

CAPÍTULO 5. PLANTAS DE POTABILIZACIÓN

ÍNDICE

1. REJAS, TAMICES, CÁMARA DE CARGA Y AFOROS	1
1.1. REJAS	1
1.2. MICROTAMICES	1
1.3. CÁMARA DE CARGA	1
1.4. AFOROS.....	2
2. TRATAMIENTOS PRELIMINARES	3
2.1. DESARENADORES	3
2.1.1. <i>Objetivos de su Aplicación</i>	3
2.1.2. <i>Zonas que Componen un Desarenador de Flujo Horizontal</i>	3
2.1.3. <i>Diseño de un Desarenador</i>	4
2.2. PRESEDIMENTACIÓN O SEDIMENTACIÓN PRELIMINAR.....	7
2.2.1. <i>Objetivos de su Aplicación</i>	7
2.2.2. <i>Parámetros de Diseño de un Sedimentador de Flujo Horizontal</i>	7
2.3. PREFILTRACIÓN GRUESA EN MANTO DE GRAVA	8
2.3.1. <i>Objetivos de su Aplicación</i>	8
2.3.2. <i>Clasificación</i>	8
2.3.3. <i>Parámetros de Diseño</i>	8
2.3.4. <i>Filtración Dinámica con Manto de Grava</i>	8
2.3.5. <i>Filtro Grueso de Flujo Horizontal</i>	10
2.3.6. <i>Filtros Gruesos de Flujo Horizontal Descendente en Serie</i>	12
2.3.7. <i>Filtros Gruesos de Flujo Vertical Descendente en Serie</i>	12
3. COAGULACIÓN: MEZCLA RÁPIDA.....	14
4. FLOCULACIÓN.....	24
5. SEDIMENTACIÓN Y DECANTACIÓN	31
5.1. DEFINICIONES	31

5.2. CLASIFICACIÓN.....	31
5.3. ALCANCE	31
5.4. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN CRÍTICA.....	32
5.4.1. <i>Generalidades</i>	<i>32</i>
5.4.2. <i>Método Teórico de Determinación de la Velocidad de Sedimentación</i>	<i>32</i>
5.4.3. <i>Ensayos en Laboratorio.....</i>	<i>34</i>
5.5. SEDIMENTADORES CONVENCIONALES DE FLUJO HORIZONTAL O DECANTADORES.....	39
5.6. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS CON ESCURRIMIENTO VERTICAL	43
5.7. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS EN ESCURRIMIENTO INCLINADO	43
5.7.1. <i>Velocidad de Sedimentación Crítica de Diseño</i>	<i>43</i>
5.7.2. <i>Dimensionamiento de la Zona de Sedimentación.....</i>	<i>44</i>
5.7.3. <i>Sistema de Ingreso del Agua a Cada Unidad</i>	<i>47</i>
5.7.4. <i>Sistema Recolector del Barro Depositado en las Tolvas</i>	<i>48</i>
5.7.5. <i>Zona Líquida Entre Placas Paralelas o Conductos Inclina- dos y la Base Mayor y Superior de las Tolvas de Barro</i>	<i>49</i>
5.8. RECOLECCIÓN SUPERFICIAL DEL LÍQUIDO SEDIMENTADO.....	49
6. FLOTACIÓN.....	52
7. FILTRACIÓN.....	55
7.1. GENERALIDADES	55
7.1.1. <i>Definición del Proceso</i>	<i>55</i>
7.1.2. <i>Velocidad de Filtración</i>	<i>55</i>
7.1.3. <i>Clasificación del Proceso de Filtración.....</i>	<i>55</i>
7.1.4. <i>Parámetros Básicos Adoptados de Diseño y Operación</i>	<i>56</i>
7.1.5. <i>Parámetros Característicos de los Medios Filtrantes.....</i>	<i>56</i>
7.2. FILTRACIÓN RÁPIDA CONVENCIONAL.....	57
7.2.1. <i>Características de la Alternativa</i>	<i>57</i>
7.2.2. <i>Límites de Calidad del Agua Cruda para Filtración Rápida Convencional</i>	<i>58</i>
7.2.3. <i>Parámetros de Diseño y Operación.....</i>	<i>58</i>
7.2.4. <i>Estructuras y Elementos de la Filtración Rápida Convencional</i>	<i>60</i>
7.2.5. <i>Pérdida de Carga en el Manto Filtrante Fijo.....</i>	<i>63</i>
7.2.6. <i>Fluidificación de Medios Granulares.....</i>	<i>67</i>
7.2.7. <i>Lavado de los Filtros.....</i>	<i>71</i>
7.2.8. <i>Sistema de Recolección y Disposición de Agua Sucia del Lavado</i>	<i>77</i>
7.2.9. <i>Sistema de Control de la Filtración Rápida</i>	<i>78</i>
7.2.10. <i>Filtración con Velocidad Declinante.....</i>	<i>79</i>
7.2.11. <i>Número de Filtros</i>	<i>81</i>
7.3. FILTRACIÓN DIRECTA ASCENDENTE.....	81
7.3.1. <i>Características del Proceso.....</i>	<i>81</i>
7.3.2. <i>Determinación de Parámetros de Diseño y Operación</i>	<i>83</i>
7.3.3. <i>Parámetros de Diseño y Operación de la Filtración Directa Ascendente</i>	<i>83</i>
7.3.4. <i>Estructuras y Sistemas de la Filtración Directa Ascendente.....</i>	<i>84</i>
7.3.5. <i>Descargas de Fondo Intermedias</i>	<i>85</i>
7.4. FILTRACIÓN DIRECTA DOBLE: ASCENDENTE – DESCENDENTE	86
7.4.1. <i>Características del Sistema.....</i>	<i>86</i>
7.4.2. <i>Características de la Filtración directa Ascendente en la Filtración Directa Doble</i>	<i>86</i>

7.4.3. Características de la Filtración Descendente en la Filtración Directa Doble.....	88
7.5. FILTRACIÓN DIRECTA DESCENDENTE	88
7.5.1. Características del Proceso	88
7.6. FILTRACIÓN LENTA.....	90
7.6.1. Características del Proceso	90
7.6.2. Selección del Proceso de Filtración Lenta	90
7.6.3. Límites de Calidad del Agua Cruda	91
7.6.4. Criterios de Diseño y Operación	92
7.6.5. Estructuras de la Filtración Lenta	93
7.6.6. Especificaciones Generales.....	94
7.7. FILTROS DINÁMICOS DE ARENA	94
7.7.1. Características.....	94
7.7.2. Característica del Agua Cruda.....	94
7.7.3. Velocidad Media de Filtración.....	95
7.7.4. Caudal de Ingreso al Filtro	95
7.7.5. Dimensionamiento	95
7.7.6. Lecho Filtrante de Arena	96
7.7.7. Manto Sostén	96
7.7.8. Sistema de Drenaje	96
7.7.9. Regulación de la Velocidad de Filtración	96
7.7.10. Sistema de Autolimpieza de una Unidad	97
7.7.11. Sistema de Ingreso a Cada Unidad de una Batería	97
7.7.12. Operación y Mantenimiento	97
7.7.13. Generalidades.....	98
7.8. FILTRACIÓN A PRESIÓN	98
7.8.1. Características del Proceso	98
7.8.2. Diseño Adoptado.....	98
7.8.3. Características Aconsejadas Para el Sistema de Filtros a Presión.....	98
7.8.4. Presiones Manométricas de Diseño y Operativas.....	99
7.8.5. Recipientes	99
7.8.6. Elementos Interiores de los Filtros	99
7.8.7. Instrumentación Requerida.....	100
7.8.8. Datos Garantizados.....	100
8. LABORATORIO	103

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Criterios de diseño de filtros gruesos grava con escurrimiento horizontal según la concentración media de sólidos suspendidos	11
Tabla 2. Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación.....	14
Tabla 3. Longitud necesaria de los conductos (en metros) en función de la velocidad de sedimentación de partículas discretas, U_{sc} (cm/min) y de la velocidad media de escurrimiento U_{em} (cm/min), en el conducto de 60 x 600 mm.....	46
Tabla 4. Límites aceptables de calidad del agua cruda para filtración rápida convencional	58
Tabla 5. Parámetros de diseño y operación de la filtración rápida convencional	59
Tabla 6. Valores máximos de la calidad del agua cruda para aplicar Filtración Directa Ascendente...	81
Tabla 7. Parámetros de diseño y operación para la Filtración Directa Ascendente	84
Tabla 8. Valores máximos de parámetros de calidad del agua cruda para la Filtración Ascendente en la Doble Filtración Directa (Ascendente-Descendente).....	87
Tabla 9. Rango de valores de los parámetros de diseño para la Filtración Ascendente en la Doble Filtración Directa	87
Tabla 10. Rango de valores de los parámetros de diseño de la Filtración Descendente en la Filtración Directa Doble	88
Tabla 11. Frecuencia de los valores límites máximos que caracterizan al agua cruda para el empleo de la Filtración Directa Descendente	89
Tabla 12. Rango de valores del material filtrante en Filtración Directa Descendente	89
Tabla 13. Rango de valores de parámetros de diseños y operación en la Filtración Directa Descendente.....	90
Tabla 14. Tecnologías aplicadas para tratamiento sin coagulación química, de acuerdo a los parámetros básicos máximos del agua cruda	91
Tabla 15. Rango de valores de los parámetros de diseño y operación de la Filtración Lenta de Arena	92

FIGURAS

Figura 1. Curva de sedimentación en columna de sedimentación.....	36
Figura 2. Curvas de isoremoción en ensayo de sedimentación de partículas floculentas.....	37
Figura 3. Porosidad del lecho expandido (ϵ_e) en función del número de Reynolds (Re) y del número de Galileo (G_a)	71

1. REJAS, TAMICES, CÁMARA DE CARGA Y AFOROS

1.1. REJAS

Cuando el agua captada en fuentes superficiales pueda arrastrar materiales suspendidos o flotantes que puedan causar deterioros en bombas u obstrucciones en las conducciones o en la planta de potabilización se debe colocar rejillas para impedir su ingreso.

La separación de las barras debe ser función del tamaño de los materiales a retener.

El proyecto debe indicar claramente la ubicación y disposición de las rejillas y su forma de limpieza y calcular la pérdida de carga con rejilla limpia y establecer la máxima aceptable con rejilla sucia.

El empleo de rejillas con limpieza mecánica debe ser adecuadamente justificado quedando a juicio del ENOHSA la aceptación de su utilización.

1.2. MICROTAMICES

Cuando exista el riesgo de ingreso a la planta de potabilización de peces de pequeño tamaño u otro tipo de fauna acuática o algas provenientes de embalses se debe analizar la conveniencia de instalar microtamices.

Se deben instalar aguas abajo después de las rejillas.

Debe preverse filtros giratorios, contruidos con materiales resistentes a la corrosión, diseñados para trabajo continuo, que posean sistemas de limpieza automática con dispositivos para la eliminación de los materiales retenidos.

1.3. CÁMARA DE CARGA

Es la unidad de la planta de potabilización donde ingresa el agua cruda conducida desde la captación, su fin es mantener constante la cota del pelo libre del líquido y permitir desarrollar desde allí el perfil hidráulico de toda la planta.

A fin de asegurar, entre límites estrechos, el mantenimiento de la cota del pelo libre del agua en la cámara y evitar inundaciones y desbordes en las diferentes instalaciones de la planta se debe prever, en las paredes laterales de la misma, la construcción de un vertedero de demasías que permita la evacuación de los caudales en exceso que puedan ingresar a la cámara, derivándolos hacia el sistema de desagües de la planta.

En aquellos casos en que el líquido ingrese a la cámara de carga con elevada velocidad, que produzca oscilaciones de magnitud en la cota del pelo libre de la misma, debe

preverse una cámara de aquietamiento donde se transforme la energía cinética del escurrimiento de la conducción en energía potencial en la cámara.

El volumen de la cámara de carga se debe calcular para una permanencia inferior a 1 (un) minuto a caudal de diseño. Soluciones que consideren permanencias superiores debe ser justificadas y previamente aprobadas por el ENOHSA.

1.4. AFOROS

La correcta medición de caudales reviste suma importancia en una planta de potabilización, para controlar los distintos procesos que se desarrollan en la misma y determinar los volúmenes entregados a la distribución.

