



UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

**“DESARROLLO DE UN PLAN PARA EVALUACION DEL SISTEMA DE
FILTRACION RAPIDA DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE LA JUNTA DE
AGUA POTABLE DE BAYAS.”**

Autor:

Carangui Fernández Diego Paúl
0302478516.

Director:

Ing. Sonia Margoth Astudillo Ochoa.
0104047444.

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO.

Cuenca – Ecuador

2016



RESUMEN

La Planta de Tratamiento de Agua Potable de la Junta Parroquial de Bayas es una planta que abastece de este servicio básico de agua potable a 1240 familias que es alrededor de 5000 personas, esta planta potabilizadora se encuentra en el sector noroeste de la ciudad de Azogues. El presente estudio titulado “Desarrollo de un plan para la evaluación del sistema de filtración rápida de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de Bayas”, tiene como objetivo recopilar y analizar datos históricos de los parámetros físicos para establecer los niveles de eficiencia en la remoción, analizar datos de caudales diarios de entrada, determinar los factores que inciden a que el lecho filtrante se colmate rápidamente.

Así también, evaluar las unidades de filtración mediante procedimientos estandarizados, contenido en el Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), las pruebas efectuadas fueron las siguientes: Velocidad y caudal de filtración, análisis de la calidad de filtrado inicial, duración de las carreras de filtración, expansión del medio filtrante, duración del proceso de lavado, velocidad de lavado, granulometría del lecho filtrante, bolas de lodo y espesor del medio filtrante.

Palabras Claves: Bayas, Filtración, Potabilización, Agua, Evaluación.



ABSTRACT

Plant Drinking Water Treatment of Bayas is a plant that supplies the basic drinking water to 1240 families is about 5000 people, this treatment plant is located in the northwest sector of the city of Azogues. This study entitled "Development of a plan for the evaluation of rapid filtration system of the water treatment plant of the board of drinking water of Bayas", aims to collect and analyze historical data of physical parameters to establish levels of efficiency removal, analyze daily flows data input, determine the factors that affect the filter bed to quickly Colmate.

Also, evaluate filtration units using standardized procedures contained in the Manual III: Assessment of plants appropriate technology of the Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS), the tests performed were: speed and flow filtration, analysis of the quality of initial filtrate, duration of filter runs, expansion of the filter medium, duration of the washing process, washing speed, gradation filter bed thickness and mud balls of the filter medium.

Keywords: Bayas, Filtration, Purification, Water, Evaluation.



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CAPITULO 1	10
1.1. Antecedentes	11
1.2. Introducción.	11
1.2.1. Captación de los efluentes a la planta de Bayas	12
1.2.2. Descripción del proceso de potabilización.	13
1.2.2.1. Ingreso de agua cruda.	14
1.2.2.2. Coagulación.	14
1.2.2.3. Floculación.	15
1.2.2.4. Sedimentación.	16
1.2.2.5. Filtración rápida.	16
1.2.2.6. Filtración lenta.	18
1.2.2.7. Desinfección.	19
1.2.2.8. Almacenamiento de agua tratada.	19
1.2.2.9. Laboratorio de control.	20
CAPITULO 2	21
2.1. Propiedades del agua.	22
2.1.1. Función del agua	22
2.1.2. Estructura química del agua	22
2.1.3. Parámetros físicos, químicos y biológicos del agua.	23
2.1.3.1. Parámetros físicas	23
2.1.3.2. Parámetros químicos	27
2.1.3.3. Parámetros biológicos	34
2.2. Filtros de tasa declinante y lavado mutuo.	35
2.2.1. Clasificación de los filtros	37
2.2.2. Características de la tasa declinante	38
CAPITULO 3	39
3.1. Historia de la Filtración.	40
3.2. Definición.	41
3.3. Mecanismo de la Filtración.	42
3.3.1. Mecanismo de transporte.	44
3.3.1.1. Cernido.	45
3.3.1.2. Sedimentación	46
3.3.1.3. Intercepción.	47



3.3.1.4.	Difusión.....	48
3.3.1.5.	Impacto Inercial.....	49
3.3.2.	Mecanismos de adherencia.....	50
3.3.2.1.	Fuerzas de Van der Waals	51
3.3.2.2.	Fuerzas electrostáticas	52
3.3.2.3.	Puente Químico	53
3.3.2.4.	Interacción combinada entre las fuerzas electrostáticas y las de Van der Waals.....	54
3.4.	Cinética de la Filtración.....	55
3.4.1.	Balance de masa	55
3.4.2.	Modelos para la remoción de las partículas suspendidas.	58
3.4.3.	Retención y arrastre de partículas	60
3.4.4.	Coefficiente de filtración modificado	61
3.4.5.	Perdidas de carga en un medio filtrante.....	62
3.4.5.1.	Perdidas de carga inicial.....	64
3.4.6.	Lavado de medios filtrantes.....	65
3.4.6.1.	Fluidización de medios porosos.....	65
3.4.6.2.	Expansión de medios porosos.....	65
3.4.6.3.	Perdidas de carga en medios filtrantes expandidos	67
3.5.	Factores que influyen en la Filtración.....	67
3.5.1.	Características de la suspensión.	67
3.5.2.	Características de la filtración.....	68
3.5.2.1.	Tipo de medio filtrante.....	68
3.5.2.2.	Tamaño efectivo del material filtrante.	68
3.5.2.3.	Peso específico del material filtrante	69
3.5.2.4.	Espesor de la capa filtrante.....	69
3.5.3.	Características hidráulicas.....	70
3.5.3.1.	Tasa de filtración.....	70
3.5.3.2.	Carga hidráulica disponible	71
3.5.3.3.	Calidad del efluente.....	71
3.6.	Unidades de la Filtración.	72
3.6.1.	Clasificación.....	72
3.6.2.	Filtración por gravedad	73
3.6.2.1.	Filtración ascendente.....	73
3.6.2.2.	Filtración descendente	74
3.6.2.3.	Filtración ascendente y descendente.....	74



3.6.3. Métodos de control operacional	74
3.6.3.1. Tasa constante y nivel variable.....	74
3.6.3.2. Tasa y nivel constante.....	75
3.6.3.3. Tasa declinante.....	76
3.6.4. Medios Filtrantes.....	78
3.6.4.1. Filtros de lecho simple	78
3.6.4.2. Filtros de lecho múltiples.	78
3.6.4.3. Filtración a presión.....	79
3.6.4.4. Características del medio filtrante.	79
CAPITULO 4.....	81
4.1. Descripción del proceso de operaciones.....	82
4.1.1. Principales componentes de los filtros.	82
4.1.2. Operación del filtro	85
4.1.3. Operación de los filtros de tasa declinante.	86
4.2. Lavado superficial	88
4.3. Retro lavado	88
4.3.1. Condiciones para lavar un filtro.....	88
4.3.2. Proceso de lavado	89
CAPITULO 5.....	90
5.1. Requisitos para la operación de la batería con tasa declinante.	91
5.2. Requisitos básicos para que la batería de filtros sea auto lavable.....	92
5.3. Características del proceso de filtración.....	92
5.3.1. Velocidad y caudal de filtración.....	92
5.3.2. Calidad del filtrado inicial.	94
5.3.3. Duración de las carreras de filtración.	95
5.4. Características del sistema de lavado.	95
5.4.1. Expansión del medio filtrante.....	95
5.4.2. Duración del proceso de lavado.	97
5.5. Característica del medio filtrante.....	98
5.5.1. Granulometría del medio filtrante.....	98
5.5.2. Bolas de lodo.	99
5.5.3. Espesor del medio filtrante.	100
CAPITULO 6.....	102
6.1. Eficiencia del proceso.	103
6.2. Características del proceso de filtración.....	104
6.2.1. Velocidad y caudal de filtración.....	104



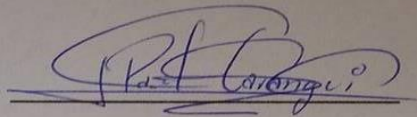
6.2.2.	Calidad del filtrado inicial.	106
6.2.3.	Duración de las carreras de filtración.	110
6.3.	Características del sistema de lavado.	112
6.3.1.	Expansión del medio filtrante.	112
6.3.2.	Duración del proceso de lavado.	114
6.3.3.	Velocidad de lavado del Filtro	117
6.4.	Características del medio filtrante.	118
6.4.1.	Granulometría del medio filtrante.	118
6.4.2.	Bolas de Lodo.	120
6.4.3.	Espesor del medio filtrante.	121
CAPITULO 7		123
7.1.	Eficiencia del proceso.	124
7.2.	Característica del proceso de filtración	125
7.2.1.	Análisis de la velocidad de Filtración o tasa de filtración.	125
7.2.2.	Análisis de la calidad de Filtrado inicial.	126
7.2.3.	Duración de las carreras de filtración.	127
7.3.	Características del sistema de lavado.	128
7.3.1.	Expansión del medio filtrante.	128
7.3.2.	Duración del proceso de lavado.	129
7.3.3.	Velocidad de lavado.	131
7.3.4.	Granulometría del medio filtrante.	132
7.3.5.	Bolas de Lodo.	132
7.3.6.	Espesor del Medio Filtrante.	133
7.4.	Evaluación General.	134
7.5.	Medidas a realizar para mejorar la operación de los Filtros.	135
7.5.1.	Aumento de la Tasa de Filtración.	135
7.5.2.	Aumento de la expansión del medio filtrante.	136
7.5.3.	Tiempo óptimo de lavado.	136
7.5.4.	Mejoramiento de la granulometría de lecho filtrante	137
7.5.5.	Espesor del medio filtrante óptimo	137
CAPITULO 8		138
8.1.	Conclusiones.	139
8.2.	Recomendaciones	141
Bibliografía.		143
Anexos		145



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Diego Paul Carangui Fernandez, autor de la tesis "Desarrollo de un plan para evaluación del sistema de filtración rápida de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de Bayas.", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Químico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 12 de Enero del 2016



Diego Paul Carangui Fernandez

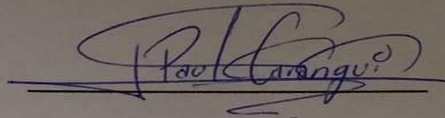
C.I: 0302478516



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Diego Paul Carangui Fernandez, autor de la tesis "Desarrollo de un plan para evaluación del sistema de filtración rápida de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de Bayas.", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de Enero del 2016



Diego Paul Carangui Fernandez

C.I: 0302478516



CAPITULO 1

Generalidades

1.1. Antecedentes

La Junta de agua potable Regional Bayas es una organización comunitaria de servicio al público, cuya labor se enmarca en el ámbito de servicio de agua potable para un aproximado de 5000 personas de la parroquia Bayas, cantón Azogues.

En el 2011 se implementó la planta de tratamiento de agua convencional de filtración rápida ya que el sistema anterior era de filtración lenta en el cual se realizó una implementación y adaptación de floculadores y sedimentadores. Además se incorporó la batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo, esto para cumplir con el propósito de dotar a la población de Bayas con agua potable de buena calidad, pero hasta el momento no se ha podido cumplir al 100% con dicho propósito ya que existe un déficit de recursos humanos y económicos, así mismo como la falta de control de calidad del agua potable.

La Planta de Tratamiento de la parroquia Bayas en estos últimos tiempos ha presentado niveles altos de turbiedad y color, y esto es un factor importante que se considera en la potabilización del agua de acuerdo a los requisitos estipulados en la normativa NTE INEN 1108. Pudiendo ocasionar un potencial problema de enfermedades de tipo hídrico en la población

Los dirigentes de la junta de Agua Potable de Bayas han solicitado ayuda técnica a la Universidad de Cuenca para solventar los problemas antes mencionados.

1.2. Introducción.

La evaluación de la batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo de la planta de tratamiento de agua potable de la junta parroquial de Bayas, comprende un análisis detallado del funcionamiento y operación de cada una de las partes que conforman la planta.

Como resultado de este plan de evaluación de los filtros, se obtendrá información sumamente valiosa que comprenderá la determinación de las condiciones óptimas para mejorar la eficiencia del sistema de filtración.

La planta de tratamiento de agua potable de la junta parroquial de Bayas es operada por gravedad, las etapas para la obtención del agua potable son: Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración Rápida y Lenta y por último la Desinfección. Así también se tiene edificaciones complementarias como es el área de

Almacenamiento y Dosificación de productos químicos, laboratorio de control, áreas de circulación, jardines y espacios verdes.

Dentro de estas etapas se tiene la filtración, en donde los filtros son las unidades más complejas de la planta de tratamiento de agua, las cuales deben trabajar correctamente para que la eficiencia sea la máxima posible. En la planta de tratamiento de agua potable de la junta parroquial de Bayas se pretende hacer un trabajo titulado **“Desarrollo de un plan para evaluación del sistema de filtración rápida de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de Bayas”** cuya metodología a aplicar es la del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) para la identificación de los factores que ocasionan la colmatación de los filtros.

En este documento se ha reunido y sintetizado los criterios más importantes para evaluar la operación de la batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo.

1.2.1. Captación de los efluentes a la planta de Bayas

La captación del agua que llega a la planta de bayas se hace de 3 fuentes: Mahuarcay, Chagrarcazhca, Santa Ana. Estas fuentes están ubicadas a diferentes distancias como se indica en el siguiente cuadro.

FUENTE	DISTANCIA A LA PLANTA
Mahuarcay	400 m
Chagrarcazhca	5 km
Santa Ana	7 km

Tabla 1-1. Captaciones
FUENTE: AUTOR

Estas fuentes mencionadas provienen de tomas de agua y pequeñas cascadas que están ubicadas en la zona oriental de la ciudad de Azogues, las mismas que llegan a la planta por acción de la gravedad siguiendo primero un canal abierto para luego ir por una tubería PVC que conducirá hasta la Planta Potabilizadora de Bayas.



Figura 1-1. Captación de Chagrarcazhca
FUENTE: AUTOR



Figura 1-2. Captación Mahuarcay
FUENTE: AUTOR



Figura 1-3. Captación Santa Ana
FUENTE: AUTOR

1.2.2. Descripción del proceso de potabilización.

La planta de Potabilización de Agua es de tipo convencional, tiene capacidad para trabajar con un caudal de entrada de 20L/s que se divide en dos partes iguales (10L/s a cada lado) ya que existen dos módulos de operación muy similares, un izquierdo y un derecho.

Estos módulos contienen un canal de ingreso, un floculador hidráulico que es de flujo vertical, un sedimentador, seguidos por pre filtros para seguir con la batería de filtros rápidos de lavado mutuo y tasa declinante donde se une el agua de los dos módulos y se dirige hacia el sistema de desinfección que se lo hace con hipoclorito de calcio.

A continuación se dará una información más detallada de todo el proceso de potabilización de agua en la planta de la junta de agua potable de Bayas.

1.2.2.1. Ingreso de agua cruda.

El ingreso de esta agua cruda proviene de los efluentes que son: Mahuarcay, Santa Ana, Chagrarcazhca. Estos efluentes llegan a través de cuatro tuberías que se puede regular manualmente por medio de válvulas con el objetivo de regular el caudal de llegada (Fig. 1-4). Además la planta posee un sistema para desviar una parte de caudal con la finalidad de evitar que el agua tenga valores de turbiedad debido al arrastre de tierra y otras partículas que son las causantes de los problemas de coagulación que se detalla a continuación.



Figura 1-4. Válvulas de los efluentes
FUENTE: AUTOR

1.2.2.2. Coagulación.

La coagulación tiene como objetivo la remoción de la mayor parte de impurezas que pueda contener el agua. Esta etapa comienza desde que el agua cruda pasa del cajón hacia el vertedero rectangular donde se forma el resalto hidráulico en la parte inferior o en la base. (Fig. 1-5). Para la coagulación se usa una solución química de sulfato de aluminio al 2% el mismo que se prepara en dos tanques de 500 ml de capacidad (Fig. 1-6). De este dosificador de sulfato pasa la solución química hasta una flauta (Fig. 1-7) Colocada al inicio del vertedero donde deja caer la solución de manera uniforme en toda la masas de agua para cumplir con el funcionamiento de la coagulación.



Figura 1-5. Resalto Hidráulico
FUENTE: AUTOR



Figura 1-6. Tanques de Sulfato
FUENTE: AUTOR



Figura 1-7. Flauta
FUENTE: AUTOR

1.2.2.3. Floculación.

En esta etapa, la floculación tiene como objetivo la formación y crecimiento de los flóculos por acción de la aglomeración de partículas, esto ocurre en las unidades de floculación (Fig. 1-8) la misma que cuenta con dos floculadores de flujo vertical. Este tipo de floculadores el flujo de agua tiene movimiento ascendente y descendente que recorre a través de unas pantallas colocadas de manera vertical cuyo material es de asbesto y cemento de 0.7m * 1.8m. Para este proceso en la Planta potabilizadora, se tiene 55 pantallas en total para cada floculador, cuya distribución es de que cada dos placas de asbesto va una de concreto con la misión de disminuir la presión del agua y así evitar la rotura de las placas consiguientes cuando se hace el llenado de este floculador luego de haber realizado el mantenimiento.

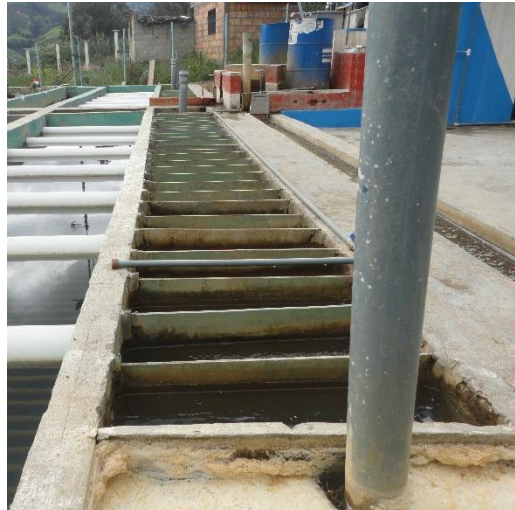


Figura 1-8. Floculador
FUENTE: AUTOR

Para la remoción de lodos que se acumulan en el fondo del floculador, se la realiza por medio de una tubería, el mismo que dispone de orificios que recolectan el lodo, con la que se evita la obstrucción para el paso del agua.

1.2.2.4. Sedimentación.

Luego de la floculación se conduce el agua al proceso de sedimentación, el cual se realiza en los Decantadores Laminares de Flujo Ascendente (fig. 1-9), que consta de 80 láminas que tienen una ubicación paralela. Estos decantadores se encuentran uno en cada módulo. La salida del agua se da por tubos perforados que se encuentra en la superficie.



Figura 1-9. Decantadores de Flujo Ascendente
FUENTE: AUTOR

1.2.2.5. Filtración rápida.

En la Planta de potabilización existen dos procesos de filtración, uno de filtración rápida, y otro de filtración lenta. Para la filtración rápida, se debe hacer pasar el agua

primero por unos pre filtros de grava tanto gruesa como grava fina que es de flujo horizontal (Fig. 1-10), cuya función es disminuir la carga de material en suspensión antes del ingreso a los filtros rápidos.

Una vez pasado el agua por los pre filtros, llega a los filtros rápidos, que es una batería de tasa declinante y lavado mutuo con un número de cuatro (Fig. 1-11) y una capacidad de 20L/s.



Figura 1-10. Pre filtros
FUENTE: AUTOR



Figura 1-11. Batería de 4 filtros
FUENTE: AUTOR

Esta batería de filtros contiene un lecho filtrante cuyo material está conformado por una capa de arena, una capa de grava, en el fondo una capa de piedra, y un falso fondo. Además contiene un canal de aislamiento por donde pasa el agua filtrada que está ubicada al final de los filtros y finalmente un canal de interconexión donde el agua se reúne y se transportará a la siguiente etapa. (Fig. 1- 12).



Figura 1-12. Canal de Aislamiento
FUENTE: AUTOR

1.2.2.6. Filtración lenta.

Otro proceso de filtración que se realiza en la Planta de potabilización, es la etapa de la filtración Lenta. Esta consiste en un cajón grande de cemento, el cual en su interior consta de un lecho filtrante de arena (Fig. 1-13). El objetivo de esta etapa es la eliminación de microorganismos patógenos que se encuentran presente en el agua (Fig. 1-14).

La entrada de agua para esta etapa se puede dar de dos maneras: la primera, es alimentar el filtro con el agua que proviene directamente desde la entrada del líquido a la planta, siempre y cuando los valores de turbiedad sean inferior al 20 NTU. Y la segunda manera es alimentar el filtro con el agua que viene de los pre filtros.

Se suele usar la filtración lenta en la Planta Potabilizadora generalmente en las noches, ya que en ese periodo de tiempo (10 pm – 6am) no existe un operador para controlar los filtros rápidos, y se opta por usar esta etapa de filtración lenta.



Figura 1-13. Lecho Filtrante (Arena)
FUENTE: AUTOR



Figura 1-14. Filtro Lento
FUENTE: AUTOR

1.2.2.7. Desinfección.

Luego del proceso de filtración, viene la etapa de desinfección. En la Planta de Potabilización se usa la Cloración, cuyo agente desinfectante usado es el Hipoclorito de Calcio que tiene un porcentaje de cloro del 70%.

En este método de Cloración, la solución de cloro que se usa tiene una concentración de 1,75 ppm. Se la prepara en tanques de 500L y la dosificación se realiza de manera directa por goteo (Fig. 1-15).

El control de la cloración se realiza en el tanque de almacenamiento de agua tratada, se toma una muestra cada dos horas de trabajo y se lleva al laboratorio para monitorear el valor de cloro existente. Es recomendable que la concentración del cloro este entre los valores de 0.6mg/L a 1mg/L ya que existe una pérdida de cloro en el transcurso de la distribución de agua.



*Figura 1-15. Dosificación por goteo
FUENTE: AUTOR*

1.2.2.8. Almacenamiento de agua tratada.

Para almacenar el agua tratada se tiene un tanque con una capacidad de 200m³. Desde este tanque, el agua es trasladada por tubería hacia dos tanques ubicados en el sector de la iglesia del Señor de Flores para su distribución. También existe una tubería que se usa para el abastecimiento directo del agua al sector de Tabacay ya que este sector es la más cercano a la Planta de Potabilización.

1.2.2.9. Laboratorio de control.

La planta potabilizadora de Bayas posee un laboratorio de control de calidad (Fig. 1-16) en el que se realizan pruebas tanto físicas (determinación de: turbiedad, color, pH, cloro residual) como pruebas químicas (determinación de: alcalinidad, dureza, cloruros, nitritos, nitratos, sulfato, fósforo, aluminio) el mismo que está equipado con instrumentos, equipos y reactivos necesarios para ejecutar cada una de las pruebas mencionadas anteriormente. Las pruebas físicas se las realiza cada dos horas de trabajo todos los días por los operarios, con el fin de controlar potenciales cambios que puedan ocurrir en el proceso de potabilización de agua, y las pruebas fisicoquímicas se llevan a cabo cada semana por estudiantes pasantes en la planta.



Figura 1-16. Laboratorio de Calidad
FUENTE: AUTOR



CAPITULO 2

MARCO TEORICO



2.1. PROPIEDADES DEL AGUA.

2.1.1. Función del agua

El agua es una molécula sencilla formado por tres átomos pequeños los cuales son, uno de oxígeno y dos de hidrogeno, con enlaces polares que permiten establecer los puentes de hidrogeno entre las moléculas adyacentes. Este enlace es la causa que da al agua propiedades que corresponden a mayor masa molecular, esa es la razón por la que tiene elevada puntos de fusión y ebullición, al igual tiene un alto calor especifico la cual la hace un excepcional amortiguador y regulador de cambios térmicos. El alto valor de su calor de vaporización permite eliminar el calor preservado, otra propiedad importante es la capacidad como disolvente de las sustancias polares. El hombre necesita agua para sus funciones vitales, por esta razón debe formar parte de nuestra dieta, ya que el agua es realmente un verdadero nutriente. Podemos perder casi la mitad de las proteínas de nuestro cuerpo y casi toda la grasa, pero la perdida de tan solo el 1-2% del agua corporal afecta a la termorregulación, a los sistemas cardiovasculares y al sistema nervioso, y limita notablemente la capacidad física y mental.[2]

2.1.2. Estructura química del agua

El agua tiene una estructura molecular simple, es decir esta molécula está compuesta por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrogeno formando un ángulo de $104,45^\circ$. Los átomos de hidrogeno se encuentra unido al átomo de oxigeno por un enlace covalente por un par de electrones de enlace. [1]

En cambio el oxígeno tiene dos pares de electrones no enlazantes por lo que se puede saber q el oxígeno tiene cuatro pares de electrones rodeando al átomo de oxígeno.

El agua a pesar de la simplicidad de la molécula forma líquidos, estructuras amorfas y sólidos muy complejos. El modelo universal del agua tiene estructura tetraédrica y es el que fija las estructuras polimórficas del estado sólido, la acción de esta se coordina a través de cuatro enlaces de hidrogeno con otras cuatro que están ubicadas en los vértices del tetraedro. El átomo de oxígeno actúa como doble receptor de los enlaces de hidrogeno y cada uno de los dos hidrógenos como dador de enlaces de hidrogeno como se puede observar en la figura (2-1). [3].

El agua tiene una distribución irregular de la densidad electrónica, por esto posee una carga parcial negativa (δ^-) cerca del átomo de oxígeno y una carga parcial positiva (δ^+) cerca de los átomo de hidrogeno.[4]

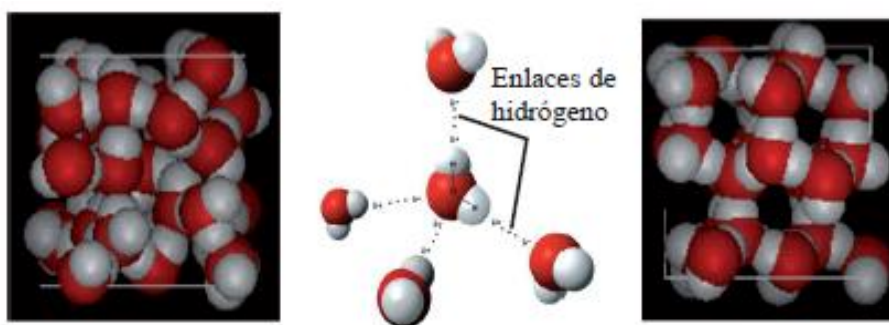


Figura 2-1. Enlaces de hidrogeno
FUENTE: Delgado. J, Las moléculas de agua, la química y la vida

2.1.3. Parámetros físicos, químicos y biológicos del agua.

Al momento de realizar controles en los diferentes procesos de tratamiento de agua, se debe tener muy en cuenta que las propiedades del agua se pueden clasificar en Físicos, Químicos, Orgánicos, Biológicos y Bacteriológicos. [1]

2.1.3.1. Parámetros físicas

Dentro de estas propiedades tenemos al sabor, olor, color, pH, turbidez, temperatura, conductividad y resistencia.

Sabor: En cuanto al sabor del agua, es un parámetro muy general, al no tener sabor en el agua tratada no significa que esté libre de algunos gérmenes patógenos o de algunas sustancias químicas inorgánicas. [1]

Olor: Lo que proporciona olor al agua son las sustancias orgánicas o de tipo industrial como podemos ver en la tabla 2-2, cuando existe olor puede indicar contaminación. La proliferación de organismos en los sistemas de distribución puede causar olores desagradables. [1]

Los métodos de purificación puede convertir sustancias que son de olores débiles en sustancias de olores intensos como es las aminas en cloro aminas y fenoles en cloro fenoles. [1]

En el siguiente cuadro se indica el origen de donde pueden provenir los diferentes olores. [6]

Naturaleza	Origen
Olor balsámico	Flores
Dulzor	<i>Coelosphaerium</i>
Olor químico	Aguas residuales industriales
Olor a cloro	Cloro libre
Olor a hidrocarburo	Refinería de petróleo
Olor medicamentoso	Fenol, yodoformo
Olor a azufre	Ácido sulfhídrico, H ₂ S
Olor a pescado	Pescado, mariscos
Olor séptico	Alcantarilla
Olor a tierra	Arcillas húmedas
Olor fecaloide	Retrete, alcantarilla
Olor a moho	Cueva húmeda
Olor a legumbres	Hierbas, hojas en descomposición

Tabla 2-2. Olores del Agua

FUENTE: Quím. Ada Barrenechea Martel, aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua

Si existiera olor en el agua el método para eliminar sería por aireación o por carbón activado.

Color: El color es la capacidad de absorber ciertas radiaciones en el campo del espectro visible, el color también es un indicador de una posible contaminación del agua. Si existe color puede afectar a la calidad estética del agua purificada.

Las causas para que el agua tenga color puede deberse a ciertas sustancias coloreadas por lo general sustancias húmicas, al igual de residuos industriales (textil, papel, etc.) y por metales como el hierro y el manganeso.

Otros factores que intervienen en la formación de color del agua son el pH, la temperatura, la materia que se encuentra disponible, así mismo como el tiempo de contacto y la solubilidad de los compuestos coloreados. [1]

El color se divide en color aparente y color verdadero:

- Color aparente: este color incluye la turbiedad, es decir se mide el color con las sustancias en solución o suspensión. [8].

Este color presenta el agua cruda o natural. [6].

- Color verdadero: esto es debido a las sustancias en solución, se mide luego de haber retirado la turbiedad. [8].

El color verdadero es el que queda luego de que el agua ha sido filtrada. Se recomienda que se realice la desinfección luego de haber eliminado en su gran mayoría el color. [6]

El equipo que por lo general se usa en esta medición son los llamados Colorímetros, estos usan una comparación de color a la base de platino y cobalto y la unidad es de Platino –Cobalto (Pt-Co). [1]



Turbidez: Un parámetro físico muy importante es la turbidez, y este es la dificultad del agua para transmitir luz causada por materiales insolubles en suspensión tales como arcillas, sedimentos, partículas orgánicas coloidales.

