfectante, se requerirán de tres a cuatro semanas como periodo de maduración por lo que al inicio del proceso la eficiencia en la remoción de los contaminantes no será total.

Además de optimizar la explotación del filtro desinfectante el objetivo del control del proceso es revisar y monitorear la velocidad de filtración y las variaciones en el caudal con el fin de evitar roturas en el sistema.

## **9.1 Beneficios**

Entre los beneficios del presente proyecto se encuentran:

- Opción viable para tratamiento de aguas residuales
- Investigación y desarrollo
- Impacto en poblaciones de bajos recursos
- Posible reúso del agua para agricultura, ganadería entre otras
- Valor agregado al material (AMN) de minas metálicas del país
- Instalación fácil y económica

## **10 LISTA DE ACTIVIDADES**

La lista de actividades para el desarrollo del proyecto sirve como base para el catálogo de conceptos en el cual se muestra a manera de lista, las actividades necesarias para realizar un proyecto, dichas actividades son agrupadas de acuerdo con las disciplinas y etapas del proyecto. Una vez terminado el listado se asignan

los costos correspondientes. El listado de actividades previas al catálogo de conceptos para el presupuesto del proyecto se desglosa en la figura 16.

Clave	Concepto	Unidad	Cantidad
	<b>ACOPLAMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO FILTRO</b>		
A	<b>DESINFECTANTE</b>		
A1	<b>PRELIMINARES</b>		
	ACONDICIONAMIENTO DEL ÁREA DE COLOCACIÓN DE LA PPFD INCLUYE: LIMPIEZA DEL ÁREA, MANO DE OBRA, HERRAMIENTA Y EQUIPO NECESARIO PARA RECIBIR LA INSTALACIÓN	m <sup>2</sup>	1
	<b>TOTAL PRELIMINARES</b>		
A2	<b>ROTOPLAS Y AMN</b>		
	TRITURACIÓN DE LOS AMN	KG	2500
	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DEL TINACO MARCA ROTOPLAS TRICAPA EQUIPADO 1100 L	PZA	1
	MANIOBRA Y MOVIMIENTO DE MATERIALES EN EL SITIO, INCLUYE: TRASLADO DE MATERIAL, MANO DE OBRA, HERRAMIENTAS Y EQUIPO PARA INSTALACIÓN	LOTE	1
	<b>TOTAL ROTOPLAS Y AMN</b>		
A3	<b>INSTALACIÓN HIDRÁULICA</b>		
	SUMINISTRO E INSTALACIÓN, DE RAMALEO DE TUBERIA PVC 1/2" CED 40, BOQUILLA DE ASPERSIÓN INCLUYE: HABILITADO, EQUIPO HERRAMIENTA, MANO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA INSTALACIÓN	m	1
	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE RAMALEO DE TUBERIA PVC 1" CED 40, INCLUYE: HABILITADO, EQUIPO HERRAMIENTA, MANO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA INSTALACIÓN	m	1
	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE RAMALEO DE DESVIACIÓN DE TUBERIA PVC 1 1/2" CED 40 PARA MANTEMIENTO. INCLUYE: HABILITADO, EQUIPO HERRAMIENTA, MANO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA INSTALACIÓN	m	1
	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE VÁLVULA DE COMPUERTA DE 1" EN SALIDA DE TINACO, INCLUYE, SUMINUSTRO, INSTALACIÓN, MANO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA INSTALACIÓN	PZA	1
	INSTALACIÓN DE MEDIDOR DE FLUJO. INCLUYE: HERRAMIENTA, EQUIPO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA INSTALACIÓN	PZA	1

## TOTAL INSTALACIÓN HIDRÁULICA

A4	<b>COLOCACIÓN Y LLENADO DEL TINACO ROTOPLAS</b>		
	SUMINISTRO, LLENADO Y NIVELACIÓN DE CAPA DE SOPORTE AMN DE 30-40 mm CON ESPESOR DE 0.15 m	m <sup>3</sup>	1
	INCLUYE: SUMINISTRO, ACARREO AL SITIO DE COLOCACIÓN Y MANO DE OBRA		
	SUMINISTRO, LLENADO Y NIVELACIÓN DE CAPA DE AMN DE 10 mm CON ESPESOR DE 0.20 m	m <sup>3</sup>	1
	INCLUYE: SUMINISTRO, ACARREO AL SITIO DE COLOCACIÓN Y MANO DE OBRA		
	SUMINISTRO, LLENADO Y NIVELACIÓN DE CAPA DE AMN DE 15 mm CON ESPESOR DE 0.45 m	m <sup>3</sup>	1
	INCLUYE: SUMINISTRO, ACARREO AL SITIO DE COLOCACIÓN Y MANO DE OBRA		
	<b>TOTAL COLOCACIÓN Y LLENADO DEL TINACO ROTOPLAS</b>		