El proyecto debe considerar, como mínimo, aforar los siguientes caudales:

- De agua cruda a tratar.
- Que ingresan a cada batería de filtros para determinar la velocidad de filtración.
- De agua de lavado de los filtros.
- De descarga de barros de decantadores y limpieza de floculadores, casa química, etc.
- Para dosificación de productos químicos.
- De agua tratada.

En todos los casos se debe realizar el aforo a fin de lograr la máxima eficiencia, tanto desde el punto de vista técnico como económico del proceso de potabilización.

El proyectista debe seleccionar el tipo y características del aforador a colocar en cada caso justificando su utilización en función del rango de caudales a medir, adaptabilidad a las características del proceso, facilidad de lectura y registro de datos, disponibilidad en el mercado y costo.

2. TRATAMIENTOS PRELIMINARES

2.1. DESARENADORES

2.1.1. *Objetivos de su Aplicación*

La instalación de un desarenador tiene por finalidad la separación de partículas minerales relativamente gruesas, especialmente arenas, que son transportadas en el escurrimiento del agua cruda que ingresa a la planta de potabilización desde la fuente superficial adoptada.

El desarenador debe:

- Evitar que se produzcan sedimentos en la conducción desde la fuente de provisión del agua cruda.
- Proteger contra la abrasión los equipos de impulsión y otros aparatos de la planta de potabilización.
- Evitar sobrecargas en las fases siguientes del tratamiento.
- Normalmente remover partículas discretas superiores a 0,2 mm.

Cuando la instalación incluyere tamizado o microcernido (con mallas de 1 a 2 mm), y el agua captada pudiera arrastrar partículas minerales, debe diseñarse siempre previamente un desarenador.

Generalmente se diseñan los desarenadores como unidad de flujo horizontal, los que deben considerar los lineamientos que se describen a continuación (numerales 2.1.2. y 2.1.3.).

El ENOHSA podrá permitir el diseño de desarenadores de flujo inclinado, según metodología de cálculo indicada en el Numeral 5.7.

2.1.2. *Zonas que Componen un Desarenador de Flujo Horizontal*

- *Zona de entrada*

Integrada por una transición que vincule el canal o conducto que transporta el líquido a desarenar. Su función es conseguir una distribución uniforme de los filetes del escurrimiento dentro de la unidad, a fin de tener una velocidad media constante en la zona de desarenación.

- *Zona de sedimentación de las partículas gruesas: zona de desarenación*

Canal en donde se realice el depósito de las partículas separadas del escurrimiento horizontal, normalmente de sección rectangular. Debe tener pendiente de fondo para facilitar su limpieza.

- **Zona de salida**

Constituida por un vertedero horizontal con descarga libre, ubicado en todo el ancho de la zona de desarenación, diseñado para mantener una velocidad que no produzca resuspensión del material sedimentado.

- **Zona receptora del material depositado para su posterior derivación**

Formada normalmente por una tolva con una pendiente mínima para provocar el deslizamiento del material depositado hacia un canal transversal colector, generalmente de 0,10 a 0,30 m de altura y 0,30 m de ancho, desde el cual se deriva todo el material recolectado a una cámara exterior, a través de compuertas de igual sección que ese canal.

2.1.3. Diseño de un Desarenador

- Parámetros de diseño: su determinación

- Velocidad de sedimentación terminal (valor constante), en adelante velocidad de sedimentación de partículas minerales o discretas, U_s (cm/s).

A determinar en ensayos con columna de sedimentación o adoptando fórmulas según sea el tamaño de las mismas (ver Numeral 5.4 - Sedimentación y Decantación - del presente Capítulo).

- Diámetro equivalente o tamaño d_p (cm) de las partículas inorgánicas, mediante análisis granulométrico, que predominan durante la mayor parte del año y especialmente las presentes en períodos lluviosos.
 - Velocidad media de escurrimiento longitudinal, U_{em} (cm/s), en la zona útil de desarenación o sedimentación.
 - Velocidad de arrastre de la partícula d_p , (U_{ar}), que debe ser el límite superior de la velocidad media de escurrimiento U_{em} (cm/s).
 - Velocidad de paso o descarga libre (carga hidráulica unitaria), q_v (m³/s.m), por el vertedero de umbral horizontal y longitud, l_v (m) igual al ancho constante B (m) del desarenador (o de la zona de desarenación). Debe evitar la turbulencia y arrastre del material en la aproximación del flujo al final de la unidad.
 - Temperatura media del agua en períodos fríos (T°C).
- Velocidad de sedimentación, U_s (cm/s), correspondiente a una partícula mineral de tamaño, d_p (cm), densidad relativa $\delta_s = 2,65$ (correspondiente a arenas)
 - Debe determinarse en ensayos con columnas de sedimentación, de acuerdo a lo establecido en el Numeral 5.4.3. - Ensayos en Laboratorio – del presente Capítulo.
 - En caso de no poder realizar esos ensayos de laboratorio, a justificarse, se deben adoptar las fórmulas de cálculo establecidas en el Numeral 5.4.2 – Método Teórico de Determinación de la Velocidad de Sedimentación – del presente Capítulo.

En particular se tienen las siguientes situaciones:

- Para arenas gruesas con tamaños d_p entre 0,02 y 0,10 cm (0,2 a 1,0 mm), con número de Reynolds R_e entre 1 y 2000, se debe aplicar la fórmula correspondiente al régimen de transición en la zona de desarenación, reemplazando en la expresión general de la velocidad de sedimentación, U_s (cm/s), el valor del coeficiente de arrastre C_D (adimensional). Preferentemente se utiliza el valor de C_D deducido por Fair, Geyer y Okun, seguidos por el de Allen o el de Rich, indicado en el referido Numeral.
 - Para gravas con tamaños d_p mayor a 1,0 cm (10 mm) y número de Reynolds R_e mayor a 10.000, se debe aplicar la fórmula de Newton para determinar la velocidad de sedimentación, U_s (cm/s), correspondiente al régimen turbulento en la zona de desarenación, en donde el número de Reynolds R_e es mayor a 1.000, según se indica en el referido Numeral.
 - Sólomente cuando predominan partículas de arenas muy finas, de tamaño d_p menor a 0,02 cm (0,2 mm), se debe aplicar la fórmula de Stokes correspondiente al régimen laminar en la zona de desarenación, en donde el número de Reynolds R_e es menor a 1, según se especifica en el referido Numeral.
- Velocidad media del escurrimiento horizontal, U_{em} (cm/s), en la zona de desarenación (asentamiento de las partículas)
 - Su función es calcular la sección transversal útil, A_e (m^2), zona de asentamiento de las partículas o de desarenación, o sea la sección vertical perpendicular al sentido del flujo en esa zona.
 - La relación entre la velocidad media de escurrimiento horizontal, U_{em} (cm/s), debe ser igual o menor a la mitad de la velocidad de arrastre, U_{ar} (cm/s), correspondiente a la partícula mineral de tamaño d_p (cm).
 - El ENOHSA podrá aceptar los siguientes valores máximos de la velocidad media de escurrimiento horizontal, U_{em} (cm/s), para minimizar la influencia de la velocidad de arrastre, U_{ar} (cm/s):
 - $U_{em} \leq 8,0$ cm/s para arena fina (tamaño $d_p < 0,02$ cmf (0,2 mm)).
 - $U_{em} \leq 11,0$ cm/s para arena gruesa (tamaño t_p entre 0,02 y 0,100 m (0,2 y 1,00 mm)).
 - Otros valores adoptados de U_{em} (cm/s) deben ser aceptados por el ENOHSA.
 - Dimensionamiento de las zonas que compnen la caja de un desarenador
 - Zona útil de desarenación (sedimentación o asentamiento)

Los parámetros de diseño de la zona útil de la zona de desarenación en donde el escurrimiento es horizontal, deben cumplir las siguientes relaciones:

 - $A_e = H.B = Q/U_{em}$ = sección transversal o vertical de la zona de desarenación (m^2).
 - $A_s = L.B = Q/U_s$ = superficie teórica de la zona de desarenación (m^2).

- $H = B/2 = (A_e/s)^{1/2}$ = altura o profundidad útil de la zona de desarenación (m).
- $B = 2H = (2 A_e)^{1/2} = A_s/L$ = ancho constante de la unidad y de la zona de desarenación (m).
- $L = A_s/B = A_s/(2 H) = H.A_s/A_e = H.U_{em}/U_s$ = longitud teórica de la zona de desarenación (m).
- $L_d = C_s \cdot L = C_s \cdot H \cdot U_{em}/U_s$ = longitud real de la zona de desarenación (m).
- $V = L.B.H$ = volumen útil teórico de la zona de desarenación (m³).
- $t_d = V/Q$ = tiempo de permanencia teórica en la zona de desarenación (s).
- $10 < L_d/H < 20$ = relación longitud real – altura líquida útil.

donde:

Q = caudal de diseño o de pasaje en cada desarenador (m³/s)

C_s = 1,25 a 1,50 = coeficiente de seguridad para compensar el efecto de eventuales turbulencias en la masa líquida por cortocircuitos corrientes de densidad o zonas muertas (preferentemente $C_s = 1,5$)

➤ Zona de ingreso

Cada unidad puede tener un canal de transición para asegurar la uniforme distribución de los filetes líquidos en la zona de desarenación.

$L_t = (B - b) / (2 \operatorname{tg} \alpha)$ = longitud del canal de transición (m), siendo:

B = ancho constante del desarenador o de la zona de desarenación (m)

b = ancho del canal o conducto de acceso a la unidad (m)

α = ángulo que forma la prolongación de la pared del canal de acceso de solera horizontal. Debe adoptarse $\alpha \leq 12^\circ 30'$.

➤ Zona de salida o descarga del líquido desarenado

La salida debe realizarse por vertedero de descarga libre, de longitud $l_v = B$ (m)

$q_v \leq 1,00$ m/s = velocidad de diseño en el pasaje del caudal desarenado, Q (m³/s), para evitar turbulencias y arrastre del material resuspendido.

$h_v = [Q/(1,838 B)]^{2/3}$ = tirante líquido sobre el vertedero de longitud $l_v = B$ = ancho del desarenador (m)

➤ Zona de almacenamiento del material sedimentado

La pendiente hacia la cámara de recolección y derivación del material depositado, desde el extremo final de la unidad, debe ser igual o superior al 10% de L = longitud de la zona de sedimentación (m).

El ancho b (m) del canal transversal recolector, debe preferentemente diseñarse en la entrada de la unidad, sin considerarse en la longitud L (m) de sedimentación.

- Consideraciones generales para el diseño
 - Se deben remover siempre las partículas de arena con tamaños iguales o mayores a 0,2 mm.
 - Se deben proyectar dos unidades como mínimo, cada una con el caudal de diseño. Un mayor número de unidades debe diseñarse considerando aspectos operativos y constructivos (evitar grandes excavaciones, especialmente por la profundidad de la tolva y canal colector de material depositado).

2.2. PRESEDIMENTACIÓN O SEDIMENTACIÓN PRELIMINAR

2.2.1. Objetivos de su Aplicación

- La instalación de un sedimentador preliminar tiene por finalidad remover materia inorgánica con tamaños predominantemente mayores a 0,02 mm que puede ser removida por sedimentación natural, sin el agregado de coagulante. Para tamaños mayores a 0,20 mm debe preferirse el diseño de desarenadores.
- Debe proyectarse sedimentación preliminar como tratamiento previo a la filtración lenta de arena, cuando las características del agua cruda así lo requiera o antes de un proceso de coagulación – sedimentación cuando se demuestre que de esta manera se economiza coagulante o se optimiza el proceso.
- Pueden diseñarse al igual que para los desarenadores, tanques rectangulares de flujo horizontal para remover los sólidos minerales.
- También pueden diseñarse presedimentadores de flujo inclinado, según metodología de cálculo indicada en el Numeral 5.7.