La turbidez de manera excesiva puede proteger a los microorganismos de los desinfectantes, ayuda al crecimiento de bacterias al igual que obliga al uso de más Cloro (desinfectante).

El equipo que se recomienda usar para la medición de la turbidez es el nefelómetro o turbidímetro, esta mide la intensidad de luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua. La unidad con la que tenemos la respuesta es en Unidad Nefelometría de Turbidez (NTU). [1]

La remoción de la turbiedad en si no es un proceso complicado pero si se ve afectado en el costo que este implica, ya que se necesita usar coagulantes, acondicionadores de pH, ayudantes de coagulación. La turbiedad afecta también a la calidad estética del agua pudiendo ocasionar rechazo. [6]

Según las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan como valor guía 5 NTU. La OMS indica, sin embargo, que para una desinfección eficiente, el agua filtrada debería tener una turbiedad promedio menor o igual a una NTU. [5].

Temperatura: Es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración.[8]

Múltiples factores, principalmente ambientales, pueden hacer que la temperatura del agua varíe continuamente.

Los límites aceptables varían entre 5 y 15⁰C, pero la temperatura óptima debe considerarse la comprendida en el intervalo de 10 a 12⁰C. [2]

Conductividad y resistividad: Otro parámetro físico es la conductividad, esto es la capacidad que posee el agua para transmitir o conducir electricidad. Si tenemos conductividad alta en el agua quiere decir que tenemos material ionizante, es decir aniones y cationes. La resistividad es lo contrario a la conductividad.

El equipo que normalmente usamos es el conductímetro, que se basa en la conductividad de electricidad entre dos caras opuestas de un prisma, que comparamos con una sal patrón de KCl o NaCl. La unidad que usamos para la conductividad es en Micro siemens por centímetro (μ siemens/cm). [1]

pH (potencial de hidrogeno): El pH es la concentración de iones de hidrogeno, su representación es $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$. El valor intermedio de pH es 7 que corresponde al agua pura y tenemos un rango de pH que va desde el valor de 0 (ácido) y 14 (básico). Este parámetro nos indica si existe contaminación o no del agua. [1]

El pH influye en las incrustaciones y en la corrosión, también en los procesos de coagulación y desinfección. Cuando se trata de aguas acidas debemos adicional un álcali que por lo general es cal para optimizar el proceso de coagulación. [4]

2.1.3.2. Parámetros químicos

Dureza: La dureza nos permite saber las cantidades de sales disueltas de calcio y magnesio existente en el agua, la presencia de estas sales en el agua se denomina aguas crudas y puede ocasionar incrustaciones, en conductos y equipos. Si la cantidad de estas sales es muy baja, el agua se denomina (aguas blandas).

- Dureza Total: mide el contenido de iones Calcio (Ca^{++}) y Magnesio (Mg^{++}).
- Dureza permanente: mide el contenido de iones calcio y magnesio después de someter el agua a ebullición y recuperar el volumen inicial con agua destilada.

- Dureza temporal: mide la dureza asociada a iones HCO_3^- eliminable por ebullición y es la diferencia entre la dureza total y permanente.

Equipo que usamos es el Espectrofotómetro de absorción atómica o titulación con EDTA.

Unidades de medida: Se mide en miligramos por litro (mg/l) o lo que es igual en partes por millón (ppm) de CaCO_3 . Para obtener el grado de dureza existen diferentes clasificaciones, siendo una de las más usadas la escala de Merck (tabla 2-3). [1]

Tipo de agua	°F
Muy blanda	< 7.9
Blandas	8 - 14.9
Semiduras	15 - 32.9
Duras	33 - 54.9
Muy duras	> 55

Tabla 2-3. Escala de Merck
FUENTE: Pérez. F. Urrea. M, abastecimiento de aguas

Alcalinidad: Mide la capacidad para neutralizar ácidos.

- Título alcalímetro o alcalinidad simple: son los mililitros de ácido sulfúrico necesarios para neutralizar 100 ml de agua con viraje a fenolftaleína. (pH entre 8.2 y 9.8)
- Título alcalímetro: son los mililitros de ácido sulfúrico necesarios para neutralizar 100 ml de agua con viraje al anaranjado de metilo. (pH entre 3.1 y 4.4).

Determinando m y p se pueden obtener las concentraciones de ion carbonato (CO_3^{2-} ; bicarbonatos HCO_3^- ; Hidróxido OH^-). [1]

Existen ácidos débiles como (bicarbonatos, carbonatos, hidróxido, sulfuro, bisulfuro, silicato y fosfato) que puede causar alcalinidad en el agua. Varios parámetros que influye en la alcalinidad como son: el pH, la composición inicial del agua, la

temperatura y la fuerza iónica. Generalmente en las aguas naturales podemos encontrar al carbonato y bicarbonatos en equilibrio con el ácido carbónico, es por esto que este tipo de agua puede tener baja alcalinidad y un pH relativamente alto, o viceversa.

La alcalinidad es un factor importante en el tratamiento de agua ya que este puede reaccionar con los coagulantes hidrolizables durante el proceso de coagulación. Además la alcalinidad puede causar incrustaciones y si tiene valores elevados puede influir en el sabor. [4]

Aniones.

Aquí se engloban todos los iones negativos que pueden estar presentes en el agua, los más comunes son:

- Cloruros (Cl^-): las aguas dulces contienen entre 10 y 250 ppm.
- Sulfatos (SO_4^{2-}) las aguas dulces contienen entre 2 a 150 ppm.
- Bicarbonatos (HCO_3^-).
- Carbonatos (CO_3^{2-}).

También podemos encontrar en el agua en menor proporción iones como:

- Nitratos (NO_3^-) < 10 ppm
- Fosfatos (PO_4^{3-}) = 1 ppm
- Fluoruros (F^-)

Cianuros

Los cianuros interfieren con la disponibilidad de oxígeno en las células por la inhibición de la oxidasa, una enzima necesaria para transportar el oxígeno celular.

Los efectos cuando se consumen altas dosis incluyen constricción del tórax, náusea, vómito, mareo, dolor de cabeza, palpitaciones, hipernea, disnea, bradicardia,

inconciencia, convulsiones y muerte. En bajas concentraciones y con un consumo prolongado, los cianuros afectan la tiroides y el sistema nervioso.

La cloración alcalina oxida parcialmente los cianuros a cianato (CNO^-) que es 20 veces menos tóxico al dióxido de carbón (CO_2) y nitrógeno (N_2). El principal problema asociado con la eliminación del cianuro es la presencia del hierro soluble que actúa como interferencia. El agua con alta concentración de cianuros se trata por descomposición electrolítica y recuperación evaporativa. También es posible removerlos con intercambio iónico, ósmosis inversa y coagulación-floculación-sedimentación-filtración. [9]

Cloro residual libre

La OMS ha establecido un valor guía de 5 mg/l el que reconoce como muy estricto. [5] Este valor se entiende a no sobrepasar, manteniendo un cloro residual de entre 0.5 a 1 mg/l. No es común encontrar agua sobre clorada. Los límites de sabor y olor del cloro son de 5 y 2 mg/l en agua destilada respectivamente. De hecho, la mayor parte de las personas perciben el sabor del cloro y de sus productos secundarios (cloraminas) por debajo de 5 mg/l e incluso hasta de 0.3 mg/l. Residuales de entre 0.6 y 1 mg/l comienzan a crear problemas de aceptación. [9]

Cloruros (Cl^-)

Los cloruros son compuestos de cloro con otro elemento o radical, presentes en casi todas las aguas naturales y en un amplio intervalo de concentraciones. De los más abundantes y estables es el cloruro de sodio (sal común) y en menor grado el de calcio y magnesio.

Los principales problemas causados por un exceso de cloruros se relacionan con la aceptabilidad durante el suministro. Los límites de sabor del cloruro dependen del catión asociado como es el potásico, sódico y cálcico.

A pesar de que los cloruros no implican un daño a la salud, la ingestión de sal puede ser perjudicial. Pero, la principal fuente es la comida. Un exceso de cloruro de sodio genera enfermedades del corazón y del riñón. [9]

Un contenido elevado de cloruros (por arriba de 200 mg/l para agua caliente y de 600mg/l en agua fría y en función de la alcalinidad) eleva la tasa de corrosión de los sistemas de distribución y puede, además, hacer que incremente el contenido de metales en el agua por este efecto. El valor guía de la OMS es 250 mg/l. [5]

El cloruro, por ser muy soluble, es muy difícil de eliminar, y de hecho ello se evita a menos que se trate de un sistema para desalar agua. En este caso aplican los procesos de membrana (ultrafiltración y ósmosis inversa), el intercambio iónico y la destilación. Esta última se considera rentable para suministro cuando es efectuada por métodos solares. [9]

Flúor (F)

La concentración del flúor presente en el agua natural es de <5mg/l. el exceso de este puede producir caries en los niños y otros problemas dentales. El consumir agua con valores elevados de flúor constantemente puede ocasionar problemas óseos. [9]

El valor guía que nos da la OMS es de 1.5mg/l y se puede eliminar mediante una precipitación con cal, dolomitas y alumbre. En procesos más avanzados se puede eliminar mediante procesos de membrana como es el caso de la ultrafiltración o la osmosis inversa. [5]

Nitratos y nitritos.

Los nitratos son reducidos a nitritos por la ausencia de oxígeno, esta reacción se puede dar de manera parcial o completa. El exceso de nitritos puede producir metahemoglobina, otro problema puede ser la posible formación de nitrosaminas las cuales son parcialmente cancerígenas en el trato digestivo. Para la eliminación de los nitratos y nitritos se puede llevar a cabo mediante la desgasificación o usar la coagulación, floculación, sedimentación y filtración. [9]

La causa por la cual podemos encontrar una elevada concentración de nitratos en el agua es causado por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, incluyendo al amoníaco y también a la contaminación causada por excremento de humano y de origen animal. Los nitratos son solubles, por lo cual son desprendidos con facilidad de los sedimentos ya sea de las aguas superficiales o subterráneas. [6]

Sulfatos

Los sulfatos se encuentran en diferentes minerales y constituyen la dureza no carbonatada, estos sulfatos son uno de los aniones menos tóxicos, pero en altas concentraciones puede ocasionar catarsis e irritación intestinal, también puede producir sabor al agua. [9]

Lo que nos da la dureza al agua es el sulfato ya bien sea de calcio o de magnesio. El sulfato de magnesio hace que el agua tenga un sabor amargo, y puede tener un efecto laxante cuando se encuentra en un alto contenido. [6]

La OMS da como valor guía una concentración de 500mg/l y se pueden eliminar mediante coagulación, floculación sedimentación, filtración y precipitación. [5].

Cationes

Se engloban todos los iones positivos que pueden estar presentes en el agua, los más comunes son:



- Calcio (Ca^{++}): este ion contribuye de forma decisiva en la dureza del agua. El agua suele contener entre 10 a 250 ppm.
- Magnesio (Mg^{++}): este ion tiene propiedades muy similares al ion del calcio, pero sus sales son más solubles y difíciles de precipitar. Las aguas dulces suelen contener entre 1 a 100 ppm.
- Sodio (Na^+): este ion suele estar asociado al ion cloruro, con un contenido de aguas dulces entre 1 y 150 ppm.
- Potasio (K^+): las aguas dulces no suelen tener más de 10 ppm por lo que es un catión no tan significativo que el resto.
- Hierro (Fe): este ion se puede presentar como ion ferroso (+2) o en la forma más oxidada del ion férrico (+3) pudiendo afectar a la potabilidad del agua y a la presencia de incrustaciones.
- Manganeso (Mn): el ion manganeso se comporta de forma similar a la del hierro.
- Aluminio.
- Metales Tóxicos: Estos son el arsénico, cadmio, plomo, bario, Zinc, Níquel, etc.

Sólidos totales

Los sólidos totales pueden obtenerse con la suma de los sólidos disueltos más los sólidos en suspensión.

- Sólidos disueltos: medida de la cantidad de materia disuelta en el agua determinada por evaporación de un volumen previamente filtrada.
- Sólidos en suspensión: medida de los sólidos en suspensión que pueden ser retenidos por un filtro (0.45 micrómetros).[9]

2.1.3.3. Parámetros biológicos

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)

Mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua que generalmente se mide en mg/l [1]

Para el cálculo determinamos el contenido inicial de oxígeno de una cierta muestra, y lo que queda luego de haber transcurrido cinco días en otra muestra semejante que se encuentra en frasco cerrado y a una temperatura de 20 °C. La diferencia entre los dos corresponde a la DBO5. Los valores aceptables son entre 300-400mg/l [6].

Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxidante químico, ya bien sea bicromato o permanganato, que necesitamos para la oxidación de la materia contenida en el agua; se puede expresar en mg/l de O₂ [1].

Coliformes totales

Los Coliformes se han usado como indicadores de potabilidad porque son fáciles de detectar y además cuantificables, los Coliformes abarca a todos las bacterias de tipo bacilos y Gram negativas las cuales crecen en sales binarias. Estos nos dicen si el agua fue potabilizada correctamente cuando nos da datos negativos a la salida de la planta. [9]

Los coliformes totales se los eliminan en el proceso de cloración normalmente, pero también se puede eliminar por radiación UV y ozonización. El valor que nos da la OMS es nulo. [5]

Coliformes Fecales

Aquí se encuentra todos los bacilos cortos que crecen a temperatura de entre los 44 y 45 °C. En esta lista se encuentra los géneros *Escherichia* y parte de algunas especies de *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*. Pero solo la *E. Coli* es específicamente de origen fecal y se encuentra siempre presente en las heces de humanos, mamíferos y en aves.

Los coliformes fecales pueden estar ausentes si la contaminación no es de origen fecal, además estos sobreviven menor tiempo en la naturaleza a comparación de los coliformes totales. Los procedimientos para determinarlos son más sencillos relativamente. [9]

Los coliformes fecales, igual que los totales se pueden eliminar mediante proceso de cloración, pero también mediante la filtración rápida se puede eliminar el 80%. El valor que nos da la OMS es también nulo. [5]

2.2. Filtros de tasa declinante y lavado mutuo.

El proceso de filtración en la potabilización de agua superficiales son los más importantes y los que más son usados, este método podemos usar con o sin pre tratamiento ya sea de coagulación y sedimentación; usamos la filtración para eliminar los sólidos que originalmente puede tener el agua o los precipitados. Los filtros más usados para las plantas de potabilización son los de flujo descendente (por gravedad) y los de medio dual (arena-antracita), esto para plantas que trabajen con caudal de 500l/s, el esquema que más frecuentemente se usa es el combinar la coagulación-floculación con una sedimentación previa a la filtración.[9]

Se requiere el empleo de un filtro también para la obtención de un agua clara y transparente, con la máxima garantía para evitar la transmisión de enfermedades.

En general, la filtración se considera como el paso de un fluido por un medio de consistencia porosa, que puede ser de arena, arena-antracita o carbón activado granulado, que retiene la materia que se encuentra en suspensión, esta suspensión puede ser flóculos o micro flóculos procedentes de la etapa anterior. [10]

Los filtros se evalúan según la capacidad de lograr una calidad de agua menor a 0.10 NTU el 95% del tiempo en una frecuencia mínima de 4 horas, también debe incluir una turbiedad máxima en el agua filtrada luego del reto lavado en 0,30 NTU.

La producción potencial del proceso de filtración se estima a partir de una tasa de filtración en las unidades de $m^3/m^2\text{día}$ que varía según el tipo de medio filtrante que usemos. A continuación tenemos un cuadro 2-4 donde nos muestra el tipo de lecho filtrante y la tasa superficial.

Tipo de lecho filtrante	Taponamiento por aire	Tasa superficial ($m^3/m^2.d$)
Arena sola	Ninguno	117,0
	Moderado	88,0
	Alto	59,0
Doble o mixto	Ninguno	234,0
	Moderado	176,0
	Alto	117,0
Profundo, > 1,50 m, generalmente de antracita	Ninguno	351,0
	Moderado	264,0
	Alto	176,0

Tabla 2-4. Tipo de lecho filtrante
FUENTE: Norma CEPIS

Con una capa de antracita permite alcanzar mayores tasas de filtración y mantener una excelente calidad de agua filtrada, se sabe que el taponamiento por aire ocurre en los filtros cuando este sale de la suspensión por disminución de la presión o el aumento de la temperatura del agua (el agua se calienta conforme pasa a través del filtro). El aire hace que los orificios del lecho filtrante se colmaten, y que actué como

un lecho colmatado que necesita un retro lavado, lo que hace que las carreras de filtración sean más cortas. [12]

Al comenzar el periodo de la filtración, partiendo de un lecho filtrante completamente limpio, hay un periodo inicial de tiempo, que se le conoce como periodo de maduración en el cual la turbidez disminuye y alcanza un valor casi constante, el cual dependerá de la altura de capa del lecho. A medida de que continúa la filtración llega un punto donde incrementa la turbiedad y ese punto se le conoce como periodo de perforación del filtro.

La pérdida de carga de un filtro es la dificultad que encuentra el agua al pasar a través de la arena, esto nos sirve para saber el grado de atascamiento del lecho de arena con el transcurso del tiempo de filtración. Cuando la pérdida de carga de un filtro sea la máxima, se suspende la entrada de agua a filtrar y se procede al retro lavado. [12].

2.2.1. Clasificación de los filtros

Los filtros se pueden clasificar mediante la tasa o velocidad de filtración, pudiendo estos ser los filtros rápidos y los filtros lentos.

Según la presión los filtros pueden ser filtros a presión o filtros por gravedad.

Los filtros por gravedad son generalmente abiertas en donde el agua baja impulsada por la gravedad a través de la arena, este tipo de filtros puede operarse en forma automática y en forma manual. Los filtros rápidos por gravedad de operación manual puede ser ya bien sea de velocidad constante y los de velocidad declinante.

Filtros rápidos por gravedad de tasa declinante y operación manual: En este tipo de filtros todos los controles que se usa son hidráulicos, no requieren ningún tipo de tanque elevado o de bombeo ya que trabaja gracias a la gravedad, además el lavado de estas unidades por lo general se lo hace con el flujo que produce el resto de la

batería. Es importante recalcar que este tipo de batería de filtros nunca se lava todo junto ya que se lo hace de manera escalonada.

En los filtros de tasa declinante y lavado mutuo (un filtro se lava con el caudal que produce el resto de las unidades de la batería) se debe tener un número mínimo de cuatro filtros, todos estos interconectados a través de un canal de entrada y uno de salida. El simple hecho de que están intercomunicados todos los filtros posee el mismo nivel de agua dentro de las cajas a pesar de que tenga diferentes pérdidas de carga y grado de colmatación. [12]

Además, cada lavado es diferente; la forma declinante es una forma de operación que deben instalarse apenas se empiece a operar en la planta. Este tipo de filtros posee una carga hidráulica menor comparado con los filtros de tasa constante, esto nos dice que la altura de agua que dejamos para compensar la pérdida de carga por colmatación que se produce mediante la carrera del filtro es menor. Por lo tanto, la frecuencia entre lavado y lavado será mayor y no estaremos usando mucha agua tratada solo en lavar los filtros.

2.2.2. Características de la tasa declinante

- Para instalar la tasa declinante debemos elegir el intervalo de lavado en un tiempo de 24 horas, por ejemplo si son 4 filtros, se lavara un filtro cada $24/4=6$ horas.
- Después de 4 horas de haber lavado todos los filtros juntos debemos lavar nuevamente el primero y luego de 6 horas transcurridas del primer filtro, lavamos el segundo y así sucesivamente. [11]

CAPITULO 3

TEORÍA DE LA

FILTRACIÓN



3.1. Historia de la Filtración.

Los filtros comenzaron su uso domésticamente, estos filtros eran piedras porosas colocadas en tinajeros. En Francia en los Siglos XVIII y XIX se usaban con frecuencia los filtros de esponjas, paños, lana y otro tipo de material.

La filtración lenta se usó en 1872, estos filtros que por lo general son de arena, es del tipo más antiguo. Actualmente, son usados para sistemas pequeños con agua de baja turbiedad o con fuentes de agua que contiene algas. Este tipo de filtros de arena no necesitan un pre tratamiento o en su defecto un control muy riguroso. [14]

Se formó dos escuelas entre los científicos, los que defendían la filtración hacia abajo (descendente) y la filtración hacia arriba (ascendente). Los primeros decían que la filtración descendente facilitaba la limpieza del filtro ya que la mayoría de la materia que se encontraba en suspensión se quedaba retenida en las primeras capas del lecho, el cual solo raspando esas capas se limpiaba con facilidad. En otra instancia, los que creían en la filtración ascendente decían que pasando a través del material más fino, la gravedad producía el asentamiento de la mayoría de las partículas en el fondo del filtro y las que alcanzaba a subir podrían fácilmente ser lavadas con solo invertir el flujo. Pero se popularizó la filtración descendente y tanto como en Europa como en América se comenzó a usar los filtros lentos de arena. Las plantas de filtración se mejoraron a finales del siglo XIX ya que se supo sobre la Microbiología (L. Pasteur, 1822-1895) y se dio mucho más importancia al aspecto bacteriológico de la filtración.

Con el avance del estudio de los filtros, se condujo al diseño de los filtros rápidos que hicieron su aparición en Norteamérica; a este tipo de filtros se le llamaba “mecánicos” o “americans” en contraposición a los “filtros ingleses” que eran los lentos. La gran innovación de los filtros rápidos fue la limpieza del lecho filtrante, pues en lugar de

hacer el raspado de la capa superior, se hacía invirtiendo el sentido del flujo (en el proceso de filtrado era de arriba hacia abajo y en el lavado de abajo hacia arriba) con lo cual se hacía la eliminación de las impurezas que quedaban retenidas en el lecho. Lousville y Little Fall (Estados Unidos) introdujeron un sistema de mezcla coagulación y sedimentación de tanques separados con el simple objetivo de remover la mayoría de las partículas antes de que llegase a los filtros; tenían una capacidad de 18L/seg. Por esta razón en las plantas de tratamiento, su funcionamiento fue mucho más eficientes.

Las plantas modernas de tratamiento de agua aún siguen este tipo de procesos aunque con el desarrollo notable de los estudios de los filtros no se ha hecho modificaciones sustanciales al proceso inicial. [13].

En los últimos años la filtración tanto la teoría como la práctica se ha desarrollado notablemente haciendo que la filtración sea un proceso más eficiente, así tenemos la filtración por membrana ya sea micro, ultra o nano. [16].

3.2. Definición.

La filtración es un proceso físico, químico y en algunos casos biológicos que se usa para separar del agua las impurezas suspendidas mediante el paso del líquido por un medio poroso. La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una solución acuosa que pasa a través de un medio poroso. Generalmente, la filtración es la operación final de la etapa de clarificación del agua en una planta de potabilización. [16]

Para que el fenómeno de la filtración pueda ocurrir es necesario aplicar gradientes de presión, los cuales hacen que la mezcla a filtrar atraviese el filtro en diferentes formas de aplicación, dependiendo de las necesidades y del equipo y estas pueden ser:



gravedad, vacío, presión, vacío y presión en conjunto, con gradiente de saturación o una fuerza centrífuga. [17]

3.3. Mecanismo de la Filtración.

La remoción de partículas menores a los poros del medio filtrante, descartó la idea de que la filtración se realizaba por un simple proceso de cernido. El agua cruda ya sea que haya pasado por un proceso de sedimentación o no, cuando entra a un filtro contiene una gran variedad de tamaño de grano en suspensión de los cuales puede variar entre 1mm hasta 10^{-3} mm. Aquí se pueden encontrar partículas electro positivas, electro negativas o neutras; o micro flóculos con polímero absorbidos.

El floc grande cuyo volumen es mayor a la de los poros del medio granular quedan retenidas por simple cernido en los intersticios del lecho a comparación de las partículas de menor diámetro que se encuentran libremente en el material granular y tiene que atravesar una cierta distancia antes de poder adherirse a los granos. [19]

La filtración es considerada como un resultado de dos tipos de mecanismos distintos pero que a su vez se complementan como es el transporte y la adherencia. Así tenemos que las partículas que serán removidas se transportan desde la suspensión hacia la superficie de los granos del medio filtrante. Ellas permanecen adheridas a los granos siempre y cuando puedan soportar las fuerzas de cizallamiento debido a las condiciones hidrodinámicas de escurrimiento. [20]

El transporte de las partículas es un fenómeno físico e hidráulico que está regido principalmente a los parámetros que gobiernan la transferencia de masa. La adherencia es un fenómeno de acción superficial el cual tienen una gran influencia por los parámetros físicos y químicos. [16]

Los mecanismos que pueden realizar el transporte pueden ser:

- Cernido.
- Sedimentación.
- Intercepción.
- Difusión.
- Impacto inercial.
- Acción hidrodinámica.

Los mecanismos de adherencia son los siguientes:

- Fuerzas de Van der Waals.
- Fuerzas electroquímicas.
- Puente químico.

No todos deben actuar al mismo tiempo pero dada la complejidad del fenómeno más de un mecanismo deberá participar para el transporte de las diferentes partículas hasta la superficie del medio filtrante. [19]

Los mecanismos de transporte y adherencia que actúan sobre las partículas suspendidas (Tabla. 3-1), en el proceso de remoción por filtración lenta también son los mismos que actúan en el proceso de filtración rápida. La diferencia fundamental es que los microorganismos en el filtro lento mueren como consecuencia del proceso de degradación biológica, a comparación de la filtración rápida, que los microorganismos quedan entre el lodo retenido en el lecho filtrante y salen del filtro con el agua de lavado quedando nuevamente liberados.[21]

Categoría	Grupo/Nombre	Tamaño (micrones)
Mineral	- Arcilla (coloidal)	0.001 – 1.0
	- Silicatos	
	- No silicatos: Fe, Ca, Al, Mg, etc.	
Biológica	- Virus	0.01 – 0.1
	- Bacterias	0.3 – 10
	- Quistes de Giardia lamblia	10
	- Algas unicelulares	30 – 50
	- Huevos de parásitos	10 – 50
	- Huevos de nemátodos	10
	- Cryptosporidio oocysts	4 – 5
Otras partículas	- Pequeños desechos amorfos	1 – 5
	- Grandes desechos amorfos	25 – 500
	- Coloides orgánicos	–

Tabla 3-1. Partículas encontradas en el agua
 FUENTE: Canepa de Vargas. L., Filtración lenta como proceso de desinfección

3.3.1. Mecanismo de transporte.

Esta etapa es básicamente una remoción hidráulica donde se da a conocer la colisión entre las partículas y los granos de arena del medio filtrante. Para entenderlos de mejor manera debemos ver como el fluido se comporta alrededor de los granos de arena, se lo expresa por las líneas de flujo como se ve en la figura 3-2. Si una partícula es llevada por las líneas de flujo, puede colisionar con un grano de arena, adherirse a él y de este modo ser removido. [21]

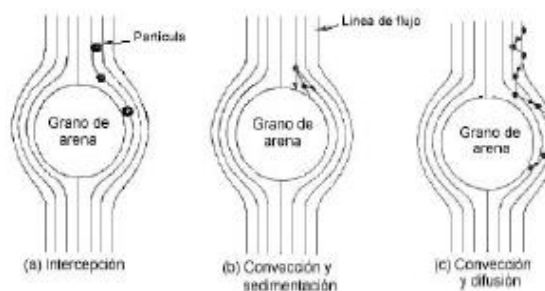


Figura 3-1. Mecanismo de Transporte
 FUENTE: Canepa de Vargas. L., Filtración lenta como proceso de desinfección

Los distintos mecanismos de transporte pueden actuar simultáneamente para que el material suspendido se acerque a los granos del medio filtrante. Lo podemos ver más claramente en el siguiente gráfico 3-2. [20]

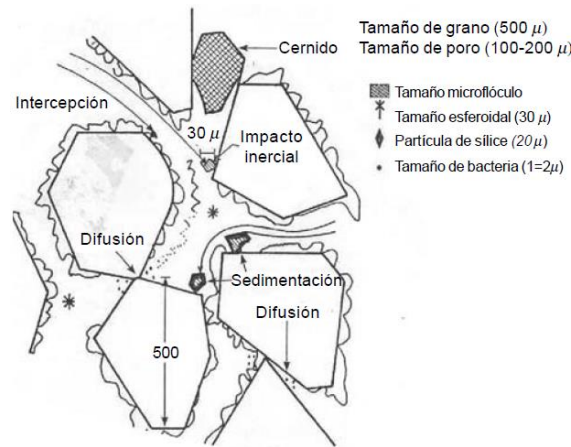


Figura 3-2. Diferentes mecanismos que pueden realizar transporte
 FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

3.3.1.1. Cernido.

El mecanismo de cernido actúa exclusivamente en la superficie de la arena, su eficiencia es negativa para el proceso ya que hace que se colmate rápidamente la capa superficial causando así que se acorte las carreras de filtración. [21]

Cuando la partícula en suspensión tiene un diámetro mayor que el tamaño de los poros del lecho, dicha partícula queda atrapada en los intersticios. El cernido actúa en las capas más superficiales del lecho y con partículas que sean fuertes, capaces de tener una alta resistencia a los esfuerzos producidos por el flujo [16].