*Figura 16 Lista de Actividades*  
Fuente Elaboración propia

## 11 ASPECTOS RELEVANTES DE LA PROPUESTA

Un aspecto importante de la propuesta presentada es que evidencia la posibilidad de llevar a cabo la instalación de una PPFD en la PTAR CA ubicada en Ciudad Universitaria. Lo anterior, considerando que el empleo de AMN con contenido en trazas de plata y otros metales microbicidas, como material de empaque para filtros que desinfecten, es una alternativa en una sola etapa para la desinfección y eliminación de organismos de interés sanitario presentes en el agua residual municipal y con alta resistencia a agentes desinfectantes convencionales.

El costo de instalación, operación y mantenimiento de la PPFD es similar al de un filtro lento de arena. El filtro empacado con AMN se caracterizaría por ser un sistema que no requiere el empleo de energía eléctrica y que resulta sencillo, económico y eficiente en el tratamiento y desinfección de agua, con la ventaja adicional de no generar compuestos organoclorados. Estas características lo hacen idóneo para su instalación en zonas rurales y pequeñas comunidades semiurbanas, que tengan

limitaciones económicas, en donde la calidad del agua y las condiciones de infraestructura no permitan contar con otros métodos de desinfección. Este último proceso, es necesario para asegurar una calidad de agua apta para su reuso seguro. En esta propuesta se considera que tanto las características del agua residual como las del medio filtrante-desinfectante, la profundidad, el caudal y la velocidad de filtración, son los principales criterios para el correcto diseño de la PPF. D.

El empleo de AMN con contenido de plata como medio filtrante-desinfectante, brinda la posibilidad de proporcionarle un valor agregado al material. Asimismo, permite iniciar el estudio y la investigación sobre su capacidad desinfectante ya que, por la naturaleza del material, se espera incrementar la calidad del agua en comparación con los materiales ya utilizados de forma convencional para filtración. Además, de que no genera subproductos potencialmente carcinogénicos, como son los resultantes del proceso de desinfección por cloración. Dada la naturaleza granular del material y su similitud con otros materiales filtrantes, se estima que el tiempo de vida útil sea de 1 a 2 años, esto dependerá del desgaste del AMN durante los retrolavados. En el caso de pérdida de actividad desinfectante del AMN en la PPF, se procederá a su reactivación o sustitución siguiendo el procedimiento descrito previamente.

Es importante señalar que el empleo de AMN no se encuentra en otros sistemas de tratamiento de aguas residuales por lo que es una propuesta innovadora. No obstante, requiere más desarrollo para determinar las variables de diseño que permitan obtener buenos resultados en la calidad del agua filtrada-desinfectada y lograr el uso del material como otra alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Al respecto, debe conocerse las limitaciones en su capacidad desinfectante en presencia de materia orgánica disuelta, asociada a las posibles fluctuaciones de operación (cambio de calidad de agua) tanto en el tanque de lodos activados, como del sedimentador secundario. El AMN al no ser medio filtrante que se emplee de manera convencional, podría ser una alternativa para la filtración-

desinfección de efluentes biológicos secundarios de sistemas de tratamiento a escala real. Su ubicación sería ya sea después del sedimentador secundario o del filtro convencional, según la calidad de agua a tratar y la requerida como efluente.

## **12 CONCLUSIONES**

Se desarrollo la propuesta de ingeniería conceptual de una planta piloto filtro desinfectante que emplea agregados minerales naturales como medio filtrante-desinfectante para la depuración de agua procedente del efluente del sedimentador secundario del sistema de lodos activados de la planta de tratamiento de Aguas Residuales de Cerro de Agua (SLA PTAR CA) en Ciudad Universitaria. El desarrollo de la ingeniería conceptual consistió en determinar los materiales y equipos necesarios para el proyecto, así como las especificaciones técnicas para el empacado de la PPF, bases de diseño y cálculos que permitieron establecer la línea base del proyecto para su construcción y operación. La ingeniería conceptual culminó con la elaboración de la lista de materiales y actividades como antecedente del catálogo de conceptos, el cual servirá como referencia para la elaboración de presupuesto y ejecución del proyecto. Asimismo, se redactó la filosofía de operación de la PPF acoplada al sistema del SLA PTAR CA la cual consistió principalmente en describir los detalles y criterios para su operación y control.