2.2.2. Parámetros de Diseño de un Sedimentador de Flujo Horizontal

- Se deben aplicar los parámetros que se especifican a continuación; debiendo justificarse a ser aprobados por el ENOHSA otros valores. Para Q = caudal de diseño ($m^3/hora$), se tiene:

$U_s = q_s = Q / (L \cdot B) = 0,20$ a $1,00$ m/hora: velocidad de sedimentación o carga hidráulica superficial, cuando no se disponga de ensayos de Laboratorio para su determinación, siendo:

L = longitud de la zona de sedimentación (m)

B = ancho constante de la zona de sedimentación (m)

$t_s = L \cdot B \cdot H / Q = 1$ a 3 horas: tiempo de permanencia hidráulica

$H = 1,50$ a $2,00$ m: altura útil de la zona de sedimentación

$q_v = Q / B = 2 \text{ a } 3 \text{ L/sm}$: carga hidráulica sobre el vertedero de descarga libre del líquido sedimentado

$L/B = 3 \text{ a } 8$: relación longitud-ancho

2.3. PREFILTRACIÓN GRUESA EN MANTO DE GRAVA

2.3.1. Objetivos de su Aplicación

Son eficientes para:

- Reducir la turbiedad y los sólidos suspendidos y en menor grado los coliformes fecales, del agua cruda o del efluente de la sedimentación preliminar, con o sin desarenadores.
- Mitigar los picos de turbiedad que puedan ocurrir, con cortos períodos de duración.
- Producir agua potable en zonas donde la calidad del agua cruda hace posible el diseño solamente de filtración lenta de arena.

2.3.2. Clasificación

- De acuerdo al sentido del escurrimiento dentro del lecho filtrante y del tipo de limpieza cuando se colmatan, se deben considerar los siguientes tipos de filtración gruesa en grava:
 - Prefiltración dinámica con lecho de grava.
 - Prefiltración gruesa en manto de grava propiamente dicha, de escurrimiento horizontal y vertical (ascendente o descendente).

El prefiltro puede ubicarse como componente de un sistema de potabilización o formando parte de la captación: ríos, arroyos, lagos, etc.

2.3.3. Parámetros de Diseño

Para la adopción del tipo y parámetros de diseño, se debe efectuar ensayos en filtros pilotos con muestras sacadas en períodos normales y en picos de corta duración. En caso que tales ensayos no puedan realizarse, a continuación se exponen para todos los tipos, parámetros que deben ser tenidos en cuenta para el diseño por ser consecuencia de estudios y experiencias disponibles de investigación sobre prefiltración gruesa.

Otros parámetros adoptados deben ser justificados y aprobados por ENOHSA.

2.3.4. Filtración Dinámica con Manto de Grava

El sistema consiste en un filtro de grava construido directamente en el lecho del río utilizando la velocidad de la corriente para autolavado superficial.

- Objetivos de su aplicación:

- Debe utilizarse en una primera etapa previa a la filtración lenta de arena, con o sin filtración gruesa de grava intermedia.
- Debe diseñarse como primera barrera para mejorar la calidad del agua a tratar o para amortiguar los picos eventuales de sus impurezas, especialmente la turbiedad y los sólidos suspendidos.

- Consideraciones para el diseño:

- La turbiedad del agua cruda no debe exceder de 20 UNT, salvo durante los picos de turbiedad.
- En general deben aplicarse parámetros y especificaciones técnicas, constructivas y de operación, semejantes a los correspondientes a filtros dinámicos de arena, cuya Norma está determinada en el Capítulo 5 - Plantas de Potabilización - Numeral 7 - Filtración.
- Tales semejanzas deben corresponder a los siguientes sistemas: ingreso, salida, control de los caudales y limpieza normal de la superficie filtrante.
- Para mejorar la calidad del agua cruda, removiendo impurezas, se deben aplicar los siguientes parámetros:
 - ❖ $U_f = 12 \text{ a } 48 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ = velocidad media de filtración
 - ❖ $U_e = 0,10 \text{ a } 0,30 \text{ m/s}$ = velocidad media de escurrimiento superficial de autolavado
 - ❖ Manto de grava de 3 subcapas de espesor e (m) y tamaños d (mm):
 - 1ª subcapa (superior): $e = 0,20 \text{ a } 0,30$; $d = 3,2 \text{ a } 4,8$
 - 2ª subcapa (intermedia): $e = 0,20 \text{ a } 0,30$; $d = 6,4 \text{ a } 12,7$
 - 3ª subcapa (inferior): $e = 0,20 \text{ a } 0,30$; $d = 15,9 \text{ a } 25,4$
- Para amortiguar los picos de turbiedad y sólidos suspendidos, se deben aplicar los siguientes parámetros:
 - ❖ $U_f = 120 \text{ a } 240 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ = velocidad media de filtración
 - ❖ $U_e \leq 0,05 \text{ m/s}$ = velocidad media de escurrimiento superficial de autolavado
 - ❖ Manto de grava de 3 subcapas de espesor e (m) y tamaños d (mm)
 - 1ª subcapa (superior): $e = 0,20 \text{ a } 0,30$; $d = 1,4 \text{ a } 2,8$
 - 2ª subcapa (intermedia): $e = 0,10 \text{ a } 0,20$; $d = 3,2 \text{ a } 6,4$
 - 3ª subcapa (final): $e = 0,10 \text{ a } 0,20$; $d = 6,4 \text{ a } 15,9$

- Eficiencias en reducción de impurezas

Se puede esperar las siguientes eficiencias medias:

- Sólidos suspendidos: 80%.

- Turbiedad: 65%.
- Color: 30%.
- Coliformes fecales: 96%.

2.3.5. Filtro Grueso de Flujo Horizontal

- **Ventajas de su aplicación**

- Posibilidad de diseñar unidades de mayor longitud y menor altura del manto de grava.
- Facilidad en aspectos constructivos.
- Son eficientes para reducir la turbiedad y los sólidos suspendidos del agua a tratar.

- **Desventajas**

- Son menos eficientes en reducción de los coliformes fecales que las restantes variantes de la filtración gruesa.
- Para conseguir una misma eficiencia se requieren mayores costos constructivos.
- Es dificultosa su limpieza.

- **Conformación**

- Debe proyectarse un tanque de base rectangular en donde el flujo debe ser horizontal.
- El sistema debe estar constituido por cuatro zonas consecutivas:
 - ❖ Zona de entrada para distribuir el flujo que ingresa.
 - ❖ Zona de filtración compuesta por dos, tres o más compartimentos llenos de material granular, normalmente grava, de tamaño constante en cada uno pero decrecientes en los que le siguen.
 - ❖ Zona de salida destinada a recolectar el líquido filtrado y derivarlo a los filtros lentos de arena.
 - ❖ Zona de recolección ubicada en el fondo de cada compartimento, que debe receptor el líquido sucio de cada limpieza periódica, proveniente del volumen contenido en los vacíos de la grava de todos los compartimentos.

- **Dimensionamiento**

- Los parámetros de diseño deben ser determinados mediante pruebas con un filtro piloto.

- En caso de no contar con esos ensayos, se puede adoptar, previa consulta y aprobación por el ENOHSA, los aconsejados por las investigaciones realizadas a la fecha, que se detallan en la **Tabla 1**.

Parámetro	Concentración de sólidos suspendidos en el afluente	
	≥ 100 mg/l	< 100 mg/l
Velocidad de filtración m/h	0,5 a 1,0	0,75 a 1,5
Número de compartimentos	4	3
Longitud de los compartimentos m		
Compartimento N° 1	2,0 a 4,0	1,5 a 3,0
Compartimento N° 2	2,0 a 3,0	1,5 a 2,5
Compartimento N° 3	1,5 a 2,5	1,0 a 2,0
Compartimento N° 4	1,0 a 2,0	--
Tamaño de la grava mm		
Compartimento N° 1	15,9 a 25,4	15,9 a 25,4
Compartimento N° 2	9,6 a 15,9	9,6 a 15,9
Compartimento N° 3	4,8 a 9,6	4,8 a 9,6
Compartimento N° 4	2,4 a 4,8	--
Altura útil máxima m	1,50	1,50
Ancho máximo m	5,00	5,00
Velocidad de descarga m ³ /m ² . día	≥ 1400	≥1400

Tabla 1. Criterios de diseño de filtros gruesos grava con escurrimiento horizontal según la concentración media de sólidos suspendidos

- Otro criterio de dimensionamiento debe ser también aprobado por ENOHSA.
- Para lograr eficiencia en reducción microbiana, deben adoptarse valores bajos de la velocidad de filtración, ya que para velocidades mayores el filtro grueso de flujo horizontal actúa reduciendo la turbiedad y especialmente sólidos los suspendidos.
- Deben efectuarse descargas periódicas, con velocidades iguales o mayores de 1,00 m²/m² h, debiendo el filtro proporcionar la carga necesaria para vencer las pérdidas de carga que se producen en el escurrimiento vertical descendente de las descargas para la limpieza.
- Debe darse en cada compartimento una altura adicional de grava sobre la de diseño, considerando las pérdidas de carga ocasionadas en el escurrimiento horizontal dentro del manto de grava.

2.3.6. Filtros Gruesos de Flujo Horizontal Descendente en Serie

- Conformación:
 - Deben estar constituidos por tres unidades o compartimentos en serie, separados entre ellos por cámaras intermedias que reciben el aporte de la anterior por el fondo y lo descargan superficialmente a la siguiente.
 - La entrada a una cámara inicial se debe efectuar mediante un vertedero de caída libre, preferentemente triangular y la salida desde la cámara final también con un vertedero similar.
 - La limpieza del manto colmatado se debe efectuar en forma semejante a los filtros gruesos horizontales, pero con el aporte únicamente de cada compartimento.
- Dimensionamiento:
 - Debe basarse especialmente en los resultados de pruebas realizadas en un filtro piloto.
 - De no contar con esos parámetros, deben presentarse valores emanados de las últimas experiencias realizadas para este tipo de filtración gruesa, siempre con la aprobación de ENOHSA.
 - Como guía se pueden indicar los siguientes parámetros:

Compartimento 1: tamaño de la grava, entre 3,0 y 4,0 cm y espesor 0,50 m, con una velocidad de filtración entre 0,20 y 0,80 m/h.

Compartimento 2: tamaño de la grava entre 1,5 y 3,0 cm y espesor 0,50 m, con una velocidad de filtración entre 0,15 y 0,40 m/h.

Compartimento 3: tamaño de la grava entre 1,0 y 1,5 cm y 0,50 m de espesor, con una velocidad de filtración entre 0,10 y 0,20 m/h.

2.3.7. Filtros Gruesos de Flujo Vertical Descendente en Serie

- Conformación
 - Debe ser igual a la de un filtro de flujo vertical descendente, pero invirtiendo el flujo y el sistema de ingreso y descarga en las cámaras intermedias entre las tres unidades o compartimentos, o sea entrada superficial y salida por el fondo para cada una de esas cámaras intermedias.
 - La limpieza de cada compartimento debe ser semejante a los filtros gruesos descendentes.
- Dimensionamiento
 - Los parámetros de diseño deben obtenerse en pruebas en filtro piloto.

- De no contar esos antecedentes debe presentarse a ENOHSA para su aceptación y aprobación, parámetros emanados de investigación en este tipo de filtro grueso.
- Como guía se puede indicar los siguientes parámetros:
 - ❖ Número de compartimentos en serie: ≥ 3 .
 - ❖ Velocidad de filtración: 12 a 48 $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$.
 - ❖ Espesor del manto de grava: 0,60 a 0,80 m.
 - ❖ Granulometría (tamaños en mm).
 - Primer compartimento: 19,0 a 25,4
 - Segundo compartimento: 6,4 a 12,7
 - Tercer compartimento: 2,4 a 4,8
- Velocidad de descarga para la limpieza: 100 a 200 $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ . d}$

3. COAGULACIÓN: MEZCLA RÁPIDA

- Definición: la coagulación es un proceso que consiste en aplicar productos químicos para lograr la desestabilización de suspensiones coloidales de partículas sólidas y asimismo la adsorción y precipitación de compuestos en solución, a fin de su remoción por sedimentación, flotación y/o filtración, pasando previamente, o no, por un proceso de floculación.

El proceso de coagulación se caracteriza por la alteración físico-química de partículas coloidales del agua, principalmente por la turbiedad y el color, produciendo su aglomeración en partículas sedimentables.