Los sólidos grandes como las algas cladóferas forman una capa esponjosa sobre el lecho que mejora la eficiencia del cernido ya que actúa como una especie de pre filtro y evita que el proceso se colmate rápidamente. [21]

Hall considera que la probabilidad de remoción de una partícula viene dada por una formula tomando en cuenta consideraciones geometrías: [20]

$$Pr = \left[\frac{d}{Dc} \right]^{3/2} \quad \text{Ec. 3-1.}$$

De donde:

Pr= partícula por cernido.

d = Diámetro de partícula. (L)

D_c = diámetro del medio Filtrante. (L)

3.3.1.2. Sedimentación

La sedimentación se da por efecto de la gravedad de las partículas suspendidas durante la filtración, también puede producirse la sedimentación con material suspendido relativamente grande y denso cuya velocidad de asentamiento sea alta en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja. [20]

La remoción de las partículas de menor tamaño que la de los poros, gracias a la gravedad, hace que se sedimente sobre la superficie de los granos del lecho filtrante. [16]

Algunos autores consideran relaciones íntimas entre velocidad de flujo, la densidad y el tamaño de partícula removida. Sin embargo este mecanismo no explica por qué el filtro remueve las partículas de tamaño coloidal, ni por que la materia que ya se ha sedimentado no se arrastra de nuevo por el flujo.

La velocidad de sedimentación de las partículas puede calcularse usando la ecuación de Stokes, así tenemos: [13]

$$V_s = \frac{g(\rho_s - \rho_a)d^2}{18\mu} \quad \text{Ec. 3-2.}$$

De donde:

V_s = velocidad de sedimentación de las partículas (LT^{-1})

ρ_s = densidad de las partículas (ML^{-3})

ρ_a = densidad del agua (ML^{-3})

d = diámetro de las partículas (L).

μ = viscosidad absoluta del agua ($ML^{-1}T^{-1}$)

g = aceleración de la gravedad (LT^{-2}).

3.3.1.3. Intercepción.

El régimen de escurrimiento que se da en la filtración es de carácter laminar lo que quiere decir que las partículas se mueven a lo largo de las líneas de corriente; debido a que las partículas suspendidas tienen una densidad aproximada a la del agua, dichas partículas son eliminadas de la suspensión siempre y cuando las líneas de corriente de los granos del medio filtrante, se encuentren a una distancia igual a la mitad del diámetro de las partículas suspendidas. [20]

Para tener una mejor idea de la eliminación de las partículas suspendidas suponemos que las partículas (A) viajan a través de las líneas de flujo, lo cual ocurre a velocidades bajas, a medida que se acercan hacia un estrechamiento (B), las líneas de flujo se ven forzadas a estar en contacto entre sí con el medio filtrante, quedando así interceptada. Lo podemos ver en la siguiente figura. [13]

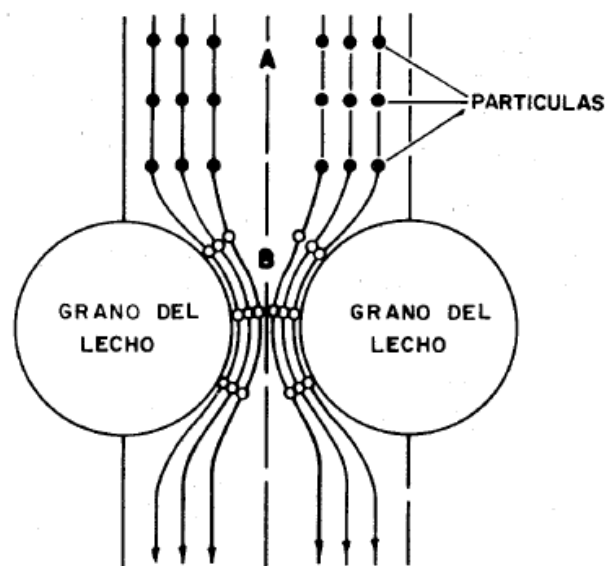


Figura 3-3. Contacto de las partículas con el medio filtrante
FUENTE: Arboleda. V., Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua.

Inicialmente el floculo comienza a pegarse a la cara superior de los granos del lecho hasta que logran cubrirlos completamente formando de esta forma una película que crecerá a medida que va pasando el tiempo, logrando así aumentar el esfuerzo cortante. Esto hace que se formen segmentos que se suspenden de los granos, que

luego de un cierto tiempo se rompen para dirigirse hacia los granos más profundos y menos recubiertos. Este proceso tipo arrastre hace que se produzca colmatación del medio filtrante cada vez más profundo, conforme el proceso avanza. [16]

Ives propuso una ecuación en la que toma en consideración las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante como formas esféricas, así tenemos: [13]

$$I = \frac{d}{D} \quad \text{Ec. 3-3.}$$

De donde:

I= Parámetro adimensional de intercepción.

d= Diámetro de las partículas suspendidas.

D= Diámetro de los granos del medio filtrante

3.3.1.4. Difusión

Las partículas que son relativamente pequeñas pueden presentar un movimiento errático cuando estas se encuentran en suspensión en medio líquido, resultado de un simple bombeo de las partículas suspendidas por las moléculas de agua. [20]

Debido al movimiento Browniano las partículas de menor tamaño tienen una cierta tendencia de dirigirse desde zonas de mayor concentración hacia zonas de menor concentración. [16]

Si la partícula es conducida por las líneas de flujo la partícula puede cambiar su trayectoria de una línea de flujo hacia otra, esto hace que la partícula colisione con el grano de arena. Cuanto más decrece la velocidad intersticial mayor será la posibilidad de que la partícula colisione. Así mismo, a medida que la temperatura aumenta también aumenta la probabilidad de colisión ya que su energía térmica se eleva. [21]

Se ha demostrado que la suspensiones de las arcillas presentan fenómenos de difusión, por esto podemos encontrar algunos solidos adheridos a los granos del medio filtrante donde existe velocidades de flujo casi nulas. Por último se sabe que la

eficiencia del filtro debido a la difusión es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al diámetro de partícula y de grano. [13]

3.3.1.5. Impacto Inercial.

Cuando las velocidades de flujo son bajas, la partícula viaja con las líneas de flujo, y si al contrario las velocidades de flujo son altas y la partícula es grande, debemos tener en cuenta un factor denominado inercia, la inercia hace que la partícula pueda seguir una trayectoria distinta a las líneas de flujo si tiene suficiente cantidad de movimiento para hacerlo. [13]

Podemos ver en la figura como las partículas suspendidas con una cierta cantidad de movimiento colisionan con los granos del lecho. [20]

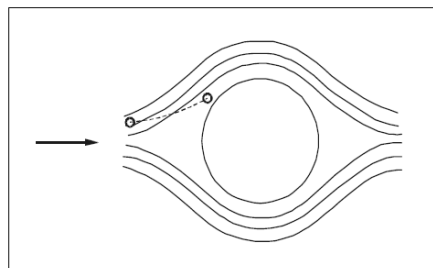


Figura 3-4. Mecanismo de Impacto Inercial
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano.

Este factor es el principal en los filtros de aire ya que la eficiencia de dicho filtro es directamente proporcional a la velocidad de flujo e inversamente proporcional al diámetro del medio filtrante. Pero en los filtros de suspensiones acuosas, la viscosidad de dicho fluido hace muy difícil que la materia suspendida pueda adquirir movimiento como para que el impacto inercial afecte.

El efecto que ocasiona el impacto inercial es despreciable cuando se consideran partículas suspendidas de un tamaño comprendido entre 0,01 y 0,10 micrómetros y la densidad este entre los valores de 1,00 y 2,65 Kg/m³ cuando estemos trabajando en un régimen laminar. [13]

3.3.1.6. Acción Hidrodinámica

La acción hidrodinámica se le es atribuida a la remoción de las partículas relativamente grandes (alrededor de 10 micras), este mecanismo se da cuando el gradiente de velocidad de escurrimiento es constante. [20]

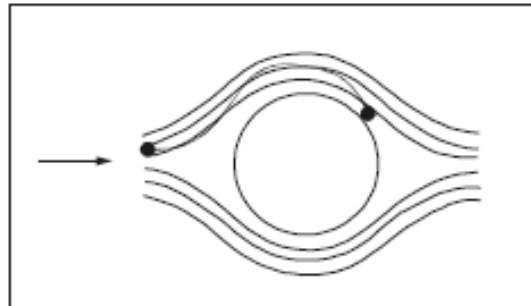


Figura 3-5. Mecanismo de acción hidrodinámica
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

Como se puede ver en la figura 3-6, la diferencia entre las velocidades V_a y V_b tiende a hacer que la partícula gire y a su vez produzca una diferencia de presión en dirección perpendicular al escurrimiento, esto hará que la partícula se dirija hacia una región donde la velocidad es mucho más baja. [20]

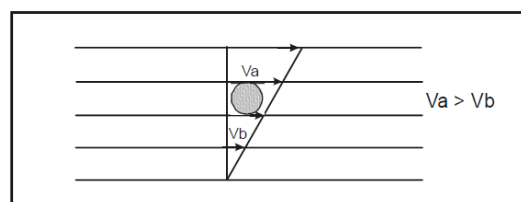


Figura 3-6. Acción de la tensión de cizallamiento
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

3.3.2. Mecanismos de adherencia.

El que cada contacto sea o no efectivo y produzca o no adherencia de la partícula al medio filtrante podría pensarse que depende más de medios físicos, factores químicos y electroquímicos; lo cual induce a modificaciones en el comportamiento de los filtros. [13]

Mientras no se produzca el fenómeno de la adherencia no existe remoción, un desarrollo de la película biológica ayuda a los granos de arena a ser más absorbente y tener más adherencia. Cuando el filtro comienza a trabajar y antes de que se pueda desarrollar la capa biológica, la remoción de los Coliformes es nula. Después de que la película se ha desarrollado, la tasa de remoción es de 2 a 4 logaritmos; esto nos da la idea de la importancia de la película biológica en la eficiencia del filtro [21]

La adherencia entre las partículas puede darse entre la superficie de los granos y también entre la partícula que se encuentran previamente retenidas. Son importantes las características de las superficies cuando se considera una filtración de una suspensión de arcilla en un lecho de arena, ya que la remoción es inferior al 20% cuando no se emplea coagulante. [20]

Los factores más importantes en la adherencia que consideraremos son las Fuerzas de Van der Waals, los efectos electrostáticos y el puente de hidrogeno. [13]

3.3.2.1. Fuerzas de Van der Waals

Estas fuerzas son principalmente los responsables de la adhesión de las partículas de los granos del filtro. Estas fuerzas actúan cuando tenemos una distancia pequeña y el diámetro de partícula es menor que el diámetro del medio filtrante, para esto podemos calcular con la siguiente ecuación: [13]

$$F_a = \frac{Kdp}{12r^2} \quad \text{Ec. 3-4.}$$

De donde:

Fa= fuerzas de Van der Waals.

K= constante de atracción de Van der Waals

dp= diámetro de la partícula

r= distancia entre las partículas y el grano ($r < 1$).

Las fuerzas de adhesión son operativas, cada grano tiene un volumen llamado espacio de adhesión. Las partículas suspendidas que entran en él pueden ser removidas del flujo, a medida que sean atraídas para adherirse a la superficie de los granos. [16]

La constante de Van der Waals se incrementa con la densidad de las partículas, no así ocurre con el pH lo que es independiente al igual que la característica de la fase acuosa. [13]

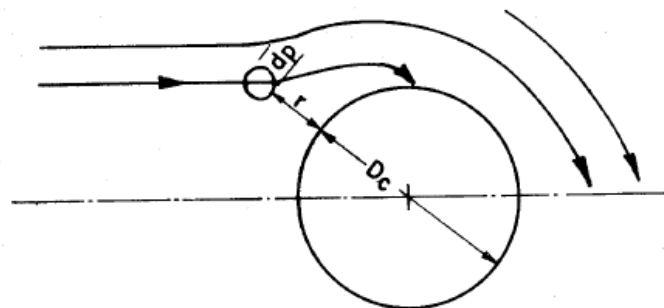


Figura 3-7. Trayectoria de la partícula capturada por las fuerzas de Van der Waals
FUENTE: Arboleda. V., Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua

3.3.2.2. Fuerzas electrostáticas

Esta fuerza es la combinación de las fuerzas coulombicas con las de Van der Waals las que dan la adsorción de las partículas en ciertas circunstancias. Considerando esta fuerza como la responsable de la adhesión podemos considerar tres casos:

- Los granos del medio filtrante son negativos y los coágulos son positivos. En este caso tenemos una atracción entre el medio filtrante y las partículas lo que significa que con solo acercar las partículas a los granos del lecho estos se atraen y se produce la adhesión.
- El segundo caso es cuando tenemos los granos del lecho filtrante negativos mientras que las partículas son neutras. Aquí la barrera de energía no existe y se produce adhesión con solo existir contacto.

- El tercer caso tenemos cuando tanto los granos del lecho como las partículas son negativas. Esto produce una repulsión entre unos y otros, pero existe la fuerza hidrodinámica que rompe esta barrera y hace que las partículas se aproximen lo suficiente como para que las fuerzas de Van der Waals actúen en este caso. Como es de esperarse, las probabilidades de adhesión son menores en comparación a los casos anteriores. [13]

3.3.2.3. Puente Químico

La desestabilización de los coloides o partículas es efectuada por los productos de la hidrólisis que se polimerizan a diferente pH. El principio fundamental de los puentes químicos es que las cadenas poliméricas adheridas a las partículas dejan sus segmentos en toda el agua lo cual pueden ser absorbidos bien sea por otras partículas o por algunos sitios vacantes en el grano del filtro. Esto es un fenómeno completamente diferente a las cargas electrostáticas. Para ayudar a la eficiencia de adhesión podemos inyectar en el efluente que entra al filtro ayudantes de filtración o poli electrolitos. [13]

Este fenómeno es independiente de las fuerzas de Van der Waals y de las cargas electrostáticas. Se acrecienta al atravesar las partículas las constricciones del lecho [16].

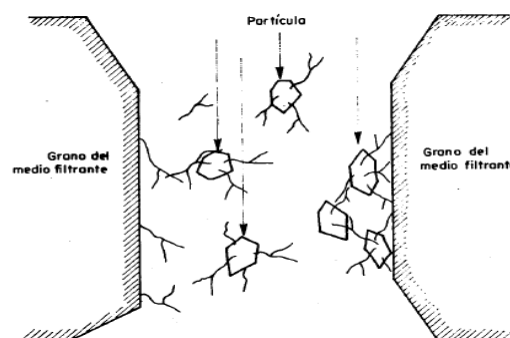


Figura 3-8. Acción del polímero en un medio granular
FUENTE: Salazar. L., Diseño de plantas potabilizadoras

3.3.2.4. Interacción combinada entre las fuerzas electrostáticas y las de Van der Waals.

Partículas sólidas sumergidas en agua presentan cargas en su superficie y puede ser debido a varios factores como puede ser:

- Disociación de iones en las partículas.
- Cargas que no están balanceadas debido a las imperfecciones que puede haber en la estructura del cristal.
- Reacciones químicas con iones específicos de la suspensión
- Puede existir sustitución isomorfa en la estructura del cristal.

En el interfaz sólido – líquido tenemos una capa conocida como capa compacta que es una capa con cargas opuestas a las del sólido y existe otra capa que también posee cargas opuestas pero tienes sus iones esparcidos y se las denomina capa difusa.

Tenemos esta doble capa que crea un potencial de repulsión entre las partículas de suspensión con cargas eléctricas semejantes.

Si en una dispersión coloidal, las únicas fuerzas fueran las de atracción de Van der Waals y las de repulsión las electrostáticas, se podría calcular el efecto global de interacción por la adición de ambas como contribuciones. Tenemos una barrera de energía denominada como $(V_R - V_A)_{MAX}$, este valor debe reducirse o anularse con el simple objetivo de reducir la estabilidad de los coloides para que se adhieran entre sí con las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante.

En este caso la arcilla se representa como coagulo de tamaño igual a $1\mu m$ de modo que su carga es positiva gracias a la hidrolisis del aluminio, la barrera de energía es sustituida por un potencial positivo, resultado de la suma de las fuerzas de Van der

Waals y las electrostáticas. La adherencia entre los granos y las partículas resulta de su contacto. [20]

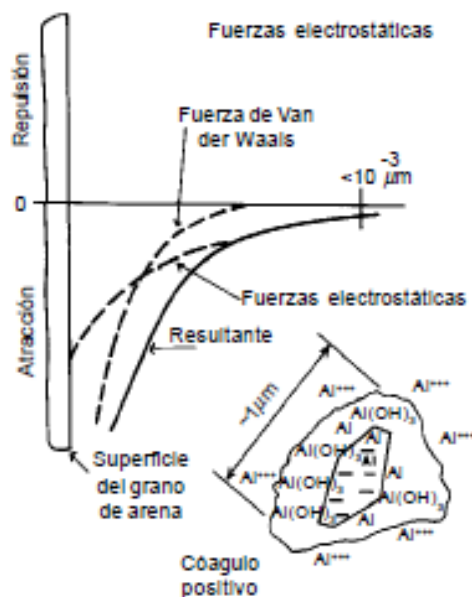


Figura 3-9. Interacción ente el grano de arena y la partícula con carga positiva
FUENTE: Maldonado, V., Tratamiento de agua para consumo humano

3.4. Cinética de la Filtración.

No existe un modelo matemático que describa el comportamiento de los parámetros de operación de los filtros, al igual que no existe ninguna fórmula para calcular los diferentes parámetros que actúen en el funcionamiento de un filtro. Pero esto no es un impedimento para determinar los parámetros del proceso de filtración de manera experimental lo cual es conveniente realizar estudios con filtros pilotos ya que cualquier alteración que pueda haber en el filtro o en el medio filtrante significaría un cambio en los parámetros del proceso. [20]

3.4.1. Balance de masa

En primer lugar el balance de masa en la filtración nos sirve en primer lugar para determinar la distribución de los depósitos en el medio filtrante en función de la posición y tiempo. Y como segundo punto tenemos una expresión que hace posible

conocer la cantidad de solidos removidos por unidad de volumen del medio filtrante.

[20]

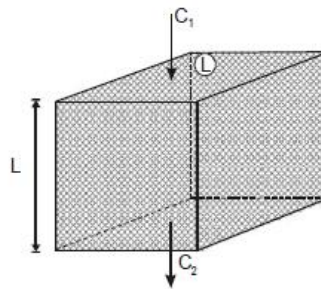


Figura 3-10. Elemento del lecho filtrante
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

A continuación tenemos la variación de la concentración de la suspensión expresada por la siguiente formula:

$$-\Delta C = (C_2 - C_1) \quad \text{Ec. 3-5.}$$

De donde:

ΔC = variación de la concentración de las partículas (volumen de partículas suspendidas por volumen de suspensión)

C_1 = concentración de las partículas suspendidas en el efluente (L^3/L^3) .

C_2 = concentración de las partículas suspendidas en el efluente (L^3/L^3)

Ahora tenemos que Q como un caudal que escurre a través del medio o elemento y tenemos que el depósito específico aumenta una cierta cantidad ($\Delta\sigma$), y que al transcurrir un cierto intervalo de tiempo (Δt), nos da como resultado un volumen de partículas removidas igual a:

$$-\Delta C * Q * \Delta t \quad \text{Ec. 3-6.}$$

Así mismo tenemos un volumen de partículas acumuladas igual a:

$$\Delta\sigma_a * A * \Delta L \quad \text{Ec. 3-7.}$$

De donde:

Q= caudal (L^3T^{-1})

Δt = Intervalo de tiempo (T).

$\Delta\sigma_a$ = variación del depósito específico absoluto (volumen de sólidos/ volumen de medio filtrante, L³/L³).

A= área del elemento del medio filtrante (L²)

ΔL = espesor del elemento de volumen del medio filtrante (L)

Igualando ambas expresiones y obteniéndole en su forma diferencial tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial L} * V + \frac{\partial \sigma_a}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 3-8}$$

Teniendo V como la velocidad de filtración o tasa de filtración (Q/A). Esta ecuación fue propuesta por Iwasaki a través del estudio de los filtros lentos.

Se sabe que el depósito específico efectivo (σ) es el que nos da el volumen que ocupan las partículas removidas teniendo en cuenta la porosidad de los depósitos.

$$\sigma = \beta * \sigma_a \quad \text{Ec. 3-9}$$

De donde tenemos:

σ = depósito específico absoluto (volumen del depósito/ volumen del medio filtrante)

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

Sabemos que la porosidad tiene la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \sigma \quad \text{Ec. 3-10}$$

De donde:

ε = porosidad del medio filtrante.

ε_0 = porosidad inicial (volumen de vacíos/volumen total del medio filtrante)

Combinando estas nuevas ecuaciones a la ecuación de Iwasaki tenemos como resultado:

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = \frac{1}{\beta * V} * \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad \text{Ec. 3-11}$$

Esta ecuación muestra que la tasa de variación de la concentración de la suspensión, en función del espesor del medio filtrante, va disminuyendo a medida que la porosidad decrece con el tiempo de operación. [20]

3.4.2. Modelos para la remoción de las partículas suspendidas.

Se han propuesto muchos modelos el cual nos ayude a describir la variación de la concentración de la suspensión a través del medio filtrante como podemos ver en el siguiente cuadro, el cual tiene la siguiente formula general:

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = F \quad \text{Ec. 3-12.}$$

Donde establece esta ecuación la reducción de la concentración de las partículas (C) a través de la profundidad del medio filtrante (L) es función de la concentración de las partículas (C), del depósito específico (σ) y de parámetros específicos del modelo.

Iwasaki propuso la siguiente ecuación tomando en cuenta que no se aplicó coagulantes a las partículas y tiene una velocidad de aproximación inferior a 12 m³/m²d. [20]

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = \lambda * C \quad \text{Ec. 3-13.}$$

De donde:

λ =Coeficiente del filtro o módulo de impedimento (L⁻¹)

C= concentración remanente de la suspensión (L³/L³)



Autor	Año	Expresión	Variables
Iwasaki	1937	$\frac{dI}{dL} = + \lambda I$	I = concentración por cm ²
Ives	1962	$\frac{dC}{dL} = - \lambda C$ $\lambda = \lambda_1 K\sigma - \frac{\theta \sigma^2}{\rho_0 - \sigma}$	σ, C, ρ_0
Ives	1969	$\lambda = \lambda_1 (1 + \frac{\beta\sigma}{\rho_0})^y (1 + \frac{\sigma}{\rho_0})^z (1 + \frac{\sigma}{\sigma_v})^x$	β, ρ_0, σ
Deb	1970	$C = \frac{V}{\rho_0 - \sigma} \frac{dC}{dL} + \frac{dC}{dt}$	C ρ_0
Adin y Rebhun	1970	$\frac{d\sigma}{dt} = K_1 C (F - \sigma) - K_2 \sigma J$	F = capacidad del filtro J = gradiente hidráulico K ₁ , K ₂ = coeficiente de adherencia y desprendimiento. σ, C
Gunn y Otros	1992	$\frac{dC}{dZ} = 1,5 (\frac{1 - \rho_0}{dc}) \alpha n_0 C$	d = diámetro del grano n ₀ = eficiencia de remoción del colector α = factor de eficiencia de las colisiones

Tabla 3-2. Modelos matemáticos de filtración
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

Esta nueva ecuación se basa en la hipótesis de que cualquier subcapa de filtro presenta la misma eficiencia de remoción y que la suspensión es uniforme al entrar y salir de cualquier subcapa, al integrar esta ecuación, para t=0 muestra la variación de la concentración en función de una exponencial con el espesor del lecho filtrante, así tenemos: [20]

$$C = C_0 * e^{-\lambda_0 * L} \tag{Ec. 3-14.}$$

De donde:

C₀= concentración inicial de las partículas suspendidas (L³/L³)

λ₀= Coeficiente inicial de filtración (L⁻¹)

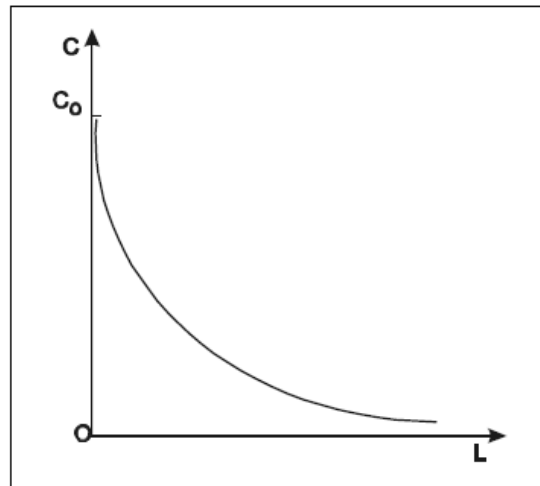


Figura 3-11. Variación de la concentración en función del espesor del lecho filtrante para $t=0$

FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

Esta grafica 3-11 nos expresa que durante la filtración se produce la colmatación progresiva de los poros y por ende, también varía la eficiencia de la remoción de las diversas capas. Aquí se debe de tener en cuenta la variación que puede ocasionar los poros las que son directamente proporcional a la profundidad del medio filtrante y del tiempo de filtración. [20]

3.4.3. Retención y arrastre de partículas

Las partículas retenidas en los poros pueden causar un estrechamiento en los canales cuando tenemos un caudal constante, lo que nos da como resultado el aumento de la velocidad intersticial. Esta velocidad hace que las partículas que se encuentran en las capas inferiores se arrastren hasta que la cantidad arrastrada sea proporcional a la existente en cada capa. Produce disminución del depósito efectivo absoluto (σ) para cada subcapa considerada.

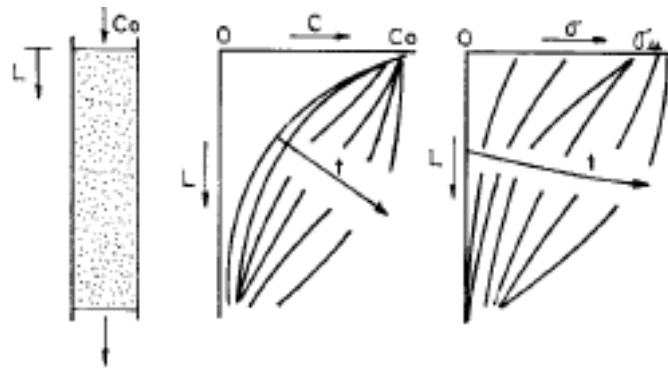


Figura 3-12. Variación de C y σ en función de L
 FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

En esta grafica 3-12 podemos observar como varia la concentración (C) y el deposito especifico absoluto (σ) a medida que avanza por el filtro en una longitud (L). Tenemos al medio filtrante donde existe una condición limitante en la superficie donde progresa a través de todo el espesor del mismo y que cuando llega a esa condición en todo el medio, el deposito especifico alcanza un valor de saturación (σ_u), y la concentración parece inalterable (C_0). [20]

3.4.4. Coeficiente de filtración modificado

El coeficiente del filtro (λ) normalmente permanece constante durante la filtración, pero se ha verificado que puede existir cambios en función del depósito especifico (σ) causados por la variación de la geometría de los poros, todo esto causada por la retención de las partículas. Los modelos matemáticos pueden obtenerse si se considera:

- Al medio filtrante como un conjunto de esferas individuales.
- El medio filtrante está representado como un conjunto de capilares cilíndricos individuales.
- La velocidad intersticial es modificada por la cantidad promedio de depósitos en cualquier elemento de volumen de medio filtrante.



Modelo	Exponentes	$\lambda = F()$	Observaciones
Iwasaki Sakthivadival	X=Z=0 Y=1	$\lambda = \lambda_0 + a_1 \cdot \sigma$	$a_1 = \frac{b \cdot \lambda_0}{\epsilon_0}$, b = 1
Herejes Shekhtman Lerk	X=Y=0 Z=1	$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0}\right)$	
Maroudas y Eisenkhan Wright, Kavanaugh y Pearson	Y=Z=0 X=1	$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}\right)$	
Mackerle	X=0	$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{b \sigma}{\epsilon_0}\right)^y \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0}\right)^z$	
Ives	X=Y=Z=1	$\lambda = \lambda_0 + a_1 \cdot \sigma - \frac{a_2 \sigma^2}{\epsilon_0 - \sigma}$	a_1, a_2 , parámetros
Stein	X=Z=0 Y=1	(*) $\lambda = \lambda_0 \left(1 + K_1 \cdot \sigma\right)$ (**) $\lambda = \lambda_0 \left(\frac{1 - K_2 \cdot \sigma}{1 - K_2 \cdot \sigma_u}\right)^4$	(*) $K_1 = 1/\epsilon$, b = 1 (válido cuando λ decrece con σ) (**) K_2 = coeficiente (válido cuando λ decrece con σ)
Mintz y Kristhul		$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{C_0 \cdot \sigma}{C \cdot \sigma_u}\right)$	C, C_0 = concentraciones de partículas suspendidas (vol/vol)
Deb		$\bar{\lambda} = M_1 \left(\frac{X}{\epsilon_0 - \sigma}\right)^{M_2}$	$\bar{\lambda}$ = Coeficiente adimensional; M_1, M_2 constantes. X ' = parámetro
Yao, Habibián y O'Melia		$\lambda = \frac{3}{2} \left(\frac{1 - \epsilon_0}{D}\right) n \cdot \alpha$	n = eficiencia de colección de un colector esférico aislado α = Factor de colisión
O'Melia y Ali		$\lambda = \frac{3}{2} \left(\frac{1 - \epsilon_0}{D}\right) \eta \cdot r$ $\eta r = \alpha \cdot n + N \cdot \alpha \rho \cdot \eta \rho \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2$	n = Número de partículas suspendidas $\alpha \rho$ = Factor de colisión entre partículas retenidas y partículas suspendidas $\eta \rho$ = Eficiencia de colección entre partículas retenidas y partículas suspendidas.

