

Nombre  
66623

T  
LIBRE  
2013

**Universidad de Valparaíso**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**



**Estimación de la Evolución de la Pérdida de Carga  
en un Filtro Rápido.**

Por

**Larry Raymond Laing Barrientos.**

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en  
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil.

Profesor Guía: José Manuel Gundelach Lagos.

Diciembre, 2013.

R. 16079

- ENSAYO  
- TRATAMIENTO DEL AGUA  
- SEDIMENTACIÓN

## Agradecimientos

*En primer lugar quiero agradecer a Dios por otorgarme perseverancia y sabiduría para poder llegar a concretar este logro, en segundo lugar doy gracias a mi familia que fue un apoyo en todo mi proceso estudiantil, especialmente a mi hermano Eugenio Castro.*

*Doy gracias a todas las personas que confiaron en mí. Especialmente a mis amigos de colegio y universidad, por todo el cariño, y compañía que me entregaron en toda la época universitaria y escolar.*

*Doy gracias a todos mis compañeros de la selección de basquetbol y natación en la que participe durante todos mis años universitarios, de los cuales pude formar unos lazos de amistad muy importante para mi vida y que guardo con muchos recuerdos y nostalgia. También agradecer a mis entrenadores Nicolás Aguad y José Luis Verdejo, los cuales son unos excelentes formadores deportivos.*

*También quiero agradecer a mi profesor guía José Manuel Gundelach quién fue un pilar fundamental para poder llevar a cabo este trabajo de título, con una excelente voluntad otorgándome todo su apoyo y conocimientos.*

*Doy gracias a la empresa ESVAL por facilitarme los instrumentos con los que pude realizar el desarrollo de este trabajo de título y su excelente disposición que tuvieron como empresa.*

# Índice General

Índice General .....	1
Glosario .....	7
Lista de abreviaturas o siglas .....	8
Lista de símbolos.....	9
Lista de figuras .....	10
Lista de tablas .....	11
Resumen.....	13
Introducción.....	14
Planteamiento del problema.....	14
Objetivos .....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos .....	15
CAPÍTULO I.Tratamiento de agua potable con sus procesos.....	16
1.1 Captación del agua. ....	17
1.1.1 Fuente de abastecimiento superficial .....	17
1.1.1.2 Toma de agua .....	17
1.1.1.3 Rejas para sólidos flotantes.....	17
1.1.1.4 Cámaras de captación.....	17
1.1.1.5 Conducción.....	17
1.1.1.6 Dispositivos para la regulación del flujo .....	17
1.2 Agregado de coagulantes.....	18
1.2.1 Coagulantes metálicos.....	18
1.2.2 Coagulantes polielectrolitos.....	18
1.2.3 Coagulación por barrido.....	18
1.3 Coagulación. ....	19
1.3.1 Hidráulicos .....	19
1.3.1.1 Resalto hidráulico o salto hidráulico.....	19
1.3.1.2 Bombas .....	19
1.3.1.3 Orificios .....	19
1.3.2 Coaguladores mecánicos.....	19

1.3.2.1	Coaguladores de eje vertical y horizontal .....	20
1.3.2.2	Coaguladores de turbina.....	20
1.4	Floculación.....	20
1.4.1	Floculadores hidráulicos.....	21
1.4.1.1	Floculadores de flujo horizontal y vertical .....	21
1.4.2	Floculadores mecánico .....	21
1.4.2.1	Eje horizontal o vertical.....	21
1.4.2.2	Oscilante y reciprocante .....	21
1.5	Sedimentación o decantación.....	21
1.5.1	Baja tasa.....	22
1.5.2	Tasa media .....	22
1.5.3	Alta tasa.....	22
1.6	Filtración.....	22
1.6.1	Filtros lentos.....	22
1.6.2	Filtros rápidos.....	22
1.7	Agregado químico.....	23
1.8	Distribución.....	23
1.9	Calidad del agua.....	23
1.9.1	Requisitos según la OMS y otros países.....	23
1.9.1.1	Requisitos físicos.....	23
1.9.1.2	Requisitos químicos.....	24
1.9.1.3	Requisitos bacteriológicos.....	24
1.9.2	Requisitos del agua potable según la norma NCH409/1 of 2005.....	25
1.9.2.1	Requisitos físicos.....	25
1.9.2.2	Requisitos químicos.....	25
1.9.2.3	Requisitos radioactivos.....	26
1.9.2.4	Requisitos bacteriológicos.....	26
1.10	Planta de tratamiento de agua potable Concón.....	26
1.10.1	Planta N°1.....	26
1.10.2	Planta N°2.....	27
1.10.3	Planta N°3.....	27
	CAPÍTULO II. Teoría de la filtración.....	28
2.1	Filtración.....	28

2.2 Historia de la filtración.....	28
2.3 Mecanismos de la filtración.....	28
2.3.1 Transporte de partículas dentro de los poros.....	29
2.3.1.1 Cernido.....	30
2.3.1.2 Sedimentación.....	30
2.3.1.3 Intercepción.....	30
2.3.1.4 Difusión.....	30
2.3.1.5 Impacto inercial.....	30
2.3.2 Mecanismos de adherencia a los granos.....	31
2.3.2.1 Fuerza de Van der Waals.....	31
2.3.2.2 Fuerza electroquímica.....	31
2.3.2.3 Puente químico.....	31
2.4 Clasificación de los filtros.....	32
2.4.1 Filtración rápida o filtración lenta.....	32
2.4.2 Filtración según la fuerza de filtración.....	33
2.4.2.1 Filtración por gravedad.....	33
2.4.2.2 Filtración por presión.....	34
2.4.2.3 Filtración por centrifugación.....	34
2.4.2.4 Filtración por vacío.....	35
2.4.3 Clasificación según los requerimientos del agua cruda.....	35
2.4.3.1 Como tratamiento único.....	35
2.4.3.2 Como tratamiento de diversas etapas.....	35
2.4.3.3 Filtración directa.....	35
2.4.3.4 Filtración convencional.....	36
2.4.4 Clasificación de filtros según su flujo.....	36
2.4.4.1 Filtración de tasa constante.....	36
2.4.4.2 Filtración con tasa declinante.....	36
2.4.4.3 Filtración con vasocomunicadores de nivel de agua variable.....	36
2.4.4.4 Filtración con pérdida de carga variable con vertedero de control.....	36
2.4.5 Clasificación de los filtros de acuerdo a los componentes del lecho filtrante....	36
2.4.5.1 Medio filtrante.....	36
2.4.5.2 Soporte del medio filtrante.....	37
2.4.6 Clasificación según su sistema de drenaje.....	38

2.4.6.1 Fondo falso con boquillas .....	38
2.4.6.2 Fondo Wheeler .....	39
2.4.6.3 Tuberías perforadas .....	39
2.4.6.4 Bloques Leopold .....	40
2.4.6.5 Placas porosas .....	40
2.4.7 Clasificación de filtros según su sistema de lavado .....	41
2.4.7.1 Limpieza manual .....	41
2.4.7.2 Sistemas de retrolavado .....	41
2.5 Modelos matemáticos de la filtración .....	42
2.6 Modelo de ensuciamiento propuesto por Iwasaki e Ives .....	42
2.6.1 Variables de la ecuación de Ives .....	43
2.6.2 Solución de la ecuación de Ives .....	45
2.6.3 Nueva ecuación de Ives .....	46
2.7 Ecuaciones para la pérdida de carga en un filtro .....	47
2.7.1 Pérdida de carga inicial .....	47
2.7.2 Casos para la aplicación de la ecuación de la pérdida de carga inicial .....	48
2.7.2.1 Cuando los granos son esféricos y de diámetro uniforme .....	48
2.7.2.2 Cuando los granos no son esféricos, pero son de diámetro uniforme .....	49
2.7.2.3 Cuando los granos no son esféricos ni de diámetro uniforme y tampoco están estratificados en el lecho .....	49
2.7.2.4 Cuando los granos no son esféricos, ni de diámetro uniforme, pero están estratificados en el lecho .....	50
2.7.3 Pérdida de carga por colmatación del lecho .....	50
2.7.3.1 Variables para la ecuación de la pérdida de carga final .....	52
<b>CAPÍTULO III. Relación de la turbiedad con los sólidos totales suspendidos .....</b>	<b>53</b>
3.1 Turbiedad .....	53
3.2 Medición de la turbiedad .....	53
3.2.1 Unidad Nefelométrica .....	53
3.2.2 Unidad de Jackson .....	54
3.2.3 Unidad de silicio .....	55
3.3 Floc .....	55
3.3.1 Características físicas .....	55

3.3.2 Características químicas.....	55
3.3.3 Influencia de la temperatura.....	56
3.3.4 Dureza del floc.....	56
3.3.4.1 Floc blando.....	56
3.3.4.2 Floc duro.....	56
3.3.4.3 Floc recomendado.....	56
3.4 Balance de masas.....	57
3.5 Sólidos suspendidos totales.....	57
3.5.1 Ensayos de sólidos suspendidos totales.....	57
3.5.2 Procedimiento del ensayo.....	58
3.5.3 Datos para laboratorio.....	59
3.5.4 Resultados entregados por el laboratorio.....	60
3.6 Método de ajuste por mínimos cuadrados.....	63
<b>CAPÍTULO IV. Resultado del ensayo según el balance de masas.....</b>	<b>65</b>
4.1 Descripción del filtro utilizado.....	65
4.2 Metodología de trabajo.....	67
4.3 Materiales del ensayo.....	67
4.4 Descripción del ensayo.....	68
4.4.1 Medición de la altura de agua.....	68
4.4.2 Medición de la turbiedad.....	68
4.4.3 Medición de las tasas.....	68
4.5 Medición de la pérdida de carga inicial para el diseño.....	69
4.5.1 Condiciones de diseño para la pérdida de carga inicial.....	69
4.5.1.1 Condiciones iniciales de la arena.....	69
4.5.1.2 Condiciones iniciales de la grava para soporte.....	69
4.5.2 Pérdida de carga a la salida del filtro.....	70
4.5.3 Pérdida de carga producida por el sistema de drenaje.....	70
4.6 Nivel de agua real para el inicio de la filtración.....	71
4.7 Ensayos para determinar la evolución de la pérdida de carga en un filtro.....	72
4.7.1 Mediciones de la turbiedad.....	72
4.7.2 Medición de la variación del nivel de agua dentro del filtro.....	75
4.7.3 Mediciones de las tasas de filtración.....	77

4.7.4 Cálculo del depósito específico.....	81
4.7.5 Relación de SST acumulados en el lecho filtrante.....	83
4.7.5.1 Cálculos de los caudales de entrada.....	83
4.7.5.2 Cantidad SST acumulados en el lecho filtrante.....	85
4.7.6 Relación de la masa acumulada con el depósito específico.....	86
4.8 Utilización de la ecuación de la pérdida de carga final.....	89
4.9 <b>Comentarios</b> .....	89
<b>Conclusiones</b> .....	90
<b>Bibliografía</b> .....	91

# Glosario

<b>Abrasión:</b>	Degaste producto de los esfuerzos de roce entre partículas
<b>Afluente:</b>	Agua que entra a un depósito o entra en una etapa
<b>Agua cruda:</b>	Agua en estado natural sin tratar
<b>Agua tratada:</b>	Agua que ha sido sometido algún tratamiento para mejorar su calidad
<b>Batería de filtros:</b>	Conjuntos de filtros que conforman una planta de tratamiento de agua potable
<b>Carrera de filtración:</b>	Intervalo de tiempo entre dos lavados consecutivos en un filtro en funcionamiento
<b>Colmatación:</b>	Acumulación de sedimentos en un lecho filtrante
<b>Coloide:</b>	Partícula de tamaño generalmente definido entre 1 y 1000 $\mu\text{m}$ que no sedimenta por efecto de la fuerza de gravedad
<b>Efluente:</b>	Agua que sale en un depósito o termina una etapa
<b>Filtro:</b>	Estructura o dispositivo diseñado para efectuar el proceso de filtración
<b>Floc:</b>	Resultado de la unión de partículas, formando un coloide en suspensión gracias a un Coagulante
<b>Lecho filtrante:</b>	Material granular con superficie porosa capaz de retener partículas para el efecto de filtración
<b>Solución química:</b>	Mezcla de dos o más componentes químicos formando un compuesto químicamente estable

## Lista de abreviaturas o siglas

<b>Bq:</b>	Unidad que mide la actividad radioactiva
<b>CAPRE:</b>	Centro América, Panamá y República Dominicana
<b>CEPIS:</b>	Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del medio ambiente
<b>CGS:</b>	Sistema cegesimal de unidades
<b>JTU:</b>	Unidad de Jackson para medir la turbiedad
<b>mv:</b>	Mili voltio
<b>NMP:</b>	Número muy probable
<b>NTU:</b>	Unidad nefelométrica para medir la turbiedad
<b>OMS:</b>	Organización Mundial de la Salud
<b>PTA:</b>	Planta de tratamiento de agua potable
<b>UFC:</b>	Grado de contaminación de un ambiente
<b>UPC:</b>	Unidad de Platino – Cobalto para medir el color

## Lista de símbolos

$A$  = Área del filtro

$C_e$  = Coeficientes de esfericidad

$D_c$  = Diámetro del grano

$d_i$  = Diámetro promedio entre dos tamices

$f$  = constante adimensional igual a 5

$g$  = Gramos

$h$  = Pérdida de carga

$h_0$  = Pérdida de carga inicial

$h_f$  = Pérdida de carga final

$K$  = coeficiente de pérdida

$L$  = Profundidad del lecho filtrante = Longitud de conducto

$mg$  = miligramos

$Q$  = Caudal

$s$  = Segundos

$S_0$  = Factor de forma

$V$  = Volumen

$x_i$  = Proporción de arena retenida

$\epsilon_0$  = Porosidad inicial

$\lambda$  = Eficiencia de un filtro

$\lambda_i$  = Eficiencia inicial

$\mu m$  = Micro metro

$\nu$  = viscosidad cinemática

$\sigma$  = Depósito específico

$V_i$  = Velocidad intersticial

$V_s$  = Velocidad de filtración

## Lista de figuras

Figura 1- Principales etapas del tratamiento del agua potable. ....	16
Figura 1.2- Unión de partículas producto del agregado de coagulante Ref: 1.....	18
Figura 1.4- Floculadores mecánicos con sistemas giratorios Ref:CEPIS.....	20
Figura 1.5- Decantador de tasa media Ref: PTA Concon.....	21
Figura 1.6- Sistema productivo de agua potable. Planta de tratamiento ESVAL Con Con .....	27
Figura 2.1- Mecanismos de transporte del floc en un lecho filtrante Ref: CEPIS.....	29
Figura 2.2- Intercepción. Ref: CEPIS.....	30
Figura 2.3- Impacto inercial. Ref: CEPIS .....	31
Figura 2.4- Fuerza de Van der Waals. Ref: CEPIS .....	31
Figura 2.5- Puente químico, desestabilización de los coloides. Ref: CEPIS .....	32
Figura 2.6- Filtro rápido de gravedad. Ref: CEPIS .....	33
Figura 2.7- Filtro a presión Ref: Manual técnico del agua .....	34
Figura 2.8- Filtro por centrifugación Ref: (Manual técnico del agua).....	34
Figura 2.9- Filtración por vacío Ref: Manual técnico del agua .....	35
Figura 2.10- Sistema de drenaje con boquillas para lavado con aire y agua. Ref: CEPIS.....	38
Figura 2.11- Fondo Wheeler. Ref: CEPIS.....	39
Figura 2.12-Tuberías perforadas. Ref: CEPIS.....	39
Figura 2.13- Fondo tipo, bloques Leopold. Ref: CEPIS.....	40
Figura 2.14- Placas porosas. Ref: CEPIS.....	41
Figura 2.15- Diferencia de concentraciones en un lecho filtrante. Ref: CEPIS.....	43
Figura 2.16- Evolución de la eficiencia con el depósito específico. Ref: CEPIS.....	46
Figura 2.17-Comparación de pérdida de carga real con la ideal. Ref: CEPIS.....	51
Figura 3.1- Mecanismo de funcionamiento del Nefelómetro. Ref: 23.....	53
Figura 3.2- Turbidímetro. Ref:23.....	54
Figura 3.2- Disco Secchi. Ref: 23 .....	54
Figura 3.3- Balance de masas.....	57
Figura 4.1- Filtro Utilizado. Ref: Planta de Concón.....	65
Figura 4.2- Superficie del lecho filtrante. Ref: Planta de Concón.....	66
Figura 4.3- Afluente del filtro utilizado flotador desconectado. Ref: Planta de Concón.....	66
Figura 4.4- Llenado del filtro utilizado Ref: Planta de Concón .....	67

## Lista de tablas

Tabla 1.1- Requisitos físicos internacionales.....	23
Tabla 1.2- Requisitos químicos internacionales.....	24
Tabla 1.3- Requisitos bacteriológicos internacionales.....	24
Tabla 1.4- Requisitos físicos NCh409/1 of 2005.....	25
Tabla 1.5- Requisitos Químicos NCH409/1 of 2005. Y elementos que aparecen en la norma NCH409/1 of 84.....	25
Tabla 1.6- Requisitos Radioactivos NCH409/1 of2005.....	26
Tabla 2.1- Límites de la Arena.....	37
Tabla 2.2- Especificaciones de la grava de soporte.....	38
Tabla 2.3- Tipos de lavado.....	42
Tabla 2.4- Coeficientes de esfericidad para partículas no esféricas.....	49
Tabla 2.5- Relación entre temperatura y viscosidad cinemática.....	52
Tabla 3.1- Conversiones de turbiedad.....	55
Tabla 3.2- Muestreo de turbiedades en el día 6 de septiembre del 2013.....	59
Tabla 3.3- Resultados del laboratorio.....	60
Tabla 3.4- Resultados del laboratorio con ceros.....	60
Tabla 3.5- Puntos Considerados para la Tendencia.....	62
Tabla 3.6- Mínimos cuadrados.....	63
Tabla 3.7- Puntos para determinar la varianza.....	63
Tabla 4.1- Pérdida de carga que ocurre producto de los factores que componen el filtro.....	71
Tabla 4.2- Mediciones de turbiedad de entrada y salida 8 de Octubre.....	72
Tabla 4.3- Mediciones 10 de octubre de turbiedad de entrada y salida.....	73
Tabla 4.4- Mediciones 17 de noviembre de turbiedad de entrada y salida.....	73
Tabla 4.5- Promedio de turbiedad de entrada 8 de octubre.....	74
Tabla 4.6- Promedio de turbiedad de entrada 10 de octubre.....	74
Tabla 4.7- Promedio de turbiedad de entrada 17 de Noviembre.....	74
Tabla 4.8- Altura de agua en el instante de medición 8 de Octubre.....	75
Tabla 4.9- Altura de agua en el instante de medición 10 de Octubre.....	75
Tabla 4.10- Altura de agua en el instante de medición 17 de noviembre.....	75
Tabla 4.11- Aumento de la pérdida de carga 8 de Octubre.....	76
Tabla 4.12- Aumento de la pérdida de carga 10 de Octubre.....	76
Tabla 4.13- Aumento de la pérdida de carga 17 de Noviembre.....	76
Tabla 4.14- Mediciones de tasas de filtración 8 de Octubre.....	77

Tabla 4.15- Mediciones de tasas de filtración 10 de Octubre .....	78
Tabla 4.16- Mediciones de tasas de filtración 17 de Noviembre.....	79
Tabla 4.17- Caudal de filtración y velocidad de filtración 8 de Octubre.....	80
Tabla 4.18- Caudal de filtración y velocidad de filtración 10 de Octubre.....	80
Tabla 4.19- Caudal de filtración y velocidad de filtración 17 de Noviembre.....	80
Tabla 4.19- Depósito específico 8 de Octubre.....	81
Tabla 4.20- Depósito específico 10 de Octubre.....	81
Tabla 4.21- Depósito específico 17 de Noviembre.....	82
Tabla 4.22- Volumen retenido 8 de Octubre.....	82
Tabla 4.23- Volumen retenido 10 de Octubre.....	82
Tabla 4.24- Volumen retenido 17 de Noviembre.....	83
Tabla 4.25- Caudal de entrada 8 de Octubre.....	83
Tabla 4.26- Caudal de entrada 10 de Octubre.....	84
Tabla 4.27- Caudal de entrada 17 de Noviembre.....	84
Tabla 4.28- Masa de SST acumulados en el lecho filtrante 8 de Octubre.....	85
Tabla 4.29- Masa de SST acumulados en el lecho filtrante 10 de Octubre.....	85
Tabla 4.30- Masa de SST acumulados en el lecho filtrante 17 de Noviembre.....	85
Tabla 4.31- Relación depósito específico con la masa acumulada.....	87

## Resumen

El siguiente trabajo consiste en analizar el comportamiento que tiene un filtro rápido dentro de una planta de tratamiento de agua potable, durante su producción. Para su mejor comprensión se analizan las etapas de tratamiento que tienen generalmente las plantas de agua potable, otorgando un mayor énfasis en la filtración.

Los filtros rápidos son utilizados con el fin de poder retener impurezas que conforman la turbiedad, que aún existen a pesar de los diferentes procesos previos de tratado. Este proceso de filtrado ocurre en una de las últimas etapas del tratamiento de agua potable, con el fin de que posteriormente se le añada cloro y flúor para su posterior distribución, por lo tanto, el control de la turbiedad en este punto es algo crítico, debido a que el agua potable necesita ser entregada a la población con turbiedades mínimas que cumplan con la norma vigente NCH409/1 Of 2005.

El problema consiste en que no existe una manera concisa de poder determinar la cantidad de turbiedad que puede retener un filtro a medida que pasa el tiempo, debido a que la literatura actual entiende como turbiedad retenida a lo que es depósito específico, factor que actualmente no se puede determinar. Debido a este problema se realizaron diversos ensayos en la planta de tratamiento de agua ubicada en la ciudad de Concón, Chile. Los ensayos consisten en determinar una relación de la turbiedad con los sólidos suspendidos totales que se encuentran en el agua, para poder realizar un balance de masas con respecto a la turbiedad del agua retenida en el filtro y poder determinar la cantidad de material que queda dentro de él a medida que pasa el tiempo hasta su posterior colmatación final, donde el filtro se rebalsa producto de que la pérdida de carga se incrementa a medida que el filtro se va ensuciando acumulando depósitos en los granos, debido a esto filtra menos agua.

Esto se realiza con la finalidad de poder cuidar los filtros en el sentido de no sobre exigirlos, para no tener daños producidos por las grandes presiones y entregarle una mayor utilidad cuando hay emergencias de grandes demandas de agua en tiempos de grandes turbiedades, como lo es el verano, donde se producen deshielos en la cuenca aportante, arrastrándose mucho sedimento de las montañas.

# Introducción

La tecnología de la filtración consiste básicamente en la remoción de partículas suspendidas, coloidales y micro-organismos presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso capaz de retener estas impurezas que afectan la calidad del agua. El objetivo básico que tiene la filtración es separar las impurezas que no han quedado retenidas en procesos previos de tratamiento dentro de una planta de agua potable, por lo que la eficiencia del trabajo de los filtros dependerá de la mayor o menor remoción de impurezas que quedan aún luego de los procesos de tratamiento anteriores, debido a que es la última etapa mecánica física de tratado. Es también la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad de la Norma Chilena 409/1 of 2005.

Pueden existir diferentes tipos de filtración, como los de baja carga superficial (filtros lentos) o alta carga superficial (filtros rápidos) con medios porosos (pastas arcillosas, papel filtro) o en medios granulares mixtos o únicos (arena, carbón o combinados); con flujo ascendente (de abajo hacia arriba) o descendente (de arriba hacia abajo) o mixto (en parte ascendente y en otra descendente) también puede haber filtros que trabajan a presión, pero en este caso va a depender de la carga hidráulica que exista antes del lecho filtrante.

## Planteamiento del problema

Actualmente, no existe en nuestro país un modelo o mecanismo técnico que permita conocer de manera fidedigna la evolución de la pérdida de carga en un filtro rápido de una planta de tratamiento de agua potable.

En base a lo descrito en el párrafo anterior, en este trabajo de título se busca determinar un modelo matemático que, a partir de ciertas variables, como la densidad del agua, material granular, porosidad del lecho filtrante, profundidad del lecho, dimensiones del filtro, velocidad de lavado, turbiedad removida, permita establecer la evolución de la pérdida de carga en el material filtrante.

# Objetivos

## Objetivo general

Determinar un modelo matemático que permita predecir la conducta de un filtro rápido dentro de una planta de agua potable.

## Objetivos específicos

Los objetivos específicos que permiten alcanzar el objetivo general son:

- Analizar los fenómenos físicos y químicos de los factores que inciden en el comportamiento de un filtro rápido en una planta de tratamiento de agua potable.
- Estimar la cantidad de material retenido dentro del material filtrante.
- Generar una relación entre la turbiedad del agua y los sólidos suspendidos totales contenidos en ella.
- Determinar la velocidad de filtrado en diferentes horas de la carrera del filtro.
- Estimar la cantidad de sólidos totales retenida en el tiempo de una carrera completa del filtro.
- Modificar la ecuación de Camp de la relación del depósito específico con la turbiedad.

# CAPÍTULO I

## 1. Tratamiento de agua potable con sus procesos.

El tratamiento de agua potable proveniente de cursos superficiales en Chile se rige principalmente por el siguiente orden, donde existen diferentes etapas de tratamiento [1]. Cada etapa con su respectivo proceso se explicará a continuación.

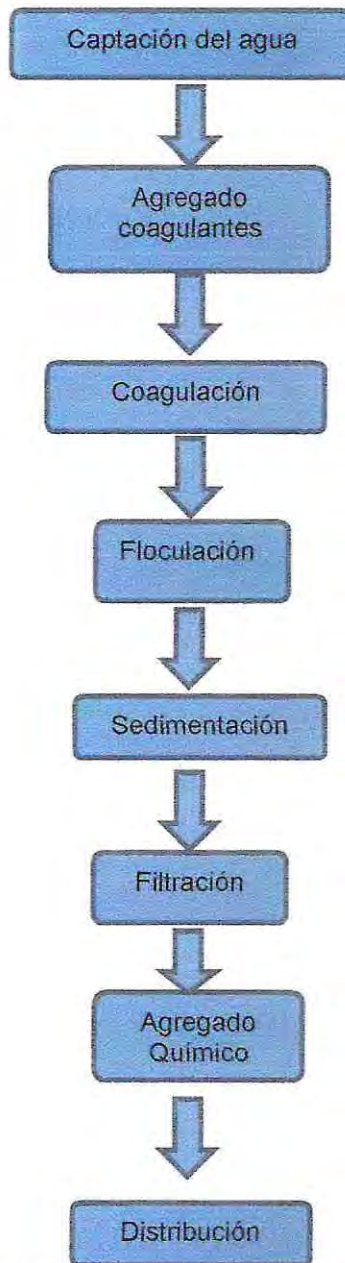


Figura 1. Principales etapas del tratamiento del agua potable.

La producción de agua potable, en Chile, es regulada por la Norma Chilena, de ahora en adelante NCh, NCh 777 (norma de diseño) y la norma NCh 409 (calidad del agua), por lo que tendrá que cumplir con ciertas características acordes a la normativa para su producción y distribución [1].