Los coagulantes usuales a utilizar son las sales de aluminio o de hierro, mientras que para aplicaciones específicas se podrán adicionar polímeros y en menor grado, sílice activada y bentonita como auxiliares de la coagulación.

- La coagulación debe realizarse en una primera etapa mediante la mezcla rápida, operación que consiste en dispersar los productos químicos en el agua, produciendo reacciones de hidrólisis y precipitaciones prácticamente instantáneas. Es necesario conocer la cinética de la coagulación mediante ensayos de laboratorio para el dimensionamiento de los dispositivos de mezcla.
- El agua a tratar deberá clasificarse según sea su comportamiento, de acuerdo a la **Tabla 2:**

I. Alta concentración de coloides – baja alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos en la superficie de los coloides (pH 4 a 7)	Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas. Adición de alcalinidad en algunos casos.
II. Alta concentración de coloides – alta alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitación de hidróxidos (pH mayor que 7)	Dosis de coagulación incrementa con concentración de partículas.
III. Baja concentración de coloides – alta alcalinidad	Formación de precipitado. Floculación de barrido.	Alta dosis de coagulantes. Adición de partículas
IV. Baja concentración de coloides – baja alcalinidad	Formación de precipitado. Floculación de barrido.	Alta dosis de coagulantes. Adición de alcalinidad o partículas, o ambos.

Tabla 2. Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación

- Para fijar los parámetros de diseño debe realizarse ensayos de laboratorio en dos épocas diferentes: la lluviosa y la seca, especificando el porcentaje de su duración en el año. Los ensayos deben indicar la conveniencia o necesidad de realizar una coagulación por neutralización de cargas o por barrido. Los ensayos deben realizarse durante una semana como mínimo en cada época y se deben determinar las condiciones óptimas del gradiente de velocidad, tiempo de mezcla, dosis del coagulante y la concentración de su solución.

- En el caso plenamente justificado de no tener parámetros deducidos de esos ensayos, se podrán adoptar los siguientes criterios para coagulantes metálicos hidrosolubles:

- Tiempo de mezcla: menor a 7 s.
- Gradiente de velocidad G : entre 300 y 1200 s^{-1} , debiendo evitarse valores entre 1500 y 3600 s^{-1} . En cambio se podrá producir una mezcla satisfactoria con gradientes de velocidades superiores a 3600 s^{-1} , que puede lograrse en mezcladores mecánicos en línea o singularidades ubicadas en conductos con velocidades relativamente elevadas.
- El parámetro GT debe estar comprendido entre 300 y 1600.

Los valores adoptados deben ser aprobados específicamente por el ENOHSA en cada caso, previa justificación técnica.

- La coagulación con sales de aluminio o de hierro debe producir una reacción adecuada del coagulante con el agua. Para ello deberán cumplirse las siguientes condiciones:

- Todos los productos químicos que modifican el pH (cal, soda, ácidos y otros), deben aplicarse aguas arriba del punto de inyección de la solución del coagulante, a una distancia suficiente y con un dispositivo adecuado de mezcla que permita asegurar una completa disolución.
- Para lograr el pH óptimo de coagulación, compatible con el mecanismo de coagulación requerido de acuerdo a los ensayos (neutralización de cargas o barrido), el pH debe ser corregido antes de la introducción del coagulante.
- La dosificación de las sales de aluminio o hierro debe efectuarse en forma constante en el plano de la inyección, mediante chorros separados 10 cm como máximo, a fin de que su dispersión en el agua sea inmediata y uniforme.
- Cuando se aplican polímeros auxiliares de la coagulación, debe determinarse en ensayos de laboratorio el tiempo transcurrido entre la aplicación del coagulante primario y la aplicación posterior del polielectrolito, recomendándose que se posibilite alcanzar valores entre 3 y 30 minutos a ajustar de acuerdo a las experiencias a realizar en el futuro durante la operación del sistema.
- Los coagulantes metálicos, auxiliares de coagulación y preoxidantes deben aplicarse en solución.
- La concentración de la solución del coagulante debe ser la menor posible, entre 0,5 y 2,0 % (5 a 20 g/l), para una inyección instantánea, debiendo estudiarse caso por caso si existen excepciones. Debe evitarse la excesiva dilución (menor a 0,5 %).
- La dispersión de polielectrolitos como coagulantes primarios o como auxiliares de coagulación, debe cumplir con las recomendaciones de los fabricantes.

- Se debe adoptar el dispositivo de mezcla rápida entre los siguientes tipos:

- *Mezclador hidráulico*: que utiliza la energía disipada en forma de pérdida de carga en el flujo de agua a través de un conducto, canal o tanque de mezcla. A

su vez se tienen las siguientes clases de mezcladores: mezcla en línea en conducto abierto o cerrado, mezcla en singularidades colocadas en conductos: resalto hidráulico, vertedero, canaletas Parshall, curva, expansión brusca, placa con orificios, válvula y cualquier otro que produzca una pérdida de carga localizada.

- *Mezclador mecánico*: es un aparato mecánico que debe producir movimientos de mezcla en un líquido a través de la rotación de un impulsor. Se denominan agitadores de turbina y se clasifican según el tipo de flujo producido en la masa líquida dentro del tanque de mezcla: de flujo axial que mueve el líquido paralelamente al eje impulsor y de flujo radial que lo hace perpendicularmente al eje, siendo en ambos la potencia disipada función de la geometría del tanque o conducto de mezcla, del sistema de impulsión y de las características del líquido.
- *Mezclador neumático*: en donde las burbujas de aire producidas por un difusor ascienden por el tanque de mezcla, provocando la circulación del líquido y una potencia disipada en una expansión isotérmica.

Debe ser aconsejable en todos los casos que el dispositivo produzca una mezcla instantánea (tipo flash) en una unidad de flujo pistón.

- En cada caso debe justificarse las razones técnicas de la elección efectuada.
 - La mezcla en resalto hidráulico, que es un fenómeno que ocurre cuando la corriente líquida pasa de un régimen rápido o hipercrítico a uno tranquilo o subcrítico, debe cumplir con las siguientes condiciones:
 - En canales rectangulares por cambio de pendiente o con vertederos de caída libre, el Número de Froude F_1 en el inicio hipercrítico del resalto hidráulico debe estar comprendido entre 4,5 y 9 ($F_1 = 4,5$ a $9,0$ que corresponde a resalto estable).
 - En canaletas o medidores Parshall, el Número de Froude F_1 en el inicio del resalto, puede estar comprendido en cualquiera de los dos siguientes rangos: entre 1,7 y 2,5 ($F_1 = 1,7$ a $2,5$ que corresponde a resalto débil o preresalto) o entre 4,5 y 9,0 ($F_1 = 4,5$ a $9,0$ que corresponde al resalto estable)
 - En ambos mezcladores, el Número de Froude F_1 no debe estar comprendido en el rango entre 2,5 y 4,9 ($F_1 = 2,5$ a $4,9$ que corresponde a resalto oscilante), ni superar el valor mayor a 9,0 ($F_1 > 9,0$ que corresponde a un resalto fuerte y que puede provocar roturas en el canal).
 - $F_1 = U_1 / (g \cdot h) =$ Número de Froude (adimensional), siendo:
 - $h_1 = Q / (b \cdot U_1) =$ altura del agua en el inicio del resalto hidráulico (m), cuando el régimen es hipercrítico
 - $U_1 = 2 (2g \cdot E_o / 3) \cdot \cos \phi / 3 =$ velocidad media de escurrimiento por esa sección inicial del resalto hidráulico (m/s)
- donde:
- $\cos \phi = - (g \cdot Q / b) / (2/3 g \cdot E_o)^{3/2}$, siendo $\phi =$ ángulo auxiliar de cálculo
- $Q =$ caudal de pasaje por el mezclador (m^3/s)

b = ancho constante del canal rectangular (m). En medidores Parshall, $b = w$ = ancho de la garganta o módulo del medidor

$E_o = E_1 = H_1 + U_o^2/2g$ = energía específica o carga hidráulica disponible en la sección inicial supercrítica del resalto (m), siendo:

H_1 = distancia vertical entre la línea piezométrica aguas arriba del resalto hidráulico y la solera en el comienzo de ese resalto (m)

$U_o^2/2g$ = diferencia de niveles entre la línea de energía y la línea piezométrica (m)

En canaletas Parshall se tiene:

$E_o = E_1 = H_o + U_o^2/2g + N = h_o + [Q/(D' \cdot h_o)]^2/2g + N$ = energía específica en la sección 1 (donde comienza el resalto (m) siendo:

$h_o = k \cdot Q^n$ = tirante líquido medido en la sección del sector convergente de fondo horizontal, situado a $2/3 B$ (m) de la garganta (m), y que corresponde al caudal de pasaje, Q (m^3/s) para la canaleta de módulo W (m) = ancho de la garganta (m)

$U_o = Q / (h_o \cdot D')$ = velocidad media en la sección de medición (m), donde $D' = 2/3 (D - W) + W$ = ancho de la sección de medición en el sector convergente de la canaleta (m).

N = diferencia de niveles entre las soleras de ese sector convergente y de la sección inicial del resalto (comienzo de la garganta) (m)

- Los parámetros W , D , N , k y n , están desarrollados en manuales que consideran a los medidores Parshall.
 - En mezcladores por cambio de pendiente, el valor de N (m), corresponde a la diferencia de niveles de la solera del canal donde el régimen hidráulico es constante y de esa sección inicial del resalto.
 - En mezcladores de vertederos de caída libre, el valor de N (m), es igual a la altura del vertedero respecto a la solera del canal antes del vertedero.
 - En todos los casos debe producirse el resalto hidráulico, para lo cual es necesario analizar las condiciones del escurrimiento aguas abajo. La solución del coagulante debe ser inyectada en el inicio del resalto donde se produce la mayor turbulencia.
- Los mezcladores mecánicos deben obedecer las siguientes condiciones:
 - La potencia del equipo debe ser establecida en función del gradiente de velocidad.
 - Para tener tiempo de mezcla inferior a 2 s, el flujo debe incidir directamente sobre las paletas del impulsor.
 - La solución del coagulante debe ser inyectada debajo de la turbina o hélice del equipo.

- La utilización de difusores en un canal o conducto debe cumplir con las siguientes condiciones, aparte de las generales para mezcladores rápidos:
 - Producir una aplicación uniforme mediante chorros dirigidos en un sentido distinto al correspondiente al escurrimiento, que a su vez debe tener una velocidad media igual o mayor a 2 m/s.
 - El diámetro de los orificios de salida de los chorros debe ser igual o mayor a 3 mm.
 - El sistema difusor debe permitir limpiezas periódicas en el conducto que distribuye la solución de coagulante.
- Productos químicos dosificados en seco deben ser previamente diluidos o dispersados en agua antes de su aplicación.
- Gradiente medio de velocidad G (s^{-1}) para producir mezcla rápida. Es uno de los factores básicos conjuntamente con el tiempo de mezcla t_m (s).

Deben adoptarse para su cálculo las siguientes expresiones, según sea el tipo de mezclador rápido.

- Expresión general

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V_m}} = \text{gradiente medio de velocidad (s}^{-1}\text{), que define un parámetro de disipación de la energía en la masa del fluido.}$$

Donde:

P = potencia aplicada al agua (W ó N . m/s)

V_m = volumen del sector donde se produce la mezcla (canal, conducto o tanque), (m^3)

μ = $\rho \cdot \nu$ = viscosidad dinámica del agua a temperatura T °C (N . s/m² ó Kg/m.s)

ρ = masa específica del agua a temperatura T °C (Kg/m³ ó N.s²/m⁴ para Kg = N/g)

ν = μ / ρ = viscosidad cinemática del agua a temperatura T °C (m²/s)

g = aceleración de la gravedad en el sitio de consideración (m/s²)

- Para mezcladores hidráulicos

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{Q}{V_m} \cdot h_f} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{h_f}{tm}} = \text{gradiente medio de velocidad, (s}^{-1}\text{),}$$

expresión general de mezcladores hidráulicos

Donde:

Q = caudal de diseño o de pasaje por el mezclador hidráulico (m^3/s)

$t_m = V_m / Q$ = tiempo de mezcla rápida (s)

h_f = pérdida de carga hidráulica en el pasaje (m), en el volumen $V_m(m^3)$, para arribar al gradiente medio de velocidad, $G (s^{-1})$ requerido en el proceso, valor que depende del tipo de mezclador adoptado.