Tabla 3-3. Modelos matemáticos que relacionan λ y σ
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

3.4.5. Pérdidas de carga en un medio filtrante.

La pérdida de carga (h) se produce al hacer pasar un fluido con cualquiera cantidad de caudal (Q) a través de un lecho filtrante granular que tiene una longitud determinada (L), el cual produce fricción al avanzar por los poros produciendo así las pérdidas de carga como se le observa en la figura 3-12 .[20]

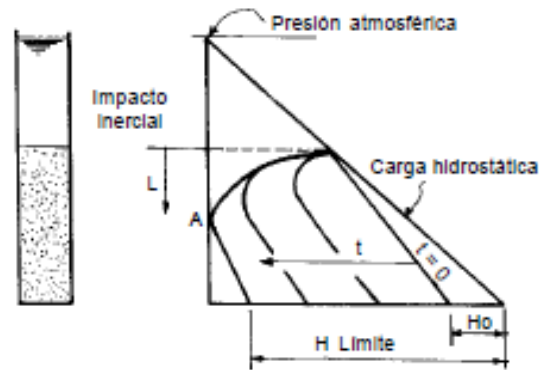


Figura 3-12. Variación de la pérdida de carga en función de L y t
 FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

Las pérdidas de carga en un sistema de filtración se considera todos los puntos que lo conforman como son: [13]

- Entrada del filtro.
- Lecho filtrante (grava y arena).
- Toberas (por entrada, contracción, fricción y salida).
- Salida de la cámara.
- Accesorios (codos, válvulas).

Al iniciar la filtración, las pérdidas de carga solo se deben al tamaño, forma y porosidad del medio filtrante así como también a la viscosidad y velocidad del agua que se está filtrando. Las pérdidas de cargas iniciales podrían ser constantes siempre y cuando el filtro carecería de partículas en suspensión, pero se sabe que esto no puede suceder así que los sólidos en suspensión irán recubriendo los granos que se encuentran en el lecho, así como aumentando de tamaño y por ende disminuyendo la porosidad, con lo que nos da a entender que las pérdidas de carga ira aumentando conforme el área de paso del flujo vaya disminuyendo. [20]

Existe dos clases de pérdidas de carga, así tenemos:

- Una pérdida de carga inicial, que es la mínima que puede producir un filtro y se le denomina h_{σ}
- Las pérdidas de carga por colmatación la cual está en función del tiempo y lo denominaremos $h\varphi(t)$

$$h_f = h_0 + h\varphi(t) \quad \text{Ec. 3-15.}$$

3.4.5.1. Pérdidas de carga inicial

Estas pérdidas se calcula de acuerdo a la ecuación de Koezeni que solo es aplicable para esferas que se encuentran en flujo laminar, su fórmula es la siguiente:

$$h_0 = f \frac{v}{g} L \frac{(1-\varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} v \left(\frac{A}{V}\right)^2 \quad \text{Ec. 3-16}$$

Dónde:

f = constante experimental y adimensional (su valor es 5).

v = viscosidad cinemática.

g = aceleración de la gravedad.

L = profundidad del lecho.

ε_0 = porosidad inicial.

V = velocidad de filtración.

$\frac{A}{V}$ = relación área de la partícula/ volumen de la partícula.

Como sabemos que los diámetros de las partículas no son esféricas ni tienen tamaño uniforme, por lo cual debemos introducir un coeficiente de esfericidad (C_e). Además los granos pueden o no estar estratificados en el lecho por lo que las pérdidas de cargas totales será igual a la suma de las pérdidas de carga en cada capa. [20]



3.4.6. Lavado de medios filtrantes.

Generalmente en los filtros rápidos se realiza el lavado invirtiendo el sentido del flujo, inyectando agua en el falso fondo, expandiendo el medio filtrante y recolectando en la parte superior el agua de lavado. Se hace el lavado de manera obligatoria por que los granos del medio filtrante retienen material progresivamente y produce taponamientos. [20]

3.4.6.1. Fluidización de medios porosos.

Cuando hacemos pasar un flujo ascendente por un medio granular hace que los granos se reorienten hasta una posición donde presentan menor resistencia al paso del flujo. Por lo tanto si la velocidad de lavado es baja, el lecho no produce expansión y por ende su porosidad no se modifica de manera significativa.

Lo contrario ocurre cuando se aumenta la velocidad de lavado, esto produce un levantamiento de los granos por que superan su peso y quedan en suspensión en el líquido.

La velocidad de lavado es directamente proporcional a la altura del medio filtrante, la porosidad aumenta y la resistencia al paso del agua es aproximadamente igual. Cuando el lecho no está expandido las pérdidas de carga son lineales a la velocidad del flujo, no así sucede cuando ya se expande el lecho, las pérdidas de carga toman su valor máximo.

3.4.6.2. Expansión de medios porosos.

La expansión depende tanto de la esfericidad como de la porosidad del medio filtrante, por lo general un lavado ascendente se da en el orden de 0.9 y 1.3 m/min. La expansión total de un medio filtrante se determina teniendo como dato la curva de granulometría y calculando la porosidad de las diferentes subcapas expandidas en una determinada velocidad de lavado. [20]

Para su cálculo necesitamos el número de Reynolds (R_e) y el número de Galileo (G_a) que tienen las siguientes formulas:

$$R_e = \frac{D_e * V * \rho}{\mu} \quad \text{Ec. 3-17.}$$

$$G_a = \frac{D_e^3 * \rho (\rho_s - \rho) * g}{\mu^2} \quad \text{Ec. 3-18.}$$

De donde:

D_e = diámetro equivalente.

V = velocidad de flujo del agua

μ = viscosidad dinámica.

ρ = densidad del agua

ρ_s = densidad del material filtrante.

g = aceleración de la gravedad.

Para el cálculo del lecho expandido se usa:

$$\varepsilon_e = 1 - \frac{1}{\sum_{l=1}^n \frac{X_i}{1 - \varepsilon_i}} \quad \text{Ec. 3-19.}$$

Para el cálculo de la expansión total (E) usaremos la siguiente formula:

$$E = \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} = \frac{l_e - l_0}{l_0} \quad \text{Ec. 3-20}$$

De donde:

ε_i = porosidad expandida de la capa

ε_0 = porosidad del lecho estático.

X_i = fracción en peso del material retenido entre dos tamices consecutivos.

l_0 = espesor del lecho estático.

l_e = espesor del lecho expandido.

3.4.6.3. Pérdidas de carga en medios filtrantes expandidos

En este caso las pérdidas de carga que existe es igual al peso de los granos de cada material que compone el medio. Se la calcula con la siguiente ecuación:

$$h_i = (1 - \varepsilon_0) L_0 \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad \text{Ec. 3-21.}$$

De donde:

h_i = Pérdidas de carga del material expandido.

ρ_s = masa específica del material filtrante.

ρ_a = masa específica del agua.

3.5. Factores que influyen en la Filtración.

La eficiencia que puede tener un sistema de filtración está íntimamente relacionada con las características que poseen la suspensión y el medio filtrante, con la hidráulica de la filtración y la calidad del efluente. [13]

Es importante considerar que los factores que pueden ser principales en los filtros lentos, pueden o no ser importantes en los filtros rápidos. A continuación se muestra los principales factores que influyen en la filtración rápida. [20]

3.5.1. Características de la suspensión.

La eficiencia de remoción de las partículas suspendidas en un medio filtrante está en relación con las siguientes características de la suspensión:

- Tipo de partículas suspendidas.
- Tamaño de las partículas suspendidas.
- Densidad de las partículas suspendidas.
- Resistencia o dureza de las partículas suspendidas.
- Temperatura del agua a ser filtrada.
- Concentración de las partículas suspendidas.
- Potencial Zeta de la suspensión.



- pH del efluente.

3.5.2. Características de la filtración.

3.5.2.1. Tipo de medio filtrante.

El tipo de medio filtrante que queramos usar depende de la calidad de agua que deseamos obtener, también debemos tener presente la duración de las carreras de filtración así como la facilidad del lavado. Se dice que un medio filtrante se considera como ideal cuando granos con una determinada granulometría y cierto peso sean capaz de remover la mayor cantidad posible de partículas suspendidas para obtener un efluente de buena calidad, esto con una mínima cantidad de agua para ser lavado.

[13]

Se usa la arena comúnmente en los filtros rápidos, pero si tiene una granulometría menor hace que las carreras de filtración se acorte, comparado si usamos una arena de granulometría mayor, en todo caso, la estratificación de la arena se da en un filtro rápido porque aquí se hace un lavado en contracorriente, con los granos de menor tamaño en las capas superiores y las de mayor tamaño en las inferiores. Con la estratificación de la arena ayuda a la retención de la mayor parte de las partículas que se encuentran en suspensión en las capas superiores. [20]

3.5.2.2. Tamaño efectivo del material filtrante.

Los materiales filtrantes deben ser especificados de manera que su granulometría sea la adecuada para la filtración, los parámetros que se deben emplear son los siguientes:

Primero tenemos el tamaño efectivo (T_e), este se refiere al tamaño de granos correspondientes al porcentaje del 10% esto en relación al porcentaje en peso que pasa por las mallas de una serie granulométrica. Así también tenemos al coeficiente de uniformidad (C_u) que es igual a la relación de porcentaje en peso que pasa por

las mallas de una serie granulometría solo que la relación al tamaño de los granos es del 60%.

La forma de los granos depende normalmente del coeficiente de esfericidad (C_e), el cual es igual a la relación entre el diámetro de la esfera y el tamaño medio de los granos. Y el peso específico (P_e) que no es más que la relación entre el peso del grano y el volumen que ocupa dichos granos. [13]

Así también tenemos el tamaño mínimo y máximo por el cual no debe encontrarse ningún grano del medio filtrante. [20]

3.5.2.3. Peso específico del material filtrante

El peso específico (P_e) del material es igual al peso de los granos dividido para el volumen efectivo que ocupan dichos granos, a continuación tenemos valores normales para el coeficiente de esfericidad y peso específico de los materiales más usados. [20]

Material	Coficiente de esfericidad	Peso específico (g/cm ³)
Arena	0,75 - 0,80	2,65 - 2,67
Antracita	0,70 - 0,75	1,50 - 1,70
Granate	0,75 - 0,85	4,00 - 4,20

Tabla 3-4. Valores normales de materiales filtrantes
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

3.5.2.4. Espesor de la capa filtrante.

En una planta de tratamiento de agua que use entre dos o más capas, es un poco difícil fijar un espesor óptimo de medio filtrante para que sus filtros funcionen en condiciones ideales durante todo el año. La experiencia ha demostrado que el espesor de las capas que usan arena y antracita está en el orden de que la capa de antracita ocupa del 60-80% del espesor y la arena de 20-40%. Por ejemplo si tenemos

un medio filtrante de 70cm la antracita ocupara aproximadamente unos 50 cm y la arena unos 20cm. [20]

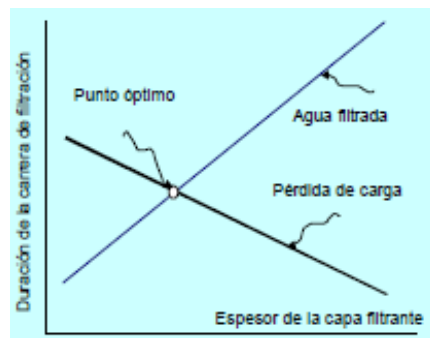


Figura 3-14. Punto óptimo de operación en función de la carrera de filtración y espesor de la capa filtrante
FUENTE: Arboleda. V., Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua

Como se puede observar en la figura 3-14, la operación ideal que puede tener un filtro es cuando la pérdida de carga máxima ocurre en el mismo instante cuando la turbiedad está en el límite. La grafica relaciona las pérdidas de carga y turbidez del efluente en función de la duración de las carreras de filtración y el espesor del medio filtrante. [13]

3.5.3. Características hidráulicas.

Estas características son las que se relaciona a la tasa de filtración, la carga hidráulica disponible, la calidad del efluente y ciertas condiciones que influyen en la filtración.

3.5.3.1. Tasa de filtración.

No necesariamente el uso de tasas de filtración bajas nos asegura la producción de agua filtrada de mejor calidad y mayor volumen de agua producida por carrera de filtración, podemos ver que luego de algunos minutos de filtración la calidad del fluente es la misma siempre y cuando el pre tratamiento previo sea el adecuado.

Las velocidades pueden variar inevitablemente y esto puede afectar a la calidad del efluente, podemos decir entonces que las variaciones en la tasa de filtración

dependen primordialmente de la magnitud de la variación producida, de la tasa de filtración, de la pérdida de carga y de la forma que se realiza la variación. [13]

Las variaciones de la tasa de filtración durante una carrera de filtración son muchas veces inevitables y pueden afectar de una manera sustancial a la calidad del agua, entre los principales estudios que se realizó para estudiar la influencia en la variación de esta tasa de la calidad de agua filtrada destacan los trabajos de Cleasby y colaboradores. [20]

3.5.3.2. Carga hidráulica disponible

Esta carga hidráulica influye en la duración de las carreras de filtración, vale recalcar que este parámetro es puramente empírico y es seleccionado por la persona que va hacer el estudio. Se ha demostrado en estudios de que los filtros de tasa declinante producen carreras de filtración más largos que los de tasa constante en relación con la misma pérdida de carga en el medio filtrante. [13]

Para obtener una misma duración en las carreras de filtración es necesario que la carga hidráulica sea superior a la que se va a usar si tenemos una tasa declinante, existes varios factores como la granulometría del medio filtrante, espesor y aspectos económicos, etc. para poder fijar la carga hidráulica con la que un filtro debe operar. [20]

3.5.3.3. Calidad del efluente

La calidad del efluente está relacionada con características inherentes al filtro, al uso de que se destinara al agua filtrada y a la existencia de una operación eficiente. Los valores permitidos de potabilidad del agua varía dependiendo del país, pero por lo general la turbidez no debe superar a 5NTU y no debe ser inferior a 1NTU. Podemos obtener estas condiciones mencionadas con unas dos capas únicas de arena pero la

calidad del agua filtrada no es constante porque conforme avanza la filtración la calidad va disminuyendo.

La filtración es una operación compleja la cual es imposible analizarla en función a una sola variable sin que sea influenciada por el resto, debido a la complejidad de la filtración se intentó con la siguiente formula relacionar las principales variables con el objetivo que se mejore la efectividad del filtro.[13]

$$K = \frac{v_{00} D^3 \Delta H}{\Delta L} \quad \text{Ec. 3-22.}$$

De donde:

K= índice de la filtrabilidad.

v_{00} = velocidad de aproximación (LT⁻¹).

D= diámetros de los granos del medio filtrante (L)

ΔH = perdidas de carga en la capa filtrante de espesor ΔL (L)

3.6. Unidades de la Filtración.

3.6.1. Clasificación.

De manera general se ha dado la clasificación de los filtros para la purificación del agua pero centraremos nuestro estudio en los filtros rápidos, así tenemos a continuación una tabla explicativa: [18]

Según la velocidad de filtración	Según el medio filtrante usado	Según el sentido del flujo	Según la carga sobre el lecho
Rápidos 120 - 360 m ³ /m ² /día	1. Arena (h=60-75 cm)	Ascendentes	Por gravedad
	2. Antracita (h=60-75 cm)	Descendentes	Por presión
	3. Mixtos: Antracita (35-50 cm) Arena (20 - 35 cm)		
	4. Mixtos: Arena, Antracita, Granate	Flujo Mixto	
Lentos 7 - 14 m ³ /m ² /día	Arena (h=60-100 cm)	Descendente Ascendente Horizontal	Por gravedad

Tabla 3-5. Clasificación de los filtros
FUENTE: Arboleda. J, Practica de purificación del agua. Tercera edición



La clasificación de los filtros rápidos pueden hacerse teniendo en cuenta los siguientes parámetros: el lecho filtrante, el sentido del flujo durante la filtración, la forma de aplicar la carga de agua sobre el medio filtrante y la forma de control operacional. [20]

Parámetro de clasificación			
Lecho filtrante	Sentido del flujo	Carga sobre el lecho	Control operacional
Simple (arena o antracita)	Descendente	A gravedad	Tasa constante y nivel variable
Lechos dobles o múltiples	Ascendente	A presión	Tasa constante y nivel constante
	Ascendente-descendente		Tasa declinante

Tabla 3-6. Clasificación de los filtros rápidos
 FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

3.6.2. Filtración por gravedad

Este tipo de filtración usa la gravedad y usualmente se usa en las plantas de tratamiento de agua cuando es de abastecimiento público, la elección de este tipo de filtro es más de aspecto económico. Estas unidades pueden ser de flujo ascendente y puede tener una tasa de filtración constante o declinante. [20]

Los filtros por gravedad más comunes son los filtros granulares, que están formados por depósitos de fondo perforado llenos de arena porosa a través del cual pasa el fluido de flujo laminar, estas son continuos y se usa en tratamientos de aguas residuales y tratamiento de potabilización de agua por lo general. [17]

3.6.2.1. Filtración ascendente

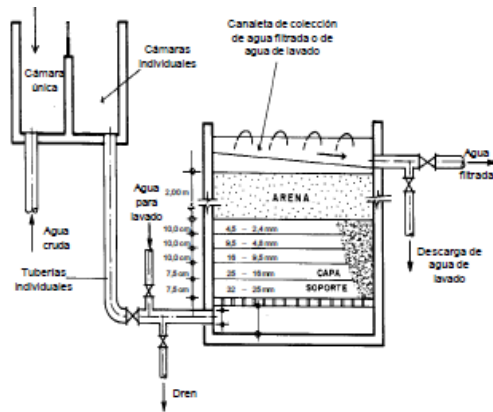


Figura 3-15. Esquema de un filtro de flujo ascendente y tasa constante

FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

3.6.2.2. Filtración descendente

3.6.2.3. Filtración ascendente y descendente

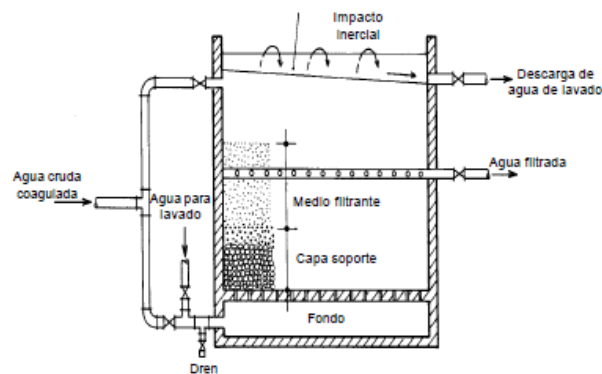


Figura 3-16. Esquema de un filtro Bi-Flow
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

3.6.3. Métodos de control operacional

3.6.3.1. Tasa constante y nivel variable

El caudal total se encuentra repartido de manera equitativa pero el nivel de agua en cada filtro varia independientemente del nivel de los demás, esto nos dice que el caudal de filtración será constante. El nivel del agua que se encuentra en la caja del filtro tomara valores como un mínimo cuando el medio filtrante se encuentre completamente limpio y un valor máximo cuando el medio filtrante se encuentra en condiciones de ser lavado.

El nivel de agua que se encuentre en cada filtro será variable y dependiente del nivel de colmatación que tenga el medio filtrante de cada uno de los filtros.

Este tipo de unidad de filtración tiene ciertas ventajas comparando con la tasa y nivel constante, así tenemos: [20]

- Un caudal del afluente constante y la tasa de filtración se mantienen constante, no necesitaremos el empleo de algún mecanismo de control.
- Usa un vertedero para que el caudal sea distribuido de manera uniforme entre todos los filtros.
- Cuando un filtro deja de funcionar por mantenimiento, su caudal de este filtro es distribuido a los filtros restantes de manera equitativa para que no se vea afectado la filtración.
- Después de que se reanudara la operación de algún filtro, la tasa de filtración de los filtros restantes disminuye gradualmente hasta que el filtro se equilibre.
- La pérdida de carga es visual y depende del operador que observe el nivel máximo permitido para que proceda al lavado de dicho filtro.
- El caudal en cada filtro se puede medir muy fácilmente en el vertedero de entrada.

3.6.3.2. Tasa y nivel constante.

El nivel de agua en este tipo de unidades se considera aproximadamente constante al igual que su carga hidráulica, así como se mantiene constante la resistencia de su filtro y su tasa de filtración. En el inicio de la filtración para que la resistencia total del filtro se mantenga constante necesitaremos instalar un dispositivo controlador que nos dé un valor de pérdida de carga igual a la diferencia de la carga hidráulica total y la suma de las pérdidas de carga de todo el sistema. [20]

3.6.3.3. Tasa declinante

Aquí la carga hidráulica es aplicada desde el inicio hasta el final de la filtración, lo cual produce que de manera gradual se vaya disminuyendo el caudal de filtrado. La calidad del efluente es superior y sus carreras de filtración son más largas comparando con los filtros de tasa constante.

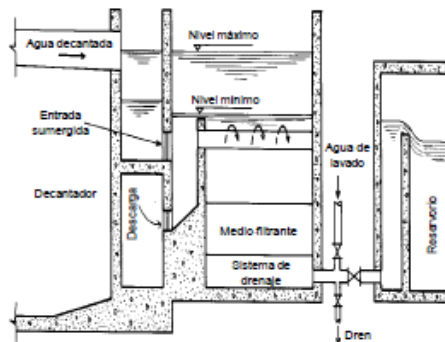


Figura 3-17. Esquema de sistema de filtración con tasa declinante
FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

La distribución de agua hacia cada una de las unidades de filtración de la misma batería es realizada por una tubería o canal común, el nivel de agua es prácticamente el mismo en todos los filtros de la batería y en el canal común de distribución.

Existe un nivel de operación denominado nivel máximo de operación de los filtros que es el instante en el que se ha usado la totalidad de la carga hidráulica disponible para la filtración de la batería, en este punto es cuando se debe realizar el lavado del filtro.

Durante el lavado de este tipo de filtros, el filtro que está siendo lavado cede su caudal a los filtros restantes de la batería lo cual produce un aumento del nivel de agua hasta llegar a un nivel máximo. Una vez que se haya lavado el filtro y se ponga nuevamente en funcionamiento, el caudal del resto de filtros de la batería y hasta el canal común de distribución ira disminuyendo su nivel hasta llegar a un

nivel mínimo, en este punto el filtro lavado produce un caudal de agua filtrada mayor a lo que se producía antes de que sea lavado.

A causa de la retención de las impurezas en los filtros, el nivel de agua seguirá aumentando hasta que nuevamente un filtro este en su nivel máximo de operación y sea lavado, así siguiendo el mismo ciclo antes mencionado. El filtro que se retirara para el lavado será el que lleve más tiempo de operación de filtración.

Las principales ventajas que tiene el filtro de tasa declinante frente al sistema de tasa constante son los siguientes: [20]

- Cuando un filtro es retirado al lavado, el nivel de agua sube de manera gradual en los demás y por consecuencia las variaciones de las tasas de filtración son graduales.
- El operador puede ver a simple vista la pérdida de carga por el nivel de agua en los filtros.
- La calidad del efluente es mejor cuando la tasa de filtración disminuye desde el inicio hasta el final de la filtración.
- Por la retención de las partículas el volumen de agua producido por unidad de pérdida de carga es mayor.
- La carga hidráulica necesaria para la filtración es menor.
- Se elimina los equipos mecánicos de control, esto significa reducción de costos iniciales.

Existe una cierta metodología para realizar el lavado de los filtros de tasa declinante y esto consiste en que se debe lavar los filtros de manera sucesiva; se debe lavar el filtro después de $24/N$ siendo N el número de filtros de la batería. [20]

3.6.4. Medios Filtrantes

3.6.4.1. Filtros de lecho simple

Este tipo de lecho son generalmente de arena convencional, la permeabilidad va aumentando conforme aumenta la profundidad del filtro. La disposición de las partículas se hace que los granos más pequeños queden en la superficie del filtro mientras que los granos más grandes en el fondo. Esta estratificación de los granos presenta un inconveniente y es que cuando el floculo penetra dentro del lecho se ira encontrando con poros cada vez más grandes y la mayor parte de las partículas quedaran retenidas en la superficie por lo que la capacidad de almacenar los flóculos es limitada. [20]

Estos tipos de filtros también se les denomina mono capa y sus equipos llevan un lecho de filtración de un material determinado como puede ser: sílice, basalto, arena, antracita, granate, etc. [22]

3.6.4.2. Filtros de lecho múltiples.

Estos tipos de filtros son lechos de varios materiales (generalmente de sílice y antracita), el cual posee diferente granulometría y densidad. [22]

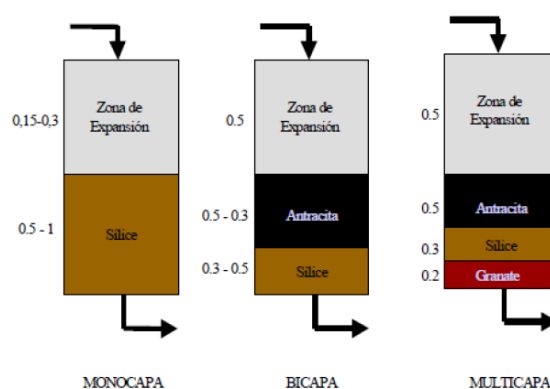


Figura 3-18. Filtro de lecho múltiple
 FUENTE: Espinoza. T., Caracterización de un filtro de arena para potabilización de agua, mediante la obtención de curvas experimentales basadas en los parámetros de funcionamiento

3.6.4.3. Filtración a presión.

En este grupo de filtros se pueden hacer muchas clasificaciones diferentes, así tenemos que según la posición del filtro:

- Horizontales: son cilindros cerrados a presión dispuestos en posición horizontal.
- Verticales: son cilindros cerrados a presión dispuestos en posición vertical

Y según el tipo de lavado:

- Filtros lavados por agua: son equipos en los que para el proceso de lavado del lecho de filtración se usa solamente agua.
- Filtros lavados por agua y aire: se usa en el lavado agua y aire en diferentes secuencias del proceso. [22]

3.6.4.4. Características del medio filtrante.

El filtro puede ser de un solo medio (arena o antracita), de medio dual (arena y antracita) o lechos mezclados. Puede ser de profundidad convencional de 0.6 m a 0.9 m o de capa profunda de más de 0.9 m de altura.

Una síntesis de las características de los medios filtrantes nos la presentan (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003), en su libro. [16]

Characteristic	Unit	Value	
		Range	Typical
Shallow-bed (stratified)			
Anthracite			
Depth	mm	300-500	400
Effective size	mm	0.8-1.5	1.3
Uniformity coefficient	unitless	1.3-1.8	≤1.5
Filtration rate	L/m ² -min	80-240	120
Sand			
Depth	mm	300-360	330
Effective size	mm	0.45-0.65	0.45
Uniformity coefficient	unitless	1.2-1.6	≤1.5
Filtration rate	L/m ² -min	80-240	120
Conventional (stratified)			
Anthracite			
Depth	mm	600-900	750
Effective size	mm	0.8-2.0	1.3
Uniformity coefficient	unitless	1.3-1.8	≤1.5
Filtration rate	L/m ² -min	80-400	160
Sand			
Depth	mm	500-750	600
Effective size	mm	0.4-0.8	0.65
Uniformity coefficient	unitless	1.2-1.6	≤1.5
Filtration rate	L/m ² -min	80-240	120
Deep-bed (unstratified)			
Anthracite			
Depth	mm	900-2100	1500
Effective size	mm	2-4	2.7
Uniformity coefficient	unitless	1.3-1.8	≤1.5
Filtration rate	L/m ² -min	80-400	200



Sand			
Depth	mm	900-1800	1200
Effective size	mm	2-3	2.5
Uniformity coefficient	unitless	1.2-1.6	≤1.5
Filtration rate	L/m ² ·min	80-400	200
Fuzzy filter			
Depth	mm	600-1080	800
Effective size	mm	25-30	28
Uniformity coefficient	unitless	1.1-1.2	1.1
Filtration rate	L/m ² ·min	600-1000	800

Characteristic	Unit	Value ^a	
		Range	Typical
Dual-medium			
Anthracite ($\rho = 1.60$)			
Depth	mm	360-900	720
Effective size	mm	0.8-2.0	1.3
Uniformity coefficient	unitless	1.3-1.6	≤1.5
Sand ($\rho = 2.65$)			
Depth	mm	180-360	360
Effective size	mm	0.4-0.8	0.65
Uniformity coefficient	unitless	1.2-1.6	≤1.5
Filtration rate	L/m ² ·min	80-400	200
Multimedia			
Anthracite (top layer of quad-media filter, $\rho = 1.60$)			
Depth	mm	240-600	480
Effective size	mm	1.3-2.0	1.6
Uniformity coefficient	unitless	1.3-1.6	≤1.5
Anthracite (second layer of quad-media filter, $\rho = 1.60$)			
Depth	mm	120-480	240
Effective size	mm	1.0-1.6	1.1
Uniformity coefficient	unitless	1.5-1.8	1.5
Anthracite (top layer of tri-media filter, $\rho = 1.60$)			
Depth	mm	240-600	480
Effective size	mm	1.0-2.0	1.4
Uniformity coefficient	unitless	1.4-1.8	≤1.5
Anthracite (second layer of quad-media filter, $\rho = 1.60$)			
Depth	mm	120-480	240
Effective size	mm	1.0-1.6	1.1
Uniformity coefficient	unitless	1.5-1.8	1.5
Anthracite (top layer of tri-media filter, $\rho = 1.60$)			
Depth	mm	240-600	480
Effective size	mm	1.0-2.0	1.4
Uniformity coefficient	unitless	1.4-1.8	≤1.5
Sand ($\rho = 2.65$)			
Depth	mm	240-480	300
Effective size	mm	0.4-0.8	0.5
Uniformity coefficient	unitless	1.3-1.8	≤1.5
Garnet ($\rho = 4.2$)			
Depth	m	50-150	100
Effective size	mm	0.2-0.6	0.35
Uniformity coefficient	unitless	1.5-1.8	≤1.5
Filtration rate	L/m ² ·min	80-400	200

^aAdapted from Tchobanoglous (1988).