## **1.1 Captación del agua.**

Con respecto a la captación de agua, la literatura describe que existen dos tipos de procesos. El primero de ellos, corresponde a la fuente de abastecimiento superficial y el segundo, se remite a describir la fuente de abastecimiento subterránea. Para fines del presente trabajo, será sustentada teóricamente sólo la primera de ellas.

### **1.1.1 Fuente de abastecimiento superficial**

La NCh 777/1 Of 2008 evidencia los requisitos de diseño que debe tener una captación superficial. En Chile, más de un 85% de las captaciones son superficiales, por lo que se toman diferentes consideraciones para el diseño [2].

Los componentes de una estructura de captación, por su parte, se dividen en diferentes procesos, tales como:

- Toma de agua.
- Rejas para sólidos flotantes.
- Cámaras de captación.
- Conducción.
- Dispositivo para la medición de regulación del flujo.

#### **1.1.1.2 Toma de agua**

Estas tomas dependerán de las características geológicas, hidrológicas y topográficas de la zona o cuenca. Principalmente, se componen por captaciones laterales que funcionan como bocatoma, donde ingresa el agua para su posterior tratamiento [3].

#### **1.1.1.3 Rejas para sólidos flotantes**

Estas estructuras son las encargadas de separar todo material grueso que proviene aguas arriba de la captación de un río, por lo que tendrá que limpiarse cada cierto período de tiempo para no generar obstáculos en el recorrido del agua [3].

#### **1.1.1.4 Cámaras de captación**

Son las encargadas de recibir el agua captada y generar una menor fuerza de entrada para su conducción [3].

#### **1.1.1.5 Conducción**

Este proceso consiste en una tubería que conduce hacia los coaguladores y va a depender de la cota de entrada con respecto a la de salida y si es que esta necesita una bomba elevadora [3].

#### **1.1.1.6 Dispositivos para la regulación del flujo**

Corresponden a válvulas que sirven para regular el flujo de entrada hacia las conducciones [3].

## 1.2 Agregado de coagulantes.

El proceso de agregado de coagulantes dependerá, netamente, de la calidad que posea el agua cruda, que corresponde al agua proveniente del río y que no posee tratamiento alguno [4]. Esta condición del agua cruda, sumado al proceso de agregado coagulante, es lo que forma el "floc", al unirse a los coloides [5].

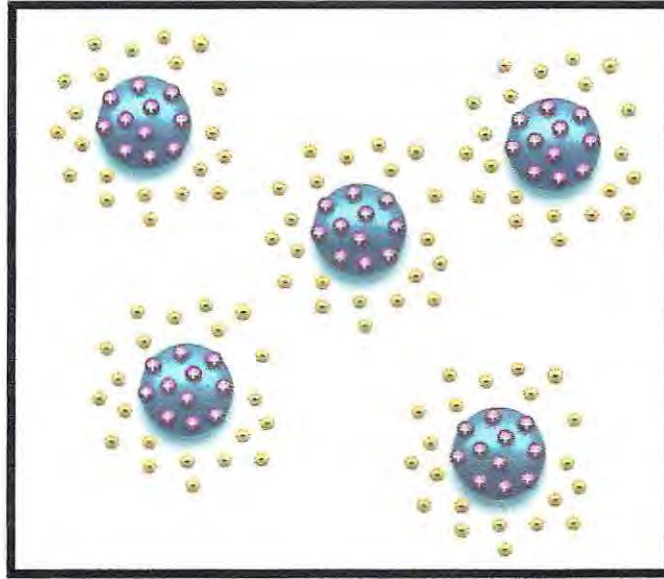


Figura 1.2 Unión de partículas producto del agregado de coagulante Ref. 1

Luego, los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos:

- Coagulantes metálicos.
- Polielectrolitos o ayudantes de coagulación.

### 1.2.1 Coagulantes metálicos

Estos coagulantes se pueden clasificar en:

- Sales de aluminio.
- Sales de hierro.

El uso de un coagulante en particular dependerá de su costo y modo de empleo. Además, dependerá del pH y la turbiedad del agua cruda [1].

### 1.2.2 Coagulantes polielectrolitos

Son sustancias químicas que ayudan a la coagulación ya que poseen carga positiva. Esta situación, neutralizará los sólidos que conforman la turbiedad debido a su carga negativa, produciendo una mayor cohesión y densidad entre las partículas que se van formando con los coagulantes metálicos, gracias a la atracción que existe entre ellos [1].

### 1.2.3 Coagulación por barrido

Es otra forma de agregado de coagulante, que consiste en la incorporación de altas dosis de solución, que exceden el límite de solubilidad de ese compuesto de agua. Consiste,

básicamente, en generar un floc que barre a otro floc en estado coloidal. Este tipo de coagulación no es tan utilizado debido a su alto costo monetario, producto de las grandes cantidades necesarias para realizar el proceso [1].

Para concluir con el apartado de agregado de coagulante, y para fines de este trabajo, es necesario aclarar que la coagulación es el resultado de la incorporación de los coagulantes, que tiene como objetivo formar el floc, que da como resultado una nueva composición de la turbiedad. Una buena coagulación dependerá, a excepción de la por barrido, en una óptima relación de los mecanismos de coagulación, los parámetros de mezcla rápida, las condiciones químicas de dosificación, el gradiente de velocidad y, en última instancia, el tiempo de retención [1].

## 1.3 Coagulación.

Los coaguladores son estructuras que forman turbulencias, a las que se les añade el coagulante para la formación del floc. Existen dos tipos de coaguladores, los del tipo hidráulico y los del tipo mecánico, los cuales serán descritos a continuación [1].

### 1.3.1 Hidráulicos

- Resalto hidráulico o salto hidráulico
- Bombas
- Orificios

#### 1.3.1.1 Resalto hidráulico o salto hidráulico

El resalto hidráulico, o salto hidráulico, es la turbulencia generada por un cambio de pendiente brusco que ocurre en un canal y puede ser utilizado como un coagulador debido a la gran energía que es transformada en turbulencia. Dentro de estos tipos de coaguladores se encuentran:

- **Canaletas Parshall:** Son un tipo de coagulador muy usado debido a su mezcla rápida que se produce en el resalto. Se le aplica el coagulante en la garganta, que es donde está el pie del resalto de la fuente [5].
- **Vertedero triangular:** Es un coagulador que tiene como característica una mezcla rápida debido a la turbulencia que se produce aguas abajo del vertedero. El punto de aplicación del coagulante es sobre la napa debajo del vertedero [5].
- **Compuertas:** Consisten en una mezcla rápida con el coagulante debido al resalto que se produce aguas abajo de la compuerta parcialmente abierta. El punto de aplicación del coagulante es al pie del resalto [5].

#### 1.3.1.2 Bombas

Este mecanismo de coagulador hidráulico consiste en generar una transformación de energía mecánica en una mezcla de fluido no comprimible. Esta genera turbulencia para la adición del coagulante [6].

#### 1.3.1.3 Orificios

Los Orificios, como mecanismos para el agregado de coagulante, funcionan de acuerdo a una pared sumergida. En este lugar, se evidencian aberturas que forman turbulencias al otro lado de la pared en la cual se le agrega el coagulante [6].

### 1.3.2 Coaguladores mecánicos

Existen dos tipos de coaguladores mecánicos, los de una cámara y los que tienen cámaras en serie. El punto de aplicación del coagulante es a la entrada del agua cruda y tiene como característica una mezcla rápida producida por la turbulencia generada por los movimientos de las paletas. Este movimiento puede variar según el tipo de coagulador [1].

Los tipos de coaguladores mecánicos pueden ser:

- Coagulador de eje vertical y horizontal
- Coagulador por turbina

### 1.3.2.1 Coaguladores de eje vertical y horizontal

Estos coaguladores de eje vertical y horizontal funcionan gracias al movimiento de sus paletas, producto de un motor, provocando una turbulencia para la incorporación del coagulante [1].

### 1.3.2.2 Coaguladores de turbina

Los coaguladores de turbina son dispositivos que se caracterizan por su efectividad debido a la mayor compactación que poseen. Es así, como pueden mezclar más agua gracias a la gran velocidad con la que giran sus paletas [1].

## 1.4 Floculación

La floculación corresponde a la etapa en que se termina de formar el floc como partícula sedimentable. Es aquí donde ocurre el mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos que dan como resultado partículas suspendidas, discretas y visibles. Producto de este proceso, el floc reúne la densidad necesaria para sedimentar por efecto de la gravedad [7].

Existen dos tipos de floculadores. El primero de ellos, es el de tipo hidráulico, y puede apreciarse en la Figura 1.3. Luego, se describe el floculador de tipo mecánico, que se observa en la figura 1.4.

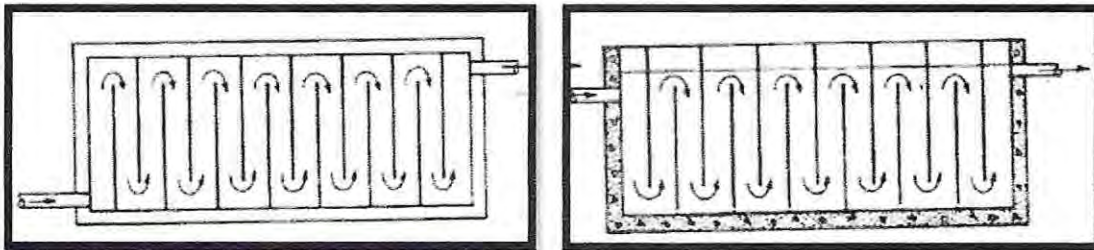


Figura 1.3- Floculador hidráulico horizontal y coagulador hidráulico vertical respectivamente Ref:CEPIS



Figura 1.4- Floculadores mecánicos con sistemas giratorios Ref:CEPIS

### 1.4.1 Floculadores hidráulicos

- Flujo horizontal y vertical

#### 1.4.1.1 Floculadores de flujo horizontal y vertical

Se caracterizan por tener una mezcla lenta, producto de la pérdida de carga que ocurre en las curvas y en los cambios de dirección del flujo. Son también conocidos como floculadores del tipo laberinto [7].

### 1.4.2 Floculadores mecánico

- Eje horizontal o eje vertical.
- Oscilante y recíprocante

#### 1.4.2.1 Eje horizontal o vertical

Los del tipo eje horizontal o vertical tienen como característica una mezcla lenta que se produce por los movimientos que tienen sus paletas [7].

#### 1.4.2.2 Oscilante y recíprocante

Los del tipo oscilante y recíprocante son poco comunes en las plantas de tratamiento de agua potable, de ahora en adelante PTA, por su complejo modo de uso, por los riesgos de corto circuito y por su poca eficiencia. El primero de ellos, cuenta con unas paletas adheridas a un eje horizontal que gira. En cambio, el recíprocante, consiste en la misma estructura, con la diferencia que tiene una parrilla en el centro que hace que las mismas paletas se desplacen verticalmente de arriba hacia abajo dentro del agua [7].

## 1.5 Sedimentación o decantación.

La sedimentación es el proceso en el que el floc desciende al fondo de los decantadores, los que son limpiados luego de pasar un cierto período de tiempo. Este fenómeno ocurre gracias a la fuerza de gravedad y a las densidades del floc, que en este caso tendrían que ser mayores a las del agua, por lo que entre mayor sean la densidad y tamaño del floc más rápido descenderá [7].

En base a lo descrito, aparece el término de tasa superficial, que corresponde a la velocidad con la que el floc se deposita en el fondo del sedimentador. Este asentamiento es posible de medir gracias al caudal de trabajo con respecto al área del sedimentador [8].



Figura 1.5- Decantador de tasa media Ref: PTA Concon

Existen tres tipos de sedimentadores:

- Baja tasa.
- Tasa media.
- Alta tasa.

### **1.5.1 Baja tasa**

Dentro de estos sedimentadores se encuentran los de flujo horizontal convencionales, que tienen una tasa variable entre 15 a 30  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ . Además, se dividen en cuatro zonas independientes: una de entrada, de salida, de sedimentación (donde la dirección del flujo es horizontal) y de retención de partículas sedimentables. Es relevante mencionar que, se considera que la velocidad es la misma en todos los puntos [1].

### **1.5.2 Tasa media**

Los de este tipo son sedimentadores de flujo vertical con mantos de lodo en la parte inferior y se caracterizan por tener una tasa que varía entre 45 y 60  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ . El proceso de sedimentación de tasa media, consiste en que el agua entra directamente por el fondo del estanque, así, permite su captación mientras ingresa por las canaletas de recolección que se encuentran en la superficie del mismo recipiente [1].

### **1.5.3 Alta tasa**

Estos tipos de sedimentadores se caracterizan por tener una inclinación que puede ser por medio de placas o a través de módulos espaciados. La tasa de estos sedimentadores varía entre los 120 a 180  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ . Por su parte, el ángulo óptimo de inclinación es de 60 grados, así, los sedimentos no se adhieren a las placas o módulos espaciados [1].

Es importante mencionar que los sedimentadores de flujo inclinado son más eficientes que los otros sedimentadores convencionales descritos. Esto se debe a que la altura de caída de los flocs entre las placas es menor, pudiendo remover partículas más pequeñas [1].

## **1.6 Filtración.**

La filtración es el proceso físico mecánico final del tratamiento de agua. Consiste en retener las partículas y microorganismos que quedan luego de los procesos de tratamiento anteriores, por medio de lechos filtrantes que pueden ser de arena, antracita o mixtos [1]. En el Capítulo II se hablará en profundidad del proceso de filtración.

Dentro de las PTA, existen dos tipos de filtros en base a su velocidad:

- Filtros Lentos: 7-14  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ .
- Filtros Rápidos: 120-600  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ .

### **1.6.1 Filtros lentos**

Son filtros que, mayoritariamente, están compuestos por un solo material (arena), tienen un flujo descendente y actúan con una carga gravitacional. El agua de filtrado no requiere tratamiento previo [1].

### **1.6.2 Filtros rápidos**

Corresponden a filtros que pueden tener diferentes tipos de lecho filtrante como arena, antracita o mixtos y tienen distintos sentidos de flujo, entre ellos, ascendente, descendente o mixto. Su carga puede ser gravitacional o a presión. El agua de filtrado necesita tratamiento previo [1].

## 1.7 Agregado químico.

Esta etapa consta de diferentes procesos, donde el más relevante corresponde a la incorporación de cloro al agua para eliminar las bacterias o agentes contaminantes que puedan existir, a pesar del tratamiento previo. Luego, viene el proceso de fluoruración que consiste en agregarle algún compuesto que contenga este elemento. Esta dosificación se efectúa de acuerdo a un reglamento estatal, con fines de salud pública, siendo su principal objetivo prevenir, por un lado, las caries dentales y, por otro, fortalecer el tejido óseo en formación [9].

## 1.8 Distribución.

Previo a la etapa de distribución propiamente tal, es necesario que el agua, a estas alturas potable, sea conducida gravitacionalmente o elevada hacia las copas o estanques a través de bombas elevadoras que poseen la suficiente potencia para realizar la actividad. Así, el resultado final del tratamiento podrá ser repartido a la población aledaña [1].

## 1.9 Calidad del agua.

La calidad se refiere a cómo tiene que ser entregada el agua a la población según los requisitos de la norma NCH409/1 of 2005. El agua chilena debe cumplir con ciertos parámetros, tanto físicos, químicos, radiactivos como bacteriológicos, para que sea considerada como potable y así efectuar su distribución para el consumo humano.

El propósito principal que tiene la norma del agua potable es la protección de la salud pública, mediante la calidad de los suministros de agua potable a través del control de los compuestos riesgosos o peligrosos del agua. La Organización Mundial de la Salud (OMS), establece guías en base a la calidad del agua potable que son la referencia internacional para el establecimiento de estándares y seguridad del agua para su consumo. Por lo que todos los países toman en cuenta estas referencias para los límites permisibles que debe tener el agua potable [10].

### 1.9.1 Requisitos según la OMS y otros países.

#### 1.9.1.1 Requisitos físicos.

Tabla 1.1- Requisitos físicos internacionales.

Requisito	unidad	OMS	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	México	Perú	CAPRE	EEUU	UE
Turbiedad	nefelométricas	5	3	5	5 *	5	5	3	5	5	10
Color	escala platino-cobalto	15	5	15	20	15	20	15	15	15	20
Olor	-	Inodora	Inodora	Inodora	Inodora	Inodora	Inodora	Inodora	Inodora	Inodora	Inodora
Sabor	-	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida	insípida

\* La turbiedad actualmente se rige en Chile por una serie de cumplimientos simultáneos que se explicarán a continuación.

En la Tabla 1.1 se evidencian los elementos químicos permitidos por las normas de cada país. En ella, se puede observar que, por ejemplo, la Unión Europea presenta el doble de turbiedad en comparación al resto de los países; por otro lado, el rango de color promedio de cada nación es semejante, a excepción de Argentina.

### 1.9.1.2 Requisitos químicos.

A continuación, se mostrarán los índices de químicos establecidos en cada país.

Tabla 1.2- Requisitos químicos internacionales.

Sustancia en (mg/l)	OMS	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	México	Perú	CAPRE	EEUU	U E
Amoníaco (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	1.5	0.2	-	0.25	-	0.5	0.5	0.5	-	0.5
Antimonio	0.005	-	-	-	0.05	-	0.005	0.05	0.006	0.01
Arsénico	0.01	0.05	0.05	0.01	0.01	0.025	0.05	0.01	0.01	0.05
Bario	0.70	-	1.0	1.0	0.50	0.70	1.0	-	2.0	0.10
Boro	0.30	-	-	-	0.30	-	-	-	-	1.0
Cadmio	0.003	0.005	0.005	0.01	0.003	0.005	0.005	0.05	0.005	0.005
Cianuro	0.07	0.1	0.1	0.05	0.1	0.07	0.07	0.05	0.2	0.2
Cobre	2.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.50	1.0	2.0	1.30	3.0
Cromo	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	0.10	0.05
Fluoruro	1.5	-	1.5	1.50	1.2	1.5	1.5	0.7 - 1.5	4	1.5
Hierro	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
Manganeso	0.5	0.1	0.1	0.10	0.1	0.15	0.5	0.5	0.05	0.05
Mercurio	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Molibdeno	0.07	-	-	-	0.07	-	-	-	-	-
Níquel	0.02	-	-	-	0.02	-	0.05	0.05	-	0.05
Nitrato	50	45.	10	10.0	50.	10.	10.	50.	10.	50.
Nitrito	3	0.10	-	1.0	3	1.	0.9	0.10	1.0	0.10
Plomo	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01	0.05	0.01	0.015	0.05
Selenio	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.05	0.01
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	250.0	400	400	250	250	400	400	250	250	250
Zinc	3	5	5	5	3	5	3	3	5	5

En la Tabla 1.2 se evidencian las cantidades de cada elemento químico presente en el agua potable de cada Nación. Es importante mencionar que, en general, los números indican la semejanza existente entre ellos.

### 1.9.1.3 Requisitos bacteriológicos.

Tabla 1.3- Requisitos bacteriológicos internacionales.

Parámetro	OMS	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	México	Perú	CAPRE	EEUU	UE
Microbiológicos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Colifecales o E.Coli (NMP/100ml)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coliformes totales (NMP/100ml)	0	<3	0	1	0	0	0	<4	0	0

Luego de analizar la Tabla 1.3 se desprende que, en base a la normativa, ningún país puede presentar sustancias bacteriológicas que contaminen el agua potable. En el siguiente

apartado, se describirá la situación que rige para que el tratamiento de agua potable sea óptimo para su consumo.

## 1.9.2 Requisitos del agua potable según la norma NCh409/1 of 2005.

### 1.9.2.1 Requisitos físicos.

Tabla 1.4- Requisitos físicos NCh409/1 of 2005.

Requisitos	Unidad	Límite máximo
Turbiedad	Unidades nefelométricas (formazina)	*
Color verdadero	Unidad de la escala platino-cobalto	20
Olor	-	Inodora
Sabor	-	Insípida

\* Requisitos que debe cumplir la turbiedad en Chile según NCh409/1 of 2005

- Turbiedad media mensual: Debe ser  $\leq 2$  NTU (promedio aritmético)
- Tolerancia muestras con turbiedad  $> 4$  NTU: 5% cuando se analicen 20 o más muestras mensuales  
1 muestra, cuando se analicen menos de 20 muestras mensuales
- Muestras con turbiedad entre 10 y 20 NTU: No pueden presentarse en un mismo periodo de 24 hrs (Días consecutivos)
- Muestra con turbiedad  $> 20$  NTU: No puede presentar ninguna en el mes

### 1.9.2.2 Requisitos químicos.

Tabla 1.5- Requisitos Químicos NCH409/1 of 2005. Y elementos que aparecen en la norma NCH409/1 of 84

Sustancia	Expresado como	Límite máximo mg/l
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	1.5
Arsénico	As	0.01
Cadmio	Cd	0.01
Cianuro	CN	0.05
Cloruros	Cl	400
Cobre	Cu	2.0
Compuestos Fenólicos	Fenol	0.002
Cromo hexavalente	Cr	0.05
Detergente	SAAM	0.5
Flúor	F	1.5
Hierro	Fe	0.3
Magnesio	Mg	125
Manganeso	Mn	0.10
Mercurio	Hg	0.001
Nitratos	N	50
Nitritos	N	3.0
Plomo	Pb	0.05
Residuos Sólidos filtrables	-	1000
Selenio	Se	0.01
Sulfatos	So <sup>-2</sup>	500
Zinc	Zn	3.0

En la Tabla 1.5 se observan los límites de los elementos químicos permitidos por la norma.

### 1.9.2.3 Requisitos radioactivos.

Tabla 1.6- Requisitos Radioactivos NCH409/1 of2005.

Elementos radioactivos	Límite máximo, Bq/L
Estroncio 90	0.37
Radio 226	0.11
Actividad Beta total (excluyendo Sr-90, Ra-226 y otros emisores alfa)	37
Actividad Beta total (incluyendo Sr-90, corregida para el K-40 y otros radioemisoras naturales)	1.9
Actividad Alfa total (incluyendo Ra-226 y otros emisores alfa)	0.55

En la Tabla 1.6 se evidencia la radioactividad permitida por la norma. Así, por ejemplo, el máximo de estroncio 90 que puede presentarse en el agua potable corresponde a 0.37 Bq/l.

### 1.9.2.4 Requisitos bacteriológicos.

De todas las muestras que se analicen mensualmente, se acepta la presencia de coliformes totales en una concentración mayor o igual a cinco UFC o NMP. El agua potable debe estar exenta de Escherichia Coli [11].

## 1.10 Planta de tratamiento de agua potable Concón

Luego de ahondar en el proceso de tratamiento de agua potable, se presentarán las características principales del contexto físico en donde se realizaron los ensayos para la investigación. En los párrafos siguientes, se explica su ubicación, implementación, procesamiento y distribución para llegar a un producto final potable.

El lugar donde se realiza el estudio, corresponde a la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Concón. Ésta se ubica a dos kilómetros de la rotonda Concón, cerca de la desembocadura del río Aconcagua en el océano Pacífico [12].

La clasificación de la fuente superficial, según la norma NCh 777/1, es del tipo IIB, que corresponde a las aguas captadas que son factibles de tratar con los procesos de coagulación, floculación, decantación, filtración, desinfección y, en el caso de altas turbiedades, podría ser necesario incluir una etapa de predecantación o sedimentación primaria. La clasificación de aguas subterráneas corresponde a la de tipo IA, las que son factibles de tratar sólo con el proceso de desinfección, que es obligatorio para todos los casos [12].

La captación superficial trata de una bocatoma lateral que cuenta con lo estipulado en el diseño por la norma NCh 777/1. Ésta también cuenta con 2 bombas Flygt con un caudal de elevación de 1200 l/s, dos equipos de 600 l/s y dos equipos de 275 l/s [12].

La PTA consta de tres sub plantas, en dos de ellas las captaciones son del tipo superficial, la tercera cuenta con un proceso de tipo subterráneo, las cuales serán descritas a continuación.

### 1.10.1 Planta N°1

Fue construida en 1917 y tiene una capacidad actual de tratamiento de 700 l/s. Está formada por las siguientes estructuras [12]:

- Cámara de repartición, que es la encargada de recibir el agua y distribuirla en forma equitativa [12].
- Floculadores con una torre Pivet, para la dosificación de sulfato de aluminio [12].

- Unidades de floculación, que son del tipo mecánico y cuentan con 12 unidades de sedimentación, que son dos partes de 14 x 38 m cada una [12].
- Unidad de filtración, compuesta de 14 filtros rápidos de lecho único, con un área por unidad filtrante de 38 m<sup>2</sup> [12].

### 1.10.2 Planta N°2

Fue construida en 1994 y tiene una capacidad nominal de tratamiento de 500 l/s. Está compuesta por [12]:

- Dos cámaras de repartición para los predecantadores [12].
- Desarenadores o predecantadores [12].
- Canaletas Parshall, donde se le agrega el coagulante al agua [12].
- Unidades de floculación del tipo hidráulico [12].
- Seis sedimentadores de una superficie total de 56.67 m<sup>2</sup> [12].
- Nueve filtros rápidos de lecho mixto (carbón y arena) con un área total de 219.6 m<sup>2</sup> [12].

Los procesos de desinfección y fluoración tratan las aguas de ambas plantas.

### 1.10.3 Planta N°3

Corresponde a la única planta de captación subterránea. Es gracias a tres pozos que extraen agua subterránea con un caudal máximo total de 200 l/s. No cuenta con tratamientos químicos para su pretratado, debido a que el agua no los necesita. En este caso, el agua es tratada solamente con el proceso de filtración rápida, que cuenta con 5 filtros rápidos con un área de filtrado por unidad de 24.4 m<sup>2</sup> [12].

En conclusión, el agua producida en las tres plantas descritas, se almacena en un estanque de 1.000 m<sup>3</sup> y es elevada mediante la planta de alta hacia el recinto Eduardo Aguirre, que tiene una capacidad de 12.000 m<sup>3</sup> distribuida en tres estanques, dos de 5.000 m<sup>3</sup> y uno de 2.000 m<sup>3</sup>. Los otros estanques de Santa Inés, de 6.000 m<sup>3</sup> de regulación total, correspondiente a uno de 1.000 m<sup>3</sup> y otro de 5.000 m<sup>3</sup> de Viña del Mar, que alcanzan a alimentar a Concón, Reñaca y Viña del Mar, pudiendo llegar hasta la parte baja de Valparaíso.