### 13 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acura (2022) Lodos activados: qué son y en que consiste este proceso. Recuperado de: <https://grupoacura.com/es/blog/lodos-activados/>
- Anda Valades L. (2021) Tiempo de retención hidráulico en plantas de agua potable. Recuperado de: <https://www.iagua.es/blogs/luis-anda-valades/tiempo-retencion-hidraulico-trh-planta-agua>
- Amábilis Sosa L.E. (2010) Análisis de patrón de flujo en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial. Tesis de maestría, UNAM. Recuperado de: [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-06199?func=find-b&local\\_base=TES01&request=An%C3%A1lisis+de+patr%C3%B3n+de+flujo+en+humedales+&find\\_code=WRD&adjacent=N&filter\\_code\\_2=WYR&filter\\_request\\_2=&filter\\_code\\_3=WYR&filter\\_request\\_3=](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-06199?func=find-b&local_base=TES01&request=An%C3%A1lisis+de+patr%C3%B3n+de+flujo+en+humedales+&find_code=WRD&adjacent=N&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=)
- American Water Works ANSI/ AWWA B100-16 Granular Filter Material. Recuperado de [https://www.abpsoil.com/images/references/Standard\\_awwa-b100%202016.pdf](https://www.abpsoil.com/images/references/Standard_awwa-b100%202016.pdf)
- Aguilar P., Jiménez B.\*, Maya C., Orta T. and Luna V. (2006). Desinfection of sludge with high pathogenic content using silver and other compounds. (“Disinfection of sludge with high pathogenic content using silver and ...”) Water Sci. Technol. 54(5):179-187
- Ávila Sánchez L.J. (2017) Propuesta de un filtro económico para mejorar la calidad del agua potable en la FES Aragón (Tesis de Licenciatura, UNAM) Recuperado de

[https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-28904?func=full-set-set&set\\_number=033933&set\\_entry=000001&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-28904?func=full-set-set&set_number=033933&set_entry=000001&format=999)

- Ayala Ruiz R. (2007) Influencia de la carga hidráulica superficial en un reactor de lecho fijo alimentad con efluentes porcinos (Tesis de maestría, UNAM) Recuperado de [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/YJL5A53U8EN9J28YVY7LFLF38C73B6TAS69LDKTNHI1M238X98-40363?func=full-set-set&set\\_number=181799&set\\_entry=000006&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/YJL5A53U8EN9J28YVY7LFLF38C73B6TAS69LDKTNHI1M238X98-40363?func=full-set-set&set_number=181799&set_entry=000006&format=999)
- Bhardwaj A. K., Sundaram S., Yadav K. K., Srivastav A L. 2021. An overview of silver nano-particles as promising materials for water disinfection, Environmental Technology & Innovation, (23) 101721.
- Barraque. Ch (1979) Filtración del agua. En Manual técnico del agua. Recuperado de <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/fildegremont.pdf>
- Blacio Ordoñez D.A, Palacios Pérez J.L (2011) Filtros biológicos para la potabilización del agua, posibilidades de uso de fla (filtros lentos de arena) con agua superficial de nuestra región (Tesis de Licenciatura, Universidad de Cuenca) Recuperado de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/751/1/ti878.pdf>
- Barrera Hernández R. (2016) DQO y DBO Recuperado de: [https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/marketing/capacitacion/2016/05/Hanna Instruments. DQO y DBO.pdf](https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/marketing/capacitacion/2016/05/Hanna_Instruments._DQO_y_DBO.pdf)

- Blanc D.S. Carrara P.H, Zanetti G (2005) Water disinfection with ozone, copper and silver ions, and temperature increase to control Legionella: seven years of experience in a university teaching hospital. J. of Hosp. Infect, 60(1)69-72.
- Cadavid Rodríguez J.J, Zúñiga Ahumada D.E (2009) Construcción y análisis de un sistema de filtración granular a presión para abastecimiento de agua de consumo humano en situaciones de emergencia (Tesis de Licenciatura, Universidad de los Andes) Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/14287/u401974.pdf?sequence=1>
- Calderón Mólgora C.G. (2013) Serie Autodidáctica de medición de la calidad del agua. Identificación y descripción de sistemas primarios para el tratamiento de aguas residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del agua. Recuperado de [Carga hidráulica o carga \(yumpu.com\)](#)
- Calle Padilla D.E, Romero Zambrano M. (2019) Elaboración del modelo físico y la guía metodológica de una columna de filtración de arena, antracita y carbón activado (Trabajo de grado, Universidad Del Azuay. Recuperado de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9412/1/15049.pdf>
- Calzada Hoyo B. (2015) La mina del 8 de septiembre de 1546. Recuperado de: <http://bernardodelhoyoc.blogspot.com/2015/09/la-mina-del-8-de-septiembre-de-1546.html>
- Carbotecnia, Centro de Aprendizaje. (2013) Plata. Recuperado de: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/plata-en-el-agua-y-sus-efectos-en-la-salud/>