^bAnthracite, sand, and garnet sizes selected to limit the degree of intermixing. Use Eq. (11-34) for other values of density ρ .

Tabla 3-8. Algunas características de los medio filtrantes
FUENTE: Mateus. M, Moreno. C., La filtración en forma de una Operación de separación industrial.



CAPITULO 4

Funcionamiento de la batería de filtros

4.1. Descripción del proceso de operaciones.

4.1.1. Principales componentes de los filtros.

- 1) **Caja del filtro.** Esta es considerada la parte más importante de la unidad de filtración, aquí se puede observar el falso fondo, el drenaje que normalmente es de un material de concreto, la capa soporte de grava, el lecho filtrante, las canaletas secundarias de lavado y el canal principal de lavado. Por encima de este nivel se encuentra las cargas de agua necesarias para el funcionamiento de la batería (carga hidráulica para el lavado y carga hidráulica para el proceso de filtrado).[23]

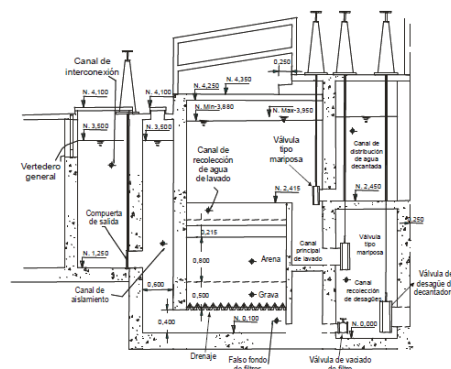


Figura 4-1. Caja de filtración
FUENTE: Cepis/OPS. Tratamiento de agua
para consume humano

- 2) **Canal de distribución de agua decantada.** Estas alimentan a la caja de los filtros por medio de las válvulas de entrada en cada unidad. Existe en la parte superior un vertedero que sirve para limitar la carga hidráulica máxima disponible para la operación.
- 3) **Canal de desagüe de agua de retro lavado.** Recibe el agua del retro lavado de los filtros. En este canal adicionalmente se reúne los canales de los decantadores y floculadores. [23]
- 4) **Canal de aislamiento.** Este canal aísla una unidad del resto de la batería de filtros, cerrando la válvula de entrada y la compuerta de salida que se comunica con el canal de interconexión. El canal se localiza contiguo a la caja del filtro y

se comunica por el falso fondo, esto permite una distribución uniforme del agua de lavado por todo el ancho del drenaje.

5) Canal de interconexión de la batería. Esta cumple dos funciones importantes las cuales son:

- Durante la filtración, reúne el efluente de todos los filtros y los saca mediante el vertedero que controla la carga hidráulica de lavado.
- Durante el lavado, al momento que se disminuye el nivel de agua por debajo del vertedero de salida facilita a que se deriva el agua filtrada de manera automática hacia el filtro que se va a lavar.[23]

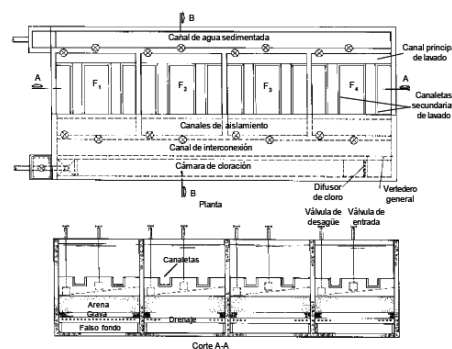


Figura 4-2. Canal de interconexión de la batería
FUENTE: Cepis/OPS. Tratamiento de agua para consume humano

6) Lecho filtrante. Se encuentra dentro de la caja del filtro, es la parte más importante de la filtración, en este tipo de batería de filtros se usa un lecho filtrante doble (arena-antracita), la tasa de filtración para este tipo de lecho tiene un promedio de $250 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. [24]

Este tipo de lecho filtrante de modo dual es usado por que su eficiencia en la remoción de las partículas en suspensión es muy buena, así como es capaz de almacenar grandes volúmenes de sólidos que contiene el agua en el lecho. Los factores importantes para la elección de este medio filtrante es principalmente la calidad que debe producir en medida de la turbiedad, así

también la calidad de las partículas que transporta el agua en cuanto al tamaño y dureza de estas. Otro parámetro es la velocidad de filtración, la carrera de filtración, la carga hidráulica disponible y las exigencias de las autoridades. [24]

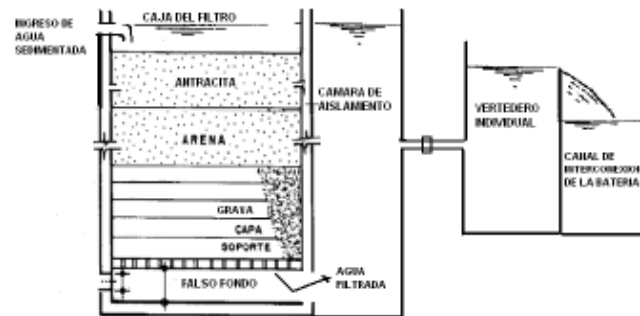


Figura 4-3. Disposición del lecho filtrante
FUENTE: García. F. Evaluación de la batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo de la planta de tratamiento de agua potable.

7) Drenaje, capa soporte de grava y falso fondo. El drenaje más durable está construido por viguetas prefabricadas de concreto de forma triangular, tiene 0,3 metros de ancho. Los orificios se ubican a los dos costados de la vigueta espaciados entre 0,10 y 0,15 metros de centro a centro, estos orificios se establecen con niples PVC de 1 pulgada de diámetro. [23]

El falso fondo se denomina al canal ubicado debajo del drenaje por donde sale el agua filtrada o asciende el agua para retro lavado [25]

Este falso fondo está diseñado para asegurar una larga estabilidad en sus características de operación, ser resistentes a cambios en las pérdidas de carga, uniformidad en los flujos. [24]

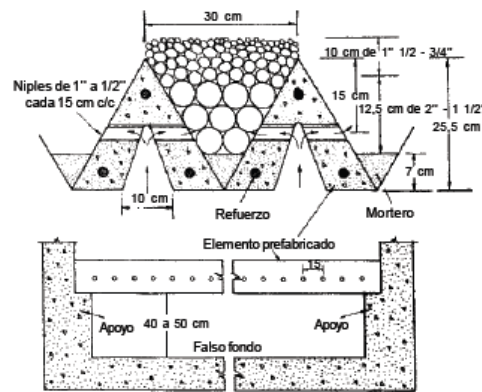


Figura 4-4. Drenaje y falso fondo
FUENTE: Cepis/OPS. Tratamiento de agua para consume humano

4.1.2. Operación del filtro

En la planta de tratamiento de potabilización de Bayas, el agua que proviene de los sedimentadores es recolectado por un canal común que posteriormente será transportado a los filtros por medio de tuberías de 160mm la cual se encuentra a 2,15m de altura.

Esta agua que ingresa al filtro pasa a través del lecho filtrante que es de arena-antracita, esta lo hace en una dirección de arriba hacia abajo, y el agua que posteriormente sale del lecho filtrante se lo denomina agua filtrada. A continuación existen unas viguetas prefabricadas cubiertas de grava, el cual sirve para sostener el material de arena-antracita, donde dejan pasar el agua hacia el falso fondo que se encuentra en la parte inferior de la cámara de filtración.

El proceso de operación de los filtros es el siguiente:

- El agua sedimentada tiene la entrada al filtro a través de una válvula tipo mariposa el cual debe ser abierta permitiendo así el ingreso del agua, todas las válvulas para la entrada del agua sedimentada a cada filtro se encuentran a la misma altura.

- Obviamente las válvulas de drenaje y del falso fondo deben estar en la posición de cerrado.
- El nivel de agua que se encuentra en el filtro ira en ascenso conforme pasa el tiempo y a la vez pasa a través del lecho filtrante.
- El agua filtrada pasa al falso fondo, seguido a la cámara de aislamiento para que finalmente recaiga en el canal de interconexión.
- Se hace controles paulatinos y secuenciales de los parámetros físicos como es la turbiedad, pH, color del agua filtrada, tomada del canal de aislamiento.
- Una vez que el filtro se ha saturado completamente y llegue al nivel máximo en el canal, se procederá al lavado del filtro.

4.1.3. Operación de los filtros de tasa declinante.

Los filtros usados en la planta de tratamiento de agua potable de Bayas constan de una batería de filtros de tasas declinante y lavado mutuo. Este tipo de filtración posee una carga hidráulica que funciona desde el inicio hasta el final de la filtración cuyo caudal va disminuyendo conforme pasa el tiempo. La calidad del efluente en este tipo de filtración es superior a comparación de los filtros lentos.

La planta trabaja con tasa constante, esto quiere decir que durante la filtración el agua ingresa al filtro con una velocidad, pero se sabe que conforme el filtro se vaya saturando o ensuciando esta velocidad va disminuyendo en función al tiempo. Para evitar esto, se usa controladores de caudal, que tiene como función el obligar al filtro a recibir y sacar una misma cantidad de caudal de agua todo el tiempo.

El lecho filtrante se va ensuciando a medida que pase el tiempo así que es necesario el lavado. Para este lavado existen tres niveles de operación (N1, N2, N3) en donde se tiene un nivel máximo de operación el cual se conoce como N2 y corresponde al

instante donde el filtro debe ser lavado porque ya se ha utilizado toda la carga hidráulica disponible para la filtración.

Durante el lavado de un filtro, los filtros restantes de la batería aceptan parte del caudal de aquel filtro que se ha retirado para lavarlo, de este modo, el nivel de agua de estos filtros restantes sube hasta un nivel máximo el cual denominaremos como N3.

Finalmente cuando el filtro que se ha retirado es lavado y puesto nuevamente en funcionamiento, este filtra un caudal superior comparado cuando fue retirado para el lavado y esto provoca que el nivel de agua en toda la batería de filtros incluida el canal disminuya.

Pasado el tiempo, el nivel de agua que se encuentra en los filtros va aumentando debido a que se produce una retención de impurezas en el lecho filtrante, este nivel aumenta hasta llegar al nivel máximo de operación o punto N2. [26]

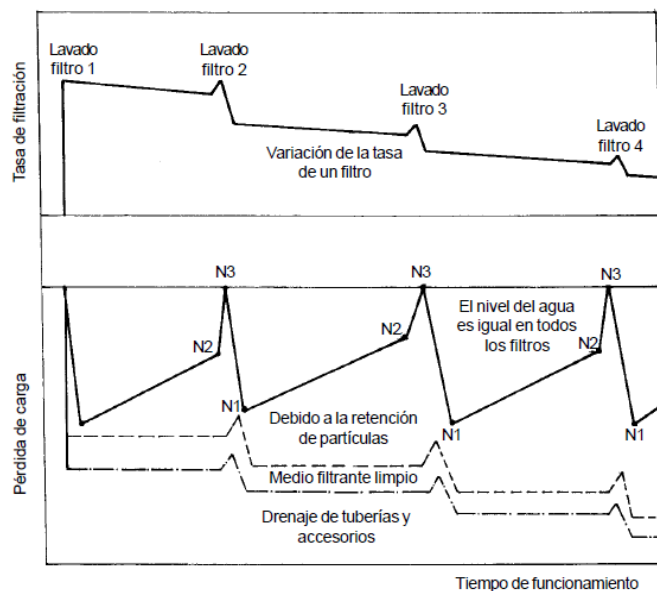


Figura 4-5. Variación de la tasa de filtración, pérdida de carga y nivel de agua durante el funcionamiento de un filtro

FUENTE: Maldonado. V., Tratamiento de agua para consumo humano

Mientras más sucio este el lecho filtrante más sube la altura del agua sobre el lecho. Pero como todos los filtros están conectados por el canal de distribución, la altura de agua sobre el lecho es la misma para toda la batería. Por eso es importante saber cuál filtro hay que lavar cuando la altura llegue al nivel máximo de toda la batería de filtros de tasa declinante.

4.2. Lavado superficial

El lavado superficial que se hace al filtro es muy simple, se realiza con una bomba y una manguera que inyecta agua a presión sobre la superficie del lecho y sobre las paredes del filtro. Se usa para la remoción del lecho del filtro un rastrillo para mejorar el rendimiento al romper las bolas de lodo que puede contener, y así asegurar que el lavado sea el correcto.

4.3. Retro lavado

El retro lavado del filtro se da cuando se hace pasar agua por la parte inferior del filtro con la presión adecuada cuyo objetivo es que el lecho filtrante se expanda y así se desprenda todo el material que está retenido.

La ventaja que tiene el retro lavado es que no necesita de accesorios adicionales para realizar el lavado del lecho filtrante.

4.3.1. Condiciones para lavar un filtro

Para lavar el filtro es necesario que la turbiedad del agua filtrada sea superior a la establecida, es decir mayor a 1 NTU, y su problema radica en las etapas anteriores a la filtración, como un ejemplo cuando se acorta la dosis de sulfato.

Cuando se ha cumplido el tiempo de la carrera de filtración recomendado que es de 30-50 horas. [25]

4.3.2. Proceso de lavado

Este proceso es de responsabilidad única de los técnicos operadores que trabajan en la planta de tratamiento de agua potable de Bayas, para ello se debe seguir los siguientes pasos:

- Se cierra la válvula de ingreso al filtro de agua sedimentada.
- Espere un tiempo prudente (3 minutos) hasta que el nivel de agua en el filtro descienda completamente.
- Abra la válvula de desfogue.
- Abra la válvula de retro lavado.
- Espere un cierto tiempo hasta que esté lavado el medio filtrante, este proceso toma un tiempo de 10 minutos.
- Luego de transcurrido ese tiempo se cierra la válvula de retro lavado.
- Se cierra la válvula de desfogue.
- Por ultimo abra lentamente la válvula de ingreso de agua sedimentada hacia el filtro.



CAPITULO 5

Requisitos según el

CEPIS

A continuación se describe los requisitos de operación, las características del proceso de filtración y del sistema de lavado de la planta de tratamiento de agua potable de Bayas. Los procedimientos fueron tomados del Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), el cual se encuentra detallado a continuación.

5.1. Requisitos para la operación de la batería con tasa declinante.

Se da a conocer a continuación los requisitos básicos para que una batería de filtros pueda operar en tasa declinante.

- Debe estar integrada por un número como mínimo de cuatro filtros (fig. 5-1.)
- Debe tener una carga hidráulica necesaria para un filtro que recién se ha puesto en funcionamiento luego de su respectivo lavado, su tasa de filtración no sea mayor a 1.5 veces la tasa promedio del proyecto.
- Debe tener un dispositivo para modificar el nivel en el canal de entrada dependiendo de las necesidades. La función de este dispositivo es limitar la carga hidráulica para los procesos de tal manera que cumpla con el requisito anterior (Tasa máx. = 1.5 tasa promedio).
- Y por último, los ingresos del agua decantada debe encontrarse en un nivel inferior al nivel mínimo de operaciones de la batería.



Figura 5-1. Batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo
FUENTE: Autor

5.2. Requisitos básicos para que la batería de filtros sea auto lavable.

Los requisitos para que se considere a una batería de filtros como auto lavable son las siguientes:

- Debe producirse una velocidad ascensional necesaria para expandir el medio filtrante entre un porcentaje del 25 % y 30 %.
- La batería de filtros debe tener un canal que interconecte la salida de todos los filtros.
- Debemos tener un vertedero de salida sobre el canal de interconexión, este puede ser común a toda la batería o puede ser individual.
- Observar que un filtro pueda ser lavado con el flujo que produce el resto de las unidades en la batería de filtro.

5.3. Características del proceso de filtración.

Los parámetros que evalúa principalmente son la velocidad de filtración durante el proceso, la calidad de filtrado inicial que se obtiene y la duración que puede tener las carreras de filtración.

5.3.1. Velocidad y caudal de filtración.

Al momento de instalar la tasa declinante, desfasando las condiciones de operación de los filtros, hace que cada lecho filtrante se colmate de diferente manera y como en este diseño no se admite más agua de lo que el estado del medio filtrante lo permite, por consecuencia se trabaja en la batería de filtros con diferentes condiciones de caudal y velocidad. Sabemos que se lava en un orden consecutivo de manera estricta, por consiguiente, el primer filtro que se lava es el que toma mayor caudal y tiene mayor velocidad de filtración comparado con el resto de unidades que van decreciendo, así el más sucio o el que tiene mayor tiempo operando, tiene las condiciones mínimas de caudal y velocidad de filtración.

Objetivo

Determinar la velocidad de filtración con la que opera los filtros de la batería.

Equipos y materiales.

- Una regla graduada.
- Un cronómetro.

Procedimiento.

- 1) Colocar la regla dentro del filtro.
- 2) Cerrar la válvula de ingreso al efluente.
- 3) Medir un tiempo (T_f) en segundos, necesarios para que el nivel de agua baje una distancia denominada como altura (H).
- 4) Realizar varias veces la medición en los filtros y promediar los valores de (T_f).
- 5) Calcular la velocidad de filtración con la siguiente ecuación:

$$v_f = \frac{V_f}{T_f * A_f} \quad \text{Ec. 5-1}$$

De donde:

v_f = velocidad de filtración. ($m^3 / m^2 \text{ d}$)

V_f = Volumen filtrado. (m^3)

A_f = área del lecho filtrante. (m^2)

T_f = tiempo de filtrado. (s)

$$V_f = A_f * H \quad \text{Ec. 5-2}$$

A_f = área de la caja del filtro. (m^2)

H = altura. (m)



6) Calculamos el caudal de operación con la siguiente formula:

$$Q = \frac{A_F * H}{T_f} \quad \text{Ec. 5-3}$$

5.3.2. Calidad del filtrado inicial.

Después de ocurrido el proceso de lavado, el primer efluente que se produce por el filtro generalmente suele tener una turbiedad mayor que la del resto de la carrera, esto debido a que las partículas que se desprenden en el lavado, todavía permanecen en el filtro.

Objetivo

Determinar el comportamiento del filtro al iniciar la carrera de filtración y determinar el tiempo que demora en alcanzar una turbiedad normal y constante

Materiales

- 15 recipientes de 150 milímetros
- Turbidímetro.
- Cronómetro.

Procedimiento.

- 1) Numerar los frascos de manera ascendente desde el 1-15.
- 2) Luego del proceso de lavado, esperar que se llene completamente el canal de aislamiento.
- 3) Tomar muestras a partir desde el momento en que se reinicia la operación de filtrado, tomar las muestras cada minuto hasta que se complete los 15 minutos.
- 4) Determinar la turbiedad de las muestras.
- 5) Graficar turbiedad versus el tiempo, en un papel semilogarítmico de dos ciclos.

5.3.3. Duración de las carreras de filtración.

En una batería de filtros que funcione correctamente, la duración de las carreras de filtración puede variar entre 30 y 50 horas o más dependiendo de la calidad de agua coagulada o decantada que esta reciba. Se denomina carrera de filtración al intervalo entre lavados de un mismo filtro.

5.4. Características del sistema de lavado.

El lecho filtrante se puede conservar en buenas condiciones si el comportamiento del sistema de lavado es el adecuado, los ensayos que aquí se realicen serán durante la puesta en marcha de la planta de potabilización con el único objetivo de que podamos realizar los ajustes que sean necesarios para la conservación de los filtros en un buen estado.

5.4.1. Expansión del medio filtrante.

La expansión del lecho filtrante depende del caudal de lavado y del peso de los granos de arena. Este último varía de acuerdo con el diámetro del material granular.

Objetivo

Determinar el porcentaje de aumento de espesor del lecho filtrante durante la operación de lavado.

Materiales

- Varillas metálicas con cajas soldadas a una distancia de 5 centímetros entre los bordes de las cajas. En el extremo final de la varilla hay una placa metálica para evitar que se introduzca en la superficie de la arena. (fig. 5-2).
- Flexómetro.
- Cronómetro

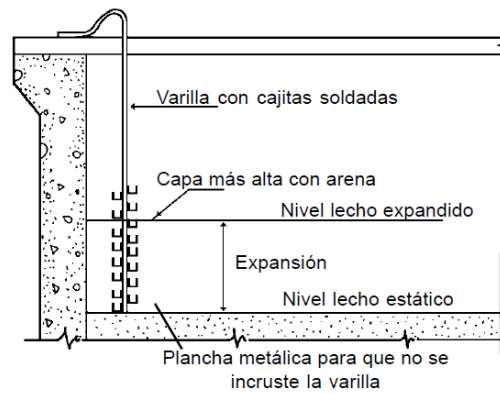


Figura 5-2. Medidor de expansión del lecho filtrante
FUENTE: Cepis/OPS. Evaluación de plantas de tecnología aplicada

Procedimiento.

- 1) Antes del inicio de lavado, se sitúa la varilla dentro del filtro colocando el extremo inferior por encima del lecho.
- 2) Se procede a realizar el lavado normalmente.
- 3) Se deja pasar 3 minutos y se retira suavemente la varilla y verifique cuantas cajas están llenas del medio filtrante y se mide la distancia (Δh) entre la caja más alta que contenga la arena y el extremo inferior de la varilla.
- 4) Determinar la altura del lecho filtrante (h) en el punto de medición.
- 5) Determinar el porcentaje de expansión (E) del lecho filtrante:

$$E = \frac{\Delta h}{h} * 100 \quad \text{Ec. 5-4}$$

- 6) Efectuar esta medición en varios puntos del lecho filtrante para determinar si la expansión es uniforme en toda el área del filtro.

Es recomendable medir en especial el punto opuesto a la salida del agua de lavado y el inmediato. Para que el medio filtrante se lave bien, debe producirse una expansión del 25% al 30%.

5.4.2. Duración del proceso de lavado.

Cuando se realiza un lavado del filtro, la medida de turbiedad del agua de lavado puede incrementarse rápidamente al principio y hasta puede llegar a valores superiores de 1.000 NTU que luego a medida que el lecho filtrante se vaya limpiando, la turbiedad ira disminuyendo. Analizando esta curva se puede determinar el tiempo de lavado óptimo y más conveniente.

El tiempo de lavado también varía con la calidad del agua cruda. En la época que es de lluvia la turbiedad se vuelve alta y el tiempo de lavado suele ser mayor.

Objetivo

Determinar el tiempo óptimo en el que debe ejecutarse la operación de lavado.

Materiales

- 15 frascos de 150 milímetros.
- Cronómetro.
- Turbidímetro
- Muestreador

Procedimiento.

- 1) Numerar los frascos del 1-15.
- 2) Iniciar el lavado del filtro normalmente y tan pronto caiga la primera agua de lavado en la canaleta llenar el frasco enumerado como 1.
- 3) Seguir llenando los 15 frascos cada minuto.
- 4) Determinar las turbiedades de las muestras y dibujar la curva de turbiedad versus el tiempo en papel logarítmico-aritmético de tres ciclos.

- 5) Determinar en la curva el punto de inflexión inferior en donde esta tiende a ser asíntota con respecto al eje horizontal. El tiempo óptimo de lavado corresponderá a aquel punto. Sería ideal que al llegar a ese punto se tuviera agua con una turbiedad menor a 5 NTU.

5.5. Característica del medio filtrante.

El medio filtrante es la parte más importante del filtro, constituye propiamente el filtro, y las características que tiene más influencia en la eficiencia de los filtros como son el tamaño y forma de los granos, la porosidad del medio filtrante y su altura.

5.5.1. Granulometría del medio filtrante.

Objetivo

Determinar el tamaño de los granos que componen una muestra del medio filtrante.

Materiales.

- Un juego de mallas de la serie de marca Tyler.
- Muestreador
- Balanza analítica
- Recipientes

Procedimiento.

- 1) Lavar el filtro normalmente y vaciarlo para poder ingresar.
- 2) Tomar una muestra representativa de todo el lecho filtrante.
- 3) Secar y pesar la muestra del material filtrante.
- 4) Colocar la muestra en el juego de mallas Tyler, en el recipiente superior de mayor abertura y agitar el conjunto ya sea mecánicamente o de manera manual hasta que los granos pasen a través de las mallas.

- 5) Pesar las porciones de muestras retenidas en cada malla y calcularlas como porcentajes de la muestra total.
- 6) Graficar los porcentajes obtenidos en un papel logarítmico de probabilidades, colocando los porcentajes en peso acumulado en el eje de las ordenadas (escala logarítmica) y el tamaño de los granos en milímetro en el eje de las abscisas (escala de probabilidades).

5.5.2. Bolas de lodo.

Si se tiene un lavado deficiente del filtro (falta de expansión) o de una frecuencia inadecuada de retro lavado, el lodo se va acumulando dentro del lecho filtrante. Este deterioro del lecho filtrante se puede ver a través de la presencia de bolas de lodo.

Objetivo

Determinar la cantidad de bolas de lodo presentes en el lecho filtrante.

Materiales

- Muestreador consistente en tubo metálico de 75 milímetros de diámetro y 0.5 metros de largo.
- Malla metálica número 10 (2 milímetros de abertura)
- Probeta de 500 ml
- Balde

Procedimiento.

- 1) Lavar el filtro de manera normal y drenar el agua hasta unos 20 centímetros por debajo del nivel de la superficie de arena.
- 2) Determinar el volumen del muestreador
- 3) Extraer cuatro muestras del lecho, incrustándolo hasta la grava.

- 4) Extraer la arena sobre un plástico para separar con cuidado las bolas de lodo y dejarlas secar al sol.
- 5) Colocar las bolas de lodo secas y colocar en una probeta que tendrá un determinado volumen de agua. El volumen de las bolas equivale al incremento de volumen en la probeta.

El resultado se expresa en porcentaje con respecto al volumen del área procesada.

$$\% \text{ de bolas de lodo} = \frac{\text{incremento del volumen}}{\text{volumen de la muestra}} * 100 \quad \text{Ec. 5-5}$$

5.5.3. Espesor del medio filtrante.

Cuando el lecho se expande demasiado, la arena se pierde en cada retro lavado y se puede ver en la canaleta de recolección de agua o se puede encontrar en su falso fondo del filtro o en el tanque de aguas claras cuando el drenaje se encuentra en mal estado. Se puede evitar la pérdida del lecho si se controla cada seis meses su profundidad y se aplica las respectivas medidas correctivas.

Objetivo

Determinar la profundidad del lecho filtrante

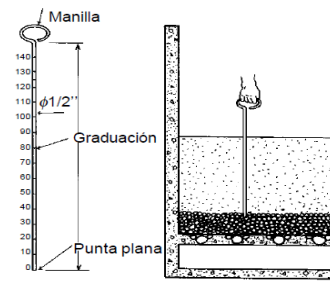
Materiales

- Varilla de 1/2" de diámetro
- Cinta métrica (fig. 5-4)

Procedimiento

- 1) Después de lavado el filtro, se seca la superficie y se introduce la varilla metálica hasta encontrar la capa de grava.
- 2) Determinar la porción de la varilla introducida.
- 3) Repetir esta operación en varios puntos del lecho filtrante.

- 4) Comparar las alturas con las indicadas en el proyecto o con la que corresponda de acuerdo con la granulometría indicada de la arena.



*Figura 5-3. Profundidad de lecho filtrante
FUENTE: Cepis/OPS. Evaluación de plantas de
tecnología aplicada*



CAPITULO 6

Parte experimental

A continuación se muestra los datos obtenidos de los requisitos de operación, las características del proceso de filtración y del sistema de lavado de la planta de tratamiento de agua potable de Bayas. Los procedimientos fueron tomados del Manual de la norma CEPIS.

6.1. Eficiencia del proceso.

Para realizar esta determinación es necesario partir de los datos de turbiedad a través de los cuales se realizó una curva 6-1. que relaciona el tiempo en meses versus la turbiedad, los datos se tomaron en un lapso de un año.

La batería de filtros debe producir agua menor al valor de 0,1 NTU para garantizar la eliminación de los huevos de parásitos en el agua filtrada por lo menos en un 94% del tiempo.

A continuación en las tablas 6-1 y 6-2 tenemos los promedios de turbiedad y caudal de los meses desde junio del 2014 hasta junio del 2015.

Promedio 2014		
Mes	Caudal	Turbiedad
Junio	13.389	0.583
Julio	13.147	0.946
Agosto	13.022	0.129
Septiembre	14.340	0.306
Octubre	11.692	0.100
Noviembre	12.513	0.969
Diciembre	13.888	0.344

Tabla 6-1. Eficiencia del Proceso.

Promedio 2015		
Mes	Caudal	Turbiedad
Enero	12.550	0.158
Febrero	13.098	0.049
Marzo	11.927	0.039
Abril	14.187	0.585
Mayo	14.730	0.177
Junio	15.388	0.080

Tabla 6-2. Eficiencia del proceso.