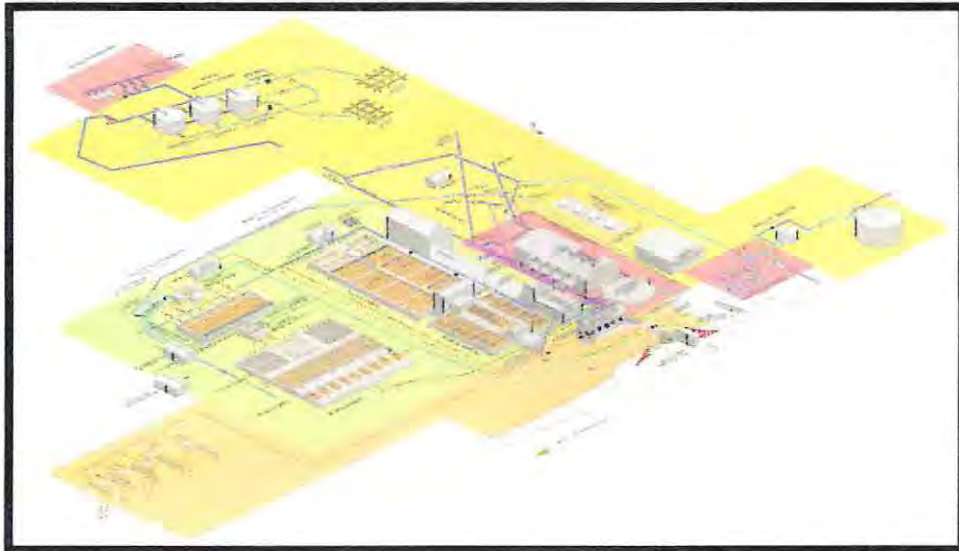


Figura 1.6 Sistema productivo de agua potable. Planta de tratamiento ESVAL Con Con

# CAPÍTULO II

## Teoría de la filtración

### 2.1 Filtración.

La filtración es un mecanismo de separación de sólidos, que contiene un líquido por medio de un material poroso capaz de retener partículas. Para el tratamiento del agua potable es una etapa muy importante, porque asegura la inexistencia de turbiedades mayores a la que exige la norma [1].

### 2.2 Historia de la filtración.

Antiguamente, el agua tratada o filtrada no se distribuía por medio de cañerías si no que se administraba por medio de galones a los consumidores, ya que no existían medios filtrantes a grandes escalas, por lo que se hacía un bien difícil de obtener. Esto llevó a pensar en hacer una instalación de filtros para toda una población. Fue así que en Londres, en el año 1829, se instalaron los primeros filtros lentos de arena. A medida que la demanda fue aumentando, se fue estudiando más a fondo la tecnología de la filtración, discutiéndose teorías para mejorar este proceso, como fue la de flujos ascendentes o descendentes, siendo esta última la más usada en la actualidad [13].

Al aumentar aún más la demanda de agua, se emplearon nuevas tecnologías para la filtración. Fue así, que en Norteamérica se desarrollaron los primeros filtros rápidos o de alta tasa, que tenían una característica en particular, funcionaban con un flujo descendente y además tenían un mecanismo de lavado que los hacía mucho más efectivos y económicos que los filtros lentos europeos. Este sistema es el retrolavado, que consiste en invertir el proceso de filtrado para remover las partículas que se encuentran en los lechos filtrantes, a diferencia de los lentos, en el que su sistema de lavado es raspando la superficie del lecho y hace que este mecanismo sea menos eficiente y más costoso [13].

En los primeros años de tratamiento de agua no se aplicaban procesos de decantación o coagulación, por lo que los filtros se colmataban muy rápido, debido a que no tenían un buen proceso de pre-tratado. Entonces se pensó en la administración de productos químicos y decantación para mejorar el rendimiento de la filtración [13].

### 2.3 Mecanismos de la filtración.

Los responsables de que ocurra la filtración son los componentes que forman el floc y que se adhieren al lecho filtrante. Esto puede ir variando a medida que el floc sea diferente en cuanto a su tamaño, que puede variar de flocos relativamente grandes, de 2 mm, a micro flocos de  $10^{-3}$  mm. Cualquiera de ellos puede provenir de bacterias, coloides o virus, también además varían su carga electro estática. Todas estas variedades de floc, corresponden a las que quedan retenidas en menor o mayor concentración en los lechos [13].

En primera instancia, o cuando el lecho está limpio, se empieza a acumular una película alrededor de los granos del lecho, donde se producen fuerzas cortantes producto de la fuerza de arrastre del flujo, que están en función de las fuerzas que mantienen pegadas a las partículas con el lecho, por lo que si estas fuerzas cortantes son fuertes, el depósito adherido al lecho se arrastrará hasta el fondo y podría aparecer en el efluente. En cambio, si son débiles se quedarán dentro del medio filtrante [13].

Los mecanismos que producen el fenómeno de la filtración son físicos y químicos, que dependiendo de las características del floc afluente se van a comportar de diferente manera cuando tenga que interactuar con el lecho filtrante, quedando retenido en él. Se pueden diferenciar

en dos tipos, en primer lugar, serán descritos los de transporte de partículas dentro de los poros, para luego dar paso al segundo, llamado de adherencia de granos [13].

### 2.3.1 Transporte de partículas dentro de los poros

Se clasifican en:

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

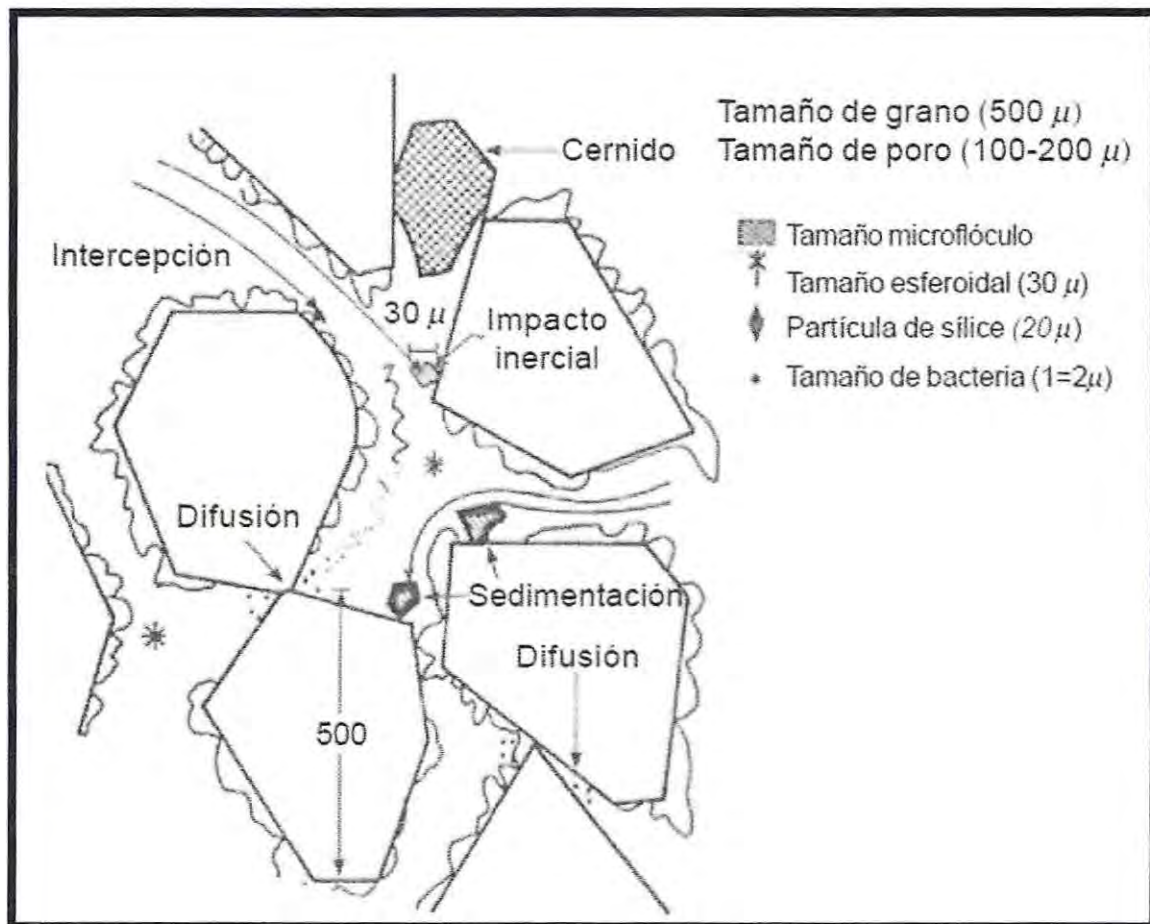


Figura 2.1 - Mecanismos de transporte del floc en un lecho filtrante Ref: CEPIS

En la Figura 2.1 se observan los mecanismos de retención de partículas provenientes de la turbiedad de entrada. Además, se grafica la clasificación de los subtipos de mecanismos de transporte de floc en un lecho filtrante.

### 2.3.1.1 Cernido

Ocurre sólo en las capas superficiales y es debido a que una partícula de gran tamaño (entre 0.5 mm a 2 mm) no puede pasar por espacios menores a los de ella. Este mecanismo ocurre gracias a que se producen grandes esfuerzos de corte entre el grano del lecho y las partículas que son capaces de resistirlos [13].

### 2.3.1.2 Sedimentación

La sedimentación ocurre por el efecto de la gravedad y es válido para el floc que tenga un peso específico mayor al del agua, para que sea una materia capaz de poder ser sedimentado y también en filtros donde la carga hidráulica sea baja para tener un mayor tiempo de sedimentación [13].

### 2.3.1.3 Intercepción

Camp y Stein (1964) propusieron este mecanismo con la hipótesis de que actúan mediante líneas de flujo para bajas cargas superficiales y que va progresando a medida que el floc se empieza a interceptar con los granos del lecho superior (Figura 2.2). Así, crece, con el tiempo, una especie de película alrededor de él, aumentando la velocidad intersticial, provocando que un menor número de partículas pueda adherirse a las capas superiores obligando a que tengan que penetrar a las capas inferiores [13].

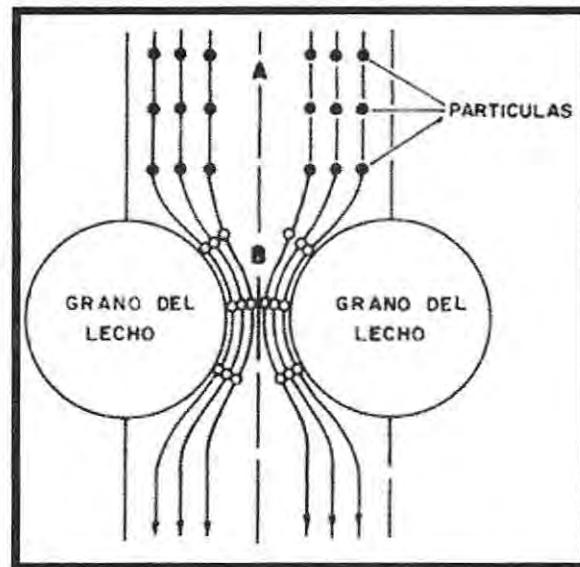


Figura 2.2- Intercepción. Ref. CEPIS

### 2.3.1.4 Difusión

La difusión se produce cuando ocurre la emigración de las partículas de tamaño molecular. Estas se mueven de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración [13].

### 2.3.1.5 Impacto inercial

El impacto inercial (Figura 2.3) ocurre cuando la carga superficial es grande, lo que implica una mayor velocidad en el filtrado, con lo que, a diferencia de la intercepción donde se producían líneas de flujo en este fenómeno, ocurren fuerzas de inercia que tienden a seguir la trayectoria de las partículas quedando retenidas en el lugar donde ya no se puedan seguir moviendo [13].

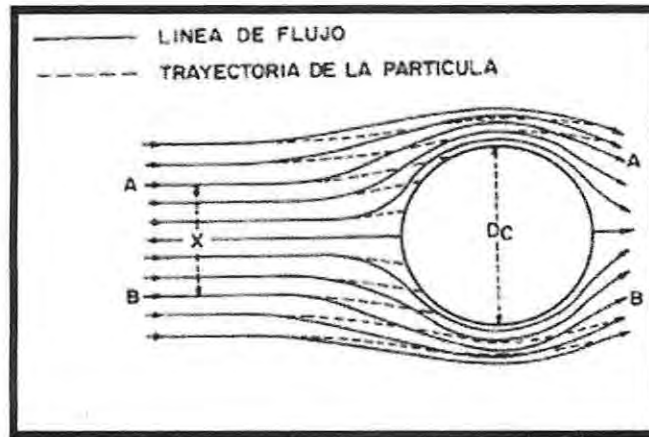


Figura 2.3 - Impacto inercial. Ref. CEPIS

### 2.3.2 Mecanismos de adherencia a los granos

- Fuerza de Van der Waals.
- Fuerza electroquímica.
- Puente químico.

#### 2.3.2.1 Fuerza de Van der Waals

La fuerza de Van der Waals (Figura 2.4), es aquella en la que existe una atracción debido a la densidad que tienen sus masas y así poder asentarse en los espacios que hay entre granos [13].

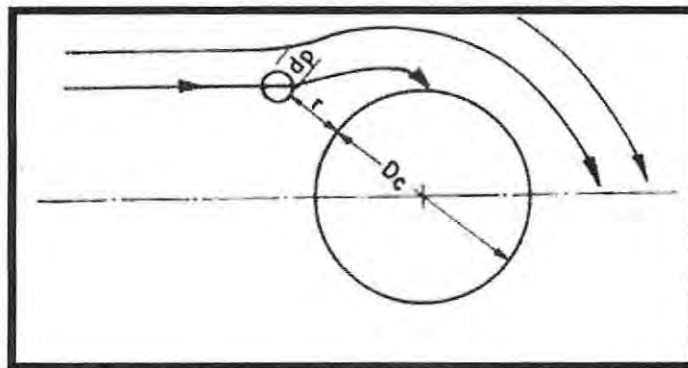


Figura 2.4 Fuerza de Van der Waals. Ref. CEPIS

#### 2.3.2.2 Fuerza electroquímica

Estas fuerzas son gracias a las cargas eléctricas que tienen los sólidos producto de su tratamiento químico, en la que se ejerce una fuerza que va a depender de la carga eléctrica que traiga para que exista una reacción con los granos, produciéndose así una atracción de masas entre partículas y granos, quedando depositados en los espacios o volúmenes que queden entre granos [13].

#### 2.3.2.3 Puente químico

Esto es gracias a la desestabilización del coloide producto de la hidrólisis, quedando sus segmentos extendidos en el agua, los que pueden ser absorbidos por otras partículas o por espacios que existen entre los granos del lecho. La absorción o unión ocurre por el hidrógeno

presente en el agua y en los coloides actuando como puente entre los demás elementos químicos presentes. Las partículas que aún conservan sus segmentos poliméricos adheridos se enlazan con los segmentos sueltos por los granos o por los de partículas ya adheridas al lecho, quedando retenidas [13].

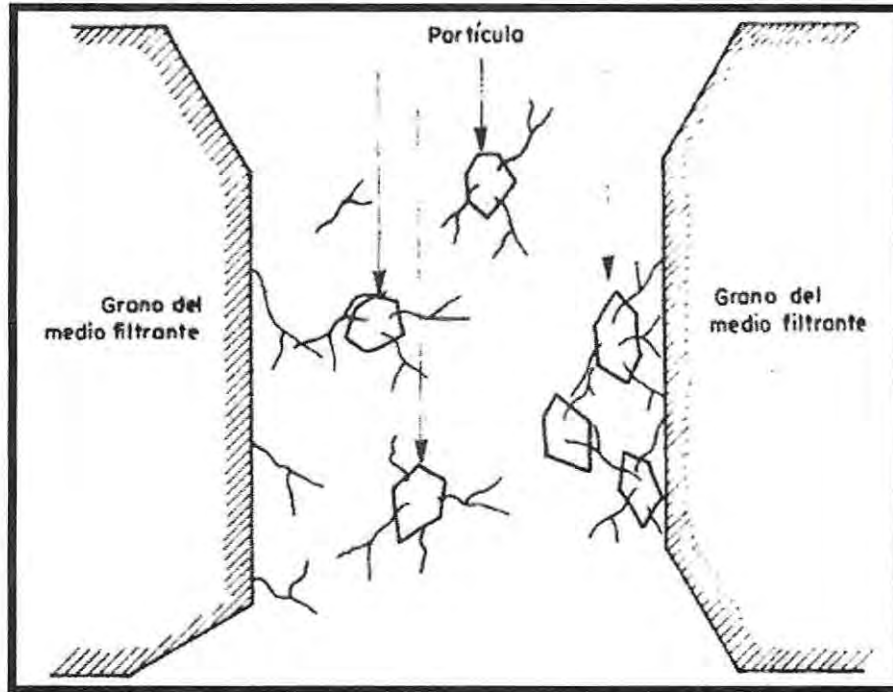


Figura 2.5 - Puente químico, desestabilización de los coloides. Ref. CEPIS

## 2.4 Clasificación de los filtros.

Los filtros se pueden clasificar en diferentes grupos, ya sea por las características de los filtros según su tasa de filtración (filtros lentos y filtros rápidos), por el tipo de fuerza que actúa, por el sentido del flujo, por el tipo de tratamiento del agua, por la composición de él o de los lechos filtrantes, por el sistema de drenaje y por su sistema de lavado. Por lo que el tipo de filtro a usar dependerá de la calidad del agua de la fuente, de las características de la demanda, rentabilidad y modo de uso [1].

### 2.4.1 Filtración rápida o filtración lenta

La filtración rápida o lenta es definida mediante la velocidad con la que escurre el agua por medio de los granos del lecho filtrante y que finalmente pasa por el sistema de drenaje. La filtración lenta es considerada entre los rangos de 0.3 m/h a 0.6 m/h, en cambio la filtración rápida es considerada entre los rangos de 5 m/h a 25 m/h. A continuación, se presenta la Ecuación 2.1 que determina, matemáticamente, la velocidad de filtración [14]:

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

Ec2.1

Dónde:

$V$ = Velocidad de escurrimiento del agua o velocidad de filtrado donde no hay lecho.

$Q$ = Caudal que pasa por el filtro.

$A$ = Área del filtro.

Se entiende también, por filtración rápida o filtración lenta, la tasa de filtración que está directamente relacionada con el caudal que escurre por el lecho filtrante [14].

## 2.4.2 Filtración según la fuerza de filtración

Existen diferentes tipos de sentidos de flujo dentro de un filtro, en los que hay unos más usados que otros y se pueden clasificar por gravedad, presión, centrifugación y vacío, descritos en los párrafos siguientes [14].

### 2.4.2.1 Filtración por gravedad

Este tipo de filtración es el más usado en la actualidad por las PTA, debido a que es un filtro sencillo de utilizar. Su trabajo consiste en que los sólidos suspendidos se asientan en el material granular producto de la conducción, que en este caso es la fuerza de gravedad, quedando así retenidos los sólidos suspendidos en la capa filtrante, tal como se muestra en la Figura 2.6 [14].

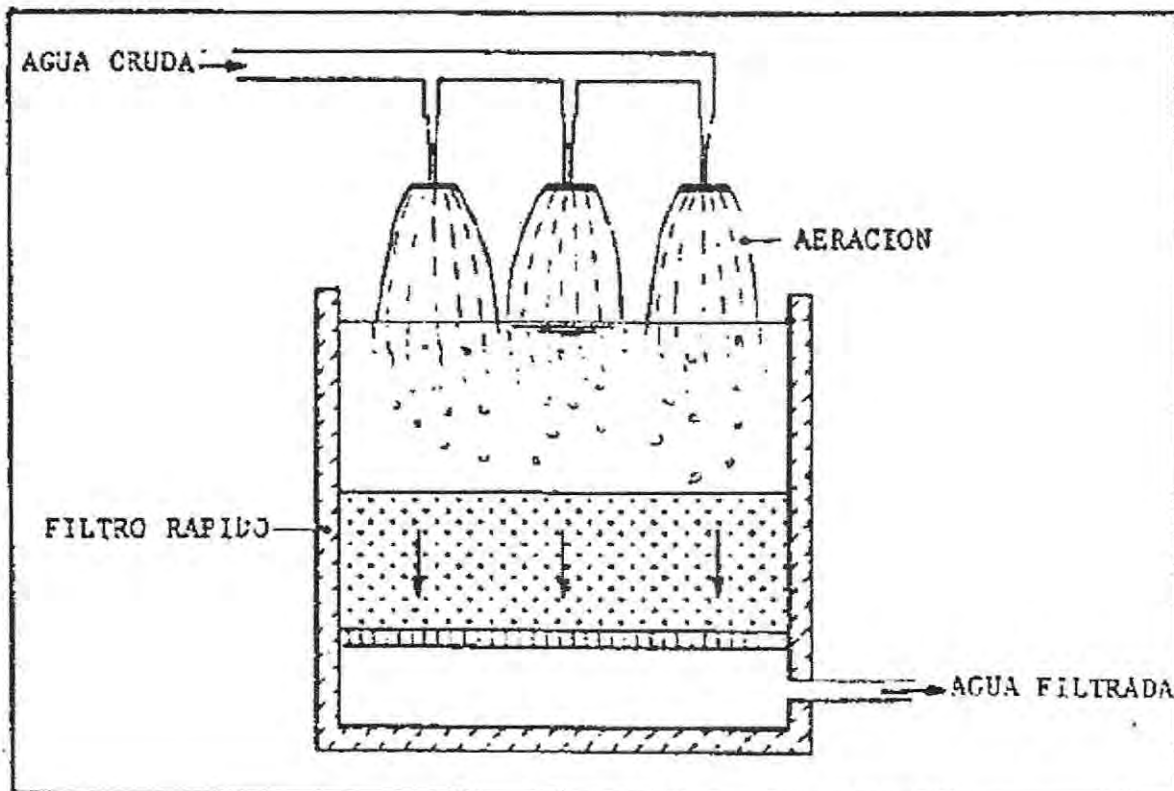


Figura 2.6- Filtro rápido de gravedad. Ref. CEPIS

#### 2.4.2.2 Filtración por presión

Los filtros por presión (Figura 2.7) no son tan usados dentro de una PTA debido a su complejo uso, al costo de mantenimiento y a su poca producción, ya que trabajan con caudales bajos. Su trabajo consiste en que el lecho, las paredes y el fondo del filtro están encerrados por un recipiente a presión hecho de acero. Aquí, la fuerza de conducción para la filtración es la fuerza a presión del agua [15].

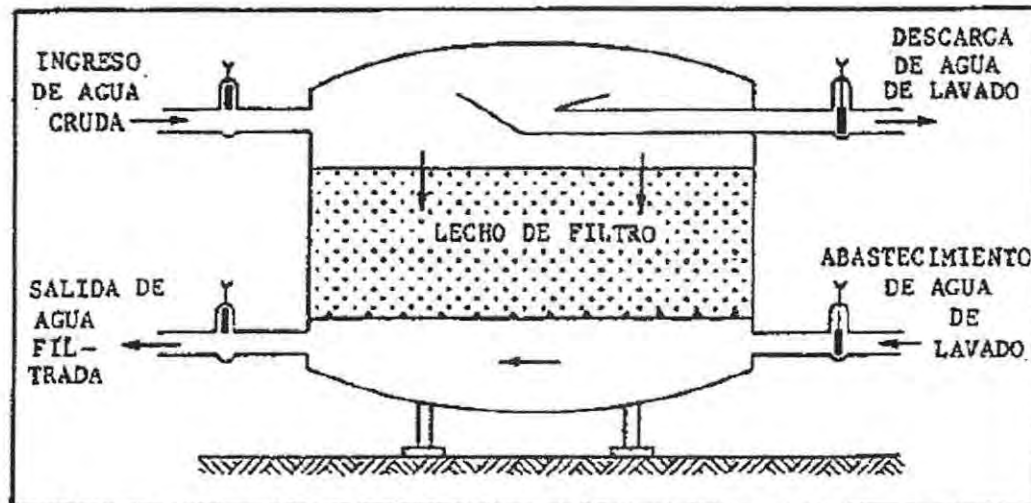


Figura 2.7- Filtro a presión Ref: Manual técnico del agua

#### 2.4.2.3 Filtración por centrifugación

Este tipo de filtro no es muy utilizado debido a su complejo uso y operación. Su funcionamiento consiste en hacer girar el agua mediante un cilindro donde las paredes tienen material filtrante, por lo que el agua, al pasar por las paredes, provoca el efecto de filtración. La fuerza de conducción en este caso es la fuerza centrífuga, evidenciada en la Figura 2.8 [15].

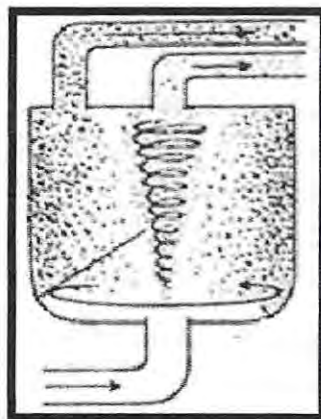


Figura 2.8- Filtro por centrifugación Ref: (Manual técnico del agua)

#### 2.4.2.4 Filtración por vacío

Al igual que los filtros a presión y centrifugación, no son muy comunes en las PTA debido a su alto costo y su compleja mantención. Su proceso de trabajo consiste en generar una presión menor dentro del cilindro con respecto a la que hay en el exterior, conduciendo las partículas hacia dentro, logrando una filtración (Figura 2.9) [15].

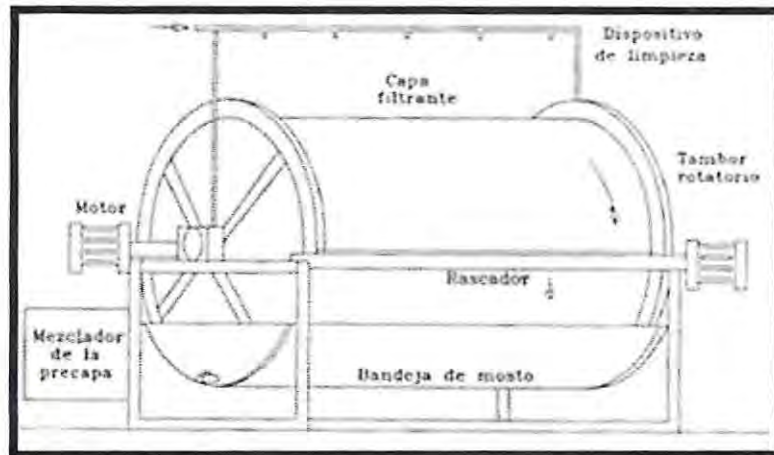


Figura 2.9- Filtración por vacío Ref: Manual técnico del agua

#### 2.4.3 Clasificación según los requerimientos del agua cruda

Los tipos de filtros se pueden clasificar según los requerimientos del agua cruda, en la cual deben realizarse estudios de calidad del agua y de acuerdo a los resultados se pueden seguir recomendaciones del tipo de filtración a utilizar [16].

Dentro de la filtración lenta se tienen:

##### 2.4.3.1 Como tratamiento único

Este sistema de filtración se utiliza para turbiedades que no son mayores a 15 NTU, con un color menor a 20 UPC y un NMP de coliformes fecales menores a 500 [16].

##### 2.4.3.2 Como tratamiento de diversas etapas.

Este tratamiento de filtración lenta se recomienda para el pretratamiento de fuentes superficiales de agua, cuya calidad puede interferir en los mecanismos de purificación. Debe emplearse como una multibarrera para controlar los cambios bruscos de la calidad del agua en las fuentes. Se debe emplear para aguas con una turbiedad menor a 80 NTU y un color menor a 30 UPC [16].