- Carbotecnia, Centro de Aprendizaje (2015) La plata en el carbón. Recuperado de: <https://www.carbotecnia.info/la-plata-en-el-carbon/>
- Carbotecnia, Centro de Aprendizaje (2023) ¿Qué es un filtro de lecho profundo? Recuperado de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/filtros-de-lecho-profundo/>
- Casierra-Martínez H., Casalins-Blanco J., Vargas-Ramírez X y Caselles-Osorio, A. (2016). Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. Tecnología y ciencias del agua, 7(4), 97-111. Recuperado en 31 de octubre de 2023, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000400097&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400097&lng=es&tlng=es).
- Cazares Venegas J.J. (2014) Calidad del agua de reúso :generación-almacenamiento-distribución, posterior a la renovación de la planta de tratamiento “Cerro del Agua”(Tesis de Licenciatura, UNAM) Recuperado de [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-44466?func=find-b&local\\_base=TES01&request=renovacion+de+la+planta+de+tratamiento&find\\_code=WRD&adjacent=N&filter\\_code\\_2=WYR&filter\\_request\\_2=&filter\\_code\\_3=WYR&filter\\_request\\_3=](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-44466?func=find-b&local_base=TES01&request=renovacion+de+la+planta+de+tratamiento&find_code=WRD&adjacent=N&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=)
- Choi. Y.C, Morgenroth, E. (2003) Monitoring biofilm detachment under dynamic changes in shear stress using laserbased particle size. Water Science and Technology 7(5): 69-76

- Coll Xavier (2018) La definición de ingeniería conceptual e ingeniería básica. ("La definición de ingeniería conceptual e ingeniería básica (Parte1) Recuperado de [https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/230401-La-definicion-de-ingenieria-conceptual-e-ingenieria-basica-\(Parte-1\).html](https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/230401-La-definicion-de-ingenieria-conceptual-e-ingenieria-basica-(Parte-1).html))
- Como afecta el biofilm a los filtros de arena (2021) Aire, Agua y Legionella. Recuperado de <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/mantenimiento-de-piscinas-como-afecta-el-biofilm-a-los-filtros-de-arena>
- Coutiño E. (2007) Los compuestos de plata y la salud. Recuperado de: <https://biblat.unam.mx/hevila/Altepepaktli/2007/vol3/no5/5.pdf>
- Crites, R.W. y Tchobanoglous, G. (2000) Sistemas de Manejo de Aguas Residuales, para Núcleos Pequeños y Descentralizados, McGraw Hill, New York
- Crittenden, R.J. Trussell, R.D (2012) MWH's Water Treatment: Principles and Design.
- Díaz Restrepo K.Y y Niño Lozada Y.E. (2018) Evaluación del comportamiento de materiales alternativos para lechos filtrantes en proceso de potabilización de agua. ("Descripción: Evaluación del comportamiento de materiales alternativos ...") Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16451/1/TESIS%20PROTO TIPO.pdf>
- FLUENCE (2019) Membranas para el tratamiento del agua y sus procesos. Recuperado de: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/membranas-para-el-tratamiento-del-agua-y-sus-procesos>

- Flujo en medios porosos (2008) Ley de Darcy. Recuperado de [http://agronomia.criba.edu.ar/carreras/ia/archivos/Materias/579/archivos/aguas\\_subterraneeas/DARCY.pdf](http://agronomia.criba.edu.ar/carreras/ia/archivos/Materias/579/archivos/aguas_subterraneeas/DARCY.pdf)
- Guerrero, Tanni y *et.al.* (2009). El agua en la Ciudad de México. *Ciencias* 94, abril-junio, 16-23. ("El agua en la ciudad de México - Revista Ciencias") [En línea] <https://www.revistacienciasunam.com/es/43-revistas/revista-ciencias-94/203-el-agua-en-la-ciudad-de-mexico.html>
- Emiliano Estapé P., Capdevila Maya O., Valero Cervera F. (2021) Evaluación del medio filtrante Filtralite como alternativa a la arena en la ETAP Llobregat. Recuperado de <https://www.filtralite.com/sites/default/files/pdfs/articulo-tecnico-evaluacion-medio-filtrante-filtralite-alternativa-arena-estacion-tratamiento-agua-potable-llobregat-tecnoaqua-es.pdf>
- Flores Torres C.A González Martínez S. (2006) Filtración combinada anaerobia para el tratamiento de aguas residuales. Recuperado de [CVII-54 \(smbb.mx\)](http://www.smbb.mx/CVII-54)
- García Rojas J.L (2002) Evaluación de compuestos desinfectantes en la eliminación de *Vibrio Cholerae* y *Escherichia Coli* presentes en agua. Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001922.pdf>
- GEDAR, (2012) Gestión de Aguas y Residuos- Fangos Activos. Recuperado de: <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/fangos-activos.htm>