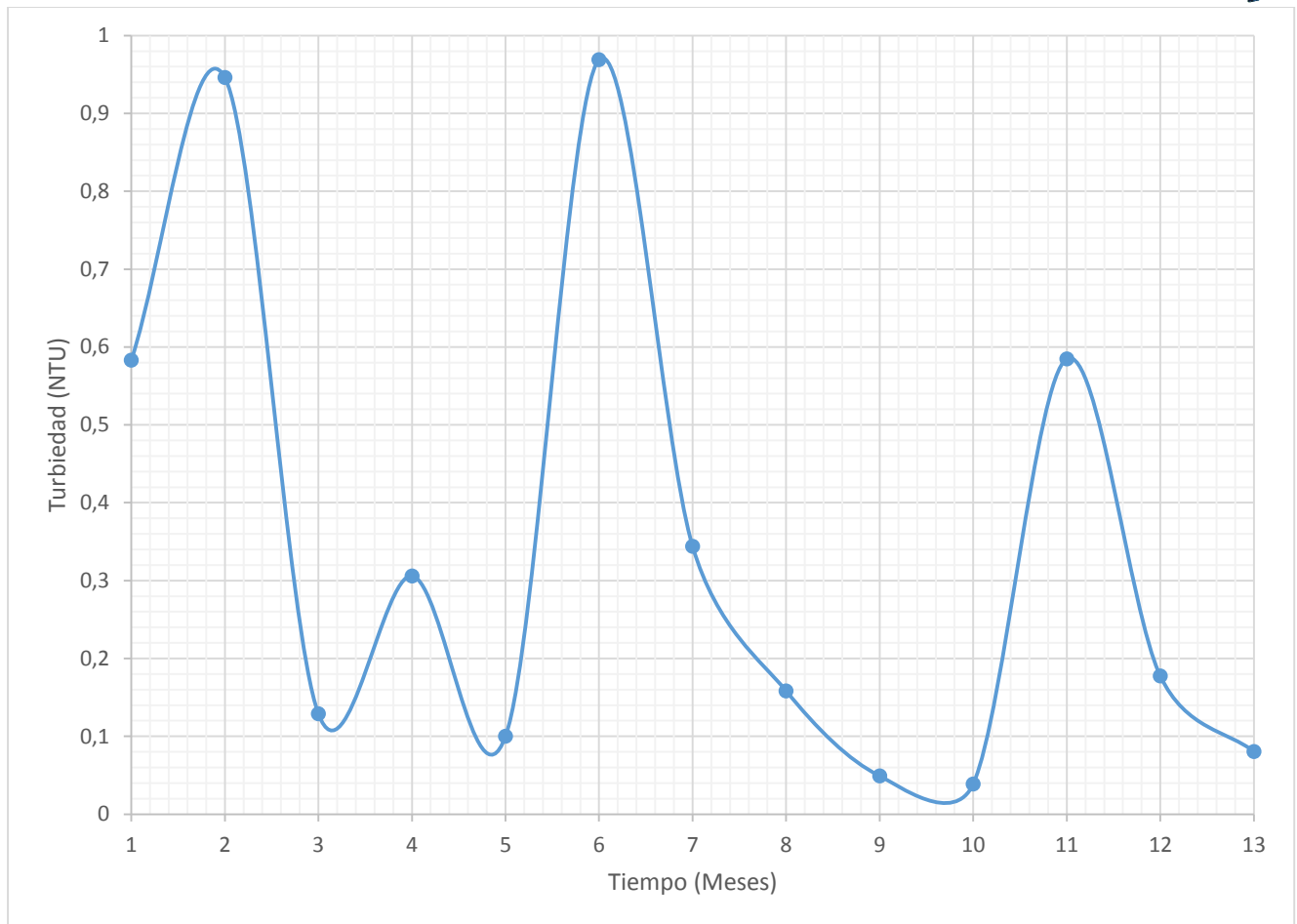


Grafico 6-1. Eficiencia del Proceso.

6.2. Características del proceso de filtración.

6.2.1. Velocidad y caudal de filtración

En la Planta de Tratamiento de Agua de la junta de Bayas se procedió a evaluar la velocidad de filtración en los cuatro filtros que contiene la planta, siguiendo todos los pasos que se vio en el apartado 5.3.1. Obteniendo los datos de la tabla 6-3:

Área de la caja del filtro (m2)	2,72
Área del filtro (m2)	1,92
volumen de agua filtrada (m3)	0,54

Tabla 6-3. Área y Volumen para la velocidad de filtración

A continuación se muestra las tablas 6-4 y 6-5 donde se ha realizado las pruebas sobre la velocidad y el caudal de filtración:



Fig. 6-1. Determinación de la velocidad de filtración

No. Filtro	Altura inicial (m)	Altura final (m)	Variación de la altura (m)	Tiempo(s)	Volumen de agua filtrada (m ³)	Área del filtro(m ²)	Área del lecho filtrante(m ²)	Velocidad de Filtración (m ³ /m ² d)	Caudal de Filtración (l/s)
1	0.9	1.1	0.2	150	0.54	2.72	1.92	115.20	3.63
2	0.89	1.09	0.2	168	0.54	2.72	1.92	102.86	3.24
3	0.85	1.05	0.2	156	0.54	2.72	1.92	110.77	3.49
4	0.87	1.07	0.2	160	0.54	2.72	1.92	108.00	3.40

Tabla 6-4. Datos para Velocidad de filtración

No. Filtro	Velocidad de filtración (m ³ /m ² d)	Caudal de filtración (l/s)
1	115.20	3.63
2	102.86	3.24
3	110.77	3.49
4	108.00	3.40

Tabla 6-5. Velocidad y Caudal de filtración

Con los datos de la tabla podemos obtener una curva de la velocidad de filtración en el que podemos determinar una línea de tendencia la misma que nos da una velocidad de filtración de 111,7 m³/m² d y una sumatoria de caudal de 13,75 l/s.

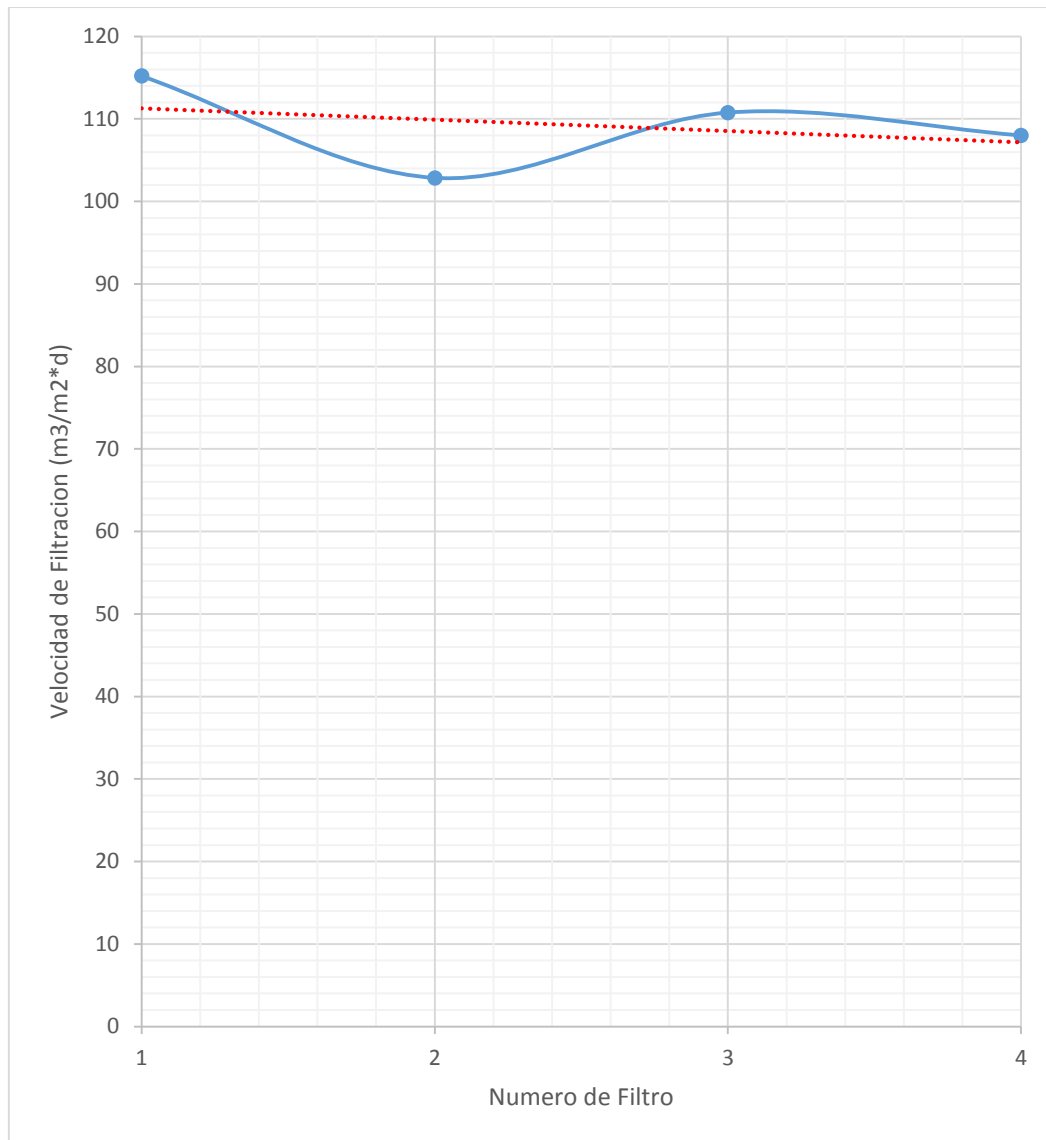


Grafico 6-2. Curva de la velocidad de Filtración

6.2.2. Calidad del filtrado inicial.

Tomamos muestras para la determinación de la medida de la turbiedad obtenidos de los filtros que inmediatamente fueron lavados, en este caso generamos una tabla 6-6 como se ve a continuación:



Fig. 6-2a Frascos para la Calidad de Filtrado Inicial



Fig. 6-2b Determinación de la Calidad de Filtrado Inicial

Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)			
	F1	F2	F3	F4
1	0.68	0.42	0.62	0.77
2	0.75	0.54	0.64	0.82
3	0.57	0.41	0.55	0.85
4	0.69	0.51	0.61	0.75
5	0.51	0.34	0.57	0.42
6	0.82	0.36	0.53	0.81
7	0.64	0.44	0.48	0.6
8	0.55	0.42	0.48	0.58
9	0.77	0.4	0.45	0.69
10	0.57	0.37	0.55	0.79
11	0.79	0.49	0.46	0.76
12	0.87	0.39	0.41	0.82
13	0.66	0.48	0.38	0.5
14	0.8	0.49	0.55	0.65
15	0.69	0.49	0.43	0.36
16	0.63	0.58	0.44	0.52

Tabla 6-6. Calidad de filtrado inicial

Se realiza una gráfica 6-3 la misma que da un valor de turbiedad con respecto al tiempo y permite evaluar la calidad de filtrado inicial.

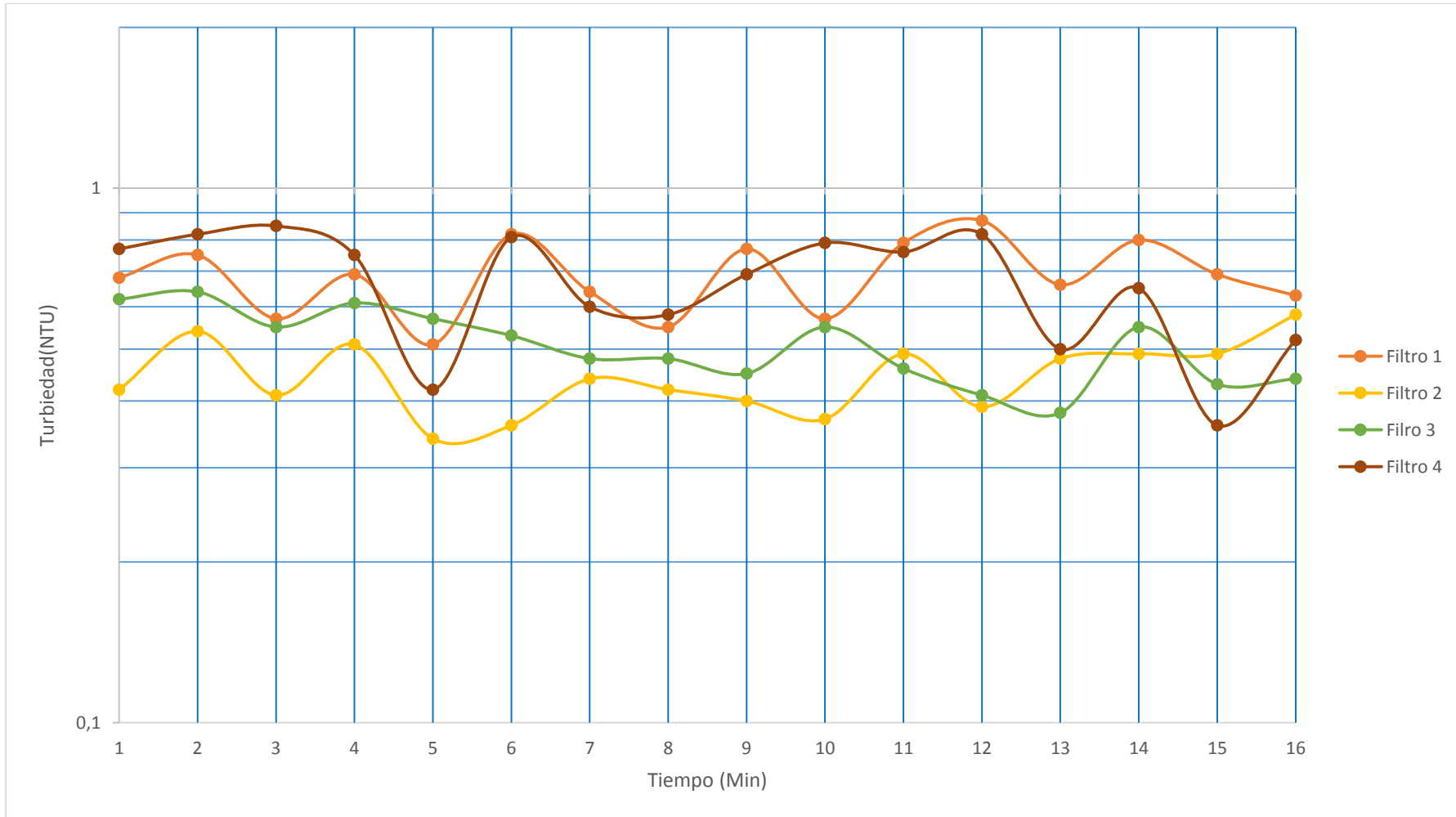


Grafico 6-3. Curvas de la calidad de filtrado inicial

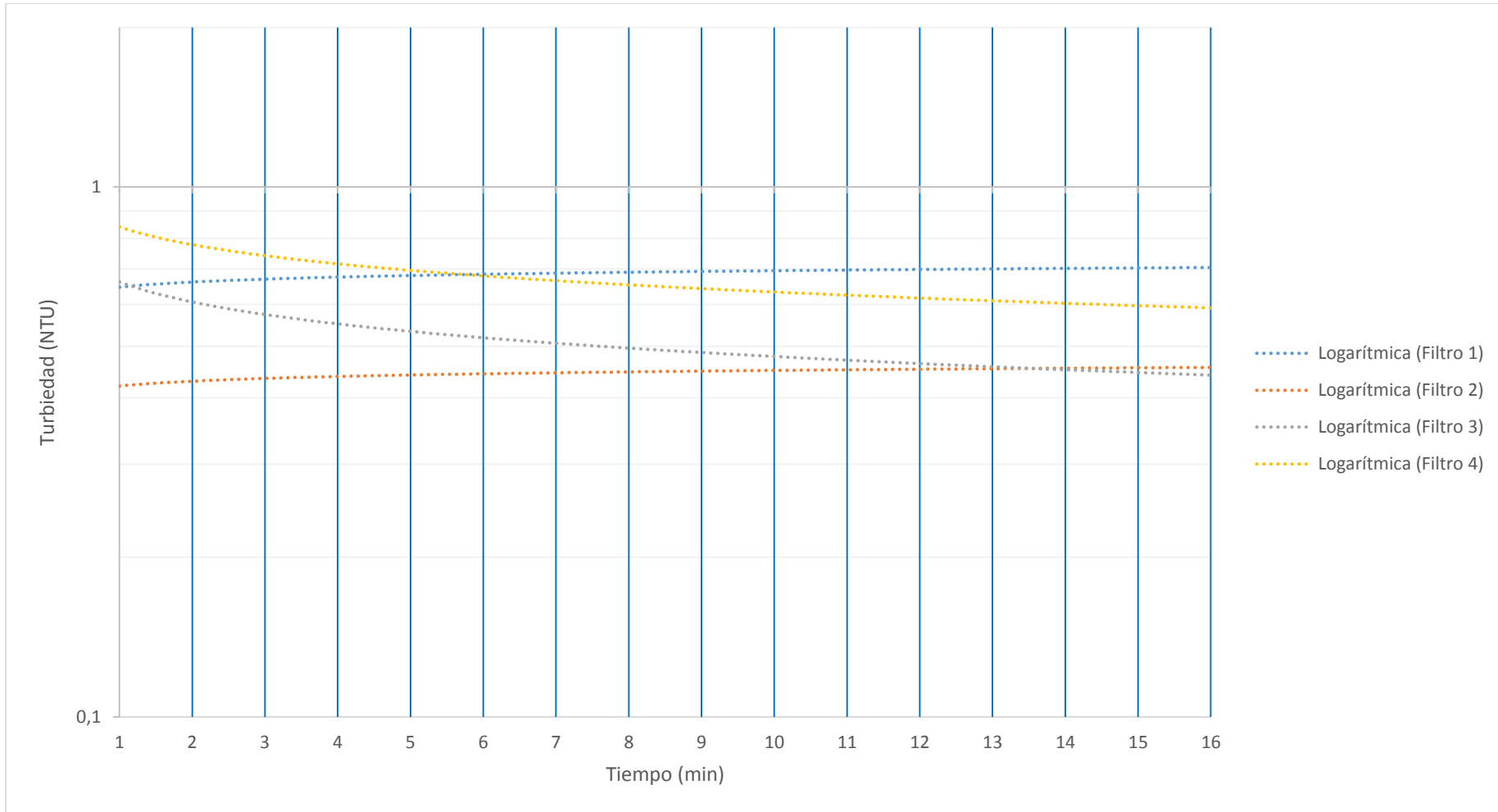


Grafico 6-4. Línea de tendencia de la calidad de filtrado inicial

6.2.3. Duración de las carreras de filtración.

Para esta determinación se analizó el registro de operación de lavado de los filtros llegándose a obtener la siguiente tabla 6-11 donde se muestra las carreras de filtración.

Periodo	Carreras de Filtración (h)
	F1
22/08/2015-24/08/2015	53
24/08/2015-26/08/2015	48
26/08/2015-27/08/2015	24.5
27/08/2015-30/08/2015	65
30/08/2015-1/09/2015	47.25
Promedio	47.55

Tabla 6-7. Duración de la carrera de filtración del filtro 1

Periodo	Carreras de Filtración (h)
	F2
22/08/2015-24/08/2015	54.2
24/08/2015-26/08/2015	40.7
26/08/2015-27/08/2015	34.78
27/08/2015-29/08/2015	48.28
29/08/2015-31/08/2015	43.5
Promedio	44.292

Tabla 6-8. Duración de la carrera de filtración del filtro 2

Periodo	Carreras de Filtración (h)
	F3
23/08/2015-25/08/2015	50.28
25/08/2015-26/08/2015	35.288
26/08/2015-28/08/2015	46.67
28/08/2015-29/08/2015	35.66
29/08/2015-31/08/2015	40
Promedio	41.5796

Tabla 6-9. Duración de la carrera de filtración del filtro 3

Periodo	Carreras de Filtración (h)
	F4
23/08/2015-25/08/2015	50.75
25/08/2015-27/08/2015	46.25
27/08/2015-28/08/2015	24
28/08/2015-29/08/2015	30.06
29/08/2015-30/08/2015	25.16
Promedio	35.244

Tabla 6-10. Duración de la carrera de filtración del filtro 4

Filtro	Carrera de filtración (h)
1	47.55
2	44.292
3	41.5796
4	35.244

Tabla 6-11. Duración de la carrera de filtración

Los promedios de las carreras de filtración se representan a continuación en una gráfica 6-5.

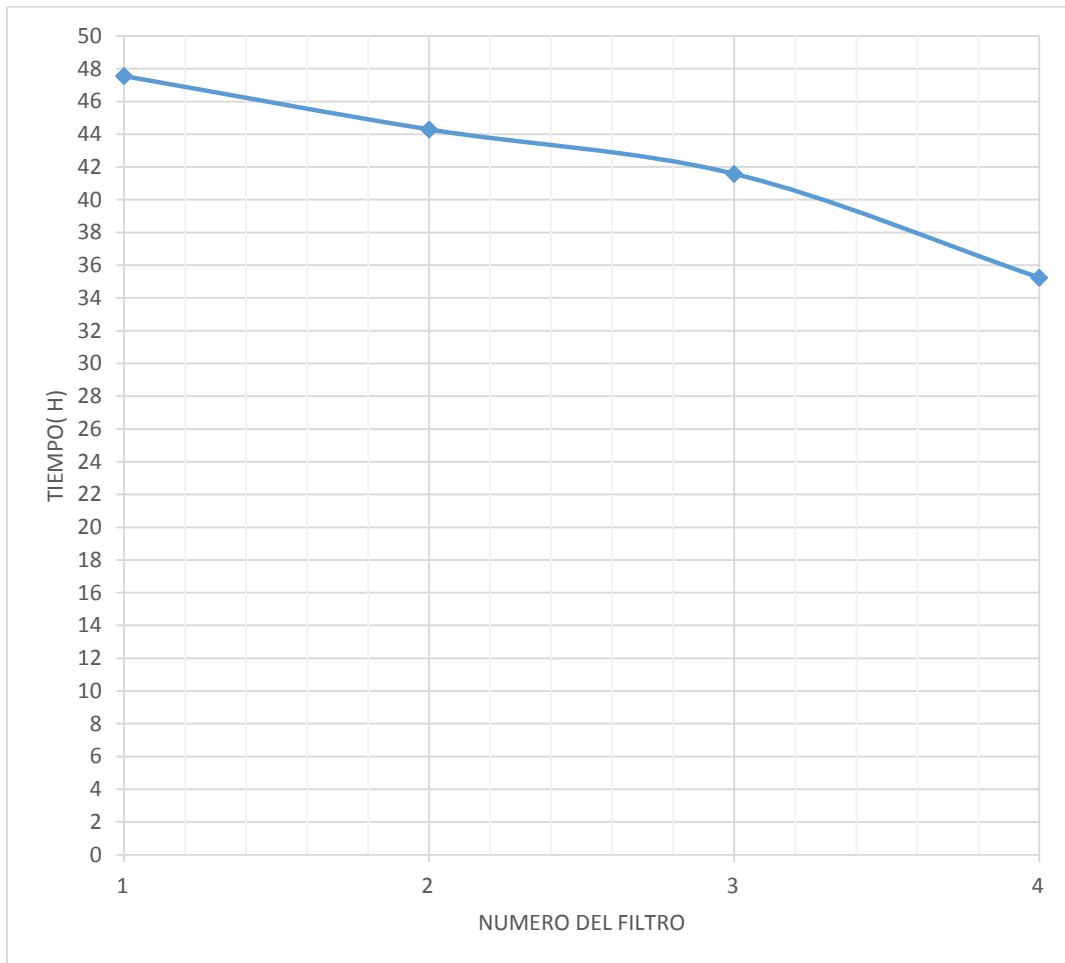


Gráfico 6-5. Curva de la duración de la carrera de filtración

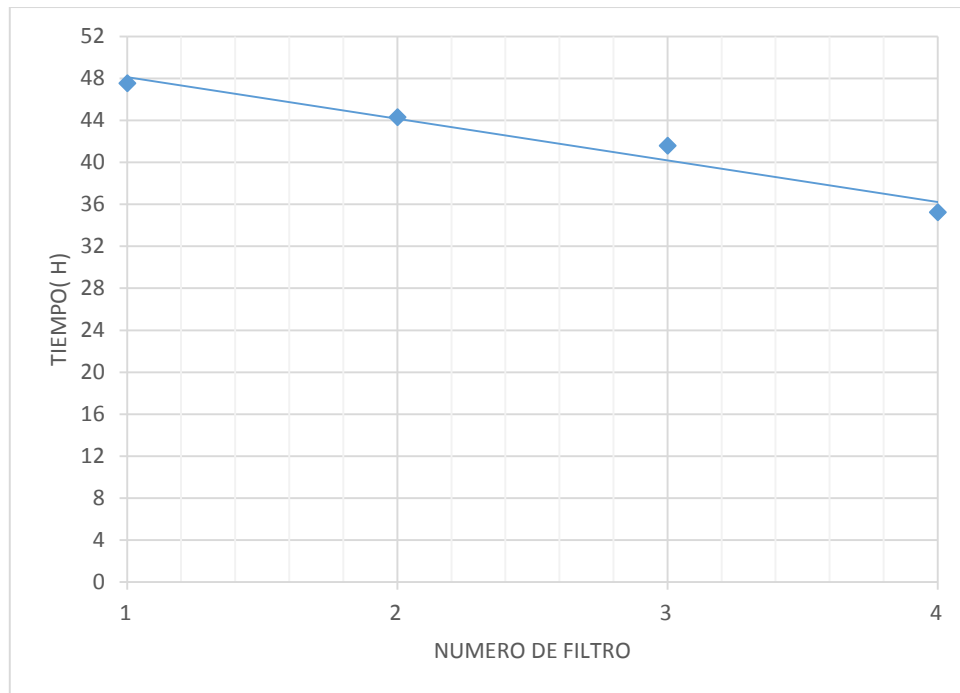


Grafico 6-6. Línea de tendencia de duración de la carrera de filtración

6.3. Características del sistema de lavado.

6.3.1. Expansión del medio filtrante.

En la Planta Potabilizadora de la Junta de Agua Potable de Bayas se procede a evaluar la expansión del medio filtrante en los cuatro filtros, siguiendo todos los pasos de acuerdo al apartado 5.4.1. Obteniendo así la siguiente tabla 6-12 donde se muestra el porcentaje de expansión de cada filtro:

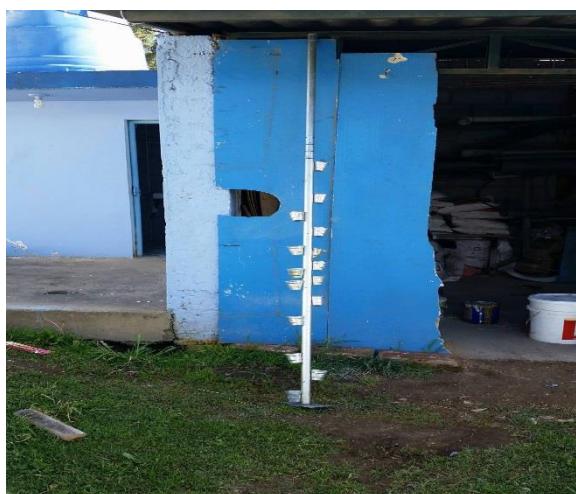


Fig. 6-3 Varilla soldada con placas metálicas para la determinación de la expansión.



Fig.6-4 Operadores que ayudaron a la determinación de la expansión

No. Filtro	Altura de expansión (cm)	Altura del lecho (cm)	Porcentaje de Expansión (%)
1	66.5	57	11.67
2	66.5	54	12.31
3	57	51	11.18
4	55	50	11

Tabla 6-12. Porcentaje de expansión del lecho Filtrante

En la siguiente grafico 6-7 se muestra la representación de los resultados de la expansión del medio filtrante de la batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo.

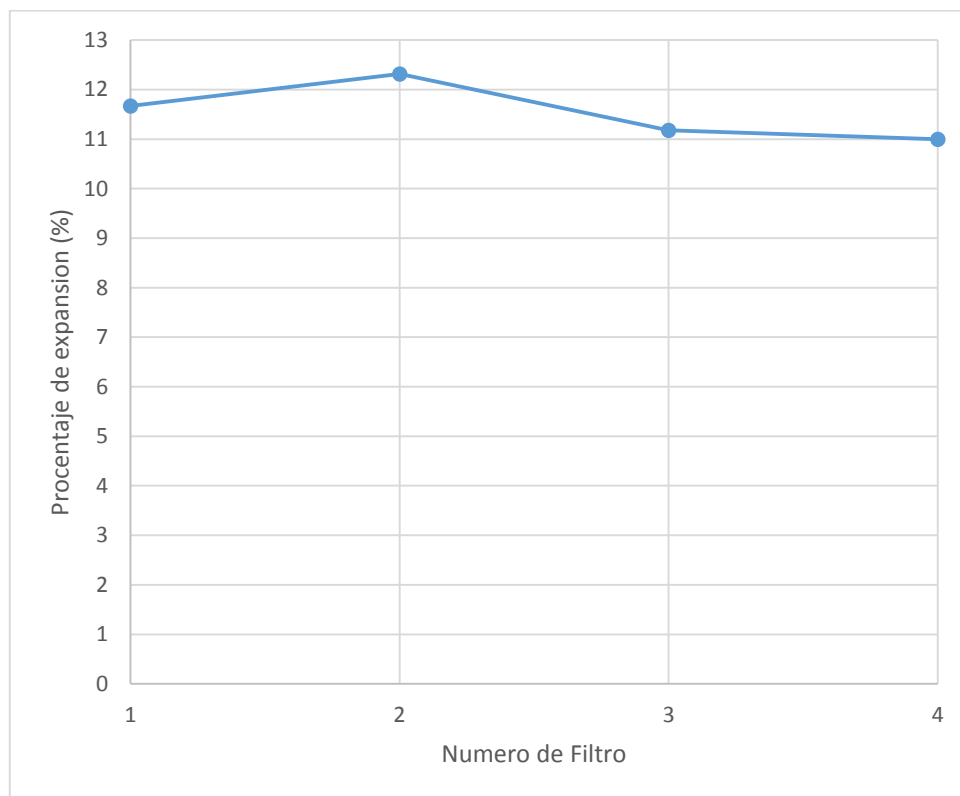


Grafico 6-7. Curva de la expansión del medio filtrante

6.3.2. Duración del proceso de lavado.

Los datos de turbiedad obtenidos en el momento del retro lavado de los cuatro filtros se muestran en la siguiente tabla 6-13 así como también los tiempos respectivos en los que fueron tomadas las muestras.