Dentro de la filtración rápida se tienen:

##### 2.4.3.3 Filtración directa

Esta filtración puede ser de contacto (sin floculación, ni sedimentación), pero debe tener un proceso de coagulación total para otorgar una neutralización de cargas. Otro requisito es que el 90% del agua cruda, proveniente de la fuente, no puede tener una turbiedad mayor a 8 NTU y con un color de 30 UPC y el 10% restante no puede tener una turbiedad mayor a 15 NTU y un color de 50 UPC [16].

#### **2.4.3.4 Filtración convencional**

La filtración convencional debe efectuarse como etapa final luego de los tratamientos anteriores de coagulación, floculación y sedimentación. La turbiedad que ingresa a los filtros no puede ser mayor de 8 NTU y el color no mayor a 20 UPC [16].

En la filtración rápida, debe filtrarse agua previamente tratada (coagulación, floculación y/o sedimentación) para lograr la remoción de las últimas partículas que no han sido retenidas.

#### **2.4.4 Clasificación de filtros según su flujo**

Los diferentes filtros que existen en la actualidad, tienen distintos tipos de flujo con el que operan. Existen los de tasa constante, tasa declinante, vasocomunicadores o nivel de agua variable y, finalmente, con vertederos de control [5].

##### **2.4.4.1 Filtración de tasa constante**

En estos tipos de filtros debe emplearse un controlador variable que mantenga una pérdida de carga total constante al abrirse gradualmente la válvula de entrada, a medida que el lecho se empieza a colmar. El controlador puede ser un flotador que mantenga un nivel de agua constante dentro del filtro [5].

##### **2.4.4.2 Filtración con tasa declinante**

Estos tipos de filtros cuentan con flotador para regular el caudal de entrada a medida que la pérdida de carga va aumentando y su tasa va disminuyendo, cumpliendo la función de restringir el flujo de entrada hacia el filtro [5].

##### **2.4.4.3 Filtración con vasocomunicadores de nivel de agua variable**

La entrada del caudal afluyente se distribuye de manera equitativa para cada filtro mediante una válvula que está comunicada a una tubería por donde pasa el caudal de salida de los decantadores. Cada unidad de filtro debe ser bastante profunda para ser capaz de permitir una variación de nivel de alrededor de dos metros [5].

##### **2.4.4.4 Filtración con pérdida de carga variable con vertedero de control**

La entrada del afluyente es por debajo de la canaleta de lavado y tiene que contar con vertedero de control que evite el vaciado del filtro al inicio de las carreras de filtrado [5].

#### **2.4.5 Clasificación de los filtros de acuerdo a los componentes del lecho filtrante**

Los principales componentes de un lecho filtrante son:

- Medio filtrante.
- Soporte del medio filtrante.

##### **2.4.5.1 Medio filtrante**

Los filtros pueden ser de uno, dos o más materiales. Así, se tienen lechos de arena, antracita, o de ambos materiales. Los espesores pueden variar entre 0.6 m, 0.9 m o de capa profunda, de más de 0.9 m. Cada partícula que forma el lecho filtrante debe ser dura, libre de partículas extrañas, libre de lodos, arcillas o materias orgánicas [16].

Es relevante mencionar que los lechos filtrantes más utilizados corresponden a los compuestos únicamente de arena. La antracita o, el carbón activado, se usan cuando existen

problemas de sabor o presencia de bacterias. A continuación, se exponen los límites del tamaño efectivo de la arena a utilizar como lecho filtrante en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1- Límites de la Arena.

Material	Tamaño efectivo mm		Coeficiente de uniformidad	
	Min	Max	Min	Max
Arena fina	0.35	0.45	1.35	1.7
Arena estándar	0.45	0.65	1.35	1.7
Arena gruesa	0.65	0.85	1.35	1.7

Como se observa, el tamaño efectivo es el diámetro de la abertura del tamiz, el cual deja pasar el 10% de la arena. Luego, el coeficiente de uniformidad se refiere a la abertura del tamiz que dejaría pasar el 60 % con respecto al tamiz que deja pasar solo el 10 %. El coeficiente mencionado se calcula mediante la siguiente ecuación [13]:

$$Cu = \frac{\text{Abertura del tamiz que dejaría pasar el 60\% (mm)}}{\text{Abertura del tamiz que dejaría pasar el 10\% (mm)}}$$

Ec 2.2

Ahora bien, cuando los lechos filtrantes están compuestos de arena fina (0.35 mm - 0.45 mm), es necesario tener en cuenta las recomendaciones para su uso. La aplicación de este material se condiciona a diferentes situaciones, como por ejemplo turbiedades altas, pretratamientos poco eficientes, cuando son requeridos períodos cortos de filtración, cuando no hay dificultades de agua para el lavado y finalmente, cuando este sistema se encuentra diseñado, exclusivamente para arena fina [16].

En segundo lugar, cuando la arena utilizada es estándar (0.45 mm - 0.65 mm), se puede utilizar este tipo de lecho en condiciones intermedias, entre las que se especifican para arena gruesa y para arena fina. En tercera, y última, instancia, los lechos filtrantes cuando requieren arena gruesa (0.65 mm - 0.85 mm) es cuando el pretratamiento es bueno, cuando no se encuentren turbiedades altas, cuando se requiere que el proceso de filtración sea más duradero, cuando se requiere ahorro de agua para el lavado y sea diseñado para altas tasas de lavado [16].

No obstante, cuando el lecho filtrante está compuesto de antracita o carbón activado, la ventaja de trabajar con flujos de servicios más altos es usada principalmente para combatir las materias orgánicas (contaminantes) que contiene el agua. La antracita debe utilizarse en filtros de multicapa o lechos profundos debido a su poca densidad y pérdida producto del retrolavado. Su tamaño efectivo varía entre los 0.6 mm y los 4 mm [16].

#### 2.4.5.2 Soporte del medio filtrante

El medio de soporte para la arena debe ser una grava. Su tamaño va a ser de acuerdo a las características del filtro y del sistema de drenado que tenga. La grava debe ser dura, estar limpia de limo o material orgánico y resistente a la abrasión, de superficie lisa y debe tener un mínimo porcentaje de formas alargadas o planas. El peso específico no debe ser menor a  $2.6 \text{ g/cm}^3$  [16].

En la parte superior del soporte se recomienda utilizar una gravilla fina para tener una mayor precaución y evitar que pasen materiales finos al sistema de drenaje. A continuación, en la Tabla 2.2, se encuentran las especificaciones de la grava de soporte.

Tabla 2.2- Especificaciones de la grava de soporte.

Capa	Tamaño de la grava (mm)
1	9 – 12
2	2 – 9
3	1 – 1.5 (arena)

Las dimensiones del lecho filtrante serán de acuerdo a las características del sistema de drenaje adoptado. El diseño de soporte también puede ser reemplazado por placas porosas que cumplan con las características del soporte de grava [16].

### 2.4.6 Clasificación según su sistema de drenaje

El sistema de drenaje es el encargado de evacuar el agua que entra al filtro hacia un medio colector que, generalmente, es una cañería o vertedero de rebalse. El sistema de drenaje de un filtro dependerá de las características del medio de soporte y de los lechos filtrantes para evitar que estos medios pasen hacia el drenaje. Este último debe cumplir las siguientes características: que distribuya uniformemente el agua de lavado, que no produzca una pérdida de carga demasiado alta y que además sea económico [18].

Los sistemas de drenaje pueden estar directamente conectados al colector o a un falso fondo que generalmente se usa para mejorar el flujo de lavado del filtro. En este caso deberán tener una altura mínima con respecto al tubo efluente de lavado [18].

Los tipos de drenaje que existen son:

- Fondo falso con boquillas.
- Fondo Wheeler.
- Tuberías perforadas.
- Bloques Leopold.
- Placas porosas.

#### 2.4.6.1 Fondo falso con boquillas

Existe una gran variedad de boquillas, que generalmente son de plástico y su sistema de drenaje se puede clasificar en dos tipos, según el tipo de lavado, las simples y las especiales. En las primeras, se emplea un método de lavado sólo por agua. En cambio, las especiales se pueden ocupar para lavado con agua y aire. En el caso de las simples existe una distribución alrededor de 20 a 30, por m<sup>2</sup> en las especiales se emplea una distribución mayor, que va alrededor de 50 a 60, por m<sup>2</sup> [18].

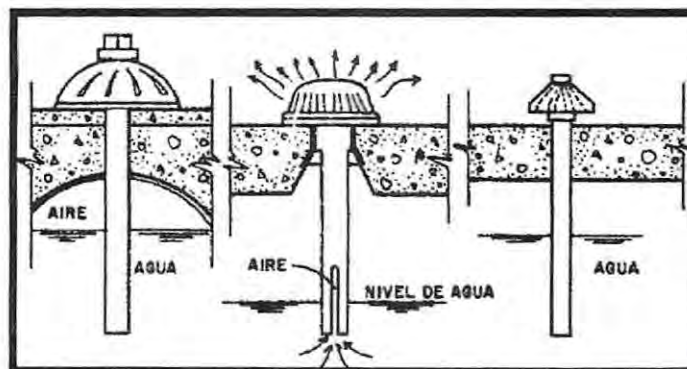


Figura 2.10- Sistema de drenaje con boquillas para lavado con aire y agua. Ref: CEPIS.

Para el uso de este sistema de drenaje se recomienda una granulometría mayor a 2.8 mm y menor a 63 mm [18].

#### 2.4.6.2 Fondo Wheeler

El fondo Wheeler consiste en una losa de hormigón con orificios troncocónicos en los que se colocan 5 esferas de 2.5 a 1.25 cm de diámetro, donde pasa el agua y está situada a 10 - 50 cm del fondo del filtro. Estas losas pueden ser prefabricadas y se anclan a soportes de hormigón, el material de soporte es grava, cuyo diámetro debe ser mayor a 4.8 mm y menor a 31.7 mm, tal como se muestra en la Figura 2.11 [18].

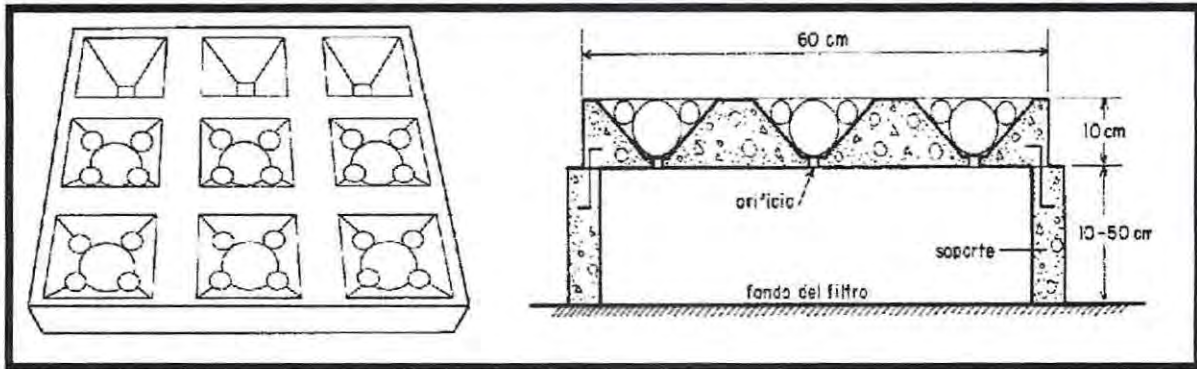


Figura 2.11- Fondo Wheeler. Ref: CEPIS.

#### 2.4.6.3 Tuberías perforadas

Las tuberías perforadas están formadas por un tubo o ducto principal que capta el agua mediante perforaciones. A partir de este ducto, salen tuberías laterales, también perforadas, se emplea como material de soporte grava, que tiene que tener una granulometría no menor a 2.4 mm y no mayor a 38 mm (Figura 2.12) [18].

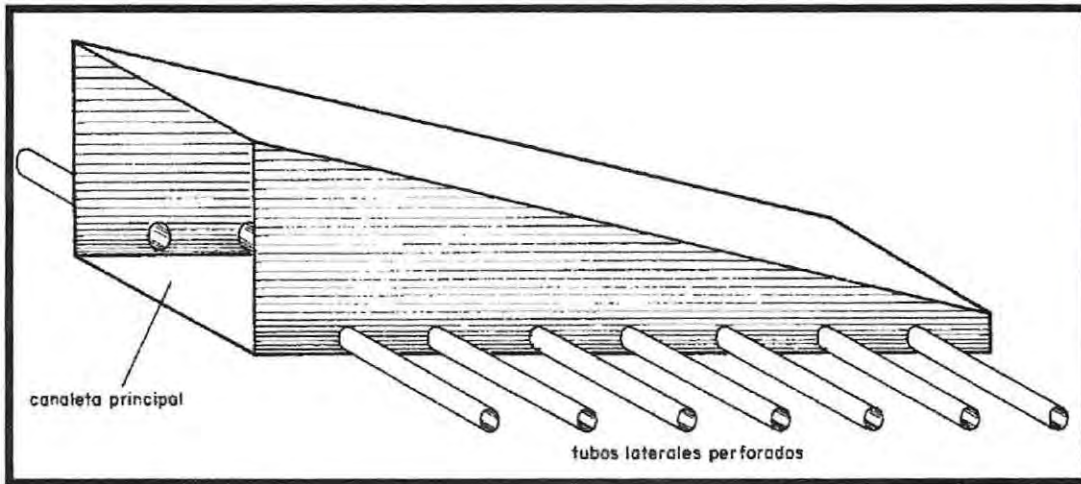


Figura 2.12- Tuberías perforadas. Ref: CEPIS.

#### 2.4.6.4 Bloques Leopold

Los bloques Leopold tienen dos ductos paralelos para poder mejorar la distribución de agua de lavado que generalmente son de cerámica, y para casos especiales donde ocupen lavado con aire, se recomienda usar polietileno expandido. La forma de captación del agua es igual a la de las tuberías perforadas. Su representación se evidencia en la Figura 2.13 [18].

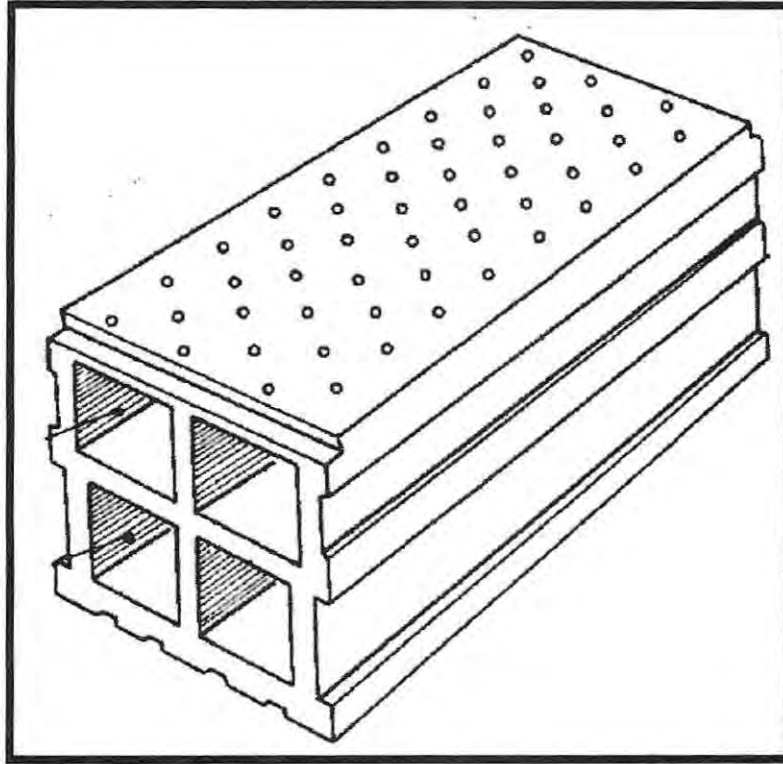


Figura 2.13- Fondo tipo, bloques Leopold. Ref. CEPIS.

#### 2.4.6.5 Placas porosas

Las placas porosas son bloques prefabricados. Pueden ser vigas de hormigón poroso o bloques con granos relativamente grandes. La característica que tiene este sistema de drenaje, es que los poros se asimilan a los poros de la arena, por lo que no es necesario utilizar grava como medio de soporte, teniendo a la vez la desventaja de que a medida que pasa el tiempo los poros se obstaculizan por los granos de arena, lo que hace que sea un sistema de drenaje no tan efectivo (Figura 2.14) [18].

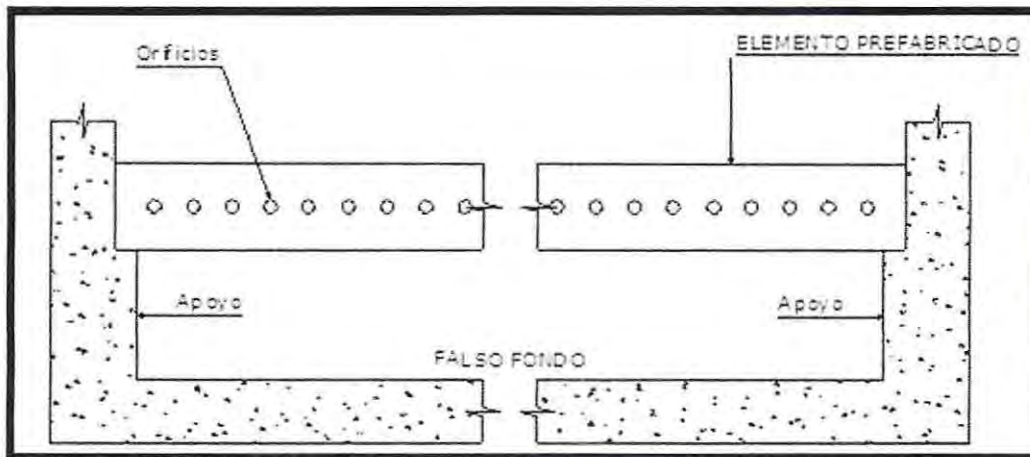


Figura 2.14- Placas porosas. Ref: CEPIS.

### 2.4.7 Clasificación de filtros según su sistema de lavado

El sistema de lavado se hace para evitar riesgos, como que penetren sólidos provenientes de las turbiedades a los medios de drenaje y también con el fin de mantener un mejor flujo de agua filtrada, ya que a medida que el filtro se va ensuciando empieza a filtrar menos agua, lo que implica el aumento de la pérdida de carga [18].

La limpieza de los filtros se puede hacer de dos formas:

- Removiendo la capa superficial del filtro en forma manual.
- Aplicando agua en sentido ascendente (retrolavado).

#### 2.4.7.1 Limpieza manual

Hace referencia al barrido de las capas superficiales, en donde son removidas y reemplazadas por una capa nueva. Esta situación, provoca que el mecanismo no cumpla con el perfil de eficacia requerido en el ámbito monetario y de tiempo [13]

#### 2.4.7.2 Sistemas de retrolavado

El sistema de retrolavado se produce gracias a la incorporación de un flujo ascendente sobre un medio granular y produce una fricción entre el líquido y las partículas que se encuentran en los lechos, ejerciendo una fuerza en sentido contrario a la del peso propio de los granos y que tienden a reorientarse (expandirse) de acuerdo a la menor resistencia al paso del flujo, por lo que dependerá netamente de la velocidad de lavado. Si la velocidad es baja, el lecho no se expande y no se producirá una mayor fricción, por lo que su porosidad no se modificará. Por el contrario, cuando la velocidad de lavado es alta, la fricción va aumentando hasta llegar a igualar el peso propio de las partículas, produciéndose una expansión y dejando de tener contacto las partículas unas con otras, quedando así suspendidas libremente en el líquido [18].

Los métodos de lavado con aplicación en sentido ascendente pueden ser con agua, con aire seguido de agua y agua con aire simultáneo, finalmente, agua simultánea. Ahora bien, los retrolavados pueden clasificarse según su tasa de lavado (según su velocidad de inyección ascendente) descrito a continuación y resumido en la Tabla 2.3:

- Retrolavado a alta tasa: ocurre una fluidización completa donde se expande de un 20-50% del lecho y este método se puede utilizar para filtros con lechos mixtos o de una sola capa [18].
- Retrolavado de tasa media: en este sistema de lavado se fluidiza el 50% de los granos finos, al contrario de los granos gruesos, por lo que se le conoce como velocidad intermedia de retrolavado. El lecho se logra expandir un 20% y este método se puede ocupar para filtros de lechos únicos o mixtos [18].
- Retrolavado de baja tasa: no se fluidiza el medio filtrante, no hay movimiento en las capas inferiores y muy poco en las capas superiores. Este método se puede ocupar sólo para lechos únicos [18].
- Retrolavado con inyección de aire: este sistema de retrolavado ayuda a que el lavado sea más eficiente, produciendo una mayor remoción de las partículas que se encuentran retenidas en los lechos y otorgando una mayor fluidización de las partículas. Este método se puede ocupar para filtros de alta tasa y baja tasa y también para lechos de una capa o lechos mixtos. Básicamente opera con la inyección de aire o aire y agua mediante la tubería de lavado [18].

Tabla 2.3- Tipos de lavado.

Tipo de lavado	Velocidad del agua m/h	Velocidad del aire m/h	Duración min
Sólo agua	19-60	-	10-15
Aire seguido de agua	12-55	15-90	2-10
Aire y agua simultáneamente	10-40	20-146	3-5

## 2.5 Modelos matemáticos de la filtración.

Los modelos matemáticos de la filtración son elementos que sirven para la evaluación de los filtros según las variables que afectan su funcionalidad, pero en la actualidad no existen modelos que permitan determinar los diferentes parámetros que inciden en el funcionamiento de un filtro debido a la gran diversidad de factores que afectan su funcionamiento y a distintos tipos de filtros que existen [13].

## 2.6 Modelo de ensuciamiento propuesto por Iwasaki e Ives.

El modelo matemático propuesto por Iwasaki e Ives (1960) es utilizado en este trabajo dado su simpleza y a su relación de las hipótesis planteadas por el modelo con la teoría presentada en este estudio.

El modelo matemático que se estudiará en este trabajo consiste en la utilización de un filtro tipo y se evaluará con las ecuaciones existentes para este tipo de filtro, donde el trabajo de la filtración se analizará según las siguientes hipótesis que propusieron los autores:

1. La remoción de material suspendido efectuada por el filtro es proporcional a la cantidad de material suspendido presente en el agua.
2. Las características de remoción de un filtro dependen de la superficie disponible en los granos del medio filtrante, de la tortuosidad del flujo dentro de los poros y de la velocidad intersticial.
3. Las principales fuerzas que operan para remover las partículas suspendidas en las líneas de flujo son gravitacionales, aun cuando las fuerzas de absorción sean las dominantes cuando las partículas alcanzan los granos del filtro.

De acuerdo a lo descrito, de las hipótesis propuestas por Ives se obtiene la siguiente ecuación

$$\frac{dC}{dL} = -\lambda * C$$

Ec 2.3

Donde:

$c$  = concentración volumétrica de partículas (volumen de partículas suspendidas por volumen de suspensión)

$L$  = profundidad de la capa de lecho filtrante que se considera.

$\lambda$  = módulo de impedimento o eficiencia de la capa  $dL$  del filtro.

Esta expresión indica que a mayor concentración de sólidos acumulados en un espesor de lecho existe un mayor impedimento del tránsito de las partículas, situación evidenciada en la Figura 2.15 [13].

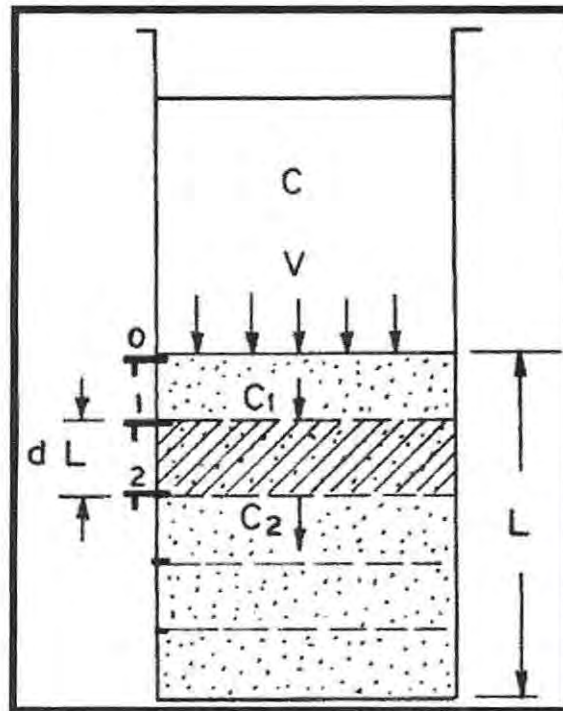


Figura 2.15- Diferencia de concentraciones en un lecho filtrante. Ref. CEPIS.

### 2.6.1 Variables de la ecuación de Ives

La Figura 2.15 muestra el proceso de filtración para un estrato de lecho ( $dL$ ) en donde se observan dos tipos de concentraciones,  $c_1$  y  $c_2$ , que corresponden a la entrada y salida del estrato  $dL$  [13]; de acuerdo a esto y despejando el módulo de impedimento de la Ecuación 2.3 se obtiene

$$\lambda = - \frac{c_1 - c_2}{\frac{dL}{c_1}}$$

Ec 2.4

En la Figura 2.15 se muestra  $V$  como la velocidad con la que escurre el floc a través del lecho filtrante, por lo que está directamente relacionada al caudal  $Q$ . También se puede observar el cambio de concentración de  $C_1$  a  $C_2$  debido a la acumulación de sólidos en el lecho y a esto lo llamaremos depósito específico ( $\sigma$ ) [13].

El depósito específico se conoce, básicamente, como el volumen depositado por unidad de volumen del medio filtrante, por lo que es una unidad adimensional [13].

$$\sigma = \frac{\text{volumen depositado}}{\text{volumen del lecho}}$$

Ec 2.5

El cambio de concentración o volumen de floc removido que pasa a través del estrato  $dL$  tiene que ser igual al volumen depositado en el medio filtrante de espesor  $dL$ .

Dónde:

$Q * dC * dt =$  Volumen de los sólidos que provienen del floc y que quedan retenidos en el espesor del lecho durante un determinado tiempo.

$-A * dL * d\sigma =$  Volumen de partículas acumuladas en el espesor  $dL$  producto del cambio de concentración.

$$Q * dC * dt = -A * dL * d\sigma$$

Ec2.6

$$\frac{Q}{A} * \frac{dC}{dL} = - \frac{d\sigma}{dt}$$

Ec 2.6a

$$V * \frac{dC}{dL} = - \frac{d\sigma}{dt}$$

Ec 2.6b

Reemplazando en Ec 2.3 se obtiene:

$$\lambda = \frac{d\sigma}{dt} * \frac{1}{v * C}$$

Ec 2.7

## 2.6.2 Solución de la ecuación de Ives

En este caso  $\lambda$  va a ir variando a medida que pasa el tiempo, debido a que se van acumulando más sólidos en el lecho filtrante. Esto se debe a que los poros de los granos del lecho se encuentran en un principio limpios y esto hace que a medida que pasa el flujo de agua entre los granos del lecho se vayan acumulando en los poros para, formar una lámina alrededor de los granos. Este caso se conoce como maduración del filtro y es un beneficio para el proceso de filtración, debido a que aumenta la superficie de contacto con el floc sin afectar la velocidad de escurrimiento del agua, aumentando así su eficiencia [13].