Los parámetros ρ , g y μ están especificados en el presente Numeral.

➤ Para conductos a presión

$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu}} \cdot \sqrt{U \cdot j}$ = gradiente medio de velocidad (s^{-1}), en conductos a presión,
siendo:

$j = h_f / L_m$ = pérdida de carga consumida en la longitud L (m) de mezcla, (mm)

$U_{am} = Q/A_e$ = velocidad media del flujo (m/s) en el pasaje por el volumen V_m (m^3) de sección transversal, $A_e (m^2)$

Los parámetros ρ , μ y g , están especificados en el presente Numeral.

➤ Para conductos abiertos o cerrados

Válido para conductos a escurrimiento a gravedad o a pelo libre, aplicando la fórmula de Manning.

$G = n \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot p}{\mu}} \cdot R_h^{0,57} \cdot U_{em}^{1,5}$ = gradiente medio de velocidad (s^{-1}), para conductos
abiertos o cerrados con escurrimiento a pelo libre

n = coeficiente de Manning, indicado en textos de Hidráulica de acuerdo a la rugosidad del conducto.

$R_h = A_e / p_e$ = radio hidráulico (m) de la sección mojada en el conducto, canal u orificio por donde el flujo pasa a la mezcla rápida, siendo:

A_e = área de la sección mojada (m^2)

p_a = perímetro mojado de esa área (m)

$U_{em} = Q / A_e$ = velocidad media de pasaje (m/s), del caudal de pasaje, $Q (m^3/s)$, por el área mojada $A_e (m^2)$.

Los parámetros ρ , μ y g , están especificados en el presente Numeral.

➤ Para una singularidad

La siguiente expresión es válida para curvas, expansiones bruscas, placas con orificios, válvulas o cualquier elemento que provoque una pérdida de carga localizada, en donde el 80% es la energía hidráulica correspondiente a la pérdida de carga, h_f (m), del flujo que se deriva en un volumen, V_m (m³), a una distancia, $L_m = 5 D$ (m), aguas debajo de la singularidad:

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{0,8U}{5D} \cdot \frac{K \cdot U^2}{2g}} = 0,2828 \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot U^3}{D}} = \text{gradiente medio de velocidad (s}^{-1}\text{)},$$

en una singularidad, siendo:

$$U_{em} = Q / A_e = 4 Q / \pi \cdot D^2 = \text{velocidad media de pasaje por el conducto (m}^2\text{)}$$

$$A_e = \pi \cdot D^2 / 4 = \text{sección de pasaje por el conducto (m}^2\text{)}$$

$$D = \text{diámetro del conducto (m)}$$

K = coeficiente de pérdida de carga del flujo turbulento por la singularidad, que se especifica en textos de Hidráulica.

Los parámetros ρ , μ , g y Q , están especificados en el presente Numeral.

➤ Para resaltos hidráulicos

La siguiente expresión es válida en canaletas o medidores Parshall y en canales rectangulares por cambio de la pendiente o en vertederos de caída libre:

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{1}{t_m} \cdot \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 \cdot h_2}} = \text{gradiente medio de velocidad (s}^{-1}\text{)}, \text{ en resaltos}$$

hidráulicos, siendo:

$$h_1 = \frac{Q}{b \cdot U_1} = h_2 / 2[(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1] = \text{tirante líquido conjugado del } h_2, \text{ correspondiente a}$$

la sección inicial del resalto hidráulico con régimen hipercrítico, (m)

$$h_2 = \frac{Q}{b \cdot U_2} = h_1 / 2[(1 + 8F_2^2)^{1/2} - 1] = \text{tirante líquido conjugado del } h_1, \text{ correspondiente}$$

a la sección final del resalto hidráulico con régimen subcrítico, (m) valor que es conveniente mantener aguas abajo del resalto, mediante dispositivos especiales (compuertas u orificios)

Donde:

Q_1 , U_1 , h_1 y F_1 = parámetros especificados anteriormente en este Numeral

b = ancho constante, (m), en canales rectangulares de mezcladores por cambio de pendiente

$b_1 = W$ = ancho de la sección inicial del resalto hidráulico, (m), en una canaleta Parshall de módulo W (m)

$b_2 = C$ = ancho mayor del sector divergente final del resalto hidráulico, (m), para esa canaleta Parshall de módulo W (m)

$F_2 = U_2 / (g \cdot h_2)^{1/2}$ = número de Froude (adimensional) en la sección final del resalto, función de h_2 (m), obtenido del valor conjugado h_1 (m) y de $U_2 = Q / (b \cdot h_2)$ = velocidad media en la sección final, (m/s)

$t_m = 2 L_r / (U_1 + U_2)$ = tiempo de mezcla en la longitud L_r (m) del resalto hidráulico, (m)

$L_r \approx 4,5 h_2$, para $F_1 = 1,7$ a $2,5$ (resalto débil)

$L_r = 6 (h_2 - h_1) \approx 6,1 h_2$, para $F_1 = 4,5$ a $9,0$ (resalto estable)

➤ Para resalto hidráulico en canal por cambio de pendiente

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{h_f}{t_m}} = \text{gradiente medio de velocidad, (m)}$$

Donde:

$$h_1 = \frac{Q}{b \cdot U_1} : \text{tirante líquido inicial, (m), para } b = \text{ancho del canal, (m)}$$

Los parámetros U_1 , U_2 , h_2 y $h_f = (h_2 - h_1) / (4h_1 \cdot h_2)$, se calculan siguiendo el criterio correspondiente a canaletas Parshall, que se especifica en textos de Hidráulica.

- Mezcladores mecánicos

➤ Potencia disipada en un mezclador rápido con turbinas

Debe aplicarse la siguiente expresión:

$$P = K \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D^5 = \text{potencia disipada, (W)}$$

Donde:

ρ = masa específica a T °C del agua, (Kg/m³)

D = diámetro de la turbina, (m)

μ = viscosidad dinámica a T °C del agua, (N · s/m²)

n = número de rotaciones por segundo, (rps)

K = coeficiente que depende del tipo de rotor y de las características de la cámara. Se debe adoptar $K = 5$, para turbinas de flujo radial con seis paletas planas fijadas en un disco perpendicular al eje de rotación del

equipo. Para este tipo de turbina, se debe adoptar las relaciones geométricas siguientes:

$$2,7 \leq D_T/D \leq 3,3$$

$$2,7 \leq H/D \leq 3,9$$

$$0,75 h/D \leq 1,3$$

$$b = D/4, W = D/5$$

$$I = D_T/10$$

Siendo:

D_T = diámetro del tanque, (m)

H = altura del tanque, (m)

h = distancia entre el borde inferior de las paletas y la solera de la cámara, (m)

W = altura de cada placa, (m), de b = longitud de cada placa, (m)

I = ancho de cada uno de los 4 deflectores perpendiculares entre sí, de altura mayor a H , (m)

$P = \mu \cdot V_m \cdot G^2$ = potencia (w), que debe adoptarse en función de:

$G = G \cdot t/t_m$ = gradiente medio de velocidad, que debe adoptarse para
 GT = valor adimensional que puede variar entre 300 y 1500 y
 t_m = tiempo de mezcla menor a 7 s

$V_m = Q \cdot t_m$ = volumen líquido de la cámara de mezcla, (m³)

$$n = \sqrt{\frac{P}{K \cdot \rho \cdot D^5}} = \text{velocidad de rotación (rps), que debe calcularse en función de } P, K, \rho \text{ y } D$$

➤ Condiciones que deben cumplir los mezcladores mecánicos:

- ❖ La potencia P (w) debe ser establecida en función del gradiente medio de velocidad G (s⁻¹).
- ❖ Tiempos de mezcla inferiores a 2 s, exigen que el flujo incida directamente sobre las placas o paletas de agitadores.
- ❖ La solución o suspensión del producto químico debe ser inyectada debajo de la turbina del agitador.
- ❖ La turbina con seis láminas cortas ubicadas en un disco perpendicular al eje de giro, presenta la mayor potencia disipada, necesaria en mezcla rápida con gradientes medios de velocidad elevada.
- ❖ La turbina con sus paletas largas, conectadas a 45° con el eje de giro (flujo axial), no debe aplicarse en la fase de coagulación. Su uso debe aplicarse preferentemente en la etapa de floculación, con gradientes de velocidad distribuidos uniformemente en el tanque, sin límite de velocidad.

- ❖ Los mezcladores mecánicos en línea deben producir gradientes medios de velocidad del orden de 5000 s^{-1} o mayores y tiempos de mezcla del orden de fracción de segundo. Para ello puede colocarse una turbina dentro de un conducto.

- Mezcladores neumáticos

- Potencia disipada

Debe emplearse en las etapas de mezcla rápida y floculación cuando se aplican en aeración y/o en la clarificación por flotación, aplicables en canales de gran profundidad o en tramos de conductos verticales, mediante difusores de aire.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q_{ai} \cdot P_a \cdot l_n \left(\frac{H - P_a}{P_a} \right) = \text{potencia disipada (w)}$$

Donde:

ρ = masa específica del agua a $T \text{ } ^\circ\text{C}$ (Kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

P_a = presión atmosférica local (m.c.a.)

H = profundidad de instalación del difusor (m.c.a)

$$Q_{ai} = \frac{\mu \cdot V \cdot G^2}{\rho \cdot g \cdot P_a \cdot l_n \left(\frac{H + P_a}{P_a} \right)} = \text{caudal de aire (m}^3\text{/s), para un determinado}$$

gradiente medio de velocidad

V_m = volumen del tanque donde se producirá la mezcla, (m^3)

- Condiciones a considerar

Deben considerarse las siguientes situaciones:

- ❖ Para la mezcla rápida no es importante el tamaño de las burbujas, mientras que en la floculación el diámetro debe ser inferior a 0,1 mm.
- ❖ Hay problemas con la espuma de acuerdo al coagulante utilizado y de la presencia de algas, que perjudica a la sedimentación.
- ❖ El aire agregado a los flóculos es favorable a la flotación, siendo especialmente indicado para el proceso de clarificación.

4. FLOCULACIÓN

- Definición: la floculación es el proceso de unir partículas previamente coaguladas y desestabilizadas para formar mayores flóculos a fin de lograr su separación por sedimentación, flotación y/o filtración del agua tratada, especialmente para la remoción de sustancias que producen turbiedad y color en el agua a tratar.
- La energía aplicada en la floculación, al igual que en la mezcla rápida, podrá efectuarse por medios hidráulicos, mecánicos o neumáticos.
- Se podrán instalar floculadores de los siguientes tipos:

- *Floculadores de potencia*, controlados por el gradiente G y en donde los flóculos son arrastrados con el agua en el flujo a través del tanque de floculación. El gradiente medio de velocidad puede ser prefijado de antemano y ajustado posteriormente por el operador.
- *Floculadores de contacto de sólidos o de manto de lodos*: controlados por la concentración de flóculos C , que requieren atención permanente del operador.

En cada caso, debe justificarse las razones técnicas de la elección efectuada.

- El período de detención hidráulica o tiempo de floculación t_f y los gradientes medios de velocidad G a ser aplicados, deben ser determinados mediante ensayos de laboratorio.
- En el caso de no ser factible esos ensayos se pueden adoptar los siguientes valores:

- *Floculadores de manto de lodo*

t_f = tiempo de floculación entre 5 y 15 min

G = gradiente medio de floculación mayor a 5 s^{-1} , dependiendo de la concentración C y densidad de los flóculos

C = concentración de los flóculos, entre 0,05 y 0,20, siendo un valor común 0,15

$C \cdot G \cdot t_f$ = parámetro entre 60 y 120

H = profundidad del manto de lodo entre 1,00 y 3,00 m, siendo un valor medio 2,00 m

- *Floculadores de potencia (hidráulicos, mecánicos o neumáticos)*

t_f = tiempo de floculación: 20 a 30 min cuando el proceso que sigue es la decantación y de 10 a 20 min, cuando se tiene flotación y/o filtración directa

- ❖ Energía aplicada $G \cdot t_f$: entre 10^4 y 10^5 , con una media de $5 \cdot 10^4$, siendo los valores más bajos para aguas de turbiedad alta y los más altos para aguas de baja turbiedad.