- Gelves M.F. (2005) Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de las biopelículas en las redes de distribución de agua potable. (“Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de ...”) Recuperado de <http://www.elaguapotable.com/Deterioro%20de%20la%20calidad.pdf>
- Gobierno de México, (2022) Minería. Recuperado de <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Hidritec (2016) Tratamiento de agua potable con Ozono. Recuperado de: <http://www.hidritec.com/hidritec/tratamiento-de-agua-potable-con-ozono>
- Higiene Ambiental (2021) Mantenimiento de piscinas, como afecta el biofilm a los filtros de arena. Recuperado de: <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/mantenimiento-de-piscinas-como-afecta-el-biofilm-a-los-filtros-de-arena>
- IBEC The anual Report of the Institute for Bioengineering of Catalonia (2018) Recuperado de [https://issuu.com/ibec\\_barcelona/docs/ibecannualreport2017\\_2017inreview](https://issuu.com/ibec_barcelona/docs/ibecannualreport2017_2017inreview)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1998). Buscador INEGI. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=plata>
- Le Ouay B. y Stellacc F. 2015. Antibacterial activity of silver nanoparticles: A surface science insight. Nano Today, (10): 339-354.
- Luna Pabello V. M.\*, Miranda Ríos M., Jiménez B. and Orta T. 2009. "Effectiveness of the use of Ag, Cu and PAA to disinfect municipal wastewater." (“Sci-Hub | Effectiveness of the use of Ag, Cu and PAA to disinfect ...”) Environmental Technology. 30(2):129-139.

- Luna Pabello V. M y Vazquez Aguilar E. 2022. Evaluación del efecto desinfectante de un agregado mineral natural sobre microorganismos de interés sanitario presentes en aguas residuales municipales. Congreso Internacional Multidisciplinario de Investigación. Facultad de Estudios Superiores Aragón.
- Magaña-López R (2011) Diseño y evaluación del funcionamiento de un filtro empacado con agregados minerales para la eliminación de huevos de helminto. (“Repositorio de Tesis DGBSDI: Diseño y evaluación del funcionamiento de ...”) Tesis de Ingeniería, UNAM. Recuperado de: [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/ETDTAKEYPHDUMI5XXA8H9V76J1EMI3U23TCCVIL5AVFA249II3-30812?func=full-setset&set\\_number=929070&set\\_entry=000008&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/ETDTAKEYPHDUMI5XXA8H9V76J1EMI3U23TCCVIL5AVFA249II3-30812?func=full-setset&set_number=929070&set_entry=000008&format=999)
- Magaña López R. (2018) Efecto de la plata, cobre, hierro y agregados minerales sobre huevos de helminto y su potencial uso en sistemas de filtración. (“RepoFI UNAM: Efecto de la plata, cobre, hierro y agregados minerales ...”) Tesis de Doctorado, UNAM. Recuperado de: [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/ETDTAKEYPHDUMI5XXA8H9V76J1EMI3U23TCCVIL5AVFA249II3-33101?func=full-setset&set\\_number=929092&set\\_entry=000005&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/ETDTAKEYPHDUMI5XXA8H9V76J1EMI3U23TCCVIL5AVFA249II3-33101?func=full-setset&set_number=929092&set_entry=000005&format=999)
- Magaña-López R., Luna-Pabello VM, Barrera-Godínez JA, Orta de Velásquez MT y Fernández-Villagómez G. (2016). Effect of mineral aggregates on the morphology and viability of *Toxocara canis* eggs. (“Effect of mineral aggregates on the morphology and viability of ...”) *Ecological Engineering*. Vol. 90 pp: 125-134.