Para esto, Ives consideró que  $\lambda$  debe partir con un valor inicial  $\lambda_i$ , que es cuando empieza la carrera de filtración, y aumentando al inicio, por lo tanto  $\lambda$  será:

$$\lambda = \lambda_i + k * \sigma \quad \text{Ec 2.8}$$

Donde  $k$  es una constante empírica que está relacionada con el aumento de la superficie de contacto entre floc y lecho [13].

La maduración del filtro llega hasta un punto en que la acumulación de material dentro del lecho es tan grande que la superficie disponible para nuevos depósitos se hace cada vez más pequeña por lo que  $\lambda$  empieza a disminuir en proporción [13].

Lo que disminuye  $\lambda$  es

$$\Delta\lambda = -\frac{\phi * \sigma^2}{\varepsilon_0 - \sigma} \quad \text{Ec 2.9}$$

Donde  $\phi$  es una constante empírica que tiene relación con la disminución de los poros de los granos de la capa del lecho y  $\varepsilon_0$  es la porosidad inicial del lecho [13].

La eficiencia final del filtro es dada por la ecuación 2.10.

$$\lambda = \lambda_i + k * \sigma - \frac{\phi * \sigma^2}{\varepsilon_0 - \sigma} \quad \text{Ec 2.10}$$

La Ecuación 2.10 logra expresar el módulo de impedimento  $\lambda$  en función del depósito específico  $\sigma$ , que para el estudio de este trabajo es de suma importancia, para obtener su relación con los sólidos suspendidos totales [13].

La figura 2.16 muestra la curva de la eficiencia en relación al aumento del depósito específico:

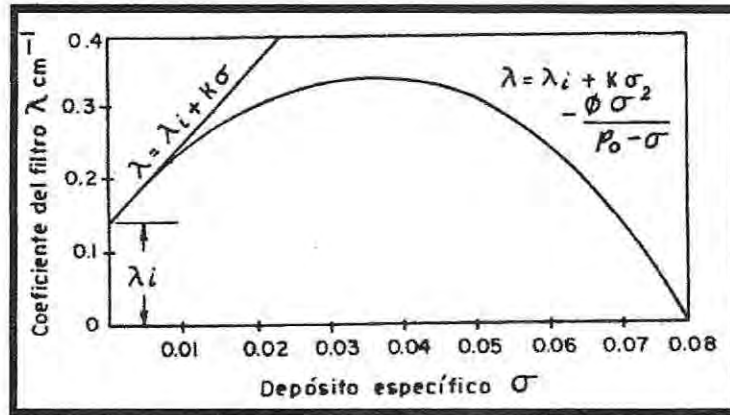


Figura 2.16- Evolución de la eficiencia con el depósito específico. Ref. CEPIS.

### 2.6.3 Nueva ecuación de Ives

En el año 1969 Ives propone un nuevo modelo, debido a las numerosas críticas que recibió de otros autores, que señalaban que el modelo propuesto por Ives en el año 1960 no demostraba el verdadero comportamiento de un filtro, ya que el estudio se basaba en partículas discretas no floculentas que son materiales, menos compactables, pero también las críticas concluyen que la primera parte de la expresión sí es válida, ya que demuestra el real comportamiento del filtro (Ec 2.12). El nuevo modelo se basa en la hipótesis de que  $\lambda$  es función de la superficie específica del filtro (superficie de material por unidad de volumen) y para comprenderlo se tiene que tomar en cuenta el principio de la carrera de filtración como un filtro constituido por granos esféricos en los cuales el material se deposita, incrementado la superficie de contacto, por lo tanto, también aumenta  $\lambda$ . A medida que la carrera progresa y aumenta el volumen de depósito, los granos del medio dejan de actuar como esferas independientes, por lo que el lecho se puede modelar como una capa llena de capilares cilíndricos [13].

Por lo que el modelo propuesto por Ives en el año 1969 queda de la siguiente manera

$$\lambda = \lambda_i * \left(1 + \frac{\beta * \sigma}{\varepsilon_0}\right)^y * \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^z * \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^x$$

Ec 2.12

Donde:

$\lambda_i$  = Eficiencia inicial

$\beta$  = constante que se calcula en base a la siguiente fórmula  $\frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0}$

$\sigma_u$  = es el límite de saturación del depósito que puede retener el filtro

$y, z, x$  = son constantes empíricas que varían según los distintos modelos que se consideren debido a la gran cantidad de variables que pueden interferir y buscan ajustarse a las condiciones experimentales de cada investigador, ya que si se reemplazan  $y, z, x$  por uno el modelo queda igual al propuesto en el año 1960.

## 2.7 Ecuaciones para la pérdida de carga en un filtro.

La pérdida de carga en un filtro es la altura  $h$  que se produce dados los esfuerzos de fricción que tiene el paso de un flujo  $Q$ , que pasa a través de una capa de espesor  $L$ . Al comenzar el trabajo del filtro que se encuentra en estado limpio, los granos del lecho se encuentran con sus poros limpios y la pérdida de carga se deberá solamente al tamaño, forma y porosidad, que corresponden a las características hidráulicas. También hay que considerar la viscosidad y velocidad de filtrado, pero a medida que pasa el flujo del agua se van acumulando sólidos que irán recubriendo los granos del lecho incrementando su diámetro  $dp$  en un valor  $\Delta d$ , disminuyendo su porosidad inicial  $\varepsilon_0$  en un valor  $\sigma$ , por lo que la pérdida de carga se irá incrementando a medida que exista una mayor resistencia para el paso del flujo  $Q$  [13].

De acuerdo con lo anterior, deben considerarse dos tipos de pérdida de carga, una que es mínima, que puede producir el filtro debido a las condiciones hidráulicas que presenta y condiciones del agua que será la pérdida de carga inicial  $h_0$  y la otra es la pérdida de carga por colmatación, que es producto de la acumulación de sólidos en el lecho filtrante, que estará en función del tiempo ( $h\Phi t$ )

La pérdida de carga total o final viene siendo la suma de las dos pérdidas de carga anteriores.

$$hf = h_0 + h\Phi(t)$$

Ec 2.13

### 2.7.1 Pérdida de carga inicial

La pérdida de carga inicial  $h_0$  se modeló a partir de la fórmula de Poiseulle donde se considera que los poros actúan como pequeños conductos a presión [18].

La fórmula de Poiseulle dice:

$$h_0 = k * \frac{L * v * v_i}{D^2 * g}$$

Ec 2.14

Donde:

$h_0$  = Pérdida de carga inicial  
 $v_i$  = Velocidad del flujo en el conducto  
 $k$  = Coeficiente de fricción  
 $L$  = Longitud del conducto  
 $D$  = Diámetro del conducto  
 $g$  = Gravedad  
 $v$  = Viscosidad cinemática

De acuerdo a esta ecuación Fair y Hatch (1933) propusieron las siguientes modificaciones para el modelo de la pérdida de carga inicial [18]:

- Diámetro  $D$ : se cambia la variable  $D$  por el radio hidráulico, como para un tubería  $R=D/4 \Rightarrow D=4R$
- Definiendo  $V$  como el volumen de los granos, el volumen del lecho será  $\frac{V}{1-\varepsilon_0}$ , el volumen de los poros será  $\frac{\varepsilon_0 * V}{1-\varepsilon_0}$  el radio hidráulico será

$$R = \frac{\text{Volumen de los poros del lecho}}{\text{Area de granos del lecho}}$$

Ec 2.15

- La velocidad intersticial del flujo en el lecho, es igual a la velocidad de aproximación del flujo dividida por la porosidad

$$v = \frac{v_s}{\varepsilon_0}$$

- La longitud  $L$  se hizo igual a la profundidad del lecho

Reemplazando los valores de acuerdo a las siguientes suposiciones se obtiene la pérdida de carga inicial expresada en la siguiente ecuación:

$$h_0 = \frac{k * L * v * v_s}{[4 \left( \frac{\varepsilon_0 * V}{(1 - \varepsilon_0) * A} \right)]^2 * \varepsilon_0 * g}$$

Ec 2.16

Ordenando la ecuación 2.16 queda de la siguiente manera:

$$h_0 = \frac{f * L * v * v_s * (1 - \varepsilon_0)^2}{g * \varepsilon_0^3} * \left( \frac{A}{V} \right)^2$$

Ec 2.17

$f = \frac{k}{16}$  es una constante adimensional que generalmente es igual a 5

Donde  $\frac{A}{V} * D_c = S_0$  es el factor de forma.

### 2.7.2 Casos para la aplicación de la ecuación de la pérdida de carga inicial

Para la utilización de la ecuación número 2.17 se deben considerar cuatro formas que tienen directa relación con el tipo de lecho y a la organización de las capas filtrantes.

- Cuando los granos son esféricos y de diámetro uniforme.
- Cuando los granos no son esféricos, pero son de diámetro uniforme.
- Cuando los granos no son esféricos ni de diámetro uniforme ni están estratificados en el lecho.
- Cuando los granos no son esféricos, ni de diámetro uniforme, pero están estratificados en el lecho.

#### 2.7.2.1 Cuando los granos son esféricos y de diámetro uniforme

En este caso la ecuación 2.17 no sufre mayores cambios quedando de la siguiente manera:

$$h_0 = \frac{f * L * v * v_s * (1 - e_0)^2}{g * \varepsilon_0^3} * \left( \frac{\pi * D_c^2 * 6}{\pi * D_c^3} \right)^2$$

Ec 2.18

Ordenando y simplificando queda de la siguiente manera:

$$h_0 = \frac{180 * L * v * v_s * (1 - \varepsilon_0)^2}{g * \varepsilon_0^3 * Dc^2}$$

Ec 2.19

### 2.7.2.2 Cuando los granos no son esféricos, pero son de diámetro uniforme

En este caso, hay que introducir un coeficiente de esfericidad debido a que las partículas que pueden actuar como lecho no son esféricas, para esto Carman (1937) ideó una forma de conversión para partículas no esféricas, especificada en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4- Coeficientes de esfericidad para partículas no esféricas

Material	Ce
Vidrio molido	0.65
Carbón pulverizado	0.73
Polvo de carbón Natural (Hasta 3/8")	0.65
Hojilla de mica	0.28
Arena (Promedio de varios tipos)	0.75
Arena cuarcítica (aristas afiladas)	0.66
Arena cuarcítica (plana y afilada)	0.43
Arena de Ottawa (casi esférica)	0.95
Arena redondeada	0.82
Arena angular	0.73
Esferas	1

El factor de forma queda modificado de la siguiente manera

$$S_0 = Ce * \frac{A}{V} * Dc$$

Ec 2.20

La ecuación para partículas no esféricas y de diámetro uniforme se resume de la siguiente manera

$$h_0 = \frac{h_0 \text{ para partículas esféricas}}{Ce^2}$$

Ec 2.21

### 2.7.2.3 Cuando los granos no son esféricos ni de diámetro uniforme y tampoco están estratificados en el lecho

Para este caso hay que considerar la dispersión de las partículas según su granulometría y organización dentro del lecho, por lo que se tendrá que modificar el factor de forma  $S_0$  de acuerdo con la siguiente expresión [18]:

*"La no estratificación de los lechos ocurre generalmente en los filtros lentos debido a que en el lavado no ocurre un orden natural de acuerdo a sus tamaños y densidades" [1]*

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{Ce} * \sum_{i=1}^i \frac{x_i}{d_i}$$

Ec 2.22

Donde:

$x_i$ = Proporción de arena retenida entre dos tamices consecutivos

$d_i$ = Diámetro promedio entre los dos tamices

Por lo que la ecuación de pérdida de carga inicial para este caso queda de la siguiente manera:

$$h_0 = \frac{f * L * v * v_s * (1 - \varepsilon_0)^2}{g * \varepsilon_0^3} * \left[ \frac{6}{Ce} * \sum_{i=1}^i \frac{x_i}{d_i} \right]^2$$

Ec 2.23

#### 2.7.2.4 Cuando los granos no son esféricos, ni de diámetro uniforme, pero están estratificados en el lecho

En este caso, la pérdida de carga inicial será la suma de las pérdidas de carga en cada capa que conforman un espesor de lecho con cierta granulometría y espesor diferente. La estratificación ocurre en forma natural en un filtro rápido debido a que dentro del proceso de lavado las partículas tienden a acomodarse de acuerdo a sus tamaños y densidades quedando colocados de menor a mayor tamaño [1]

El factor de forma queda de la siguiente manera:

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{Ce} * \frac{1}{d_i}$$

Ec 2.24

Quedando en este caso la pérdida de carga inicial de la siguiente manera:

$$h_0 = \frac{f * L * v * v_s * (1 - \varepsilon_0)^2}{g * \varepsilon_0^3} * \frac{36}{Ce^2} * \sum_{i=1}^i \frac{x_i}{d_i^2}$$

Ec 2.25

#### 2.7.3 Pérdida de carga por colmatación del lecho

De acuerdo a lo estipulado en el capítulo 2.7 existen dos parámetros para considerar la pérdida de carga total dentro de un filtro rápido, la pérdida de carga inicial  $h_0$  y la pérdida de carga producto de la colmatación  $h(t)$ . La pérdida de carga producto de la colmatación ocurre gracias al depósito específico definido en la Ec 2.5, el cual va a producir un aumento en la pérdida de carga a medida que pasa el tiempo, incrementado así el depósito específico en la o las capas del lecho.

Esta pérdida  $h(t)$  de carga depende del tipo del medio filtrante, la tasa de filtración, la viscosidad del agua y las características de la suspensión. Lo ideal para el depósito específico es que sea uniforme en todo el lecho filtrante, pero en la realidad no ocurre esto, debido a que casi todos los sólidos quedan depositados en las primeras capas del lecho y muy pocos en las capas más profundas.

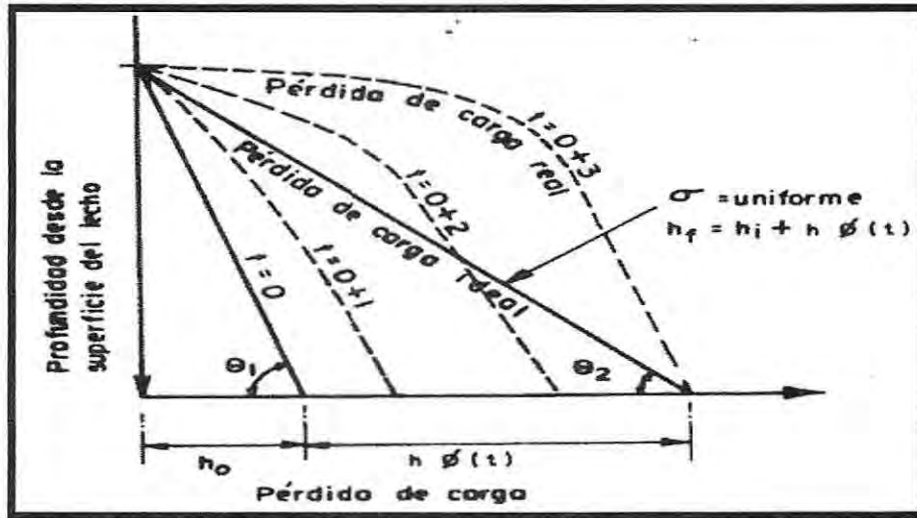


Figura 2.17 Comparación de pérdida de carga real con la ideal. Ref: CEPIS

El modelo establecido para la pérdida de carga final fue realizado por Camp (1964) en donde propuso una ecuación para el incremento de la pérdida de carga total o final considerando la formación de una película  $\Delta Dc$  alrededor del grano, la cual reduce la porosidad inicial  $\epsilon_0$  en un valor  $\sigma$ . Reemplazando  $Dc$  por  $Dc + \Delta Dc$  y  $\epsilon_0$  por  $\epsilon_0 - \sigma$  en cualquier ecuación propuesta anteriormente para la pérdida de carga inicial es válida.

Analizando el caso a) del punto 2.7.2 La pérdida de carga final queda de la siguiente manera:

$$h_f = \frac{180 * L * v * v_s * (1 - \epsilon_0 + \sigma)^2}{g * (\epsilon_0 - \sigma)^3} * \frac{1}{(Dc + \Delta Dc)^2}$$

Ec 2.26

De acuerdo a los análisis y conociendo el depósito específico se obtiene que [19].

$$Df = Dc + \Delta Dc \approx Dc * \sqrt{\frac{\sigma}{3(1-\epsilon_0)} + \frac{1}{4}}^{-1/2}$$

Ec 2.27

Reemplazando la Ec 2.27 en la Ec 2.26 se obtiene:

$$h_f = \frac{180 * L * v * v_s * (1 - \epsilon_0 + \sigma)^2}{g * (\epsilon_0 - \sigma)^3} * \frac{1}{Dc^2 * \sqrt{\frac{\sigma}{3 * (1 - \epsilon_0)} + \frac{1}{4}}}$$

Ec 2.28

La ecuación 2.28 refleja la pérdida de carga para un filtro donde el lecho filtrante presenta granos esféricos y de diámetro uniforme, como lo propusieron Fair y Hatch (1933) y de acuerdo a esta ecuación se basará el estudio sobre la evolución de la pérdida de carga en un filtro rápido, teniendo en cuenta estas variables.

### 2.7.3.1 Variables para la ecuación de la pérdida de carga final

Las variables de esta ecuación están en el sistema CGS y según las definiciones anteriores se propuso que:

$L$  = es el espesor de la capa filtrante (cm)

$g$  = la aceleración de gravedad ( $\text{cm/s}^2$ ) = 981

$v_s$  = velocidad de filtración (cm/s)

Para el uso práctico, las variables tienen las siguientes limitaciones:

La viscosidad cinemática dependerá netamente de la temperatura del agua, la cual tiene una tabulación, indicada en la Tabla 2.5 [20].

Tabla 2.5- Relación entre temperatura y viscosidad cinemática

Temperatura del agua en °C	Viscosidad cinemática $\text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad cinemática $\text{cm}^2/\text{s}$
0	$1.785 \cdot 10^{-6}$	0.01785
5	$1.519 \cdot 10^{-6}$	0.01519
10	$1.306 \cdot 10^{-6}$	0.01306
15	$1.139 \cdot 10^{-6}$	0.01139
20	$1.103 \cdot 10^{-6}$	0.01103
25	$0.893 \cdot 10^{-6}$	0.00893
30	$0.800 \cdot 10^{-6}$	0.00800
40	$0.658 \cdot 10^{-6}$	0.00658
50	$0.553 \cdot 10^{-6}$	0.00553
60	$0.474 \cdot 10^{-6}$	0.00474
70	$0.413 \cdot 10^{-6}$	0.00413
80	$0.364 \cdot 10^{-6}$	0.00364
90	$0.326 \cdot 10^{-6}$	0.00326
100	$0.294 \cdot 10^{-6}$	0.00294

El diámetro del grano  $D_c$  se limita dependiendo del tamaño efectivo que se utilice en el filtro, estas limitaciones se encuentran en las Tablas 2.1 y 2.2 respectivamente.

La porosidad dentro del lecho en la práctica no es constante, sino que cambia con la velocidad de lavado y con la de sedimentación de las partículas, por lo que la porosidad se puede obtener de acuerdo a la siguiente expresión [13].

$$\varepsilon_0 = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen total}} * 100$$

Ec 2.29

En el caso del depósito específico ( $\sigma$ ), no hay una forma acertada de poder obtener esta variable, debido a que el asentamiento de las partículas dentro del área del filtro es variable y se distribuyen de manera diferente. Debido a que no se puede determinar de manera clara y fidedigna, en este estudio se intentará expresar el depósito específico en función de la turbiedad removida en el filtro. Este método se explicará en el capítulo 4.

# CAPÍTULO III

## Relación de la turbiedad con los sólidos totales suspendidos.

### 3.1 Turbiedad.

La turbiedad es la reducción de la transparencia del agua debido a las impurezas que presenta una muestra [21].

La turbiedad se refiere a lo clara o turbia que puede estar el agua. El agua clara tiene un nivel de turbiedad bajo, mientras que el agua turbia presenta altos niveles de sólidos suspendidos totales [21].

La turbiedad es causada por partículas suspendidas en el agua, que pueden ser tierra, sedimentos, aguas residuales o plancton. La turbiedad producto de la tierra se puede deber al escurrimiento o erosión de tierras cercanas y el movimiento de estas tierras hace que se liberen sedimentos, que son los principales causantes de la turbiedad. Las aguas residuales son el resultado de las descargas de aguas servidas y los altos niveles de plancton, que pueden deberse a la gran cantidad de nutrientes presentes en el agua [22].

### 3.2 Medición de la turbiedad.

La turbia apariencia que presenta el agua es causada por el material en suspensión y es de suma importancia medir este fenómeno y regularlo para su distribución. Generalmente se asocia a la contaminación del agua. En la actualidad existen diversas formas de medir la turbiedad pero hay tres principales. La más usada es la Unidad Nefelométrica de Turbiedad, que se expresa en NTU, el otro método es la Unidad de Turbiedad de Jackson (JTU) y la unidad de silicio ( $\text{mg SiO}_2/\text{l}$ ) [23].

#### 3.2.1 Unidad Nefelométrica.

Unidad Nefelométrica de turbiedad es medida gracias a un instrumento llamado Nefelómetro, que mide la intensidad de una luz infrarroja dispersada a 90 grados sobre una muestra de vidrio [23].

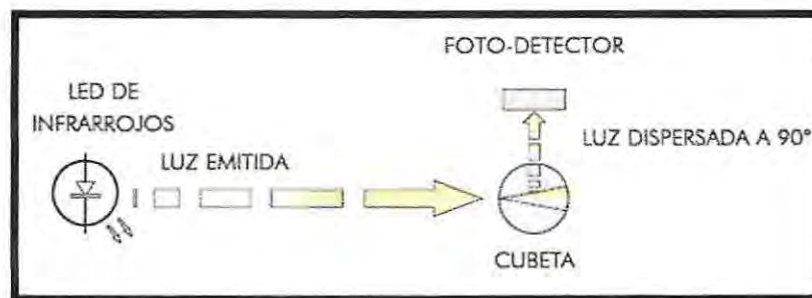


Figura 3.1 Mecanismo de funcionamiento del Nefelómetro. Ref: 23

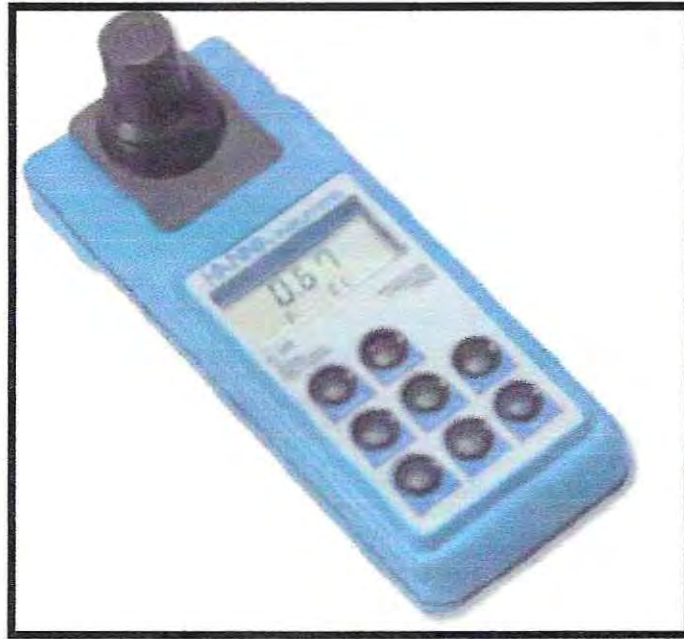


Figura 3.2 Turbidímetro. Ref.23

### 3.2.2 Unidad de Jackson.

Unidad de Turbiedad de Jackson es una medición no utilizada actualmente en plantas de tratamiento, pero sí lo es en lugares donde se tiene que medir turbiedades altas en grandes volúmenes, como en ríos, lagos y mares. En la actualidad se mide a través de un Disco Secchi, el que es introducido en el agua hasta que se pierda de vista y esta medición proporciona una estimación de la penetración luminosa del agua [23].

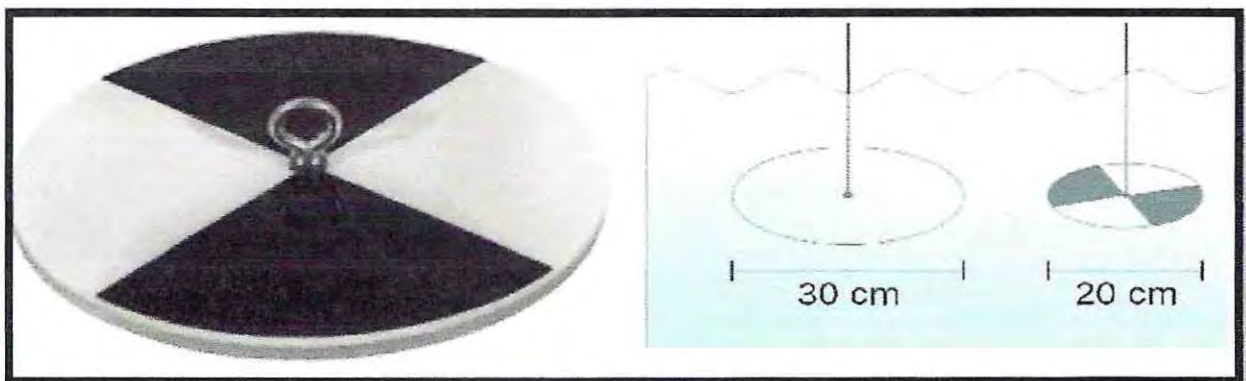


Figura 3.2 Disco Secchi. Ref. 23

### 3.2.3 Unidad de silicio.

Esta unidad corresponde a la obstrucción óptica que tiene la luz causada por una parte por millón de sílice en agua destilada.

Las unidades que se describieron anteriormente se pueden transformar utilizando la siguiente tabla:

Tabla 3.1- Conversiones de turbiedad.

	NTU	JTU	SiO <sub>2</sub> mg/l
NTU	1	0.053	0.13
JTU	19	1	2.5
SiO <sub>2</sub> mg/l	7.5	0.4	1

La turbiedad presente en la entrada de los filtros en una PTA es formada gracias a coagulantes que hacen que se aglutinen los sólidos, formando el floc y separando el líquido del sólido presente en el agua y que forma la turbiedad. Esto se explicó en mayor profundidad en el Capítulo I. Gracias al tratamiento previo, hay un mayor control de la turbiedad en la entrada a los filtros y debido a esto, se puede tener un equilibrio con respecto a las turbiedades de salida [23].

### 3.3 Floc.

El floc es uno de los principales factores que influyen en el proceso de filtración, debido a que según el tipo de floc se establecerá directamente la duración de la carrera de un filtro y la turbiedad del agua a la salida de él [13].

Los tipos de floc se pueden analizar según sus características físicas y químicas, por la influencia de la temperatura y por su dureza [13].