Fig. 6-5a Determinación de la Duración del proceso de lavado



Fig. 6-5b Frascos para la determinación de la Duración del proceso de lavado

Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)			
	F1	F2	F3	F4
1	85	119	105	63
2	70	158	100	37
3	44	54	43	22
4	34	20	19	12
5	29	6	15	8
6	11	6	9	7
7	10	8	11	9
8	8	5	9	8
9	6	2	11	6
10	1	0	11	5
11	1	1	8	8
12	0	2	10	7
13	0	1	3	2
14	0	0	3	0
15	0	0	3	0
16	0	0	0	0

Tabla 6-13. Duración del Proceso de Lavado

Se grafica los datos de turbiedad versus el tiempo en las gráficas 6-8 y 6-9:

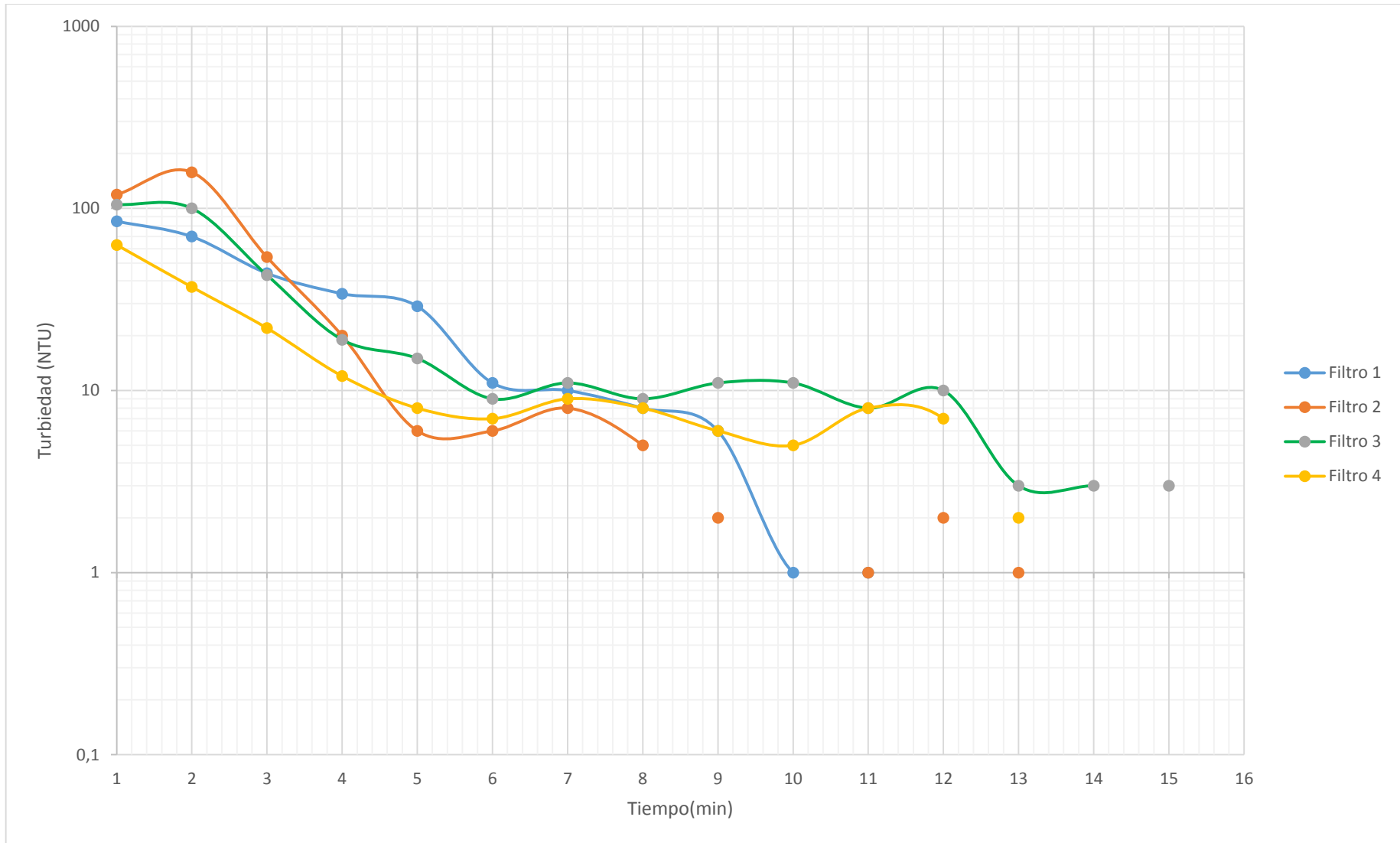


Grafico 6-8. Curva de la duración de proceso de lavado

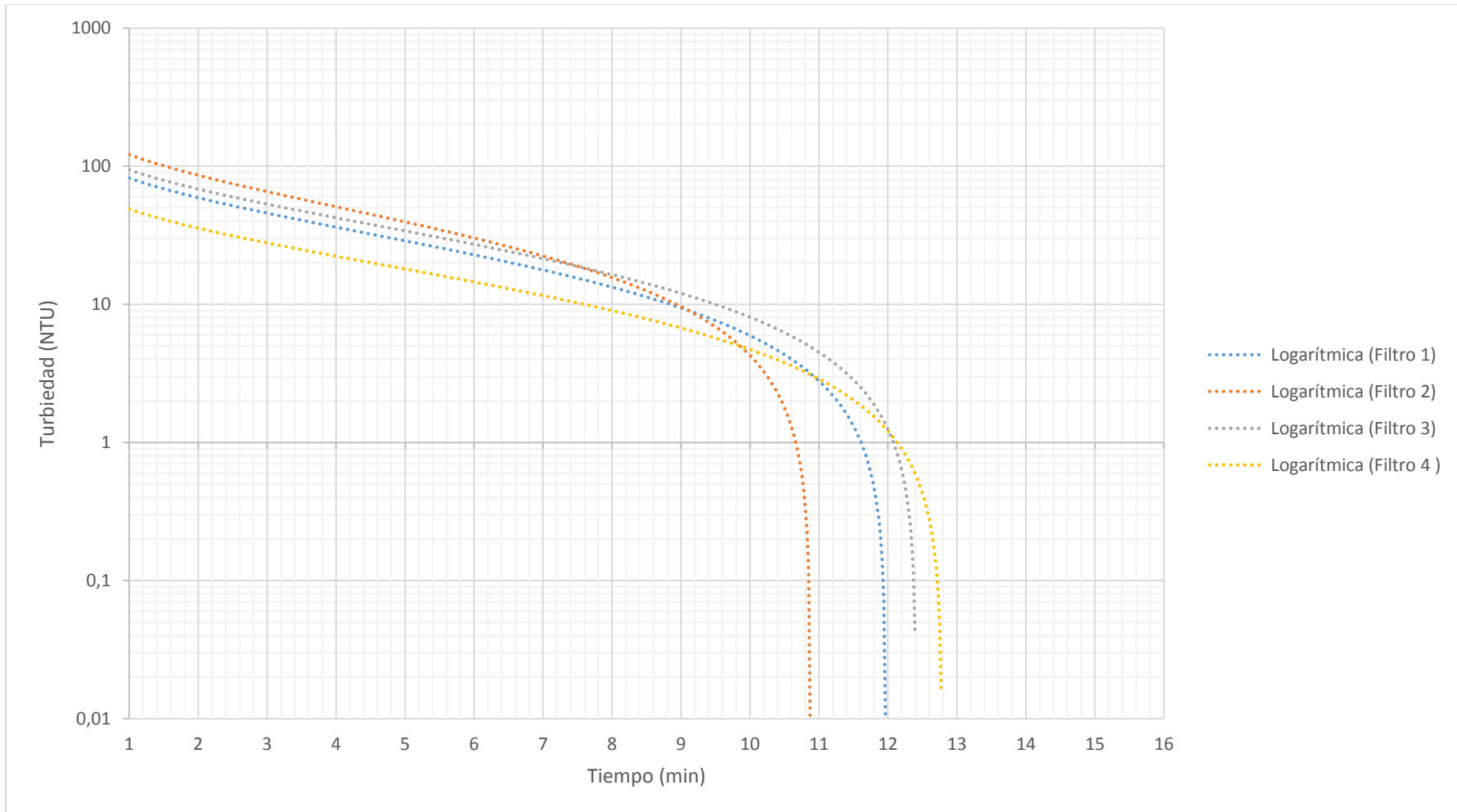


Grafico 6-9. Líneas de tendencia de la duración de proceso de lavado

6.3.3. Velocidad de lavado del Filtro

Los resultados de la velocidad de lavado de cada uno de los filtros, están dadas en la siguiente tabla 6-14, así como la representación gráfica 6-10.



FIG. 6-6 Filtro Vacío para la Determinación de la velocidad de lavado de un filtro

No. Filtro	Altura (cm)	Tiempo (s)	Velocidad de lavado (cm/s)	Velocidad de lavado (m/min)
1	43	40	1.08	0.65
2	46	45	1.02	0.61
3	49	39	1.26	0.75
4	50	41	1.22	0.73

Tabla 6-14. Velocidad de lavado del filtro

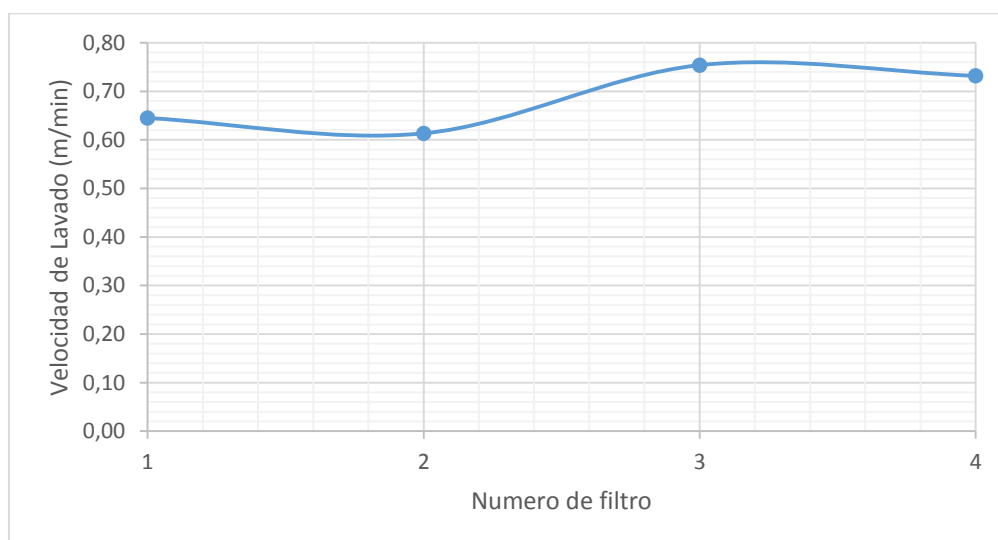


Grafico 6-10. Curva de la velocidad de lavado de los filtros



6.4. Características del medio filtrante.

6.4.1. Granulometría del medio filtrante.

Para este ensayo se realiza una selección de los tamices de forma ordenada de tal forma que se pueda obtener la mayor información posible mientras más tamices se usen. La granulometría se realizó en el laboratorio de suelos RyR.

En la tabla 6-15 se muestra los resultados del análisis granulométrico de la arena que se encuentra en los cuatro filtros que tiene la Planta de potabilización de la Junta de Bayas. Los cuales se representan en el gráfico 6-11.

Tamiz		Peso retenido acumulado	Peso retenido parcial	%Acumulado
No.	mm			
200	0.075	0	0	0
120	0.125	0.5	1	0.041
100	0.149	0.9	0	0.061
80	0.180	9.9	9	0.121
60	0.250	15.9	6	0.927
50	0.297	51.5	36	7.25
40	0.452	256.4	205	48.38
30	0.590	460.7	204	89.632
20	0.850	492.1	31	96.799
16	1.190	496.1	4	98.01
10	2.000	496.4	0	99.82
8	2.380	496.5	0	99.9
4	4.760	496.7	0	100

Tabla 6-15. Análisis granulométrico de la arena

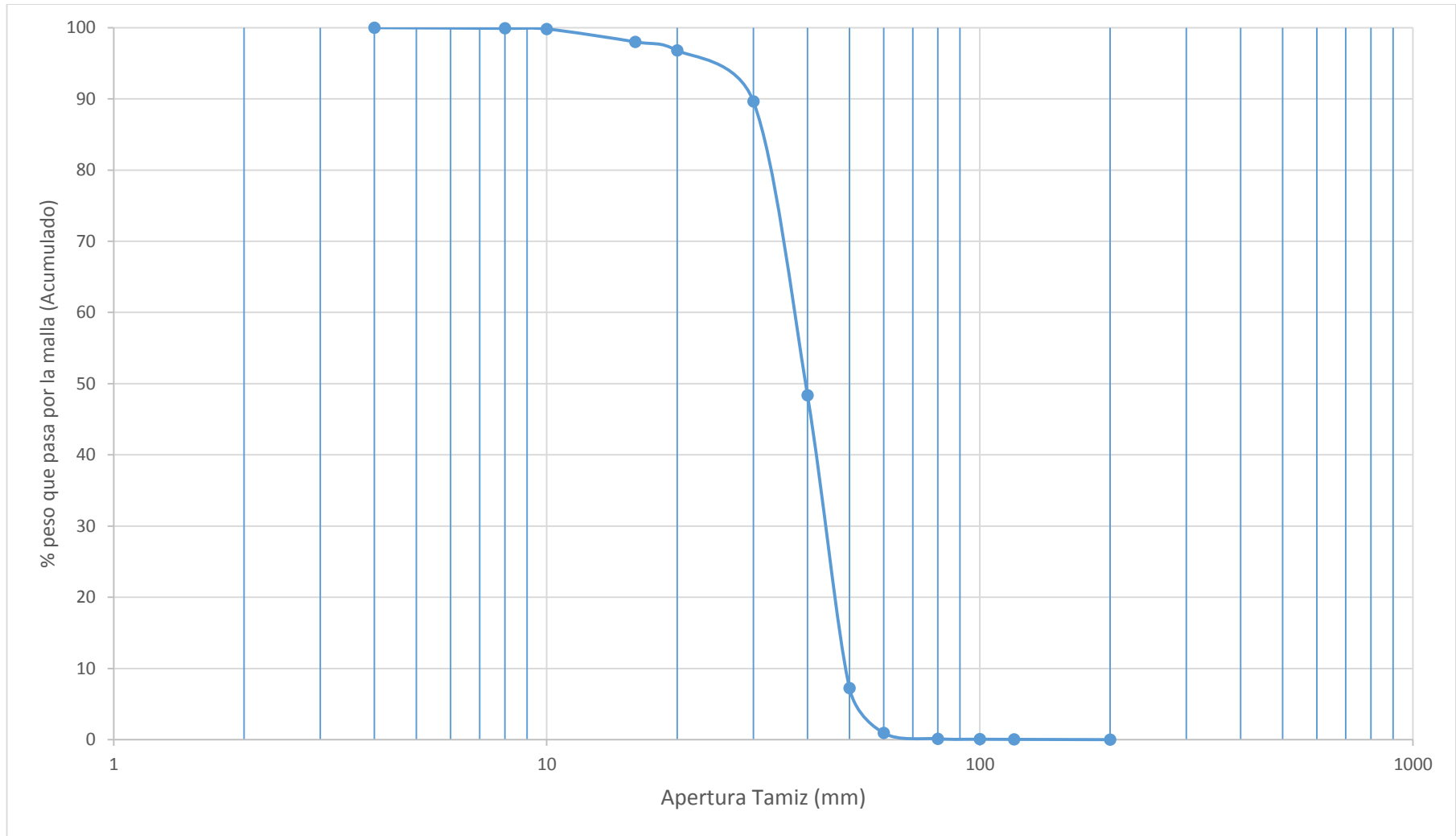


Gráfico 6-11. Curva de la Granulometría de la arena

Del grafico 6-11 se determina el diámetro o tamaño efectivo (D10), que es la abertura del tamiz por donde pasa el 10% de la muestra, así como el coeficiente de uniformidad de la arena, el cual se calcula mediante la diferencia entre D60 y D10, que integra el medio filtrante de los cuatro filtros, en la siguiente tabla 6-16 se muestra dichos resultados.

Características	
Peso total final (g)	496.7
Peso Inicial (g)	500
Diámetro efectivo (D 10)	0.307
D60	0.472
Coeficiente de Uniformidad	1.539

Tabla 6-16. Características de la arena

6.4.2. Bolas de Lodo.

Siguiendo los pasos descritos en el apartado 5.5.2. se analizó el medio filtrante para la obtención de bolas de lodo que pueden estar presentes en los cuatro filtros y tenemos los resultados de los ensayos en la tabla siguiente 6-17:

No. Filtro	Volumen de la Muestra Vm (ml)	Incremento del Volumen en la Probeta Δm (ml)	%Bolas de lodo
1	500	0	0
2	500	0	0
3	500	0	0
4	500	0	0

Tabla 6-17. Bolas de lodo

6.4.3. Espesor del medio filtrante.

Se determinó la altura del medio filtrante y los resultados se muestra en la tabla 6-19 a continuación y las gráficas 6-12 y 6-13:

Espesor del Medio filtrante (m)				
No. Filtro	1	2	3	4
Altura	0,57	0,54	0,51	0,5

Tabla 6-18. Espesor del medio filtrante

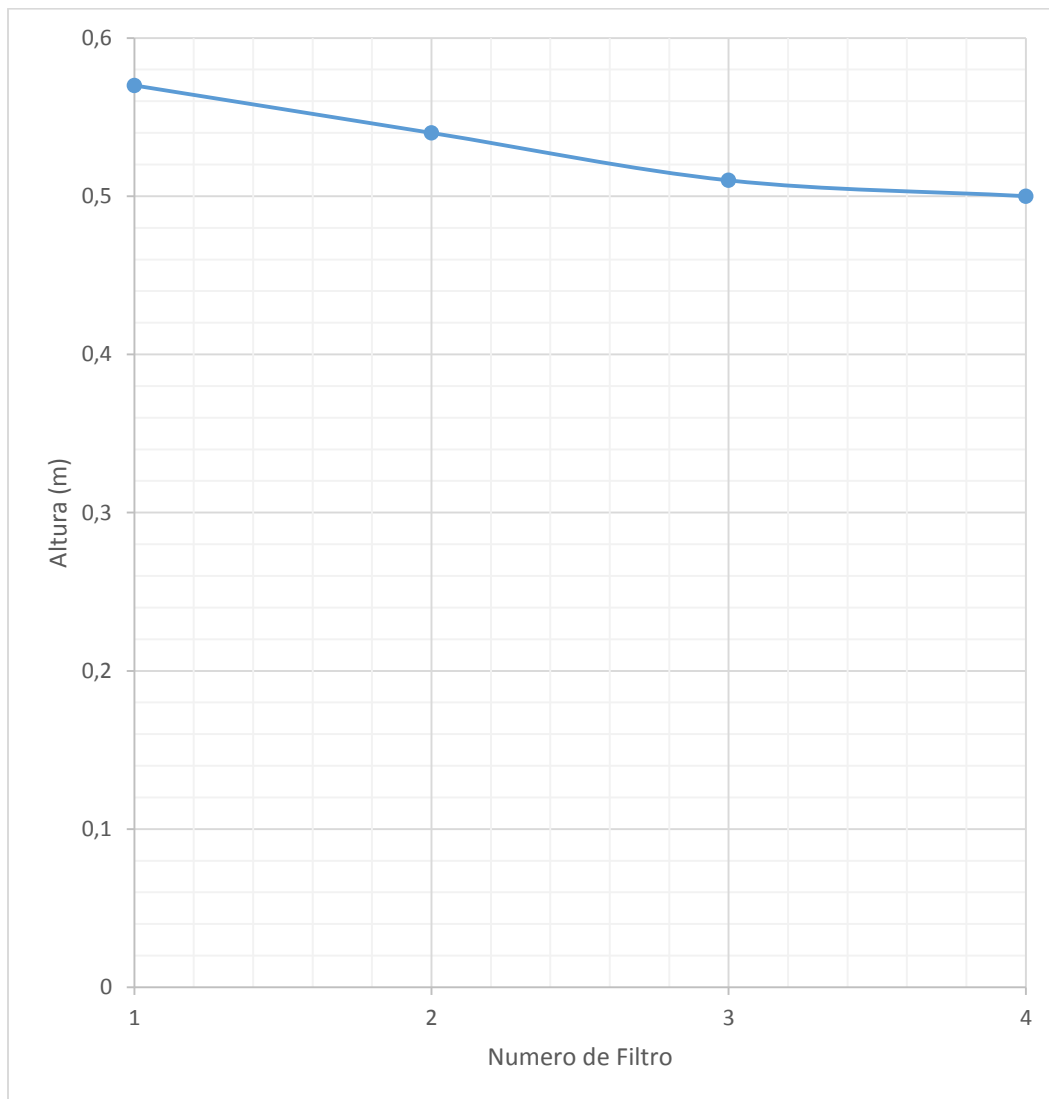


Grafico 6-12. Curva del espesor del medio filtrante

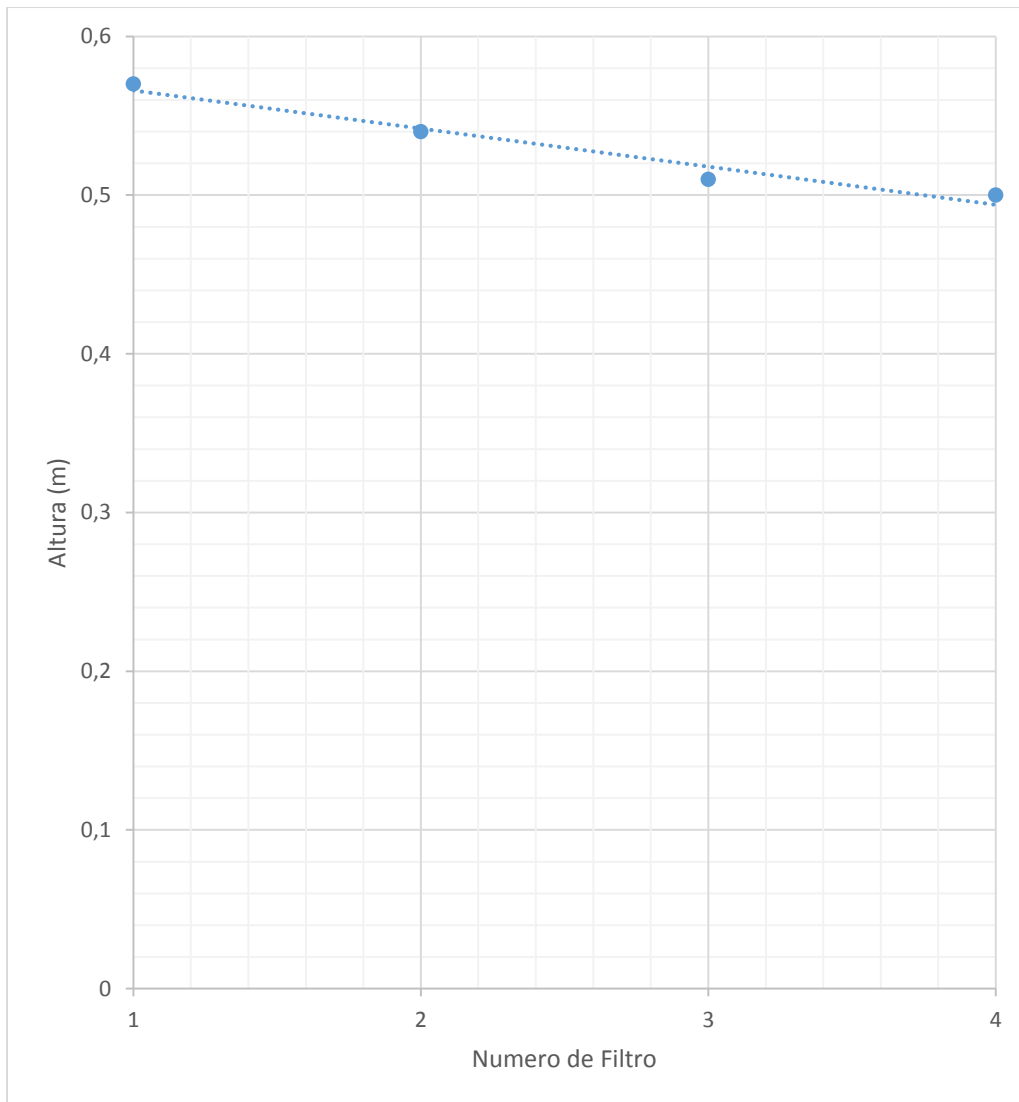


Grafico 6-13. Línea de tendencia del espesor del medio filtrante

CAPITULO 7

Análisis y

Resultados

7.1. Eficiencia del proceso.

Para realizar este análisis de eficiencia se toma como referencia la información durante un año de datos de turbiedad de agua filtrada de los archivos de control de proceso (Ver Anexo 1), así como también los datos de caudal. En base a esta información se realiza promedios cuya información se detalla a continuación en la siguiente tabla 7-1.

Promedio 2014		
Mes	Caudal (l/s)	Turbiedad (NTU)
Junio	13.389	0.583
Julio	13.147	0.946
Agosto	13.022	0.129
Septiembre	14.34	0.306
Octubre	11.692	0.1
Noviembre	12.513	0.969
Diciembre	13.888	0.344
Promedio 2015		
Mes	Caudal (l/s)	Turbiedad (NTU)
Enero	12.55	0.158
Febrero	13.098	0.049
Marzo	11.927	0.039
Abril	14.187	0.585
Mayo	14.73	0.177
Junio	15.388	0.08

Tabla 7-1. Eficiencia del proceso
Fuente: Autor

Interpretación de los resultados

De acuerdo con los datos obtenidos, los valores de turbiedad de agua filtrada es menor a 1NTU, lo cual se puede decir que el agua es de buena calidad ya que se encuentra muy por debajo de 5NTU que es el límite máximo permitido de acuerdo a la norma de requisitos de agua potable dada por el INEN

En tres ocasiones se tiene valores de turbiedad menores a 0,1NTU; si se excede este valor según lo recomendado por la CEPIS se puede indicar que la planta se encuentra en una zona de parasitosis endémica lo cual produce problemas en los consumidores.

El valor del caudal promedio que se trabaja en la Planta de Potabilización de la Junta de Bayas es de 13,37 l/s. El caudal de diseño de la Planta de Potabilización de Bayas es de 20 l/s y no se trabaja con lo que está diseñado por que puede causar problemas en todo el proceso disminuyendo así las carreras de filtración ya que como actualmente no se encuentra con un lecho filtrante adecuado ni en buenas condiciones, el filtro con este caudal se satura más rápido y la eficiencia de Potabilización disminuye.

7.2. Característica del proceso de filtración

Los resultados obtenidos se comparan con los rangos recomendados por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria del Ambiente (CEPIS).

7.2.1. Análisis de la velocidad de Filtración o tasa de filtración.

En la tabla 7-2 se indica las velocidades de filtración de cada uno de los filtros y se observa que en el caso de todos los filtros tiene un valor mucho menor a lo recomendado por la CEPIS, así también está en desacuerdo a lo que se ha propuesto en la Planta de Potabilización que tiene un valor de 250 m³/m²d.

Comparando los cuatro filtros, el filtro número dos es el que tiene el valor más bajo con 102,86 m³/m²d y el filtro número uno es el filtro que tiene el valor más alto con 115,2 m³/m²d.



No. Filtro	Velocidad de Filtración			
	Datos Obtenidos de los ensayos	CEPIS	Diseño	Unidad
1	115,2	240-360	250	m ³ /m ² d
2	102,86	240-360	250	m ³ /m ² d
3	110,77	240-360	250	m ³ /m ² d
4	108	240-360	250	m ³ /m ² d

Tabla 7-2. Velocidad de Filtración.

Interpretación de los resultados.

Se obtuvo una tasa de filtración promedio de los cuatro filtros de 109,21 m³/m² d, teniendo aquí en cuenta que hay filtros que trabajan con mayor velocidad de filtración que otros filtros. En conclusión se puede decir que la batería de tasa declinante y lavado mutuo de la Planta de Potabilización de la junta de Bayas trabaja muy por debajo por lo propuesto por la norma CEPIS y por el diseño de la planta.

La sumatoria del caudal de filtración da un valor de 13,75 l/s, lo cual se encuentra acorde con lo que normalmente se trabaja en la Planta de potabilización ya que en promedio anual la Planta trabaja con 13,37 l/s.

7.2.2. Análisis de la calidad de Filtrado inicial.

Cuando las turbiedades iniciales son altas, se puede asumir que el lavado no fue el adecuado. El causante pudo haber sido que falta más tiempo de lavado, la expansión del lecho no fue el correcto o la altura del lecho filtrante es menor a lo recomendado.

Interpretación de los resultados

En la tabla 7-3 se muestra los valores recomendados por la norma CEPIS y los obtenidos por los ensayos.

No. Filtro	Calidad de Filtrado Inicial		
	Datos Obtenidos de los ensayos	CEPIS	Unidad
1	0,51-0,87	<1	NTU
2	0,34-0,58	<1	NTU
3	0,38-0,64	<1	NTU
4	0,36-0,85	<1	NTU

Tabla 7-3. Calidad de Filtrado Inicial.