- Mantilla Morales G.; Sandoval Yoal L.; Ramírez Camperos E. M.; Gasca Álvarez S; Navarro Franco J.; Hernández Cruz N.; García Rojas J.L.; Esquivel Sotelo A.; Calderón Mólgora C. G. (2017). Energía limpia del agua sucia: aprovechamientos de lodos residuales. Recuperado de [Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales \(imta.gob.mx\)](https://www.imta.gob.mx/energia-limpia-del-agua-sucia-que-ayuda-a-eliminar-lodos-residuales)
- Martínez Rodríguez M. A (2019) Biofiltración a escala piloto de las emisiones gaseosas de una planta de tratamiento anaerobio de aguas residuales (Tesis de licenciatura, UNAM) Recuperado de [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-33566?func=full-set-set&set\\_number=033947&set\\_entry=000250&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-33566?func=full-set-set&set_number=033947&set_entry=000250&format=999)
- Martínez Silva S. (2002) Tecnología alternativa compatible con el ambiente para el tratamiento de aguas de enfriamiento: ionización de plata y cobre. Recuperado de: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/viewFile/25256/23734>
- Medios filtrantes granulares: evaluación de la relación entre la profundidad del lecho filtrante y el tamaño de grano (2022) Recuperado de <https://www.manantialwater.com.mx/purificacion/medios-filtrantes-granulares-evaluacion/>
- Miranda E. (2022) Devenir histórico de la Minería Mexicana. Recuperado de <https://www.revistageomimet.mx/2020/10/devenir-historico-de-la-mineria-mexicana/>
- Miranda Ríos M. (2005) Estudio y evaluación del poder germicida de compuestos de plata en aguas residuales parcialmente tratadas. (Tesis de maestría, UNAM) Recuperado de <https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLL>

[VY3CB3H5DHKPA4V8EB-08460?func=find-b&local\\_base=TES01&request=poder+germicida+de+compuestos+de+plata+en+aguas+residuales+parcialmente+tratadas&find\\_code=WRD&adjacent=N&filter\\_code\\_2=WYR&filter\\_request\\_2=&filter\\_code\\_3=WYR&filter\\_request\\_3=](http://www.ircwash.org/sites/default/files/Miranda-Rios-2011-Removal.pdf)

- Miranda Ríos. M.; Luna Pabello V. M.; Orta V. M. T. y Barrera G. J. A. (2011). "Removal of *Escherichia coli* from biological effluents using natural and artificial mineral aggregates." ("Removal of *Escherichia coli* from biological effluents using ... - SciELO") Recuperado de: Water SA. 37(2): 213 – 220. <http://www.ircwash.org/sites/default/files/Miranda-Rios-2011-Removal.pdf>
- Molloy S.L; Ives, R. y Rose, J.J (2007). The use of copper and silver in carbon point-of-use filters for the suppression of Legionella throughput in domestic water systems. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18042187/>
- Momba M. N. B. (2004). Comparing the effect of various pipe materials o biofilm formation in chlorinated and combined chlorine-chloraminates water systems. Waters SA ,30(2).
- Moret, Fernández D. López M.V (2015). Un método para la estimación de la porosidad de un agregado de suelo. Recuperado de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/136762/1/LopezMV\\_CapLibZNS15\\_2015.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/136762/1/LopezMV_CapLibZNS15_2015.pdf)
- Nuevo D. (2022). El tratamiento de fósforo en aguas residuales. Recuperado de: <https://www.tecpa.es/fosforo-aguas-residuales/>
- Olmedo Sánchez T. (2008). Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. ("Subproductos de la desinfección del agua por

- el empleo de compuestos de ...) Efectos sobre la salud. Recuperado de [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/OLMEDO%202008.%20Subproductos%20de%20la%20desinfecci%C3%B3n%20del%20agua.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OLMEDO%202008.%20Subproductos%20de%20la%20desinfecci%C3%B3n%20del%20agua.pdf)
- Otero Calviño N. (2009). Filtración de aguas residuales para reutilización. (“portalciencia.ull.es”) (Tesis doctoral. Universidad de La Laguna). Recuperado de <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/10239/cp273.pdf?sequence=1&is>
  - Pérez de la Cruz F.J, Urrea Mallebrera M.A (2009) Abastecimiento de aguas, Filtración, Universidad Politécnica de Cartagena (UPC) Recuperado de <https://docplayer.es/amp/23263254-Capitulo-3-potabilizacion-de-aguas.html>
  - Pérez López, J.A; Espingares García M. (1995). Estudio Sanitario del agua. Universidad de Granada. Recuperado de: [https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/Uni\\_05/filtracion.pdf](https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/Uni_05/filtracion.pdf)
  - Planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro del Agua en Ciudad Universitaria de la UNAM (2010) Recuperado de [http://www.agua.unam.mx/assets/pumagua/gacetas/gaceta\\_Ags\\_2010\\_aguatrada.pdf](http://www.agua.unam.mx/assets/pumagua/gacetas/gaceta_Ags_2010_aguatrada.pdf)
  - Programa de Manejo, Uso y Reusó del Agua en la UNAM. (2022). Recuperado de [http://www.pumagua.unam.mx/calidad\\_agua.html#:~:text=Planta%20de%20Tratamiento%20de%20Agua%20Residual%20Cerro%20del%20Agua%2C%20Ciudad%20Universitaria.&text=Cada%20pozo%20\(tres%20en%20total,al%2013%](http://www.pumagua.unam.mx/calidad_agua.html#:~:text=Planta%20de%20Tratamiento%20de%20Agua%20Residual%20Cerro%20del%20Agua%2C%20Ciudad%20Universitaria.&text=Cada%20pozo%20(tres%20en%20total,al%2013%)