#### 3.3.1 Características físicas.

Las características físicas de un floc son el volumen, densidad y tamaño del floc. Estas características se asocian directamente a la rapidez con la que aumenta la pérdida de carga en un filtro. Si el floc tiene un gran volumen, se colmatarán los lechos más rápido, tapando los poros de los granos del lecho. La densidad está directamente asociada a la fuerza de Van der Waals, ya que si el floc es más denso la fuerza de atracción de Van der Waals será mayor y con la opción de que pueda situarse en zonas del lecho más profundas [13].

#### 3.3.2 Características químicas.

Las características químicas del floc están relacionadas con el contacto que tienen con el lecho filtrante y principalmente se deben al potencial zeta, que es la intensidad del campo eléctrico entre el grano y el fluido. En este caso se han hecho estudios para determinar la carga química que tienen ciertos elementos que forman el floc y las cargas que tiene el lecho filtrante y se concluyó que los elementos de arenas (sílica) y arcillas que se encuentran en el agua son electronegativos, pero al agregarle el coagulante, su carga negativa disminuye desde un -25 o -15 mv hasta -5 ó 0 mv En ocasiones puede llegar a ser positivo cuando se le agrega un exceso de coagulante (coagulación por barrido), el lecho filtrante también es un material con carga electro negativa provocando que se repelan el floc con el lecho filtrante, pero Edwards y Monke (6) mediante estudios, encontraron que la capa superficial del filtro a una altura de (3/16") es fuertemente electropositiva, debido a que está constituida esencialmente por material orgánico (bacterias, algas, etc). Gracias a esta capa se producen fuerzas atractivas entre el lecho y el floc. Esto explica como existe una mayor remoción de partículas en los primeros 2.5 cm del lecho y que vaya aumentando su eficiencia durante el tiempo (periodo de maduración) [13].

### **3.3.3 Influencia de la temperatura.**

La influencia de la temperatura afecta a los mecanismos físicos y químicos del proceso de filtración. Se producirá una menor pérdida de carga a menor temperatura, debido a la lenta remoción del floc y también que a medida que la temperatura sea menor el floc entrará en las capas más profundas del lecho. Estas conclusiones fueron de acuerdo a los ensayos de Dostal y Robeck [13].

### **3.3.4 Dureza del floc.**

La dureza del floc está relacionada con el efecto que puede producir la pérdida de carga en un filtro debido a la calidad de la turbiedad de salida antes o después que ocurra la máxima pérdida de carga permitida. Para esto existen tres rangos de floc [13]:

- Floc blando.
- Floc duro.
- Floc recomendado.

En función de la ocurrencia los instantes de máxima turbiedad permisibles ( $t_1$ ) y de máxima pérdida de carga en el filtro ( $t_2$ ), se relacionan los tres rangos de dureza del floc [13].

#### **3.3.4.1 Floc blando.**

Se habla de floc blando cuando la máxima turbiedad efluente permisible se produce antes de que se produzca la máxima pérdida de carga  $t_1 < t_2$  [13].

#### **3.3.4.2 Floc duro.**

Se habla de floc duro cuando la máxima turbiedad efluente permisible se produce después de la máxima pérdida de carga  $t_1 > t_2$  [13].

#### **3.3.4.3 Floc recomendado.**

El floc recomendado es el ideal y se produce cuando existen la máxima pérdida de carga y la máxima turbiedad admisibles al mismo tiempo  $t_1 = t_2$  [13].

### 3.4 Balance de masas.

El balance de masas trata de un modelo físico que se basa en la ley de la conservación de la masa. En este caso, tiene como finalidad el análisis de la filtración, el que permite determinar la cantidad de material retenido en el lecho del filtro según el tiempo de carrera del filtro. El balance de masas dentro de un filtro se analiza según la turbiedad de entrada, que es variable y la turbiedad que sale del filtro con una calidad también variable. En donde el proceso retiene prácticamente todas las partículas suspendidas que trae el agua [19].

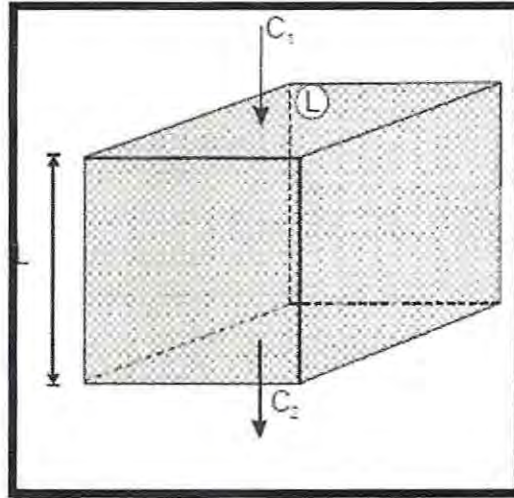


Figura 3.3 Balance de masas

$$\text{Turbiedad de Entrada} = \text{Turbiedad de salida} + \text{Material Retenido en el Filtro}$$

Ec 3.1

### 3.5 Sólidos suspendidos totales.

Los sólidos en suspensión son los que forman la turbiedad y, como se dijo anteriormente, tienen diferentes formas de medición, pero principalmente la que opera en una P.T.A. son las Unidades Nefelométricas (NTU). Debido a esto es de suma importancia para este trabajo de título conocer las masas de estas turbiedades para poder realizar el balance de masas y realizar el desarrollo de la ecuación de Camp propuesta en el Capítulo II [23].

#### 3.5.1 Ensayos de sólidos suspendidos totales.

Los ensayos de sólidos suspendidos totales SST que se realizaron fueron dentro de la P.T.A. de ESVAL, en los cuales se tomaron muestras de 13 puntos diferentes para obtener diferentes turbiedades y así poder tener una relación entre SST y la turbiedad.

Las muestras tomadas en la P.T.A. fueron analizadas en el laboratorio perteneciente a la empresa ESVAL. Las muestras tienen que tener una forma de ser tomadas y que cumplan con la norma NCh 426/2 - Of. 1997, que corresponde al almacenaje de las muestras que se debe hacer en una botella de plástico de polipropileno, que la temperatura del agua sea preferentemente a 4°C y sin que le dé la luz, para detener los procesos de crecimiento de algas mientras la muestra esté almacenada, que podrían dar cálculos erróneos en la medida.

El método del análisis para la determinación más general de los SST es la filtración mediante filtros de 45  $\mu\text{m}$  y su posterior secado en una estufa a 103-105  $^{\circ}\text{C}$  [24].

Los aparatos ocupados en el laboratorio para la determinación de los SST son:

- a) Una estufa.
- b) Una balanza de al menos 3 cifras decimales.
- c) Un desecador, con desecante adecuado,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , cloruro cálcico.

### 3.5.2 Procedimiento del ensayo.

El agua se analiza a temperatura ambiente, por lo que al sacarla del refrigerador hay que dejarla un tiempo para luego agitarla y lograr una suspensión homogénea y no haya errores en la medida. El filtro de 45  $\mu\text{m}$  que se utiliza se seca a 103-105  $^{\circ}\text{C}$ , hasta un peso constante y se deja enfriar a temperatura ambiente en un desecador para preservarlo de la humedad. El filtro ya seco se coloca encima de un vidrio poroso y se le añade un volumen conocido de la muestra de agua, ayudándose del vacío. Una vez que ha pasado toda el agua, el filtro con los sólidos retenidos se lleva a la estufa a 103  $^{\circ}\text{C}$ , para evaporar la humedad que contenga, se deja en el desecador hasta lograr temperatura ambiente, pesándose en la balanza. Este último paso se vuelve a repetir hasta pesada constante, que es entre el 4 y el 5% de la pesada anterior [24].

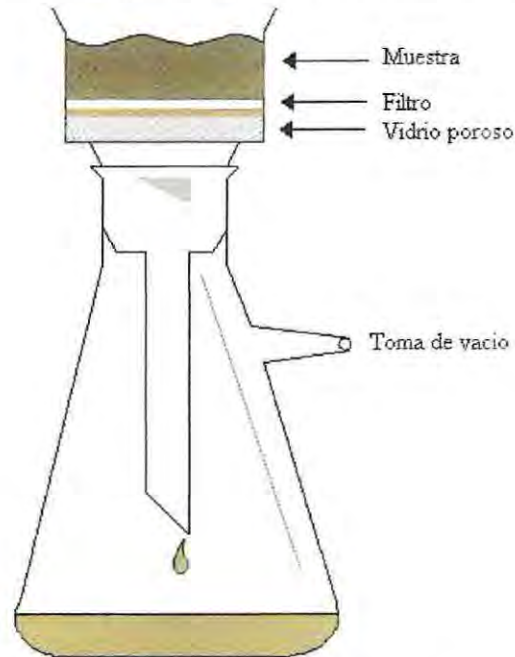


Figura 3.4 Instrumento de ensayo para obtener SST

Los sólidos en suspensión se calculan con la siguiente fórmula:

$$\text{Sólidos suspendidos totales} = \frac{(A-B) \cdot 1000}{V} \text{ mg/l}$$

Ec 3.2

Donde:

A= Peso del filtro con los SST, en gramos.

B= Peso del filtro vacío, en gramos.

V= Volumen de la muestra, en litros.

Donde A se calcula con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{C * V}{V^*}$$

Ec 3.3

C= Sólidos en suspensión de la muestra diluida, en gramos.

V\*= Volumen de muestra tomado para la disolución, en litros.

V= Volumen de la muestra, en litros.

### 3.5.3 Datos para laboratorio.

Los datos pedidos para poder tomar los puntos de muestreo son el lugar donde se tomó la muestra, el código del envase donde va la muestra, la turbiedad tomada en situ y la hora en que se tomó la muestra. Los que se observan en la Tabla N° 10 son los tomados en situ antes de llevar a laboratorio.

Tabla 3.2- Muestreo de turbiedades en el día 6 de septiembre del 2013

Lugar de Muestreo	Código de envase	Turbiedad NTU	Hora de muestreo
Bocatoma Captación	AS 1406	14.5	12:01
Agua Filtrada Planta 1	AS 350	2.17	12:06
Filtro N°9 Decantada	AS 2031	4.03	12:15
Filtro N° Filtrada	AS 1269	0.46	12:17
Filtro N°8 Decantada	AS 374	4.99	12:21
Filtro N°8 Filtrada	AS 1411	0.63	12:25
Filtro N°4 Decantada	AS 2178	3.90	12:28
Filtro N°4 Filtrada	AS 3105	0.51	12:30
Filtro N°5 Decantada	AS 361	4.12	12:33
Filtro N°5 Filtrada	AS 2194	0.47	12:35
Decantador Planta 1 Oriente 2	AS 53	2.63	12:40
Decantador Planta 2	AS 3068	6.50	12:47
Decantador Planta 1 Oriente 3	AS 1529	6.72	13:33

### 3.5.4 Resultados entregados por el laboratorio.

Los resultados entregados por el laboratorio fueron los siguientes:

Tabla 3.3- Resultados del laboratorio.

Lugar de Muestreo	Turbiedad NTU	Sólidos Suspendidos Totales mg/l
Bocatoma Captación	14.5	6
Agua Filtrada planta 1	2.17	<2.9
Filtro N°9 Decantada	4.03	8
Filtro N°9 Filtrada	0.46	<2.9
Filtro N°8 Decantada	4.99	10
Filtro N°8 Filtrada	0.63	<2.9
Filtro N°4 Decantada	3.90	6
Filtro N°4 Filtrada	0.51	<2.9
Filtro N°5 Decantada	4.12	7
Filtro N°5 Filtrada	0.47	<2.9
Decantador Planta 1 Oriente 2	2.63	3
Decantador Planta 2	6.50	8
Decantador Planta 1 Oriente 3	6.72	12

En los resultados entregados por el laboratorio hubo muestras que presentaban SST menores a 2.9 mg/l, valores que no se pueden determinar mediante este tipo de ensayo y también por los equipos presentes en el laboratorio. Para su mejor comprensión se analizaron como cero y se estructura un gráfico de turbiedad vs SST para ver si existe una tendencia ver gráfico 3.1.

Tabla 3.4- Resultados del laboratorio con ceros.

Lugar de Muestreo	Turbiedad NTU	Sólidos Suspendidos Totales mg/l
Bocatoma Captación	14,5	6
Agua Filtrada planta 1	2,17	0
Filtro N°9 Decantada	4,03	8
Filtro N°9 Filtrada	0,46	0
Filtro N°8 Decantada	4,99	10
Filtro N°8 Filtrada	0,63	0
Filtro N°4 Decantada	3,9	6
Filtro N°4 Filtrada	0,51	0
Filtro N°5 Decantada	4,12	7
Filtro N°5 Filtrada	0,47	0
Decantador Planta 1 Oriente 2	2,63	3
Decantador Planta 2	6,5	8
Decantador Planta 1 Oriente 3	6,72	12

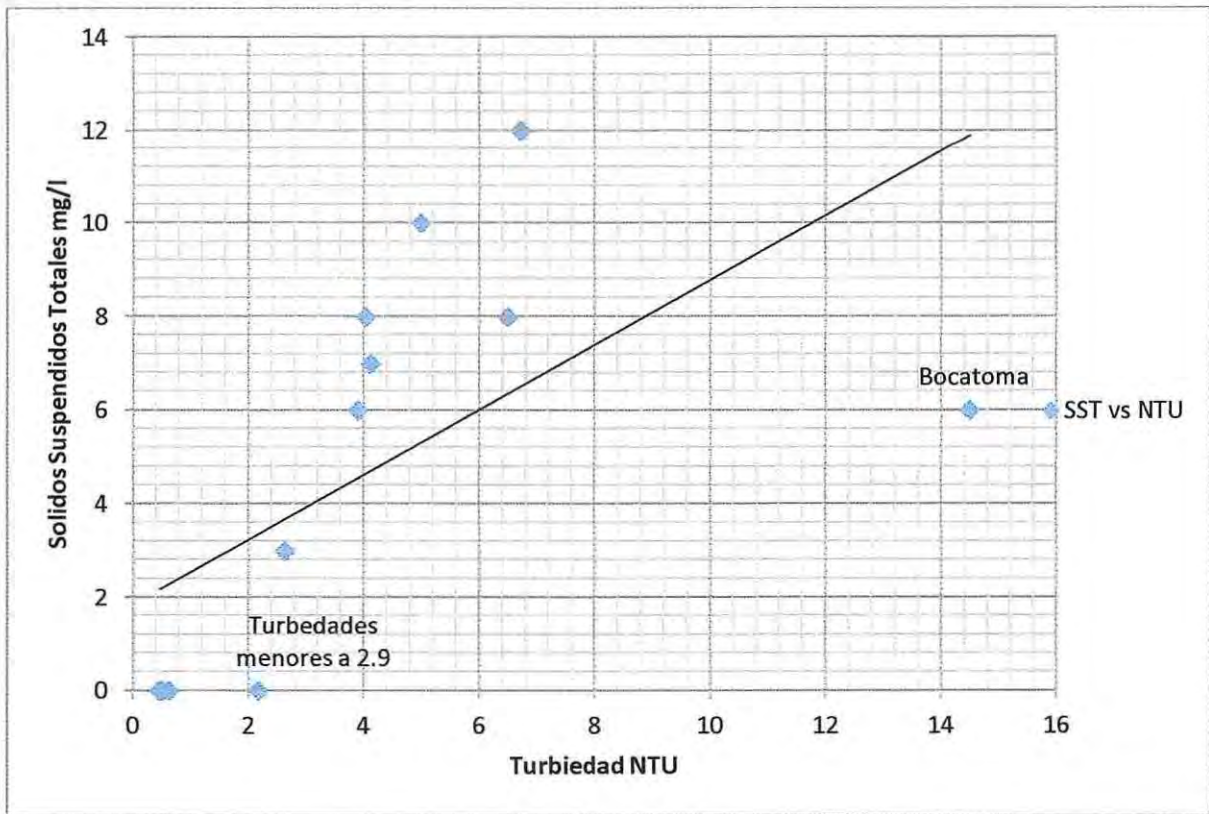


Gráfico 3.1 SST vs Turbiedad

En el gráfico anterior se observa que hay puntos que salen de la tendencia sin considerar los puntos que tienen cero SST. Esto se debe a que hay puntos, como los que se tomaron en la bocatoma de captación y los puntos de la planta número dos, que tienen diferentes naturalidades. En el caso del punto de la bocatoma es donde existe la mayor turbiedad que es de 14.5 NTU y los ensayos de laboratorio entregaron un valor de 6 mg/l de SST, menor a otras turbiedades menores; Esto se debe a que el agua en ese punto no tiene tratamiento alguno y no presenta coagulantes que ayuden a formar el floc. En cambio, en la planta número dos se encontró también un punto que no presenta tendencia comparado con los demás puntos, debido a diferentes concentraciones de coagulante. Como conclusión se considerarán los puntos de la planta número uno debido a que presentan tendencia, ya que se le aplicó la misma cantidad de coagulante durante el periodo de tiempo en que se tomaron las muestras.

Algunos resultados entregados por el laboratorio se eliminarán para poder tener una mejor tendencia debido a que presentan diferentes características físico- químicas al resto de las muestras, que serían los puntos tomados en la bocatoma y planta número dos. También se eliminarán los puntos que presentan SST menores a 2.9, ya que no presentan sólidos SST según el análisis de laboratorio quedando la tabla de la siguiente manera:

Tabla 3.5- Puntos Considerados para la Tendencia.

Lugar de Muestreo	Turbiedad NTU	Sólidos Suspendidos Totales
Filtro N°9 Decantada	4,03	8
Filtro N°8 Decantada	4,99	10
Filtro N°4 Decantada	3,9	6
Filtro N°5 Decantada	4,12	7
Decantador Planta 1 Oriente 2	2,63	3

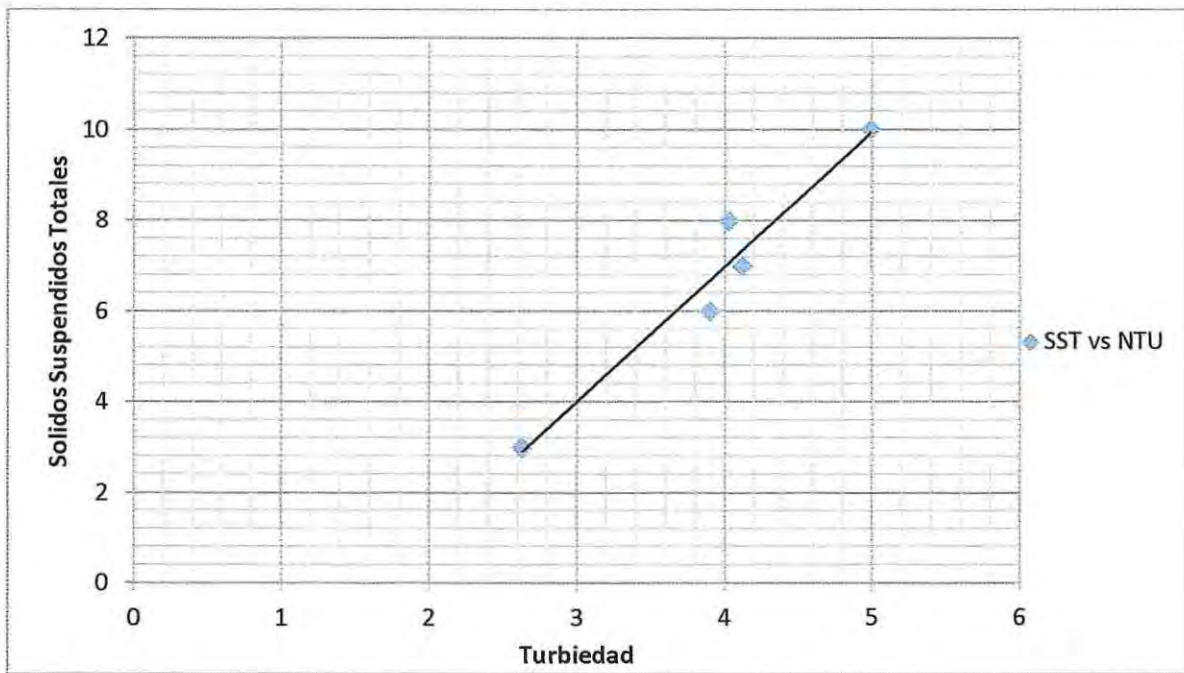


Gráfico 3.2 Turbiedad vs SST Ajustado

Del gráfico N° 3.2 se ocuparon 5 datos de los 13 analizados, que corresponden a los más representativos de la relación con la turbiedad y los SST de la planta número 1, correspondiente al tipo de tratamiento que existe, según sus coaguladores y decantadores. Debido a eso se llegó a la conclusión que se tomaran sólo puntos de esa zona. La cantidad de puntos está limitada directamente a los lugares donde se toman las muestras, ya que no hay más lugares de donde se puedan obtener turbiedades distintas. De acuerdo al mismo gráfico se modeló una recta para el balance de masas y poder tener una referencia de SST para distintas turbiedades válida para turbiedades superiores a 2.9 NTU.

### 3.6 Método de ajuste por mínimos cuadrados.

$$y = a * x + b$$

Ec 3.4

Lo primero es conocer su correlación para determinar si efectivamente se puede modelar como una recta, para eso se ocupó el método de la varianza de la correlación lineal.

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}$$

Ec 3.5

Tabla 3.6- Mínimos cuadrados.

xi	yi	xi^2	yi^2	xi*yi
4.03	8	16.2409	64	32.24
4.99	10	24.9001	100	49.9
3.9	6	15.21	36	23.4
4.12	7	16.9744	49	28.84
2.63	3	6.9169	9	7.89

Tabla 3.7- Puntos para determinar la varianza.

	xi	yi	xi^2	yi^2	xi*yi
Suma	19.67	34	80.2423	258	142.27
Promedio	3.934	6.8	16.04846	51.6	28.454
$\sigma_x^2$	0.572104				
$\sigma_y^2$		5.36			

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum xi^2}{n} - \bar{xi}^2$$

Ec 3.6

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum yi^2}{n} - \bar{yi}^2$$

Ec 3.7

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum xi * yi}{n} - \bar{xi} * \bar{yi}$$

Ec 3.8

De acuerdo con las ecuaciones anteriores se calculó una correlación de 0,97239732, lo que indica que sí se puede estimar a una recta, debido a que es cercano a 1.

Para determinar la pendiente y el intercepto se ocuparon las siguientes fórmulas:

$$a = \frac{n(\sum xi * yi) - (\sum xi) * (\sum yi)}{n(\sum xi^2) - (\sum xi)^2}$$

Ec 3.9

$$b = \frac{\sum yi - a * \sum xi}{n}$$

Ec 3.10

Calculando estas ecuaciones se obtiene como resultado una pendiente  $a=2.97638$  y un intercepto  $b= -4.90909$ , resultando la siguiente ecuación para poder determinar los SST:

$$y=2.97638*x-4.90909$$

Ec 3.11

## CAPÍTULO IV

### Resultado del ensayo según el balance de masas.

Los ensayos para la evolución de la pérdida de carga se realizaron en la planta de tratamiento de Concón, el filtro utilizado fue el filtro número 1 de la planta 1 (planta antigua).

#### 4.1 Descripción del filtro utilizado

El filtro utilizado es uno de los 14 filtros presentes en la planta 1 y tiene una dimensión de 9.5 m x 4 m, otorgando un área filtrante de 38m<sup>2</sup>. Éste tiene una altura de agua, sin considerar el lecho filtrante, de 1.5 m [12].



Figura- 4.1 Filtro Utilizado. Ref: Planta de Concón

El sistema de drenaje está constituido por un fondo tipo Wheeler, además de una capa de lecho de soporte compuesto por 5 niveles de distintas granulometrías que van de los 12 mm hasta los 2 mm, la altura del material de soporte es de 0.5 m. La capa está conformada por un solo tipo de lecho y está compuesta de arena, cuyas características son  $C_u=1.5$  y el  $TE= 0.5$  mm. La altura del material del lecho filtrante es de 0.65 m [12].



Figura- 4.2 Superficie del lecho filtrante. Ref: Planta de Concón

El filtro trabaja con una tasa declinante que va de los  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$  a los  $80 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ , trabajando de forma recomendada [12].



Figura 4.3- Afluente del filtro utilizado flotador desconectado. Ref: Planta de Concón

El filtro está construido por hormigón en masa y cuenta con dos canaletas del mismo material ubicadas a una altura de 1.85 m sobre la primera capa filtrante, que tienen como función transportar el agua de llenado para el inicio de la carrera y también transportar el agua producto del

lavado. El sistema de lavado es mediante el mecanismo de retrolavado explicado en capítulo 2, que ocurre gracias a un estanque externo que tiene un volumen de  $150 \text{ m}^3$  para ser ocupado en el lavado de los filtros [12].



Figura- 4.4 Llenado del filtro utilizado Ref: Planta de Concón

## 4.2 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo que se realizó para el desarrollo de este trabajo de título fue la siguiente:

- Desconectar el flotador en el afluente que trabaja, para la regulación de la tasa declinante.
- Medir el diámetro del conducto de salida del efluente.
- Tomar diferentes muestras de turbiedades presentes en la planta 1 para ser analizadas en el laboratorio y conocer los SST pertenecientes a cada una. Esta metodología fue explicada en el capítulo 3.
- Medir la altura de agua en cada intervalo de hora.
- Medir la turbiedad con la que trabaja el filtro de entrada y salida.
- Medir la tasa de filtración.

## 4.3 Materiales del ensayo

Los materiales ocupados fueron:

- Regla graduada cada 10 cm.
- Regla graduada para cada cm.
- Turbidímetro.
- Cronómetro.

## 4.4 Descripción del ensayo

Se analizaron tres experimentos para verificar el verdadero comportamiento del filtro en diferentes días, y el ensayo consistió en medir la altura producto del aumento de la pérdida de carga en cada intervalo de hora, junto con esto se midió la turbiedad de entrada y la turbiedad de salida del filtro. A su vez se midió la tasa de filtración.

### 4.4.1 Medición de la altura de agua

El nivel de agua se midió gracias a una regla graduada cada 1 cm, colocada en una esquina del filtro donde fue capaz de facilitar la observación para la medición. Esta regla se colocó al nivel de la primera capa del lecho filtrante y tiene una altura de 2 m.

### 4.4.2 Medición de la turbiedad

La turbiedad fue medida gracias a los nefelómetros presentes en el laboratorio de ESVAL dentro de la PTA y las mediciones se realizaron en la entrada y salida del filtro. Las muestras tomadas se realizaron de acuerdo a la norma NCH 409/2.

### 4.4.3 Medición de las tasas

La medición de tasas se realizó gracias a una serie de factores que consistieron en tener una vara graduada cada 10 cm ( $\Delta H$ ), respecto al área del filtro y cortar el inyector del agua para así poder registrar el tiempo ( $\Delta t$ ) que demora en descender el nivel del agua producto de la filtración. El cálculo se hace mediante la siguiente fórmula:

$$Tasa = \frac{Volumen\ filtrado}{\frac{Area\ del\ lecho * \Delta t}{86400}}$$

Ec.4.1

Las mediciones que se describieron anteriormente se tienen que hacer desde el momento en que se mide el nivel del agua y en cada instante de tiempo en que se tomaron las mediciones y el sistema de medidas ocupado para el correcto uso de las fórmulas es el CGS.