- ❖ G = gradiente medio de velocidad: entre 70 y 10 s^{-1} , siendo 30 s^{-1} un valor medio
- ❖ Profundidad del líquido en los tanques de floculación: de 2,50 a 5,00 m.
- ❖ Número de compartimentos en serie en la floculación mecánica y neumática: de 3 a 6, siendo 4 el valor normal.

Los valores adoptados deben ser aprobados específicamente por el ENOHSA en cada caso previa justificación técnica.

- Floculadores de manto de lodo o clarificadores de contacto

Deberán verificar los sistemas patentados de acuerdo a los siguientes parámetros de diseño:

$$\text{➤ } G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{C}{1-C} \cdot \frac{\rho_F - \rho}{\rho} \cdot U_o} = \text{gradiente de velocidad, (s}^{-1}\text{)}$$

donde:

$C = 21,8 \cdot 10^{-6} \cdot D$ = concentración de sólidos deseada (vol/vol ó cm^3/cm^3)

D = dosis de óptima de sulfato de aluminio (mg/l)

ρ_F = masa específica de los flóculos (Kg/m^3), normalmente de 1001 Kg/m^3

ρ = masa específica del agua (Kg/m^3)

$U_o = Q/A$ = carga o velocidad de escurrimiento superficial, (m/s), que debe variar entre 2 a 4 m/h (0,056 a 0,111 cm/s), donde:

Q = caudal de escurrimiento (m^3/s)

A = área horizontal del clarificador

$$\text{➤ } q = 21,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{D \cdot Q}{C_o} = \text{caudal de purga, (l/s ó } m^3/h\text{), donde:}$$

C_o = concentración del manto de lodo, normalmente de 15 %

- Floculadores hidráulicos

Son dispositivos donde se utiliza la energía hidráulica disipada en el flujo del agua a través de un tanque, canal o conducto.

Entre las variantes están los floculadores de chicanas (flujo horizontal o vertical), de acción de chorro de agua (de flujo helicoidal y los determinados "Cox" y "Alabama"), y en medio poroso (floculador de piedras).

➤ *Floculadores de chicanas*

- ❖ Los floculadores de chicana pueden ser de escurrimiento horizontal recomendado para caudales superiores a 75 l/s, mientras que para menor capacidad se aplican los floculadores de flujo vertical.

La velocidad media de escurrimiento U_i debe estar comprendida entre 0,30 m/s en el inicio del floculador y 0,10 m/s en el final.

- ❖ Se debe considerar al número de Camp, $C_a = G \cdot t_f$ como el parámetro más significativo en el proceso de floculación, ya que el floculador hidráulico es menos sensible a las variaciones de caudales que el mecánico (en éstos hay más zonas muertas y cortocircuitos que en el hidráulico).
- ❖ Se deben adoptar las siguientes relaciones de los caudales Q (m^3/s), respectivamente con los gradientes medios de velocidad G y número de Camp C_a , para la variación del caudal:

$$\frac{G}{G_o} = \left(\frac{Q}{Q_o} \right)^{3/2}$$

$$\frac{C_a}{C_{ao}} = \left(\frac{Q}{Q_o} \right)^{1/2}$$

- ❖ En los floculadores de flujo horizontal el espacio libre entre el extremo de una chicana y la pared del canal, o sea donde se produce un giro de 180° del flujo, debe ser igual a 1,5 veces la separación libre entre dos chicanas consecutivas, no debiendo ese espacio ser mayor a la longitud de cada chicana. En consecuencia la velocidad media de pasaje en ese giro U_2 (m/s) deberá ser $2/3$ de la correspondiente al flujo entre chicanas.
- ❖ En los floculadores de flujo vertical la altura líquida en el tanque no debe ser inferior a 3 veces la separación entre dos chicanas consecutivas.
- ❖ Para el diseño se deben adoptar las expresiones siguientes desarrolladas por C. Richter:

$$G = \frac{Q}{A} \sqrt{\frac{13 + 9f}{18} \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot \frac{n_c^3}{t_f}} = \text{gradiente medio de velocidad (s}^{-1}\text{), de cada tramo, cuando se cumple que } U_2 = 2/3 U_1$$

$$n_c = \sqrt{\frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{18}{13 + 9f} \cdot \left(\frac{A}{Q} \cdot G \right)^2 \cdot t_f} = \text{número de canales entre chicanas de cada tramo}$$

$$h_f = \frac{13 + 9f}{18g} \cdot \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \cdot n_c^3 = \text{pérdida de carga por fricción en el tramo de } n_c \text{ canales entre chicana (m)}$$

donde:

Q = caudal de pasaje en cada unidad de floculación (m³/s)

A = área de pasaje del canal o tramo considerado, perpendicular al sentido del flujo (m²), siendo:

A_h = H . L = área total de pasaje en floculadores de flujo horizontal

Δ_v = H . B = área total de pasaje en floculadores de flujo vertical

H = altura líquida en el tramo (m)

L = longitud del floculador (m)

B = ancho del floculador (m)

f = coeficiente de la fórmula de Darcy, que varía entre 0,2 y 0,3 para el diseño

U = Q/A = velocidad media de pasaje entre chicanas (m/s)

t_f = V/Q = tiempo de detención hidráulica en el floculador (h)

➤ *Floculadores hidráulicos de acción del chorro de agua*

Corresponden a los de flujo helicoidal y a los denominados “Cox” y “Alabama”.

- ❖ El gradiente medio de velocidad se calcula con la expresión general para mezcladores rápidos hidráulicos:

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{u}} \cdot \sqrt{\frac{h_f}{t_f}} = \text{gradiente medio de velocidad (s}^{-1}\text{)}$$

donde:

h_f = K . U²/2g = pérdida de carga total en el pasaje por todos los orificios sumergidos (m), siendo:

K = coeficiente de pérdida de carga en el flujo a través de cada orificio sumergido

U = velocidad de pasaje por cada orificio (m/s)

- ❖ El gradiente medio de velocidad G (s⁻¹) debe verificar el número S de la expresión de Sinclair y Sindelar, donde la rotura de los flóculos es despreciable cuando S = G . R_e⁻⁵ es menor de 1,3 s⁻¹.

Se sugiere $S < 0,7 \text{ s}^{-1}$ para aguas con alta alcalinidad y sales de hierro y $S < 0,3 \text{ s}^{-1}$ para aguas con baja alcalinidad y sales de aluminio como coagulante.

- ❖ En los floculadores helicoidales el flujo es tangencial y en especial dentro de la cámara de floculación, generado por la energía hidráulica inducida en la entrada. Se recomienda un mínimo de 5 cámaras en serie.
- ❖ El floculador Cox debe disponer de 5 cámaras en serie, en donde las aberturas se colocan alternativamente en la parte superior e inferior y a cada lado de las cámaras, forzando un flujo en zig-zag. Se deben proyectar las alturas con una velocidad de pasaje entre 0,7 y 0,5 m/s en la primera cámara y 0,20 a 0,10 m/s en la última. El tiempo de floculación t_f debe variar entre 15 y 25 min.
- ❖ En el floculador Alabama, con flujo ascendente-descendente se produce el ingreso a cada cámara del caudal, mediante curvas de 90° orientadas hacia y apoyadas en la solera del tanque, siendo removibles para ajustar la velocidad de ingreso.

Se debe cumplir el siguiente criterio de cálculo:

Carga superficial por cámara:	$q = 25 \text{ a } 50 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$
Velocidad en las curvas de 90° :	$U_p = 0,4 \text{ a } 0,6 \text{ m/s}$
Número de Camp:	$C_a \cdot t_f = 3,6 \cdot 10^4 \text{ a } 7,5 \cdot 10^5$, pudiendo adoptarse $5 \cdot 10^4$ para diseño
Tiempo total de floculación:	$t_f = 15 \text{ a } 25 \text{ minutos}$
Longitud de cada cámara:	$L_1 = 0,75 \text{ a } 1,50 \text{ m}$
Ancho de cada cámara:	$B = 0,50 \text{ a } 1,25 \text{ m}$
Altura líquida:	$H = 1,50 \text{ a } 3,00 \text{ m}$
Profundidad de la cámara de salida:	$H_1 = 1,50 \text{ a } 3,00 \text{ m}$

- ❖ La floculación en medio poroso o por contacto, consiste en el flujo a través de un lecho granular contenido en un tanque. Se deben cumplir los siguientes requisitos:

- Tiempo de floculación t_f entre 3 y 5 min.

- Número de Camp $G \cdot t_f$ no debe ser inferior a $1,5 \cdot 10^4$

- Gradiente medio de velocidad $G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot U \cdot j}{\mu \cdot \varepsilon_o}}$, donde:

$U = Q/A =$ velocidad de aproximación (m/s)

j = pérdida de carga unitaria en medio poroso (m/m)

ε_o = porosidad inicial del medio

❖ Pérdida de carga unitaria, en floculadores de medio poroso:

$$j = \frac{h_f}{L} = 150 \frac{\mu}{\rho \cdot g} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_o)^2}{\varepsilon_o^3} \cdot \frac{U}{C_e D} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{U^2}{g \cdot C_e \cdot D} \text{ (m/m)}$$

Fórmula de Ergun para número de Reynolds entre 10 y 300 y para porosidad inicial ε_o , siendo además de parámetros ya indicados:

L = espesor del medio granular (m)

D = diámetro equivalente del medio granular (m)

C_e = coeficiente de esfericidad medio granular

• Floculadores mecánicos

Se clasifican de acuerdo básicamente al tipo de movimiento: giratorios y alternativos u oscilantes.

➤ *Floculadores giratorios de paletas: paralelas o perpendiculares al eje*

❖ Deben calcularse considerando únicamente a las paletas que se encuentran en un solo plano del eje, ya que la repetición de las paletas en más de un plano no cambia el gradiente de velocidad.

❖ $G = 5 \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu \cdot V} \cdot [C_D (1 - k)^3 \cdot n^3 \cdot b \cdot l (r_1^3 + r_2^3 + \dots)]}$ = gradiente medio de velocidad (s^{-1}) cuando las paletas son paralelas al eje.

❖ $G = 2 \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\mu \cdot V} \cdot [C_D (1 - k)^3 \cdot n^3 \cdot b (l_1^4 + l_2^4 + \dots)]}$ = gradiente medio de velocidad (s^{-1}), cuando las paletas son perpendiculares al eje,

donde:

$C_D = 1,10 + 0,02 \left(\frac{b}{l} + \frac{l}{b} \right)$ = coeficiente de arrastre, siendo:

l = longitud y b = altura de cada paleta

k = relación entre la velocidad del agua y la correspondiente a las paletas, siendo $k = 0,25$ el valor normalmente adoptado

n = velocidad de rotación (r.p.s)

r = radio de giro correspondiente al eje longitudinal de cada paleta

- ❖ Si las paletas están inclinadas en un ángulo α respecto al eje giratorio, la expresión del gradiente medio de velocidad debe corregirse con el factor

$$\sqrt{\frac{2 \operatorname{sen}^2 \alpha}{1 + \operatorname{sen}^2 \alpha}}$$

- ❖ El área de las paletas debe ser menor al área del plano transversal del compartimento que contiene al eje de rotación y a las paletas.
- ❖ La velocidad en la extremidad de las paletas no debe ser superior a 1,20 m/s.