[25%20al%20agua%20extraida.&text=Actualmente%20el%20%C3%A1rea%20de%20Calidad,%2DTres%20pozos](#)

- Ramirez Carrillo. H.F. (2003). Evaluación de la remoción biótica y abiótica de fosfatos en reactores empacados con diferentes materiales de uso potencial en humedales artificiales (Tesis de Maestría, UNAM) Recuperado de [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-46802?func=full-set-set&set\\_number=034169&set\\_entry=000002&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLLVY3CB3H5DHKPA4V8EB-46802?func=full-set-set&set_number=034169&set_entry=000002&format=999) (“Evaluacion de la remocion biotica y abiotica de fosfatos en reactores ...”)
- Rico Piñeros I.D. (2020). Análisis de un sistema de fijación de una biopelícula para el tratamiento de aguas superficiales en el río Salitre (Tesis de licenciatura, Universidad Cooperativa de Colombia) Recuperado de: [content\(ucc.edu.co\)](content(ucc.edu.co))
- Rodríguez Manuel J. Rodríguez Germán (2007) Subproductos de la desinfección del agua potable: Formación, aspectos sanitarios y reglamentación. Recuperado de: [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442007001100007](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007001100007)
- Rocha Díaz de León G.R. (2017). Remoción de nonilfenol y bisfenol a mediante ozonización en el efluente de ultrafiltración por membrana de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Cerro del Agua, Ciudad de México, México. (“Repositorio de Tesis DGBSDI: Remoción de nonilfenol y bisfenol a ...”) (Tesis de licenciatura, UNAM) Recuperado de <https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/1IXQYAGPF5AD761T38VU2H5T2GQ2MSLL>

[VY3CB3H5DHKPA4V8EB-30290?func=full-set-set&set\\_number=033941&set\\_entry=000002&format=999](http://www.bdcint.com.do/wp-content/uploads/2017/06/Conceptos-basicos-de-filtracion-Pharm-vDS-Junio-2016.pdf)

- Sánchez D. (2016). Conceptos básicos de filtración. Recuperado de [http://www.bdcint.com.do/wp-content/uploads/2017/06/Conceptos-basicos-de-filtracion Pharm vDS Junio-2016.pdf](http://www.bdcint.com.do/wp-content/uploads/2017/06/Conceptos-basicos-de-filtracion-Pharm-vDS-Junio-2016.pdf)
- Silver S. y Jeng-Fan L. (2000). Los cationes de plata como agentes antimicrobianos: usos clínicos y resistencia bacteriana. Recuperado de <https://www.medigraphic.com/pdfs/micro/ei-2000/ei003d.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 Diario Oficial de la Federación. (2021) <https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5645374#:~:text=de%20la%20naci%C3%B3n-.NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D001%2DSEMARNAT%2D2021%2C%20Que,receptores%20propiedad%20de%20la%20naci%C3%B3n.>
- Silver In Water Purification (2022). Recuperado de <https://www.silverinstitute.org/silver-water-purification/>
- Starodub M.E. y Trevors J.T. (1990). Silver accumulation and resistance in Escherichia coli R1. Inorg. Biochem 39 pp (317-325) Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0162013490800302>
- Sutherland K. (2012). Filtration improvements progress global clean water provision. Filtration Separation pp 12-16 Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0015188212700988>

- Remtavarez (2010). La radiación ultravioleta como método superior de desinfección. Estudio sobre la óptima longitud de onda para mantener el agua libre de microorganismos: Recuperado de: [https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/05/07/131458#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20ultravioleta%20\(UV\)%20es,el%20agua%20libre%20de%20microorganismos.](https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/05/07/131458#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20ultravioleta%20(UV)%20es,el%20agua%20libre%20de%20microorganismos.)
- Turbidex. (2010). Hyper-Filtration media. Recuperado de <http://www.turbidex.com/master.pdf>
- Vázquez A. (2018). Mecano síntesis y efecto antimicrobiano de óxidos metálicos y nanoestructurados. Recuperado de: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-56912018000200029](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912018000200029)
- Walter J. (2003). Control de la calidad del agua, procesos fisicoquímicos. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=TLpzh5HQYvgC&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Wang J. Huang C.P y Pirestani D. (2003). Interactions of silver with wastewater constituents Water Res Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14511715/>
- Wiley J y Sons I. (2014). Drinking Water Distribution Systems: Biofilm Microbiology. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118743942.ch4>