Datos de las variables para la ecuación de pérdida de carga [12].

L= Espesor de lecho 65 cm.

$\epsilon_0$ = Porosidad inicial 0.35.

$\nu$ = Viscosidad del agua, que depende de la temperatura.

Dc= Diámetro efectivo del grano, 0.045 cm.

g= Aceleración de gravedad, 981 cm/s<sup>2</sup>.

## 4.5 Medición de la pérdida de carga inicial para el diseño.

La pérdida de carga inicial es la que ocurre producto de los factores hidráulicos que afectan al filtro en estudio y es una medición que tiene suma importancia para poder conocer las condiciones iniciales que presenta el filtro. Esta pérdida de carga es considerada también para el diseño de una batería de filtros [25].

### 4.5.1 Condiciones de diseño para la pérdida de carga inicial.

Las condiciones de diseño se realizaron de acuerdo al caudal máximo que tiene que procesar la planta y es igual al caudal dividido por la cantidad de filtros que contiene una batería, a continuación se muestra las condiciones de diseño:

- Caudal de planta: 850 l/s
- Temperatura: 15°C
- Viscosidad cinemática:  $1.139 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Número de filtros: 14
- Número de canaletas de llenado y lavado de cada filtro: 2
- Largo del filtro: 9.5 m
- Ancho del filtro: 4 m
- Área:  $38 \text{ m}^2$
- Aceleración de gravedad:  $9.81 \text{ m/s}^2$

El caudal medio de cada filtro queda definido por la siguiente expresión:

$$Q_{\text{filtro}} = \frac{Q_{\text{planta}}}{\text{Número de Filtros}}$$

Ec. 4.2

$$Q_{\text{Filtro}} = \frac{850}{14}$$

$$Q_{\text{Filtro}} = 60.7142 \text{ l/s} \Rightarrow 60714 \text{ cm}^3/\text{s}$$

La velocidad de filtración para el diseño es de acuerdo a la relación que tiene el caudal con el área de filtrado:

$$V = \frac{Q_{\text{Filtro}}}{\text{Área}_{\text{Filtro}}}$$

Ec. 4.3

Velocidad media de filtración =  $0.1597 \text{ cm/s}$

#### 4.5.1.1 Condiciones iniciales de la arena.

- Diámetro efectivo  $D_c$  : 0.4 mm
- Porosidad inicial  $\epsilon_0$  : 0.35
- Altura del lecho de arena 0.65 m

#### 4.5.1.2 Condiciones iniciales de la grava para soporte.

- Diámetro efectivo promedio  $D_c$  : 7mm
- Porosidad inicial  $\epsilon_0$  : 0.4
- Altura de grava: 0.5 m

Para las condiciones iniciales se calcula la pérdida de carga inicial que presenta cada estrato de arena y soporte de acuerdo con la ecuación 2.19

$$h_o = \frac{180 * L * v * v_s * (1 - \epsilon_0)^2}{g * \epsilon_0^3 * Dc^2}$$

Los resultados son los siguientes:

Pérdida de carga producida por el lecho de arena = 105.5706 cm

Pérdida de carga producida por soporte de grava = 19.1570 cm

#### 4.5.2 Pérdida de carga a la salida del filtro

La pérdida de carga producida a la salida del filtro ocurre debido a la cámara que hay en el vertedero de salida y es calculada mediante la siguiente fórmula:

$$h_{camara} = k * \frac{v^2}{2 * g}$$

Ec. 4.4

Dónde:

K = 0.5 coeficiente de pérdida por salida

V = velocidad de agua en la cámara de acuerdo a la siguiente ecuación

$$V = \frac{Q_{filtro}}{\text{Área}_{camara}}$$

Ec.4.5

Dónde el diámetro de la cámara es de 20 mm

Gracias a estos valores se obtiene una pérdida de carga producida por la cámara de salida de 9.53 cm

#### 4.5.3 Pérdida de carga producida por el sistema de drenaje.

La pérdida de carga producida por el sistema de drenaje se puede deber a diversos factores, los cuales estarían asociados a la fricción, sistemas de boquillas, contracciones producto de la temperatura, estancamiento de algún material filtrante, etc. Es por esto que los sistemas de drenaje son sistemas complejos de analizar, prestando atención a los fondos tipos Wheeler, que es el sistema de drenaje presente en este estudio, debido a su complejo cálculo se considerara un 10% de la pérdida de carga total producida por las condiciones iniciales de diseño, el cual se resume en la tabla 4.1 [14].

Tabla 4.1- Pérdida de carga que ocurre producto de los factores que componen el filtro.

<b>Pérdida de carga que ocurre producto de los factores que componen el filtro</b>	
h arena	105.5706 cm
h grava	19.1576cm
h cámara	9.58 cm
h drenaje	0.10*X cm
h total	X cm

Esta pérdida de carga X se puede conocer de acuerdo a la siguiente ecuación lineal:

$$h \text{ arena} + h \text{ grava} + h \text{ cámara} + h \text{ drenaje} = h \text{ total}$$

$$h \text{ total} = 149.2313 \text{ cm}$$

$$h \text{ drenaje} = 14.9231 \text{ cm}$$

A esta altura total de agua producida por las condiciones hidráulicas del filtro, se le deben restar los espesores de cada capa que conforma el material filtrante y el soporte del lecho para poder tener la altura real del agua producida por el filtro. Este método se analizara a continuación:

$$\text{Altura de agua} = h \text{ total} - \text{espesor de grava} - \text{espesor de arena}$$

Ec 4.6

$$\text{Altura de agua} = 149.2313 - 50 - 65$$

Mediante la ecuación 4.5 se obtiene una altura de agua inicial sobre la superficie del material filtrante de 34.23 cm para estas condiciones de diseño.

## 4.6 Nivel de agua real para el inicio de la filtración

La altura de agua real que presenta el filtro se midió en cada ensayo que se realizó presentando una altura promedio de 107 cm, con una velocidad promedio de filtración de 0.22 cm/s. Estos valores serán analizados a continuación cuando se describan los ensayos realizados. Pero es de suma importancia dar énfasis a este punto, debido a que los datos de diseño variaron con respecto a lo que presentó el filtro. Esto se puede deber a factores como la cantidad de filtros que estén operando y al deterioro de la porosidad inicial  $\epsilon_0$ . Con los valores promedios es posible estimar la variación de la porosidad que sufrió el lecho de arena en el tiempo mediante un método iterativo. Las condiciones de diseño sirvieron para conocer la altura estimativa de la pérdida de carga que ocurre en el drenaje y que son constantes durante el tiempo. Ya que se consideran las condiciones iniciales de diseño, a continuación se muestra el procedimiento para poder determinar la nueva porosidad inicial:

$$\text{Altura real del agua} = 107 \text{ cm}$$

Considerando que la porosidad solo varía en el lecho filtrante de arena y no en el material de soporte debido a que está expuesta a más cambios durante el proceso de lavado y filtración [13].

De acuerdo a la ecuación 4.6 se puede despejar la pérdida de carga total producida por las condiciones de diseño, debido a este valor se puede conocer el resultado actual de la pérdida de carga inicial en el lecho de arena, valor que se muestra a continuación:

$$h \text{ total} = 222 \text{ cm}$$

$$h \text{ arena} = 178.9724 \text{ cm}$$

Con el valor de la pérdida de carga inicial del lecho de arena y conociendo la velocidad promedio, se puede usar un método iterativo para poder conocer porosidad actual. El valor de la porosidad nueva se muestra a continuación:

$$\varepsilon_0 = 0.343 \%$$

Con el nuevo valor de la porosidad y la altura real de agua se pueden hacer los cálculos para conocer el depósito específico que contiene la ecuación propuesta por Camp [13]. La altura real sirve para tener como referencia la altura de inicio en la que se encuentra cada día el filtro, dato que variaría según el caudal de entrada.

A continuación se explicarán los ensayos realizados con cada resultado. En total se efectuaron 3 ensayos para poder realizar el estudio del filtro y los datos de las distintas variables son los anteriormente explicados.

## 4.7 Ensayos para determinar la evolución de la pérdida de carga en un filtro.

Se realizaron 3 ensayos que tienen los mismos procedimientos, con los que se analizaron diferentes variables para el desarrollo del estudio. Los ensayos se realizaron en días diferentes, pero se analizarán en conjunto con cada etapa.

El espesor de lecho considerado para efectos de colmatación es de 20 cm debido a que son las primeras capas las que sufren colmatación y que tienen la mayor eficiencia de filtración, esto se estudió con mayor profundización en el capítulo 2 [13].

### 4.7.1 Mediciones de la turbiedad.

Se midieron las turbiedades en diferentes instantes de tiempo para generar una turbiedad promedio, con la que el filtro trabajó durante los distintos tiempos en que no se tomaron las muestras. A continuación se muestran las mediciones en la siguiente tabla 4.2

Tabla 4.2- Mediciones de turbiedad de entrada y salida 8 de Octubre.:

8 de octubre 2013		
Hora	Entrada NTU	Salida NTU
10:05	4,59	0,43
11:05	3,74	0,43
12:05	4,93	0,36
13:05	4,26	0,39
14:05	4,71	0,84
15:10	4,27	0,83
15:50	4,27	0,29
17:25	4,4	0,34

Tabla 4.3- Mediciones 10 de octubre de turbiedad de entrada y salida

<b>10 de octubre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>Entrada NTU</b>	<b>Salida NTU</b>
09:45	4,59	0,26
11:00	4,88	0,53
12:00	4,64	0,79
13:00	4,7	0,37
14:15	4,64	0,34
15:20	4,65	0,32
16:20	4,67	0,49
18:00	4,82	1,30
18:30	4,9	1,60

Tabla 4.4- Mediciones 17 de noviembre de turbiedad de entrada y salida

<b>17 de noviembre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>Entrada NTU</b>	<b>Salida NTU</b>
10:30	4,1	0,42
11:00	4,03	0,67
12:00	4,12	0,36
13:00	4,57	0,42
14:00	4,73	0,46
15:00	5,2	0,38
16:00	5,92	0,37
17:00	4,76	0,22
18:00	4,41	0,28

Con las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 se puede observar que la turbiedad de salida son todas inferiores a 2.9, parámetro que para este estudio son consideradas como 0, producto a que no presentan SST en el análisis de laboratorio. Gracias a estas mediciones se generan las turbiedades promedio que hay en cada intervalo de tiempo y se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4.5- Promedio de turbiedad de entrada 8 de octubre

<b>8 de Octubre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>Entrada</b>	<b>Promedio NTU de estrada</b>
10:05	4,59	4,1650
11:05	3,74	
12:05	4,93	4,3350
13:05	4,26	4,5950
14:05	4,71	4,4850
15:10	4,27	4,4900
15:50	4,27	4,2700
17:25	4,4	4,3350

Tabla 4.6- Promedio de turbiedad de entrada 10 de octubre

<b>10 de Octubre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>Entrada</b>	<b>Promedio NTU de entrada</b>
09:45	4,59	4,7350
11:00	4,88	
12:00	4,64	4,7600
13:00	4,7	4,6700
14:15	4,64	4,6700
15:20	4,65	4,6450
16:20	4,67	4,6600
18:00	4,82	4,7450
18:30	4,9	4,8600

Tabla 4.7- Promedio de turbiedad de entrada 17 de Noviembre

<b>17 de Noviembre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>Entrada</b>	<b>Promedio NTU de entrada</b>
10:30	4,1	4,065
11:00	4,03	
12:00	4,12	4,0750
13:00	4,57	4,3450
14:00	4,73	4,6500
15:00	5,2	4,9650
16:00	5,92	5,5600
17:00	4,76	5,3400
18:00	4,41	4,5850

Con los resultados obtenidos en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se pueden remplazar en la ecuación propuesta en el capítulo 3 para poder obtener los SST, esto se analizará más adelante.

#### 4.7.2 Medición de la variación del nivel de agua dentro del filtro.

Las mediciones del nivel de agua se realizaron con respecto al nivel de la superficie del lecho y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.8- Altura de agua en el instante de medición 8 de Octubre.

<b>8 de Octubre 2013</b>	
<b>Hora</b>	<b>Altura cm</b>
10:05	107
11:05	110
12:05	115
13:05	130
14:05	135
15:10	131
15:50	133
17:25	135

Tabla 4.9- Altura de agua en el instante de medición 10 de Octubre.

<b>10 de Octubre 2013</b>	
<b>Hora</b>	<b>Altura cm</b>
09:45	107
11:00	110
12:00	112
13:00	115
14:15	120
15:20	125
16:20	127
18:00	130
18:30	135

Tabla 4.10- Altura de agua en el instante de medición 17 de noviembre

<b>17 de Noviembre</b>	
<b>Hora</b>	<b>Altura cm</b>
10:30	101
11:00	109
12:00	110
13:00	106
14:00	114
15:00	115
16:00	125
17:00	135
18:00	115

Con las tablas 4.8, 4.9 y 4.10 se logra tener una referencia de la altura de agua con respecto a la pérdida de carga inicial que hay en el lecho de arena, calculada anteriormente, y al aumento de la pérdida de carga producto de la colmatación.

Tabla 4.11- Aumento de la pérdida de carga 8 de Octubre.

<b>8 de Octubre 2013</b>			
<b>Hora</b>	<b>Altura cm</b>	<b>Aumento de la pérdida de carga cm</b>	<b>Pérdida de carga final cm</b>
10:05	107	0	179
11:05	110	3	182
12:05	115	8	187
13:05	130	23	202
14:05	135	28	207
15:10	131	24	203
15:50	133	26	205
17:25	135	28	207

Tabla 4.12- Aumento de la pérdida de carga 10 de Octubre.

<b>10 de Octubre</b>			
<b>Hora</b>	<b>Altura cm</b>	<b>Aumento de la pérdida de carga cm</b>	<b>Pérdida de carga final cm</b>
09:45	107	0	179
11:00	110	3	182
12:00	112	5	184
13:00	115	8	187
14:15	120	13	192
15:20	125	18	197
16:20	127	20	199
18:00	130	23	202
18:30	135	28	207

Tabla 4.13- Aumento de la pérdida de carga 17 de Noviembre.

<b>17 de Noviembre 2013</b>			
<b>Hora</b>	<b>Altura cm</b>	<b>Aumento de la pérdida de carga cm</b>	<b>Pérdida de carga final cm</b>
10:30	101	-6	173
11:00	109	2	181
12:00	110	3	182
13:00	106	-1	178
14:00	114	7	186
15:00	115	8	187
16:00	125	18	197
17:00	135	28	207
18:00	115	8	187

En las tablas 4.11, 4.12 y 4.13 se observa el aumento de la pérdida de carga producto de la colmatación y el valor de la pérdida de carga final, que es el aumento de la pérdida de carga más la pérdida de carga inicial que es anteriormente calculada, también se observa que hay una disminución en la pérdida de carga en algunos intervalos de tiempo, esto es debido a que en esos instantes de tiempo entro menos caudal hacia el filtro con respecto al caudal anterior.

### 4.7.3 Mediciones de las tasas de filtración

Con las mediciones de las tasas de filtración se puede tener datos que son útiles para este estudio. Primero es ver las condiciones que presenta el filtro con respecto a su diseño, lo segundo, con las tasas de filtración se pueden tener las velocidades de filtración.

En las tablas y gráficos siguientes se pueden ver las tasas de filtración durante el tiempo de carrera, además se representa la tasa de filtración en relación a las tasas de diseño en que se tomaron las mediciones:

Tabla 4.14- Mediciones de tasas de filtración 8 de Octubre.

8 de Octubre 2013					
Hora	Números de muestras	Tiempo de carrera s	Tiempo de carrera en horas	$\Delta t$	Tasa m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d
10:05	1	120	0,0333	48	180,0000
11:05	2	3720	1,0333	53	163,0189
12:05	3	7320	2,0333	65	132,9230
13:05	4	10920	3,0333	71	121,6901
14:05	5	14520	4,0333	82	105,3658
15:10	6	18420	5,1166	87	99,3103
15:50	7	20840	5,7888	96	90,0000
17:25	8	34540	9,5944	98	88,1632

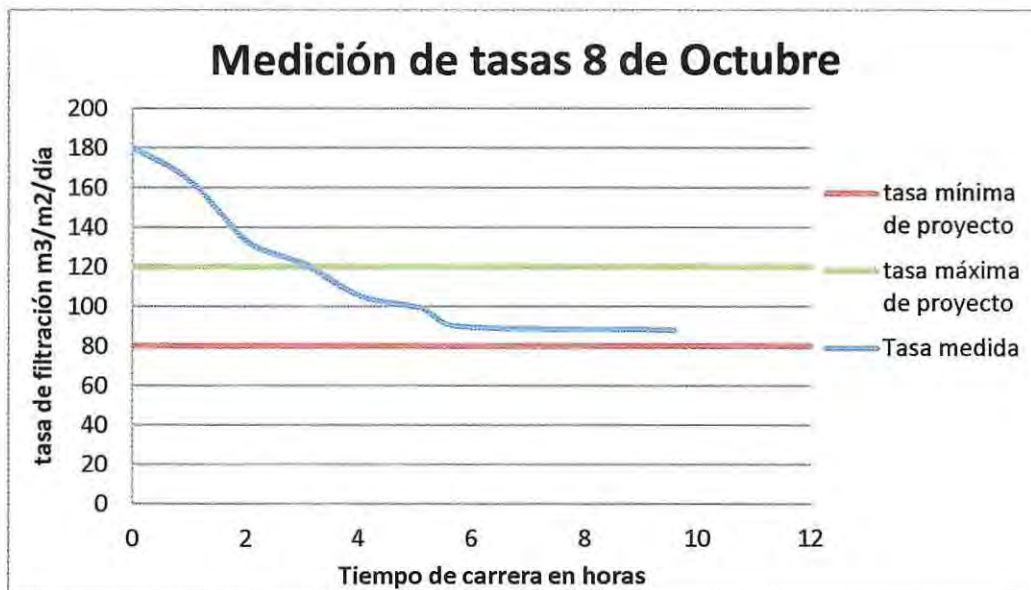


Gráfico- 4.1 Medición de tasas 8 de Octubre.

Tabla 4.15- Mediciones de tasas de filtración 10 de Octubre

10 de Octubre 2013					
Hora	Números de muestras	Tiempo de carrera s	Tiempo de carrera en horas	$\Delta t$	Tasa m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d
09:45	1	120	0,0333	40	216,0000
11:00	2	4500	1,0333	46	187,8260
12:00	3	8100	2,0333	48	180,0000
13:00	4	11700	3,0333	57	151,5789
14:15	5	16200	4,0333	62	139,3548
15:20	6	20100	5,1166	70	123,4285
16:20	7	23700	5,1166	80	108,0000
18:00	8	29700	5,1166	85	101,6470
18:30	9	31500	5,1166	90	96,0000

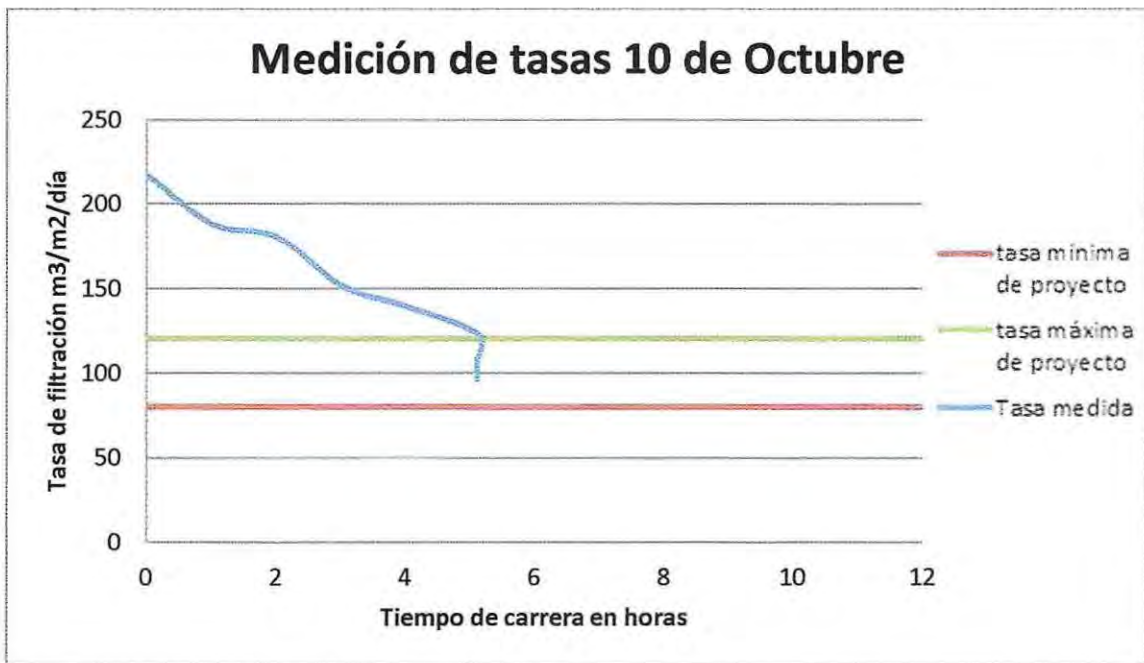


Gráfico4.2-Medición de tasas 10 de Octubre

Tabla 4.16- Mediciones de tasas de filtración 17 de Noviembre

17 de Noviembre 2013					
Hora	Números de muestras	Tiempo de carrera s	Tiempo de carrera en horas	$\Delta t$	Tasa m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d
10:30	1	1200	0,3333	42	205,7142
11:00	2	3000	0,8333	45	192,0000
12:00	3	6600	1,8333	53	163,0188
13:00	4	10200	2,8333	61	141,6393
14:00	5	13800	3,8333	71	121,6901
15:00	6	17400	4,8333	84	102,8571
16:00	7	21000	5,8333	92	93,9130
17:00	8	24600	6,8333	95	90,9473
18:00	9	28200	7,8333	102	84,7058

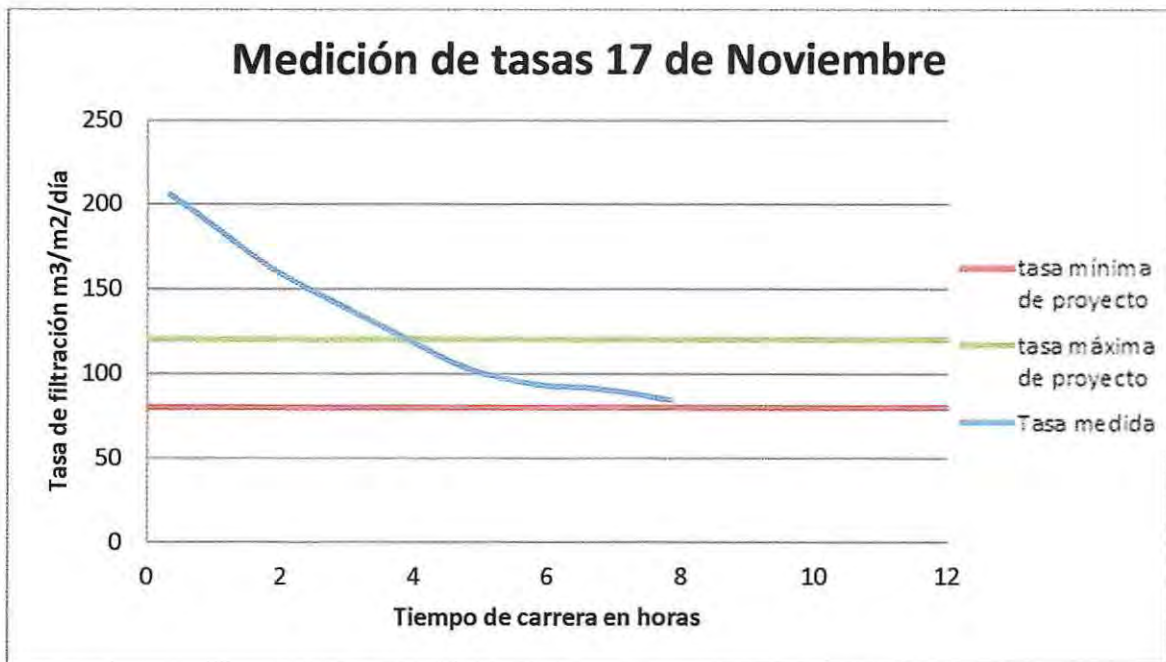


Gráfico4.3-Medición de tasas 17 de Noviembre.

Las tablas 4.14, 4.15 y 4.16 muestran la disminución de la tasa de filtración con respecto al tiempo producto de la colmatación de lecho, donde la tasa máxima y la tasa mínima son parámetros de diseño con los que se fabricó el filtro [12].

Con los datos obtenidos de la tasa de filtración se puede obtener la velocidad de filtración y el caudal de filtración respecto al área del filtro que se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 4.17- Caudal de filtración y velocidad de filtración 8 de Octubre.

<b>8 de Octubre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>caudal cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Velocidad cm/s</b>
10:05	79166,6666	0,2083
11:05	71698,1132	0,1886
12:05	58461,5384	0,1538
13:05	53521,1267	0,1408
14:05	46341,4634	0,1219
15:10	43678,1609	0,1149
15:50	39583,3333	0,1041
17:25	38775,5102	0,1020

Tabla 4.18- Caudal de filtración y velocidad de filtración 10 de Octubre.

<b>10 de Octubre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>caudal cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Velocidad cm/s</b>
09:45	95000	0,2500
11:00	82608,6957	0,2174
12:00	79166,6667	0,2083
13:00	66666,6667	0,1754
14:15	61290,3226	0,1613
15:20	54285,7143	0,1429
16:20	47500	0,1250
18:00	44705,8824	0,1176
18:30	42222,2222	0,1111

Tabla 4.19- Caudal de filtración y velocidad de filtración 17 de Noviembre.

<b>17 de Noviembre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>caudal cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Velocidad cm/s</b>
10:30	90476,1905	0,2381
11:00	84444,4444	0,2222
12:00	71698,1132	0,1887
13:00	62295,0820	0,1639
14:00	53521,1268	0,1408
15:00	45238,0952	0,1190
16:00	41304,3478	0,1087
17:00	40000,0000	0,1053
18:00	37254,9020	0,0980

#### 4.7.4 Cálculo del depósito específico.

De acuerdo a la ecuación 2.28 y a las variables obtenidas en las mediciones de los ensayos, se obtiene el depósito específico para cada instante de tiempo que se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 4.19- Depósito específico 8 de Octubre.

8 de Octubre 2013				
Hora	Altura cm	Pérdida de carga final cm	Velocidad cm/s	Depósito específico $\sigma$
10:05	107	179	0,2083	0
11:05	110	182	0,1887	0,0561
12:05	115	187	0,1538	0,0739
13:05	130	202	0,1408	0,0859
14:05	135	207	0,1220	0,0989
15:10	131	203	0,1149	0,1001
15:50	133	205	0,1042	0,1078
17:25	135	207	0,1020	0,1098

Tabla 4.20- Depósito específico 10 de Octubre.