➤ *Floculadores giratorios de turbina*

- ❖ Deben suministrar un movimiento axial (efecto de bombeo) producido por las paletas inclinadas. La ventaja respecto a las paletas de baja rotación es que pueden accionarse con altas velocidades (se eliminan los reductores de velocidad). El ángulo de inclinación, al igual que las hélices de aeronaves, varía en razón inversa a su diámetro.
- ❖ El diseño debe ser igual al correspondiente al de mezcladores rápidos, debiéndose observar las siguientes condiciones:

$D_T/D = 2,0$ a $6,6$ = relación entre el lodo o diámetro del tanque de floculación y el diámetro de giro

$H/D = 2,7$ a $3,9$ = relación entre la altura líquida y el diámetro de giro

$h/D = 0,9$ a $1,1$ = relación entre la distancia de las paletas con la solera y el diámetro de giro

$w = D/8$ = ancho de las paletas (m)

$l = D_T/12$ = ancho de cada uno de los deflectores verticales (m)

- ❖ La potencia disipada debe calcularse con la siguiente expresión:

$P = K \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D$ = potencia disipada (w)

K = número de potencia: $K = 1,25$ para un impulsor de 8 paletas y $K = 0,75$ para el de 4 paletas

➤ *Floculadores alternativos*

- ❖ Están constituidos por un sistema de paletas colocado en un balancín que se mueve de arriba hacia abajo y viceversa provocando turbulencias en la masa líquida (sistema de biela y manivela).
- ❖ Tienen ventajas especialmente en ampliaciones o reformas de instalaciones existentes.
- ❖ En caso de aplicarse este tipo de floculación debe justificarse a satisfacción del ENOHSA, el método de cálculo aplicado.

5. SEDIMENTACIÓN Y DECANTACIÓN

5.1. DEFINICIONES

- La sedimentación es un proceso basado en el fenómeno físico por el cual las partículas suspendidas presentes en el agua descienden debido a la acción de la gravedad por su mayor masa específica.
- Se denomina discretas a las partículas aisladas que no cambian de densidad, tamaño o forma al descender en el líquido, no habiendo interferencia entre las mismas durante el proceso.
- Los sólidos o partículas son considerados como aglomerables o floculentos cuando al descender en la masa líquida, se adhieren o aglutinan, cambiando de tamaño, forma y peso específico durante la caída, formando flóculos con una velocidad de sedimentación mayor que las partículas inicialmente consideradas.
- El proceso de sedimentación se realiza en unidades denominadas en general sedimentadores.
- Se reserva el nombre específico de desarenadores, a las unidades donde se retiene sólo arena y otras partículas discretas de similar velocidad de sedimentación que la arena.
- Las unidades donde sedimentan partículas floculentas se denominan indistintamente sedimentadores o decantadores. Algunos autores utilizan sólo el nombre de decantadores para el caso de sedimentación de partículas floculentas, indicando al proceso como “decantación”.

5.2. CLASIFICACIÓN

- Las unidades donde se realiza el proceso de sedimentación se dividen en convencionales de flujo horizontal, de flujo vertical ascendente y de flujo inclinado.
- En los de flujo inclinado, también denominados según algunos autores, de alta velocidad o alta carga aparente (entendida como el cociente entre el caudal y la superficie del sedimentador), el escurrimiento puede desarrollarse en conductos cerrados inclinados (de sección circular, rectangular, cuadrada, etc.) o entre placas planas paralelas e inclinadas respecto a un plano horizontal común.

5.3. ALCANCE

- En el presente Numeral se desarrollan los criterios básicos de diseño para todo tipo de unidades de sedimentación, destacándose en especial el caso de sedimentación de partículas floculentas resultantes de los procesos previos de coagulación y floculación.

- Los criterios de diseño específicos para los desarenadores, y de los presedimentadores utilizados como tratamientos preliminares, se tratan en el Numeral 2, de este Capítulo.

5.4. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN CRÍTICA

5.4.1. Generalidades

- La velocidad de sedimentación U_s debe ser uno de los parámetros básicos en el diseño y determinación de la eficiencia en reducción de la turbiedad y/o de los sólidos suspendidos del líquido a tratar.
- La velocidad de sedimentación de una partícula en un líquido en reposo, puede determinarse de dos formas: a) teórica en base a la expresión general (para zonas laminar, turbulenta o de transición), cálculo efectuado generalmente para partículas discretas y aisladas; o b) mediante ensayos de laboratorio, efectuado especialmente para partículas floculentas.
- En la sedimentación de partículas discretas aisladas no hay interferencias externas a las mismas. En cambio, las partículas floculentas al aglomerarse, resultan con mayor velocidad de sedimentación al final que en el comienzo del proceso.
- La capacidad de remoción de las partículas discretas es independiente de la profundidad y tiempo de detención hidráulica en los sedimentadores, lo que no ocurre con las partículas floculentas.

5.4.2. Método Teórico de Determinación de la Velocidad de Sedimentación

- Expresión general de cálculo de la velocidad de sedimentación

$$U_s = [4/3 \cdot (g/C_D) \cdot (\delta_s - 1) \cdot d_p]^{\frac{1}{2}} = \text{velocidad de sedimentación libre de una partícula discreta y aislada (m/s)}$$

Donde:

d_p = diámetro equivalente o tamaño de la partícula, (m)

δ_p = ρ_s / ρ = densidad relativa de la partícula (adimensional)

ρ_s = masa específica de la partícula a temperatura $T^\circ\text{C}$ de diseño, (Kg/m^3 ó $\text{N.s}^2/\text{m}^4$)

ρ = masa específica a temperatura $T^\circ\text{C}$ del agua (Kg/m^3 ó $\text{N.s}^2/\text{m}^4$)

g = aceleración de la gravedad en el lugar (m/s^2)

C_D = coeficiente de arrastre de Newton, función del número de Reynolds $R_e = U_s \cdot d_p / \nu$ (adimensional), valor constante cuando $R_e \geq 2000$ y variable para $R_e \leq 2000$

ν = viscosidad dinámica del agua a temperatura $T^{\circ}\text{C}$, (m^2/s)

- $C_D = 24/R_e$, para $R_e < 1$ (en el régimen laminar durante el asentamiento de las partículas)
- $C_D = 0,44$, para $R_e \geq 2000$ en el régimen turbulento durante el asentamiento de las partículas
- C_D = valor a adoptar entre los criterios de investigadores, entre los cuales están:
 - $C_D = 24/R_e + 3/(R_e)^{1/2} + 0,34$, expresión de Fair, Geyer y Okun (la más utilizada)
 - $C_D = 12,5/R_e^{0,5}$ = expresión de Allen
 - $C_D = 30,0/R_e^{0,625}$ = expresión modificada de Allen
 - $C_D = 14/R_e^{0,5}$ = expresión de Rich
 - $C_D = (12/R_e) (1 + 0,15 R_e^{0,687})$ = expresión de Chiller y Newman
 - $C_D = 14/R_e^{0,5}$ = expresión de Hatch

• Aplicación del método teórico

La determinación de la velocidad de sedimentación, U_s (m/s), se debe realizar mediante iteraciones (tanteos), teniendo en cuenta los siguientes parámetros de diseño: tamaño de la partícula, d_p , (m), densidad relativa de la partícula δ_s , aceleración de la gravedad, g (m/s^2) y la temperatura a $T^{\circ}\text{C}$, a fin de tener la viscosidad cinemática, ν (m^2/s) para esa temperatura.

El tanteo debe constar de los siguientes pasos:

- 1). Se debe calcular primeramente, U_s (m/s) con la ley de Stokes para escurrimiento laminar, obtenida reemplazando en la fórmula general de Newton, arriba especificada, el valor del coeficiente de arrastre $C_D = 24/R_e$ ($R_e < 1$), obteniéndose la siguiente fórmula:

$$U_s = (g/18) \cdot (\delta_s - 1) d_p^2 = \text{velocidad de sedimentación en régimen laminar, normalmente empleada para partículas floculentas o partículas minerales muy finas } (d_p < 0,2 \text{ mm})$$

Con el valor de U_s (m/s), se debe calcular el correspondiente número de Reynolds, $R_e = U_s \cdot d_p / \nu$

Si resulta $R_e < 1$, se tiene el resultado definitivo de U_s (m/s).

En cambio si $R_e > 1$, se tiene a su vez dos alternativas:

$R_e \geq 2000$ ó $R_e < 2000$, que corresponden respectivamente a flujo con régimen turbulento o régimen de transición

- 2). En el caso de $R_e \geq 2000$, se debe reemplazar en la fórmula general, arriba mencionada, el valor del coeficiente de arrastre $C_D = 0,44$, para régimen turbulento, resultando la Ley de Newton para ese régimen:

$U_s = [3,3 \text{ g} \cdot (d_s - 1) \cdot d_p]^{1/2}$ = velocidad de sedimentación de la partícula d_p (m), en régimen turbulento (m/s).

Si se mantiene el valor del número de Reynolds, $R_e \geq 2000$, se tiene el valor definitivo de U_s (m/s).

En caso contrario, si $R_e < 2000$, se debe reemplazar en esa fórmula general, el valor de C_D adoptado (según el investigador elegido), obteniéndose el valor de U_s (m/s) en el régimen de transición.

Con el valor de U_s (m/s) en ese régimen, se debe calcular el correspondiente al número de Reynolds $R_e = U_s \cdot d_p / \nu$

- 3). En este último paso, si R_e está comprendida entre 1 y 2000, se tiene el valor definitivo de U_s (m/s) en régimen de transición.
 - 4). En caso contrario, o sea que R_e no está comprendido en ese lapso (1 a 2000), se debe reiterar el cálculo para llegar al valor de U_s (m/s) especificado (normalmente establecido en la determinación de la eficiencia del proceso de sedimentación).
- Para partículas minerales de arena de tamaños $t \leq 0,005$ cm (0,05 mm), debe aplicarse directamente la expresión de Stokes (flujo laminar con $R_e < 1$). Para tamaños cercanos a 0,1 cm (1,0 mm) (valor común en arenas en suspensión, se debe utilizar la fórmula de U_s (m/s) calculada en el régimen de transición ($R_e = 1$ a 2000).
 - Para partículas floculentas no se puede aplicar la expresión de Stokes, ya que ocurren interferencias en los sedimentadores y a las diferentes masas específicas de las partículas suspendidas en el agua cruda y los flóculos formados.

5.4.3. Ensayos en Laboratorio

- En particular para líquidos previamente floculados el ensayo debe efectuarse para determinar la velocidad de sedimentación de diseño y la eficiencia en remoción de la turbiedad y/o sólidos suspendidos.
- El ensayo debe realizarse en una columna de sedimentación, debiendo ser del tipo "batch". Puede ser un tubo de 100 a 150 mm de diámetro, con una profundidad mayor a 1,00 m, preferentemente con la misma altura útil H_o (zona de sedimentación) de la unidad a diseñar o determinar su eficiencia.
- En las paredes de la columna se deben instalar varios grifos toma-muestras a distintos niveles (generalmente con una separación de 0,60 m entre ellos). Se aconseja proyectar una tapa desmontable ubicada en la base inferior para permitir el ingreso sin interferencias del líquido a ensayar, siendo una manija superior el elemento de izaje cuando se ensaya una unidad en operación.
- Para partículas discretas aisladas, la determinación de la velocidad de sedimentación se debe efectuar obteniendo el líquido a ensayar en un solo toma-muestra, por tener una velocidad de caída constante de la partícula, que no cambia de tamaño y densidad, o sea no influye la profundidad del sedimentador.