## 14 ANEXOS

### Memoria de cálculo

En la presente propuesta para el diseño de la PPF se han tomado en cuenta los siguientes datos:

Datos					
Velocidad adoptada (Vf) (m/h)	0.3	m/h	$\rho_{real}$	2180	kg/m <sup>3</sup>
Altura total del recipiente	1.4	m	Área filtrante	$2\pi rh + 2\pi r^2$	
Diametro del recipiente	1.1	m	Área del filtro Af	4.15	m <sup>2</sup>
Radio	0.55	m	Profundidad de lecho	0.65	m

Lecho filtrante	
Diametro del material (mm)	Espeso de capa (m)
15	0.45
10	0.2
Total	<b>0.65</b>
Porosidad n	0.5

\*La densidad real  $\rho_{real}$  se basa en los datos registrados en Magaña (2010 y 2018)

### Volumen disponible en el filtro

	$\pi * r^2 * h$	
Vol. disponible	0.62	m <sup>3</sup>
Masa del material contenida en el filtro ( $\rho_{real}$ )(vol disponible sin material)		
Masa	1346.62	kg

### Volumen del filtro

Vf	<b>0.62 m<sup>3</sup></b>
Vf	<b>617.7 L</b>

### Caudal de diseño

Ecuación 1  $Af = \frac{Q}{vf}$

Af= Área del filtro	m <sup>2</sup>
Q= caudal de diseño	m <sup>3</sup> /h
vf=Velocidad de filtración	m/h

Despejando Q	Q=	<b>1.24 m<sup>3</sup>/h</b>
	Q=	<b>29.86 m<sup>3</sup>/d</b>

$$Q = Af * vf$$

$$Q = 4.15 \text{ m}^2 * 0.3 \frac{\text{m}}{\text{h}} = 1.24 \text{ m}^3/\text{h}$$

### Carga hidráulica y tiempo de residencia hidráulico

Ecuación 2

$$CH = \frac{Q}{Af}$$

CH= carga hidráulica	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h
V= volumen filtro	m
TRH=Tiempo de contacto	h

Ecuación 3

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

CH	<b>0.3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h</b>
TRH	<b>0.50 h</b>
TRH	<b>29.79 minutos</b>

### Tasa de filtración

Ecuación 4

$$Vt = \frac{Vf}{Af * TC}$$

Vt=Tasa de filtración	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d
Vt	<b>1.65 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d</b>

Rango adecuado para filtros lentos

$$CH = \frac{1.24 \text{ m}^3/\text{h}}{4.15 \text{ m}^2} = 0.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$$

$$TRH = \frac{0.62 \text{ m}^3}{1.24 \text{ m}^3/\text{h}} = 0.5 \text{ h}$$

$$Vt = \frac{0.62m^3}{4.15m^2 * 0.09 \text{ día}} = 1.65m^3/m^2d$$

### Cálculo del perfil hidráulico

Re	Número de Reynolds	<b>1.19</b> Flujo laminar
$\rho_w$	Densidad del fluido (agua)	997 kg/m <sup>3</sup>
v	Velocidad superficial o carga hidráulica	8.3E-05 m/s
d	Diámetro de las partículas del medio	0.015 m
$\mu$	Viscosidad dinámica del fluido (agua)	0.00105 kg/ms

$$Re = \frac{\rho_w v d}{\mu} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$CH = \left(0.03 \frac{m}{h}\right) \left(\frac{1h}{3600s}\right) = 8.3E - 05 m/s$$

$$Re = \frac{997kg/m^3 * 8.3x10^{-5}m/s * 0.015m}{0.00105 kg/ms} = 1.19$$

En medio porosos es válida la ley de Darcy cuando el número de Reynolds es de entre 1-10, es decir, cuando predominan las fuerzas viscosas y por tanto el régimen es laminar.

Cada régimen de flujo se encuentra acotado por los rangos (Crittenden *et al.*, 2012):

- Re < 1: Flujo Darcy (viscoso)\*
- 1 < Re < 100: Flujo Forchheimer\*
- 100 < Re < 600: Flujo laminar
- 600 < Re < 800: Flujo de transición
- Re > 800: Flujo turbulento

\*Ambos se pueden describir como flujo laminar