10 de Octubre 2013				
Hora	Altura cm	Pérdida de carga final cm	Velocidad cm/s	Depósito específico $\sigma$
09:45	107	179	0,2500	0
11:00	110	182	0,2174	0,0448
12:00	112	184	0,2083	0,0491
13:00	115	187	0,1754	0,0639
14:15	120	192	0,1613	0,0723
15:20	125	197	0,1429	0,0831
16:20	127	199	0,1250	0,0934
18:00	130	202	0,1176	0,0986
18:30	135	207	0,1111	0,1042

Tabla 4.21- Depósito específico 17 de Noviembre.

<b>17 de Noviembre 2013</b>				
<b>Hora</b>	<b>Altura cm</b>	<b>Pérdida de carga final cm</b>	<b>Velocidad cm/s</b>	<b>Depósito específico (<math>\sigma</math>)</b>
10:30	101	173	0,2381	0
11:00	109	181	0,2222	0,0425
12:00	110	182	0,1887	0,0561
13:00	106	178	0,1639	0,0653
14:00	114	186	0,1408	0,0800
15:00	115	187	0,1190	0,0924
16:00	125	197	0,1087	0,1023
17:00	135	207	0,1053	0,1077
18:00	115	187	0,0980	0,1057

Con el depósito específico ya calculado, se puede hacer la relación con respecto al volumen retenido de partículas de acuerdo a la ecuación 2.5 que se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 4.22- Volumen retenido 8 de Octubre.

<b>8 de Octubre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>Depósito específico <math>\sigma</math></b>	<b>Volumen retenido cm<sup>3</sup></b>
10:05	0	0
11:05	0,0561	1385670
12:05	0,0739	1825330
13:05	0,0859	2121730
14:05	0,0989	2442830
15:10	0,1001	2472470
15:50	0,1078	2662660
17:25	0,1098	2712060

Tabla 4.23- Volumen retenido 10 de Octubre.

<b>10 de Octubre 2013</b>		
<b>Hora</b>	<b>Depósito específico <math>\sigma</math></b>	<b>Volumen retenido cm<sup>3</sup></b>
09:45	0	0
11:00	0,0448	340480
12:00	0,0491	373160
13:00	0,0639	485640
14:15	0,0723	549480
15:20	0,0831	631560
16:20	0,0934	709840
18:00	0,0986	749360
18:30	0,1042	791920

Tabla 4.24- Volumen retenido 17 de Noviembre.

17 de Noviembre 2013		
Hora	Depósito específico $\sigma$	Volumen retenido $\text{cm}^3$
10:30	0	0
11:00	0,0425	1049750
12:00	0,0561	1385670
13:00	0,0653	1612910
14:00	0,08	1976000
15:00	0,0924	2282280
16:00	0,1023	2526810
17:00	0,1077	2660190
18:00	0,1057	2610790

#### 4.7.5 Relación de SST acumulados en el lecho filtrante.

Para poder conocer los SST retenidos en el lecho filtrante como masa, se tienen que conocer los caudales de entrada y los tiempos de cada intervalo.

Los SST se obtienen de la ecuación 3.11 propuesta en el capítulo tres y para ello es necesario conocer las turbiedades promedio mostradas en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7

##### 4.7.5.1 Cálculos de los caudales de entrada.

El caudal de entrada es el que trae los SST provenientes de los decantadores que son los que finalmente quedan retenidos en el filtro. Para poder conocer los caudales de entrada, es necesario medir el caudal de filtración y la variación de volumen con respecto a la altura  $h$  ( $\Delta L$ ) de agua en la caja del filtro en cada intervalo de tiempo en el que se realizaron las mediciones. En la siguiente tabla se muestra los resultados que se obtuvieron del caudal de entrada:

Tabla 4.25- Caudal de entrada 8 de Octubre.

8 de Octubre 2013			
Hora	Caudal de filtración $\text{cm}^3/\text{s}$	Caudal $\Delta L$ $\text{cm}^3/\text{s}$	Caudal de entrada $\text{cm}^3/\text{s}$
10:05	0	0	0
11:05	71698,1132	316,6667	72014,7799
12:05	58461,5385	844,4444	59305,9829
13:05	53521,1268	2427,7778	55948,9045
14:05	46341,4634	2955,5556	49297,0190
15:10	43678,1609	2338,4615	46016,6225
15:50	39583,3333	4116,6667	43700,0000
17:25	38775,5102	1866,6667	40642,1769

Tabla 4.26- Caudal de entrada 10 de Octubre.

<b>10 de Octubre 2013</b>			
<b>Hora</b>	<b>Caudal de filtración cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal ΔL cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal de entrada cm<sup>3</sup>/s</b>
09:45	0	0	0
11:00	82608,6957	253,3333	82862,0290
12:00	79166,6667	527,7778	79694,4444
13:00	66666,6667	844,4444	67511,1111
14:15	61290,3226	1097,7778	62388,1004
15:20	54285,7143	1753,8462	56039,5604
16:20	47500,0000	2111,1111	49611,1111
18:00	44705,8824	1456,6667	46162,5490
18:30	42222,2222	5911,1111	48133,3333

Tabla 4.27- Caudal de entrada 17 de Noviembre.

<b>17 de Noviembre 2013</b>			
<b>Hora</b>	<b>Caudal de filtración cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal ΔL cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal de entrada cm<sup>3</sup>/s</b>
10:30	0	0	0
11:00	84444,4444	422,2222	84866,6667
12:00	71698,1132	316,6666	72014,7799
13:00	62295,0820	-105,5555	62189,5264
14:00	53521,1268	738,8888	54260,0156
15:00	45238,0952	844,4444	46082,5397
16:00	41304,3478	1900	43204,3478
17:00	40000,0000	2955,5555	42955,5556
18:00	37254,9020	844,4444	38099,3464

#### 4.7.5.2 Cantidad SST acumulados en el lecho filtrante.

La cantidad de SST se calcula con los caudales de entrada y el tiempo de cada intervalo. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 4.28- Masa de SST acumulados en el lecho filtrante 8 de Octubre.

8 de Octubre 2013					
Hora	Tiempo s	Caudal de entrada cm <sup>3</sup> /s	SST g/cm <sup>3</sup>	Masa g	Masa acumulada g
10:05	0	0	0	0	0
11:05	3600	72014,7799	7,4875E-06	1,9787	1,9787
12:05	3600	59305,9829	7,9935E-06	1,7396	3,7184
13:05	3600	55948,9045	8,76738E-06	1,8000	5,5185
14:05	3600	49297,0190	8,4399E-06	1,5268	7,0453
15:10	3900	46016,6225	8,4548E-06	1,5467	8,5921
15:50	2400	43700,0000	7,8000E-06	0,8339	9,4260
17:25	5700	40642,1769	7,9935E-06	1,8876	11,3136

Tabla 4.29- Masa de SST acumulados en el lecho filtrante 10 de Octubre.

10 de Octubre 2013					
Hora	Tiempo s	Caudal de entrada cm <sup>3</sup> /s	SST g/cm <sup>3</sup>	Masa g	Masa acumulada g
09:45	0	0	0	0	0
11:00	4500	82862,0290	9,1840E-06	3,4908	3,4908
12:00	3600	79694,4444	9,2584E-06	2,7077	6,1985
13:00	3600	67511,1111	8,9906E-06	2,2273	8,4259
14:15	4500	62388,1004	8,9906E-06	2,5729	10,9989
15:20	3900	56039,5604	8,9162E-06	1,9864	12,9853
16:20	3600	49611,1111	8,9608E-06	1,6314	14,6167
18:00	6000	46162,5490	9,2138E-06	2,6014	17,2181
18:30	1800	48133,3333	9,5561E-06	0,8439	18,0621

Tabla 4.30- Masa de SST acumulados en el lecho filtrante 17 de Noviembre.

17 de Noviembre 2013					
Hora	Tiempo s	Caudal de entrada cm <sup>3</sup> /s	SST g/cm <sup>3</sup>	Masa g	Masa acumulada g
10:30	0	0	0	0	0
11:00	1800	84866,6667	7,1898E-06	1,11960	1,1196
12:00	3600	72014,7799	7,2196E-06	3,0275	3,0275
13:00	3600	62189,5264	8,0232E-06	4,8586	4,8586
14:00	3600	54260,0156	8,9310E-06	6,6369	6,6369
15:00	3600	46082,5397	9,8686E-06	8,3058	8,3058
16:00	3600	43204,3478	1,1639E-05	10,1513	10,1513
17:00	3600	42955,5556	1,0984E-05	11,8828	11,8828
18:00	3600	38099,3464	8,7376E-06	13,1045	13,1045

#### 4.7.6 Relación de la masa acumulada con el depósito específico.

La relación que existe entre la masa acumulada en el lecho filtrante y el depósito específico en el mismo es debido principalmente a la acumulación de SST provenientes de las concentraciones del afluente y que quedan retenidos en el lecho filtrante. Para esto en este trabajo de título se busca tener una relación entre la masa que entra al filtro por medio de las concentraciones del afluente y el depósito específico que se genera gracias a la acumulación de, SST.

Los siguientes gráficos son para poder hacer una relación entre la masa acumulada y el depósito específico.

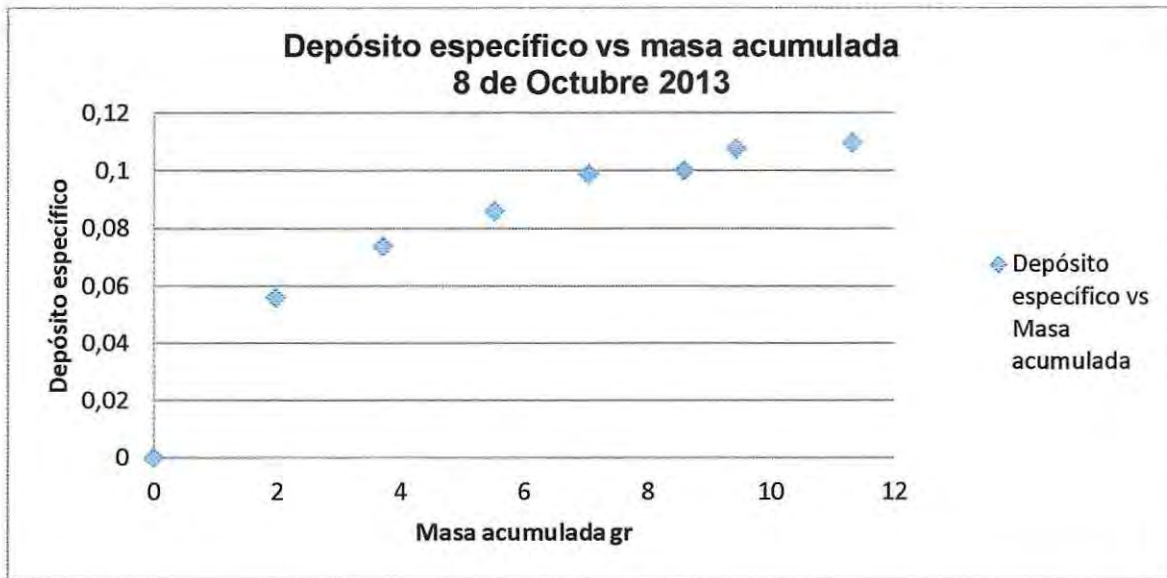


Gráfico 4.4- Depósito específico vs masa acumulada 8 de Octubre.

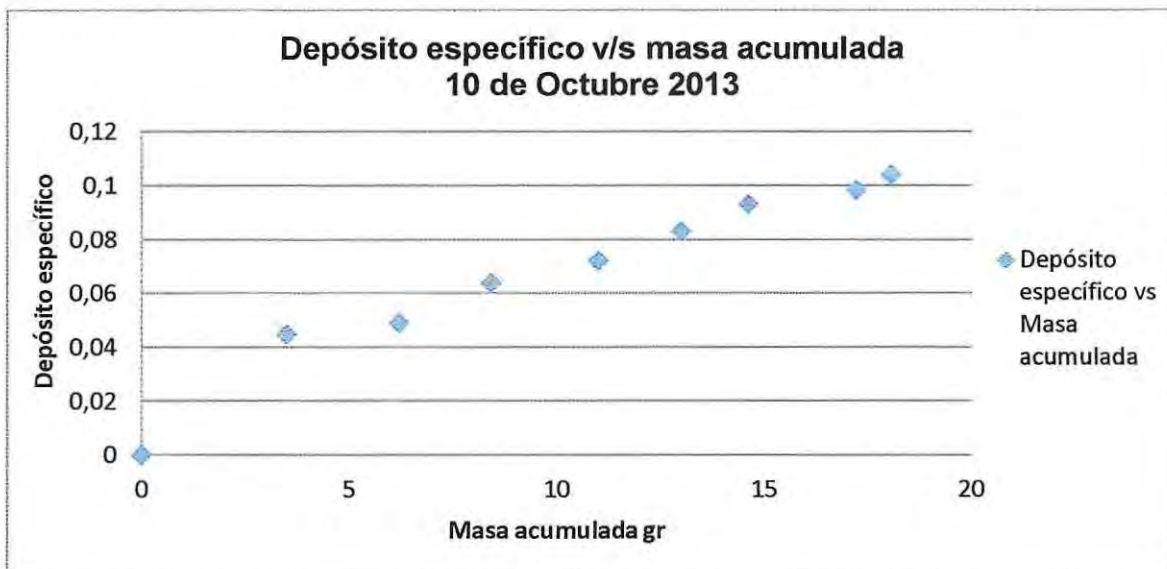


Gráfico 4.5- Depósito específico v/s masa acumulada 10 de Octubre.

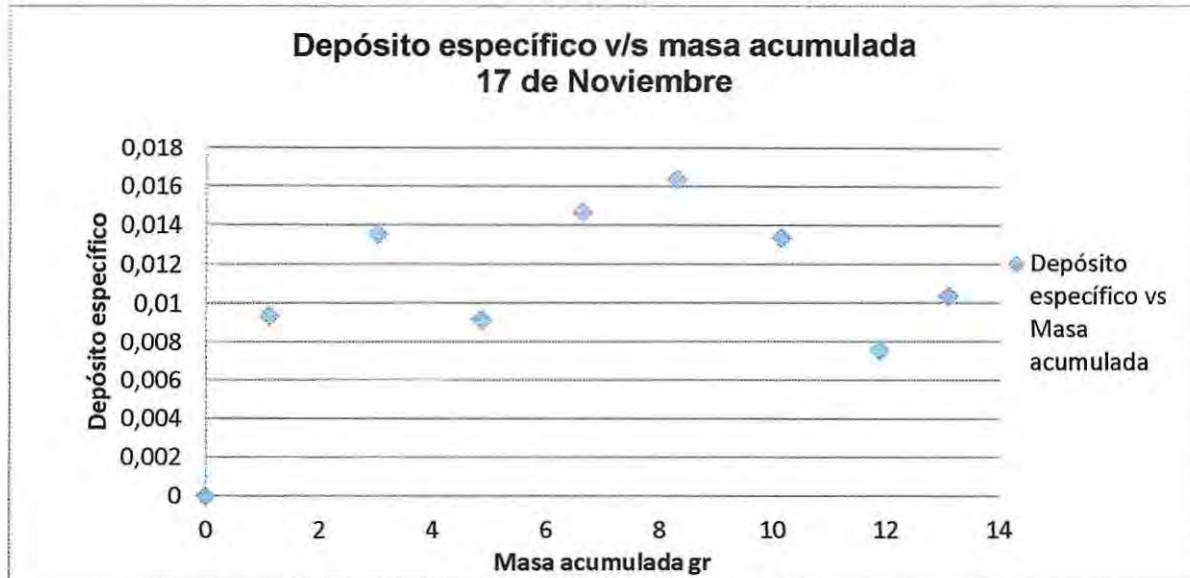


Gráfico 4.6- Depósito específico v/s masa acumulada 17 de Noviembre.

De acuerdo a los gráficos 4.4, 4.5 y 4.6 se obtienen las primeras conclusiones del comportamiento real que existe en un filtro rápido de estas características, las cuales indican que el filtro tiene un comportamiento variable durante los ensayos del 10 de Octubre y 17 de Noviembre. Esto se debe principalmente a la importante diferencia de caudal de entrada que existe en el filtro con respecto al caudal de filtración, lo que provoca que ocurran variaciones en la pérdida de carga final y no se pueda estimar una conducta uniforme durante la carrera de filtración.

Con la información correspondiente al párrafo anterior se concluyó, para efectos de relacionar la masa acumulada con el depósito específico, analizar solo el ensayo del día 8 de Octubre debido a que cumple con un comportamiento más uniforme que los demás ensayos durante el periodo de la carrera de filtración, los valores analizados serán los mostrados en la siguiente tabla.

Tabla- 4.31 Relación depósito específico con la masa acumulada

8 de Octubre 2013		
Hora	Depósito específico $\sigma$	Masa acumulada
10:05	0	0
11:05	0,0561	1,978763373
12:05	0,0739	3,718445576
13:05	0,0859	5,518537644
14:05	0,0989	7,045383784
15:10	0,1001	8,592121103
15:50	0,1078	9,426034984
17:25	0,1098	11,31368175

Respecto a la tabla 4.31 y al gráfico 4.4 se hace una relación lineal con el método de los mínimos cuadrados explicados en capítulo 3, con las ecuaciones 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8, explicadas en el mismo capítulo, los valores obtenidos se muestran a continuación

$$\sigma = a * z + b$$

$$a = 0.0057$$

$$b = 0.0511$$

$$r = 0.9667$$

Con lo que la correlación es aceptable, aunque no muy buena se expresa la ecuación que relaciona la masa con el depósito específico de la siguiente manera

$$\sigma = 0.0057 * Z + 0.0511$$

Ec 4.7

Donde:

$z$  = Masa g

$\sigma$  = Depósito específico adimensional

La masa  $z$  se obtiene de la siguiente manera

$$z = Q * \Delta t * SST/981$$

Ec 4.8

Donde:

$Q$ = Caudal de entrada en un intervalo de tiempo  $\text{cm}^3/\text{s}$

$\Delta t$  = Intervalo de tiempo s

$SST$  = sólidos suspendidos totales  $\text{g}/\text{cm}^3$  provenientes de la ecuación 3.11

$$SST = 2.97638 * x - 4.90909$$

Ec 3.11

Donde:

$x$  = Turbiedad promedio entre un intervalo de tiempo

Con las ecuaciones 4.7, 4.8 y 3.11 se obtiene

$$\sigma = \left[ 0.0057 * \frac{(Q * \Delta t * (2.97638 * x - 4.90909))}{981} \right] + 0.0511$$

Ec 4.9

La ecuación 4.9 muestra el depósito específico en función de la turbiedad  $x$ , del tiempo y del caudal de entrada. Para el uso práctico de la ecuación 2.28 propuesta en el capítulo 2 es remplazada en ella depósito específico por la expresión de la ecuación 4.9.

$$hf = \frac{180 * L * v * v_s * (1 - \varepsilon_0 + \left[ \frac{0.0057 * (Q * \Delta t * (2.97638 * x - 4.90909))}{981} \right] + 0.0511)^2}{g * (\varepsilon_0 - \left[ \frac{0.0057 * (Q * \Delta t * (2.97638 * x - 4.90909))}{981} \right] + 0.0511)^3} * \frac{1}{Dc^2 * \sqrt{\frac{\left[ \frac{0.0057 * (Q * \Delta t * (2.97638 * x - 4.90909))}{981} \right] + 0.0511}{3 * (1 - \varepsilon_0)}} + \frac{1}{4}}$$

Ec 4.10

## 4.8 Utilización de la ecuación de la pérdida de carga final

La ecuación 4.9 es el resultado final de este trabajo, donde se aprecia la evolución de la pérdida de carga en función de la turbiedad retenida y las demás variables ya definidas. El uso de ella es de acuerdo al instante en que se quiere medir, dependiendo principalmente de la velocidad de filtración, caudal de entrada, turbiedad de entrada y tiempo. La ecuación se puede aplicar para intervalos de tiempo, con lo que se puede conseguir la variación de la pérdida de carga y se puede aplicar para tiempos acumulados, teniendo en cuenta un caudal de entrada constante y una turbiedad promedio.

## 4.9 Comentarios

Como se observa en los gráficos 4.4 y 4.5 a medida que aumenta la masa dentro del lecho, hay un aumento del depósito específico para condiciones normales. En cambio en el gráfico 4.6 se observa que la variación del depósito no tienen una tendencia clara, esto es principalmente a los diferentes caudales de entrada que presentó el filtro durante el tiempo de las mediciones, lo que para este estudio no es de gran ayuda ya que éste trabajo de título investigación se basa en condiciones normales y con un caudal de entrada que no produzca variaciones significativas en el depósito específico.

De los tres ensayos realizados en la PTA de Concón el más significativo es el del día 8 de Octubre, ya que presenta un comportamiento uniforme durante el periodo de filtración y un aumento constante en la pérdida de carga, en cambio los dos ensayos restantes muestran variaciones en su pérdida de carga producto del caudal de entrada. De este modo se consideró solo el primer ensayo como referencia del modelo en cuestión.

## Conclusiones

De acuerdo al estudio realizado en este trabajo, se pudo entender el verdadero comportamiento de un filtro en un estado operacional normal en que se pudo observar las cantidades de variables que intervienen en el proceso de filtración y lo difícil que es poder predecir un comportamiento acertado de su real funcionamiento. Junto a esto el conocimiento actual que hay sobre la filtración y sobre todo de la pérdida de carga producto de la colmatación del lecho es muy escaso y poco útil. Por ello se realizó un procedimiento aplicable a un filtro rápido con tasa declinante, en el que se pueda obtener una predicción durante un tiempo de carrera con condiciones normales, a partir de la ecuación propuesta por Camp (1964).

La pérdida de carga máxima que puede tener el filtro es de 207 cm lo que implica una altura de agua para el rebalse de 135 cm, que es cuando el agua supera la altura de las paredes del filtro y sale hacia el desagüe cuando el filtro se encuentra colmatado, la variación que existe en la tasa de filtración con respecto del inicio y cuando presenta la máxima tasa de filtración es de un 49%, teniendo en cuenta este valor se puede conocer realmente en qué condiciones se encuentra el filtro durante una carrera sin depender de los caudales de entrada y turbiedades. El aumento del depósito específico para que ocurra la máxima pérdida de carga medible en el filtro es de 0.1098

Para la pérdida de carga final se considera un espesor de capa de 20 cm, el cual indica que es ese el espesor con el que trabaja el estrato de lecho filtrante de acuerdo al comportamiento del depósito específico durante la filtración. Esto permitió cumplir con tres reglas lógicas para los valores del depósito específico las cuales fueron: el aumento durante el tiempo, ser menor a la porosidad y ser positivo, siendo esta última la que se tomó como referencia para el espesor de capa, ya que espesores mayores a 20 cm entregaban valores de depósito negativos, lo que físicamente no puede ser.

La ecuación propuesta para los SST está limitada para turbiedades superiores a 2.9 NTU, ya que para turbiedades inferiores no se consideraron SST según el análisis del laboratorio de ESVAL.

La ecuación 4.10 finalmente propuesta es un instrumento de medida que sirve de referencia para determinar en qué condiciones se encuentra el filtro a lo largo de la carrera de filtración, siendo una referencia muy útil para un filtro que tiene muchas horas de trabajo. También es importante señalar que esta ecuación propuesta es válida solo para este caso utilizado es decir la PTA de Concón N°1 este filtro y la ecuación propuesta para los SST es válida para la misma. El procedimiento puede ser el mismo para cualquier filtro que cumpla las mismas características.

El correcto uso de esta ecuación está limitado a las características físicas - químicas que se generaron el día 8 de octubre, respecto a esto es poco probable tener un comportamiento uniforme en un día de operación dentro de una PTA debido a la diferentes demandas de agua que ocurren a lo largo de un tiempo de carrera.

De acuerdo al procedimiento expuesto en el siguiente trabajo se puede comprender que la ecuación propuesta por Camp (1964) tiene muchas falencias, en lo que es la práctica actual para su utilización, debido a su complejo uso. También tiene falencias en el ámbito en el cual se propuso la ecuación, ya que para esta ecuación consideró que el depósito específico se acumula de forma homogénea durante toda el área del filtro, situación que en la realidad no ocurre, sino más bien se acumula en diferentes lugares y en diferentes concentraciones.

Con el trabajo de título propuesto, se llegó al resultado que es una ecuación, en la que se puede utilizar para las condiciones descritas en este trabajo, a partir de la variable, que es la turbiedad, dato que es medible en una planta de agua potable, ya que anteriormente se tenía que conocer el depósito específico, variable que es compleja de calcular y esto hace imposible poder medir la pérdida de carga en un filtro rápido.

# Bibliografía

- [1] G. AHUMADA "*Tratamiento Convencional de Agua Potable*", Asociación Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Chile, 2010
- [2] Norma NCh 777/1 Of 2008 Agua Potable: Fuentes de abastecimiento y obras de captación. Parte 1: Captación de aguas superficiales
- [3] G. AHUMADA "Obras de Captación", Asociación Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Chile, 2010
- [4] Norma NCh Nº 1365 Of 78: Agua Potable: Plantas de tratamiento, Terminología
- [5] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), *Criterios para la Dosificación y Mezcla Rápida*, Tomo I Diseño, 1992
- [6] J. Luis Alunni "Agua Potable, Redes y Tratamiento" *Fundamentos de ingeniería*, Vol 9
- [7] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Criterio de Diseño para Floculadores y Decantadores, Tomo II, 1992
- [8] J. Arboleda. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua, Conceptos Modernos en el Diseño del Proceso de Sedimentación, Tomo V, 1973
- [9] E. Echeverría Fluoruración del Agua Potable, Asociación Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Chile, 1992
- [10] Revista Ciencia, Nº4, Estudio comparativo de Normas de Calidad de Agua Potable en Distintos Países de América, Vol 6
- [11] NCh 409/1 of 2005 Agua Potable: Parte 1, Requisitos
- [12] Manual de Operación "*Planta de Tratamiento de Agua Potable Concón*", 2006
- [13] Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua, Conceptos Modernos sobre el Diseño de Unidades de Filtración, Tomo VII, 1973
- [14] L.Vargas Tratamiento de agua para consumo humano. "*Plantas de filtración rápida*", Vol III, CEPIS, 2004
- [15] Manual Técnico del Agua, "*Filtración del agua*", Barreque. Ch y otros, 1979
- [16] Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico Ras-2000 "*Sistema de potabilización*", 2000
- [17] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), "*Criterio de Diseño para Filtros*", Tomo II, 1992
- [18] Tratamiento de filtración rápida, "*Criterios de diseño para filtro*", CEPIS, Vol III, 2004
- [19] Evaluación de las plantas de tratamiento, "Filtración", Luis di Bernardo, 1977
- [20] Water Dynamic and Kinematic Viscosity (online), [http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d\\_596.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html)
- [21] Revista Inversiones Hualix, Turbiedad, 2010

[22] Turbidez (online), <http://www.reitec.es/web/descargas/agua05.pdf>

[23] Revista, Metas y Logros, "*Medición de la turbidez en el estado del agua*", Enero 2010

[24] Agua Potable Métodos de análisis Determinación de Sólidos Disueltos Totales por Método Gravimétrico, Parte 31, ESVAL

[25] F. Escobar "Descripción hidráulica de la batería de filtros de planta N°1 de la Atarjeda", Perú, 2005