Analizando el cuadro anterior podemos observar que en todos los cuatro filtros la turbiedad cumple con lo recomendado por la CEPIS.

7.2.3. Duración de las carreras de filtración.

Analizando el registro de control de los filtros (Ver Anexo 2) se determina que los filtros se lavan consecutivamente. Existen varios criterios por los que se hace el lavado de los filtros, en la planta de potabilización de la parroquia Bayas se realiza el lavado cuando el caudal que abastece al canal de aislamiento no tiene la cantidad suficiente para cumplir con lo requerido, también es recomendable lavar el filtro cuando ha llegado a las 30 horas según lo recomendado por la CEPIS, y por ultimo cuando ya no se filtra más, es decir cuando el medio filtrante se ha saturado y llegue al nivel máximo de operación siguiendo lo visto en el apartado 4.1.3.

A continuación en la tabla 7-4 se muestra los criterios de la carrera de filtración de la planta de potabilización de Bayas comparados con las recomendaciones de las normas CEPIS.



No. Filtro	Requisitos de la Carrera de Filtración		
	Datos Obtenidos de los ensayos	CEPIS	Unidades
1	47,55	30-50	horas
2	44,29	30-50	horas
3	41,58	30-50	horas
4	35,24	30-50	horas

Tabla 7-4. Duración de las Carreras de Filtración.

Interpretación de los resultados.

La forma de operación de la batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo de la planta de potabilización de Bayas se está realizando en un promedio de 42,17 horas lo cual se encuentra dentro del rango establecido por las normas CEPIS.

7.3. Características del sistema de lavado.

7.3.1. Expansión del medio filtrante.

La expansión del lecho es uno de los parámetros importantes que se debe observar durante el lavado de los filtros. Esta expansión está directamente relacionada con la velocidad de agua de lavado y también con el diámetro del medio granular.

Interpretación de los resultados.

La expansión en las 4 unidades se muestra en la tabla 7-5, lo cual se hace la comparación con los parámetros con las normas CEPIS.



No. Filtro	Expansión del Medio Filtrante		
	Datos Obtenidos de los ensayos	CEPIS	Unidad
1	11,67	25-30	%
2	12,31	25-30	%
3	11,20	25-30	%
4	11	25-30	%

Tabla 7-5. Expansión del Medio Filtrante.

Los valores de expansión están muy por debajo de los parámetros recomendados por la norma CEPIS, la expansión más baja es del filtro 4 con el 11% y la que tiene la expansión más alta comparado con los demás es el filtro 2 con un 12,3%.

Si existe una buena velocidad, la expansión del filtro hará que los granos se rocen mutuamente y así se desprenda la película adherido a las partículas. Resultando en una buena calidad de lavado después del proceso.

A todo esto hay que acotar que desde el armado de los 4 filtros pertenecientes a la planta de agua potable de la Junta de Bayas que se realizó a finales de junio del 2014, no se ha realizado ningún control de ningún parámetro en estos filtros lo cual también afecta a que la expansión no sea la correcta por falta de control.

7.3.2. Duración del proceso de lavado.

El tiempo de lavado varía con la calidad de agua cruda que entra al proceso de potabilización, es decir; en época donde existe mucha lluvia, la turbiedad se encuentra alta y el tiempo de lavado necesario suele ser mayor comparado a cuando existe época de menos lluvia.

Interpretación de los resultados.

Cuando se realiza el lavado de los filtros, la turbiedad del agua de lavado aumenta rápidamente llegando a valores un poco mayores a 100 UNT, a medida que el lecho se limpia y transcurre el tiempo, las cifras van disminuyendo hasta llegar a valores de cero en todos los filtros.

Al estudiar las curvas de las gráficas 6-7 y 6-8 en el apartado 6.3.2. Se determina que el tiempo adecuado de lavado es de 9 minutos ya que en este punto se encuentra el punto de inflexión de la curva; el tiempo actual utilizado para el lavado de los filtros en la planta de potabilización de la junta parroquial de Bayas es de 10 minutos. Sería deseable que en este tiempo de nueve minutos se obtenga turbiedades menores a 5NTU.

El tiempo óptimo para el lavado de la batería de los filtros es de nueve minutos, ahorrándonos un minuto lo cual significa que ahorramos un caudal de 13,04 l/min.

A continuación presentamos el cuadro 7-6 donde se muestra el tiempo recomendado por la norma CEPIS y la propuesta por el ensayo obtenido.

No. Filtro	Tiempo Óptimo de Lavado		
	Datos Obtenidos de los ensayos	CEPIS	Unidad
1	9	10-15	Minuto
2	9	10-15	Minuto
3	9	10-15	Minuto
4	9	10-15	Minuto

Tabla 7-6. Tiempo óptimo de lavado.

El tiempo óptimo de lavado óptimo se encuentra por debajo de lo recomendado por la CEPIS.

7.3.3. Velocidad de lavado.

La velocidad de retro lavado recomendado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), es de 0,6-0,8m/min.

Interpretación de los resultados.

En la tabla 7-7 se presenta los parámetros propuestos por la CEPIS y los valores obtenidos en los ensayos.

No. Filtro	Velocidad de lavado		
	Datos Obtenidos de los ensayos	CEPIS	Unidad
1	0,65	0,6-0,8	m/min
2	0,61	0,6-0,8	m/min
3	0,75	0,6-0,8	m/min
4	0,73	0,6-0,8	m/min

Tabla 7-7. Velocidad de lavado.

Los 4 filtros de la Planta de Potabilización de la Junta de Bayas se encuentran dentro del rango propuesto por la CEPIS, el filtro número dos tiene la velocidad menor comparado con los restantes, y el filtro tres tiene la velocidad mayor.

Los filtros tres y cuatro son las que tienen velocidades altas por lo que puede presentar una exagerada expansión el lecho filtrante y esto a su vez hace que se pierda el material filtrante.

Características del Medio Filtrante.

7.3.4. Granulometría del medio filtrante.

A medida que el filtro se lava repetidamente, se pierde cada vez material filtrante que en este caso es arena, ya sea por el canal de lavado o por los drenajes. El material más fino se pierde sobre todo cuando apenas entra en funcionamiento el lavado.

Interpretación de los resultados.

Del análisis granulométrico de la arena los resultados de la prueba se representan en la tabla 7-8, (Ver Anexo 3) que se compara con lo recomendado por la norma CEPIS.

Característica de la arena			
Tamaño Efectivo (mm)		Coeficiente de Uniformidad	
Datos Obtenidos de los ensayos	CEPIS	Datos Obtenidos de los ensayos	CEPIS
0,30	0,45 -0,55	1,53	≤1,5

Tabla 7-8. Características de la Arena.

El tamaño o diámetro efectivo de la arena está muy por debajo de lo recomendado por la norma CEPIS en comparación con el coeficiente de uniformidad que se encuentra ligeramente por arriba del valor recomendado.

El tamaño efectivo nos indica que hay arena de tamaño menor por lo que el lecho se expande de una manera inadecuada y no permite el correcto lavado de los filtros, existiendo vacíos entre la arena. El coeficiente de uniformidad nos indica que existe arena uniforme en todo el filtro.

7.3.5. Bolas de Lodo.

No existen bolas de Lodo en el lecho filtrante de los 4 filtros, la causa es porque en el mes de Mayo existió un colapso de los cuatro filtros y se procedió a un lavado de la arena, eliminando así la presencia de bolas de lodo que pudieron haber existido.

Interpretación de los resultados.

En la tabla 7-9 se muestra las condiciones del medio filtrante según el porcentaje de bolas de lodo que se encuentre en el medio filtrante.

% de volumen de bolas de lodo	Condiciones del Medio Filtrante
0-0.1	Excelente
0.1-0.2	Muy Bueno
0.2-0.5	Bueno
0.5-1.0	Regular
1.0-2.5	De Regular a Malo
2.5-5.0	Malo
7.5	Muy Malo

Tabla 7-9. Bolas de Lodo.

Todos los filtros se encuentran en excelentes condiciones en cuestión de la cantidad de las bolas de lodo.

7.3.6. Espesor del Medio Filtrante.

El siguiente cuadro 7-10 muestra los espesores obtenidos en los ensayos y los recomendados por la norma CEPIS, así como los de diseño.

No. Filtro	Espesor del Medio Filtrante			
	Datos Obtenidos de los ensayos	Diseño	CEPIS	Unidad
1	0.57	0.60	0.6-0.8	m
2	0.54	0.60	0.6-0.8	m
3	0.51	0.60	0.6-0.8	m
4	0.50	0.60	0.6-0.8	m

Tabla 7-10. Espesor del medio filtrante.



Interpretación de los resultados.

Los cuatro filtros poseen un valor de espesor de lecho filtrante menor en todos los casos con una altura promedio de 0,527m a lo recomendado por la norma CEPIS y la altura para lo que fue construido.

Los filtro número 3 y 4 son los que presentan mayor pérdida de altura de lecho filtrante con una diferencia de 0,1m comparado con el diseño y una diferencia de 0,2m con lo recomendado con la norma aproximadamente. El filtro número 1 tiene una diferencia de 0,03m con el diseño y 0,13m con lo establecido por la norma siendo en este caso una perdida menor comparado con el resto de los lechos filtrantes.

Cuando el lecho filtrante se expande demasiado, la arena se pierde con cada reto lavado el cual se puede depositar en el falso fondo o en el canal de aislamiento. Se pude evitar la pérdida del lecho si se controla cada seis meses su profundidad y se las aplica medidas correctivas.

7.4. Evaluación General.

Una vez evaluado los filtros podemos hacer una calificación de los mismos basados en las comparaciones con las normas CEPIS, esto de manera empírica. Para lo cual se toma en cuenta cada parámetro que analizamos de los filtros y cuantitativamente lo consideramos valores desde el 1-5, siendo el mayor valor cinco, si cumple con las normas propuestas con la CEPIS y un valor de cero si está totalmente alejado.

1	Muy mal
2	Mal
3	Regular
4	Bien
5	Muy bien

Tabla 7-11. Calificación de filtros.



No. Filtro	Velocidad de filtración	Calidad de filtrado inicial	Duración de las carreras de filtración	Expansión del medio filtrante	Duración del proceso de lavado	Velocidad de lavado	Granulometría del medio filtrante	Bolas de barro	Espesor del medio filtrante	Calificación
1	3	5	5	2	4	5	3	5	4	4.00
2	3	5	5	2	4	5	3	5	3	3.89
3	3	5	5	2	4	5	3	5	2	3.78
4	3	5	5	2	4	5	3	5	2	3.78

Tabla 7-12. Calificación de las características de los filtros.
Fuente: Autor

No. filtro	Condición
1	Eficiente
2	Bueno
3	Bueno
4	Bueno

Tabla 7-12. Condición de los filtros

Según esta calificación de manera cuantitativa y empírica podemos decir que el filtro uno es eficiente pero no excelente. Los filtros dos, tres y cuatro son filtros con condiciones buenas pero no eficientes ni tampoco deficientes.

7.5. Medidas a realizar para mejorar la operación de los Filtros.

7.5.1. Aumento de la Tasa de Filtración.

Para aumentar la tasa de filtración, se debe principalmente mejorar la granulometría de la arena y la altura de la arena que se encuentre en el filtro. Se debe hacer un cambio inmediato ya que la granulometría está muy por debajo de lo recomendado por la CEPIS al igual que la altura y por esto es que la velocidad también es menor

Cabe mencionar que la construcción de los filtros en la planta originalmente es para el uso de lechos dobles, es decir de 40 cm antracita y 20 cm de arena, pero por

problemas económicos solo se colocó arena y esto ha provocado una alteración en la tasa de filtración.

7.5.2. Aumento de la expansión del medio filtrante.

La expansión del lecho filtrante depende del caudal de lavado y del peso de los granos de arena. Este último varía de acuerdo con el diámetro del material granular. En la batería de filtros existe una expansión promedia de 11,55% el cual se encuentra muy por debajo de lo recomendado, por lo que el medio filtrante llega a su expansión recomendada si la granulometría de la arena es la adecuada y su altura también lo sea. De igual manera la tasa y caudal de filtración deben ser los recomendados por la norma CEPIS para este tipo de filtros

Un factor más, es que al encontrarse un lecho filtrante de solo arena la expansión no es adecuada de acuerdo a lo que fue diseñado originalmente. Los filtros deben ser dobles de antracita y arena para mejorar la expansión del medio.

7.5.3. Tiempo óptimo de lavado.

Para mejorar el tiempo óptimo de lavado se debe tomar en cuenta los ensayos realizados en el apartado 6.3.2 el cual se muestra que con 9 minutos el filtro se encuentra lavado y por cada minuto ahorrado se ahorra 13,04 l/min de caudal de agua filtrada.

Vale mencionar que en el momento que se está lavando los lechos filtrantes, el operador debe rastrillar y así lograr una mejor eficiencia. Evitar punzar la arena ya que puede causar levantamiento y se escape por la acción de lavado y posarse en el canal.



7.5.4. Mejoramiento de la granulometría de lecho filtrante.

Es necesario el cambio de arena ya que el diámetro efectivo es inferior a lo recomendado por la Norma CEPIS. Como se analiza en el apartado 6.4.1

7.5.5. Espesor del medio filtrante óptimo

El espesor del medio filtrante es menor comparado con lo recomendado por la norma CEPIS por lo que en el filtro uno se debe añadir 3 cm más de arena para que cumpla con la Norma CEPIS y el diseño.

Al filtro numero dos se debe añadir 6 cm para que cumpla con la norma. Al filtro tres y cuatro se le debe añadir 9 cm y 10 cm respectivamente para que cumpla con lo recomendado.



CAPITULO 8

Conclusiones y

Recomendaciones

8.1. Conclusiones.

- La batería de filtros tiene una eficiencia en su proceso de filtración buena, obteniendo agua en condiciones aceptables, ya que los valores de turbiedad de agua filtrada se encuentra en un rango menor de 1 NTU.
- Las unidades de filtración están trabajando con un promedio de tasa de filtración de $109,21 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$ lo cual es un valor muy bajo y con un caudal acorde con lo que entra a la planta.
- En cuanto a lo relacionado con la calidad de filtrado inicial de agua producida por la batería de filtros, según los ensayos realizados se puede asegurar que los valores se encuentran por debajo de 1NTU lo cual cumple con el rango establecido por la norma CEPIS.
- La carrera de filtración está dentro del rango propuesto por la norma CEPIS con un promedio de carrera de filtración de 42.17 horas.
- Según los ensayos realizados se determinó que la expansión de los cuatro filtros se encuentran muy por debajo de lo recomendado por la norma CEPIS con un promedio de expansión de 11.55 %
- El tiempo óptimo de lavado para las unidades de filtración es de 9 minutos lo cual es menor a lo que se está usando en la planta, igualmente es menor a lo propuesto por la norma CEPIS. En esta operación de tiempo de lavado optimo en el minuto menos que usamos para el lavado, nos ahorramos 13,04 l/min.
- El resultado de los ensayos nos muestran que la velocidad de lavado de las unidades tienen un valor dentro de lo propuesto por la norma CEPIS el cual tiene el valor que oscila entre 0,6-0,8 m/min para todos los filtros.
- El análisis granulométrico nos indica que el tamaño efectivo de la arena se encuentra por debajo de lo establecido por la norma CEPIS con un valor de



0,307mm. En cuanto al coeficiente de uniformidad el valor se encuentra ligeramente por encima de lo establecido por la norma con un valor de 1,53.

- El lecho filtrante de las unidades de filtración carecen de bolas de lodo por lo que según la norma CEPIS, el lecho filtrante de la batería de filtros se encuentra en unas excelentes condiciones según su clasificación.
- Las unidades de filtración presentan espesores del medio filtrante muy por debajo de lo que originalmente se diseñó en la Planta de Potabilización y así mismo debajo de los valores recomendados por la norma CEPIS con valores desde 0,5-0,57 m.
- Los filtros uno y dos presentan condiciones eficientes, los filtros tres y cuatro presentan condiciones buenas, todo basado en la tabla 7-12 del apartado 7.4. debemos tomar las precauciones siguiendo lo recomendado en el numeral 7.5 necesarias para que los filtros eficientes no pasen a condiciones buenas, más bien esto debe ir mejorando y que todos los filtros se encuentren en condiciones excelentes.

8.2. Recomendaciones

- Estos ensayos que se han propuesto deberían determinarse 2 veces por año, ya que como bien se sabe, el filtro y el medio filtrante se van deteriorando con el tiempo.
- Tomar muestras directamente desde el canal de aislamiento tres veces por día para verificar si la turbiedad es menor que 1NTU y así asegurarse que el agua filtrada es de buena calidad.
- Alternar el orden de lavado cada mes para evitar que los filtros se colmaten y así tener un mejor lavado y velocidad de lavado. El caudal también mejorará ya que el último filtro que se lavan en la batería, tomara un buen caudal de los filtros anteriormente lavados.
- Los criterios que se debe tener para lavar un filtro es primero ver si ya no existe el caudal suficiente para abastecer el canal de aislamiento, luego es tomar en cuenta las 30 horas recomendadas según la CEPIS, y por último es recomendable medir una altura que oscile entre 66-62 entre el espejo de agua en el filtro y la parte superior del filtro, ya que esta altura significa que la carga hidráulica del filtro es la máxima y que al pasar las horas esta altura no cambia significativamente y que ya no seguirá filtrando agua porque el filtro ya se encuentra colmatado.
- Se recomienda el cambio de manera inmediata de la arena ya que la altura del lecho filtrante es muy bajo y la expansión es muy poca, así también la granulometría no cumple con las normas establecidas.
- Se debe modificar el tiempo óptimo de lavado, de diez minutos a nueve minutos, ya que ahorraremos 13,04 l/min de agua por cada minuto de lavado y de esta manera mejorara la calidad de filtración.

- Se debe hacer una vez al mes un lavado del filtro de manera estricta, es decir dejamos seco el filtro y el medio filtrante y procedemos al retrolavado por el tiempo ya recomendado de nueve minutos, ya que con este procedimiento estaremos lavando todo el lecho filtrante de mejor manera y evitaremos la formación de bolas de lodo a futuro.
- Se debe adquirir equipo adecuado para el análisis de la turbiedad, un turbidímetro de alta precisión que permita medir hasta centésimas ya que con el colorímetro HACH DR/890 nos da lecturas solo en unidades y no nos permite tener un control más riguroso del agua filtrada.
- Al momento de ejecutar el retrolavado se recomienda rastrillar el medio filtrante para que aumente la eficiencia de lavado.
- Responsabilidad de los operadores para llenar los registros a tiempo y hacer las pruebas necesarias de la calidad de agua, para tener un mejor registro de cómo se está trabajando en la planta potabilizadora.
- Se espera que este trabajo sirva para mejorar la calidad de agua potable que se produce en la Junta de agua potable de la parroquia Bayas.



Bibliografía.

1. Pérez. F. Urrea. M. (2004). *Abastecimiento de aguas*. Recuperado de: http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6015/mod_resource/content/1/Tema_04_CHARACTERISTICS_OF_WATER.pdf
2. Azcona. A; Gonzales. M. (2012). *Propiedades y funciones biológicas del agua*. Recuperado de: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/458-2013-07-24-Carbajal-Gonzalez-2012-ISBN-978-84-00-09572-7.pdf>
3. Delgado. J. (27.03.2012). *Las moléculas de agua, la química y la vida*. Recuperado de: <http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&cad=rja&uact=8&sqi=2&ved=0CFYQFjAJ&url=http%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F3958691.pdf&ei=EC1VVeL2Au7IsATvqoCACQ&usg=AFQjCNEsDsZpbHvXFNjoleV42M6pBQuCTg>
4. University of Arizona. (07.2005). *La química del agua*. Recuperado de: <http://www.biologia.arizona.edu/biochemistry/tutorials/chemistry/page3.html>
5. OMS. (2006). *Guías para la calidad de agua potable*. Recuperado de: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/es/
6. Barrenechea. A. *Aspectos Físicoquímicos de la calidad del agua*. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomol/uno.pdf>
7. NTE INEN (2011). *Agua potable. Requisitos*. Recuperado de: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1108.2011.pdf>
8. Doc4Net. *Fundamentos sobre química del agua*. Recuperado de: <http://www.doc4net.es/doc/2451599683288>
9. Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/11DisenoDePlantasPotabilizadorasTipoDeTecnologiaSimplificada.pdf>
10. Casero.D. (2008). *Potabilización del Agua*. Recuperado de: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45471/componente45469.pdf
11. Tecsup Virtual-Cepis. *Operación, mantenimiento y control de las principales unidades de tratamiento de agua*. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan3/042019/042019-04.pdf>
12. CEPIS. (2005). *Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada*. Recuperado de: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomol/filtrarap1.html>
13. Arboleda. V. (1981). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Recuperado de: http://www.catalogo.uni.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=121726&shelfbrowse_itemnumber=204312
14. West Virginia University. (01.2009). *Filtración lenta con arena*. Recuperado de: http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/spanish/slow_sand_filtration_DWFSOM143.pdf
15. Martin. I, Salcedo. R. (1988). *Operaciones separación sólido fluido*. Recuperado de: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/11/tema5_operaciones%20separacion.pdf



16. Salazar. L. (2012). *Diseño de plantas potabilizadoras*. Recuperado de: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358040/Contenido_en_linea_Disenio_de_Plantas_Potabilizadoras/ficha_tcnica.html.
17. Mateus. M, Moreno. C. (11.2013). *La filtración en forma de una Operación de separación industrial*. Recuperado de: <http://es.slideshare.net/ivanramma/filtracion-4>.
18. Arboleda. J. (1992). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Recuperado de: <http://www.worldcat.org/title/teoria-y-practica-de-la-purificacion-del-agua-j-arboleda-valencia-rev-de-arnul-rendon-soto/oclc/644711639#relatedsubjects>.
19. Palencia. A. (2004). *Diseño de una planta de purificación de agua para consumo humano*. Recuperado de: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6217/2/112762.pdf>.
20. Maldonado. V. (04.10.2009). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Recuperado de: http://www.ingenieriasanitaria.com/web15/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=58.
21. Canepa de Vargas. L. (2009). *Filtración lenta como proceso de desinfección*. Recuperado de: <http://www.elaguapotable.com/FILTRACION%20COMO%20PROCESO%20DE%20DESINFECCION.pdf>.
22. Espinoza. T. (21.05.2013). *Caracterización de un filtro de arena para potabilización de agua, mediante la obtención de curvas experimentales basadas en los parámetros de funcionamiento*. Recuperado de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24442>.
23. Cepis/OPS. (2006). *Tratamiento de agua para consume humano*. Recuperado de: http://www.ingenieriasanitaria.com/web15/manual2/ma2_cap5.pdf.
24. Triana. J. (2009). *Diseño del sistema de filtración con la tecnología de falsos fondos marca ITT Leopold para la implementación del lavado de filtros*. Recuperado de: http://www.ingenieriasanitaria.com/web15/manual2/ma2_cap5.pdf.
25. García. F. *evaluación de la batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo de la planta de tratamiento de agua potable*. Recuperado de: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0CEQQFjAGahUKEwiSw4zrjqrHAhVBjg0KHfGHAUo&url=http%3A%2F%2Fdspace.uce.edu.ec%2Fjspui%2Fbitstream%2F123456789%2F2630%2F1%2Ftm4300.pdf&ei=7K3OVZKdM8GcNvGPhtAE&usg=AFQjCNGmAO4FM6Er-zCwX4zaW3UhY694hw&bvm=bv.99804247,d.eXY>.
26. Maldonado. V. (04.10.2009). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Recuperado de: http://www.ingenieriasanitaria.com/web15/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=58.



Anexos



Anexo1

JAAPRB									
CONTROL DE CALIDAD									
JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS									
Operador:								Documentación CC-01	
Fecha	AGUA CRUDA	SEDIMENTADORES		FILTROS				AGUA TRATADA	
		SEDIMENTADOR 1	SEDIMENTADOR 2	FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 3	FILTRO 4	TANQUE DE RESERVA	
	Caudal (l/s)								
	Turbiedad (NTU)							Turbiedad	
	Color (UC)							Color	
Hora	pH							pH	
	Temperatura °C							Cloro resid.	
Observaciones:									



Anexo 2

Fecha	Hora	Caudal	Filtros Lavados			Sulfato			Polimero			Cloro		Nivel Tanque	Operador
			Numero	Hora	Tiempo lavado	Hora	Cantidad	T.Q	Hora	Cantidad	# Tanque	Hora	Cantidad		
22-08-2015	06H00	14	1	07H54	10 min									3/4.	
22-08-2016	08H00	14												1	
22-08-2017	10H00	14												1	
22-08-2018	12H00	14	2	11H30	10 min									1	
22-08-2019	14H00	14												1	
22-08-2020	16H00	14												1	
22-08-2021	18H00	14												1	
22-08-2022	20H00	14												1	
22-08-2023	22H00	12												1	
Observaciones:															


Fecha	Hora	Caudal	Filtros Lavados			Sulfato			Polimero			Cloro		Nivel Tanque	Operador
			Numero	Hora	Tiempo lavado	Hora	Cantidad	T.Q	Hora	Cantidad	# Tanque	Hora	Cantidad		
23-08-2015	06H00	12												1/2.	
23-08-2016	08H00	15	3	8H00	10 min									3/4.	
23-08-2017	10H00	14												1	
23-08-2018	12H00	14	4	12H00	10 min									1	
23-08-2019	14H00	14												1	
23-08-2020	16H00	14												1	
23-08-2021	18H00	14												1	
23-08-2022	20H00	14												1	
23-08-2023	22H00	10												1	
Observaciones:															

Fecha	Hora	Caudal	Filtros Lavados			Sulfato			Polimero			Cloro		Nivel Tanque	Operador
			Numero	Hora	Tiempo lavado	Hora	Cantidad	T.Q	Hora	Cantidad	# Tanque	Hora	Cantidad		
24-08-2015	06H00	12												1/2.	
24-08-2016	08H00	15												3/4.	
24-08-2017	10H00	14												1	
24-08-2018	12H00	14												1	
24-08-2019	14H00	14	1	13H00	10 min									1	
24-08-2020	16H00	14	2	16H42	10 min									1	
24-08-2021	18H00	14												1	
24-08-2022	20H00	14												1	
24-08-2023	22H00	10												1	
Observaciones:															

Fecha	Hora	Caudal	Filtros Lavados			Sulfato			Polimero			Cloro		Nivel Tanque	Operador
			Numero	Hora	Tiempo lavado	Hora	Cantidad	T.Q	Hora	Cantidad	# Tanque	Hora	Cantidad		
25-08-2015	06H00	12												1/2.	
25-08-2016	08H00	15												3/4.	
25-08-2017	10H00	14	3	10H17	10 min									1	
25-08-2018	12H00	14												1	
25-08-2019	14H00	14	4	14H45	10 min									1	
25-08-2020	16H00	14												1	
25-08-2021	18H00	14												1	
25-08-2022	20H00	14												1	
25-08-2023	22H00	10												1	
Observaciones:															



Anexo 3



LABORATORIO DE SUELOS
 Fray Marchena y Av. Loja (Urb. Antonio Borrero V. lote 29)
 Telfs.: 2385-371 0999773004 (PRINCIPAL: Cuenca)
 Av. Oriente y 3 de Noviembre (Sector San Francisco)
 Telfs.: 2247-645 0985713834 (SUCURSAL: Azogues)

Ing. Iván Riquetti V.
 M.Sc. Geotecnia
 Oklahoma State University

Ing. Juan Pablo Riquetti M.
 M.Sc. Geología y Geotecnia
 Universidad de Cuenca

ANALISIS GRANULOMETRICO

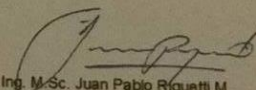
PROYECTO:	ANALISIS DE ARENA PARA FILTRO
SOLICITADO POR:	PAUL CARANGUI
USO:	FILTROS DE AGUA POTABLE
MUESTRA:	ARENA FECHA: 5 DE NOVIEMBRE DE 2015

CONTENIDO DE AGUAS	PESO HUM	PESO SECO	PESO	CONTEN	VALOR
	+ CAPS	+ CAPS	CAPSULA	DE AGUA	MEDIO
NORMA:	53,28	52,82	13,25	1,16	
ASTM D-2216	56,94	56,45	13,41	1,14	1,15

	TAMIZ		PESO	PESO	%	%
	No.	mm.	RETEN. ACUMUL.	RETEN. PARCIAL	RETENIDO	PASA
ANALISIS GRANULOMETRICO NORMA: ASTM C-136 AASHTO T-27	3/8 "	9,530	0,0	0	0	100
	No. 4	4,760	0,0	0	0	100
	No. 8	2,380	0,5	1	0	100
	No. 10	2,000	0,9	0	0	100
	No. 16	1,190	9,9	9	2	98
	No. 20	0,850	15,9	6	3	97
	No. 30	0,590	51,5	36	10	90
	No. 40	0,425	256,4	205	52	48
	No. 50	0,297	460,7	204	93	7
	No. 60	0,250	492,1	31	100	0
	No. 80	0,180	496,1	4	100	0
	No. 100	0,149	496,4	0	100	0
	No. 120	0,125	496,5	0	100	0
	No. 200	0,075	496,7	0	100	0
	Pasa No.200		(2,4)			

Wt. TOTAL DEL MATERIAL:	500,00
Wt. MATERIAL - CONT. HUMD:	494,31
Wt. SECO ANTES DEL ENSAYO:	500,00
Wt. SECO DESP. DEL ENSAYO:	494,31
ERROR DE ENSAYO:	0,00%

Diam. Efectivo =	0,307
Coef. de Unifor. =	1,539
Peso especifico =	2,560
Modulo de finura =	6,62



Ing. M.Sc. Juan Pablo Riquetti M.