- En cambio para las partículas floculentas la toma de muestras debe hacerse al mismo tiempo en todos los puntos de muestreo de la columna de sedimentación, ya que la velocidad de caída aumenta con la profundidad y con el tiempo de permanencia hidráulica.
- A continuación se especifican las recomendaciones de Camp que se deben tener en cuenta para obtener resultados confiables en los ensayos realizados en la columna de sedimentación:
 - La sección de la columna debe ser lo suficientemente grande para evitar reducción apreciable del nivel líquido en su interior y además para minimizar el efecto pared que retarda la sedimentación (la velocidad de sedimentación es prácticamente nula en esa zona).
 - Para determinar la eficiencia de un sedimentador, la altura o profundidad del punto de recolección en el mismo, debe ser igual en la columna de sedimentación para que se pueda reproducir el efecto de la floculación, ya que las partículas sedimentan con distintas velocidades.
 - Debe mantenerse preferentemente constante la temperatura en toda la masa líquida dentro de esa columna.
 - El llenado de la columna de sedimentación se debe realizar cuidadosamente para evitar turbulencia residual excesiva, tratando de hacerlo con la mayor rapidez para garantizar la uniformidad de la suspensión en el inicio del ensayo.
 - La toma de las muestras en cada uno de los grifos de recolección ubicados en distintas alturas de la columna de sedimentación, debe realizarse a partir de los puntos superiores a fin de reducir el efecto del descenso del nivel líquido en la columna.
- El procedimiento y secuencia del ensayo debe ser el siguiente:
 - Se debe determinar la turbiedad de la muestra a ensayar, denominándose C_o (UT) a la concentración inicial.
 - Se debe mezclar y volcar dentro de la columna del sedimentador, la suspensión para garantizar la uniformidad del líquido a ensayar. Cuando se introduce esa columna dentro de la masa líquida de una unidad para calcular su eficiencia, se deben tomar precauciones para tener esa uniformidad.
 - Una vez que la suspensión se haya aquietado, se deben tomar las muestras al mismo tiempo en todos los grifos de muestreo de cada profundidad de la columna a intervalos de 10 o 15 minutos de iniciado el ensayo, en el lapso más corto posible para obtener un muestreo simultáneo en todas las tomas.
 - A continuación se debe determinar la turbiedad C_t en cada serie de muestras, obtenidas en grifos diferentes.
 - Aplicando la expresión $(C_o - C_t) / C_o = (1 - C_t / C_o)$, se deben determinar los valores de la remoción porcentual de la turbiedad, siendo la relación C_t / C_o la fracción que sedimenta con una velocidad menor o igual a la que corresponde al tiempo de toma de la muestra.
 - Con los resultados obtenidos para cada serie de muestras se debe confeccionar una curva, resultante de considerar la relación $C_t / C_o = T_t / T_o$

(T = turbiedad en UT) en las ordenadas y en las abscisas la velocidad de sedimentación de la partícula $U_s = h/t$ (m/s ó cm/s), siendo h = altura constante de la toma de la muestra respecto a la superficie líquida del inicio del ensayo y t = tiempo transcurrido desde ese inicio hasta la toma de la muestra (s).

- En el caso de ensayos para determinar la velocidad de sedimentación de partículas a ser eliminadas en desarenadores o presedimentadores, se debe reemplazar la turbiedad por la concentración de partículas.

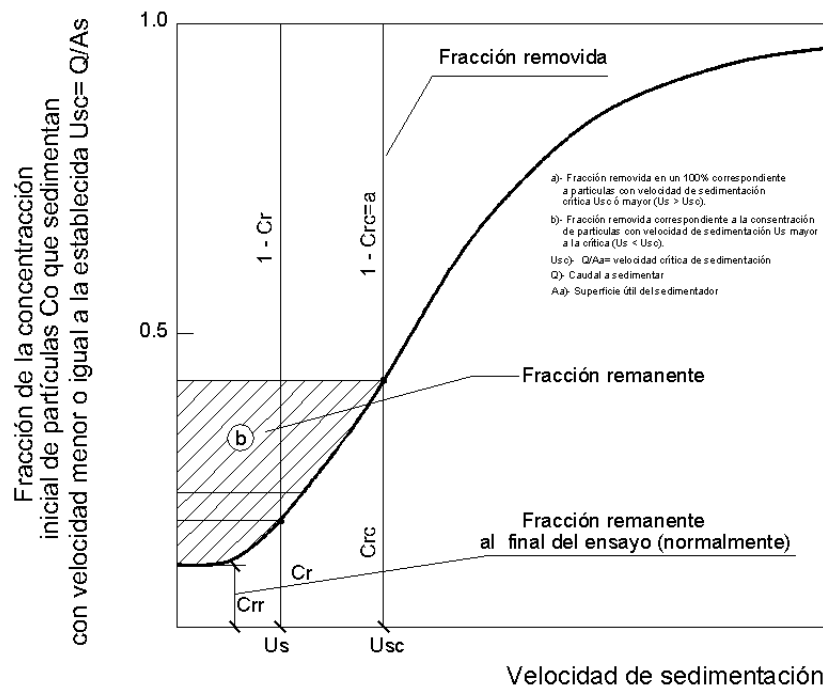


Figura 1. Curva de sedimentación en columna de sedimentación

- Denominando C_r a la fracción de la concentración de partículas o turbiedad que queda en el líquido de la columna de sedimentación, es $(1 - C_r)$ la fracción removida para cualquier punto de la curva $C_r - U_s$, siendo $U_s = h/t$ (altura de la toma de muestra/tiempo transcurrido de esa toma).
- Para $U_{sc} = Q/A_s$ = velocidad de diseño de la unidad para la cual se evalúa a la eficiencia de la unidad de superficie A_s , también denominada velocidad crítica, la remoción debe ser $(1 - C_{r0})$ y C_{r0} la fracción de la turbiedad remanente.
- La remoción global R_g para una cierta velocidad de sedimentación U_s , está compuesta de dos fracciones a y b:

$$a = (1 - C_{rc}) = \text{fracción removida en un 100\% correspondiente a partículas con velocidad de sedimentación crítica } U_{sc} \text{ o mayor } (U_s \geq U_{sc} = Q/A_s)$$

$$b = \int_{C=0}^{C=C_{rc}} (U_s / U_{sc}) \cdot dC_r = \text{fracción removida correspondiente a la concentración de partículas o turbiedad con velocidad de sedimentación } U_s$$

inferior a la crítica U_{sc} ($U_s < U_{sc} = Q/A_s$), que corresponde al área rayada de la **Figura 1**.

Considerando a C_{rr} = fracción residual de la concentración de las partículas o turbiedad, remanente normalmente al final del ensayo, se tiene realmente:

$$R_g = [1 - C_{rc} - C_{rr}] + \int_{C=0}^{C=C_{rc}} (U_s / U_{sc})$$

en la práctica puede considerarse:

$b = (U_{sc} \cdot C_{rc}) / 2$ ó $b = [U_{sc} \cdot (C_{rc} - C_{rr})] / 2$ considerando la concentración residual al final del ensayo

Con los valores calculados de R_g en cada punto de muestra y los tiempos de la serie, se debe trazar por interpolación las curvas de igual remoción R (en %), o sea $(100 - R)$ = concentración de la turbiedad (o sólidos suspendidos a la profundidad h después del tiempo de iniciación del ensayo).

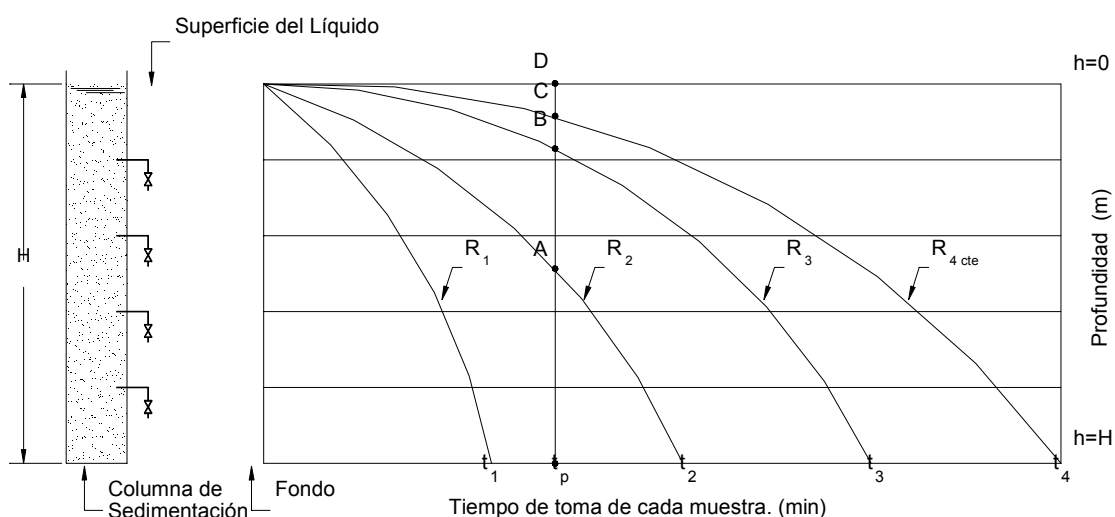


Figura 2. Curvas de isoremovión en ensayo de sedimentación de partículas floculentas

Referencias

- ❖ $R = 100 (C_o - C_i) / C_o$ = remoción de la turbiedad (o sólidos suspendidos)
- ❖ t_1, t_2, t_3 y t_4 : tiempos de permanencias requeridos para obtener $R_1 > R_2 > R_3 > R_4$
- ❖ Las curvas de remoción representan el proceso de sedimentación de las partículas floculentas, indicando el porcentaje de reducción al cabo de cierto tiempo.
- ❖ Para un tiempo t_p , los puntos A, B, C y D indican la reducción de la turbiedad o sólidos suspendidos, que se ha producido en las profundidades h_A, h_B, h_C

y h_D de un sedimentador ideal, con una altura útil H igual a la de la columna de ensayo.

- ❖ De acuerdo a diversos investigadores (Reynolds y Metcalf Eddy), la retención total para cada tiempo de permanencia t_p debe ser calculada con la siguiente expresión:

$$R_T = R_2 + (h_A/H) \cdot (R_3 - R_2) + (h_B/H) \cdot (R_4 - R_3) + (h_C/H) \cdot (100 - R)$$

Esta remoción corresponde a la carga hidráulica superficial U_s de un tanque ideal de Hazen, de profundidad útil H , siendo:

$$U_s = H/t_p$$

- ❖ Con varios valores de t_p se deben calcular los correspondientes a R_T y U_s y graficarlos en una curva: remoción total R_T (%) versus $U_s = H / t_p$.

Esa curva se debe utilizar para adoptar el valor de U_s de acuerdo a la remoción deseada R_T (%).

- La velocidad de sedimentación determinada en los ensayos de laboratorio, debe ser dividida por un coeficiente de minorización "K", a fin de obtener la velocidad de sedimentación crítica de diseño U_{sc} (m/s, cm/min o $m^3/m^2 \cdot d$). Se debe aplicar este coeficiente para tener en cuenta tanto las diferencias que se verifican entre los resultados obtenidos en las plantas y en laboratorio como las imprecisiones del método adoptado para el dimensionamiento.

El valor de K a utilizar debe estar entre 1,2 a 2, en función de la capacidad de la planta y el nivel de capacitación de los operadores. (A menor capacidad y nivel de operación, debe ser mayor el coeficiente de minorización K).

- Cuando exista variación de la calidad del agua cruda, el ENOHSA puede establecer que los ensayos se realicen durante los períodos secos y lluviosos de un año y con una secuencia tal que permita arribar a valores confiables.
- Cuando no sea posible realizar el ensayo de sedimentación, se puede reemplazar para el cálculo, la velocidad de sedimentación, U_s , por el valor de la carga hidráulica superficial, q_s , definida como el cociente Q/A_s , siendo:

Q = caudal de diseño a sedimentar (m^3/s)

A_s = superficie líquida en la zona de sedimentación de la unidad (m^2)

- Los valores de la carga hidráulica superficial q_s ($m^3/m^2 \cdot día$) que se pueden adoptar, son los siguientes:

$q_s = U_{sc} = 25 \text{ m}^3/m^2 \cdot día = 1,74 \text{ cm/min}$, para una capacidad de producción de la planta de potabilización de hasta $Q = 1000 \text{ m}^3/día$

$q_s = U_{sc} = 35 \text{ m}^3/m^2 \cdot día = 2,43 \text{ cm/min}$, para una capacidad de producción Q mayor a $10.000 \text{ m}^3/día$ ($Q > 10.000 \text{ m}^3/día$)

$$q_s = U_{sc} = 40 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{día} = 2,80 \text{ cm/min, para capacidad de producción } Q \text{ mayor a } 10.000 \text{ m}^3/\text{día} (Q > 10.000 \text{ m}^3/\text{día})$$

- En todos los casos, el valor adoptado de q_s ó U_{sc} , debe ser justificado adecuadamente y contar con la aprobación del ENOHSa.

5.5. SEDIMENTADORES CONVENCIONALES DE FLUJO HORIZONTAL O DECANTADORES

- La velocidad de sedimentación crítica U_{sc} ó carga hidráulica superficial q_v , debe ser la resultante de las metodologías desarrolladas en el Numeral 5.4.
- El área superficial debe determinarse mediante la expresión: $A_s = Q/U_{sc}$ o la expresión $A_s = Q/q_s$
- La velocidad media de escurrimiento longitudinal U_{em} , no debe ser superior al valor de la velocidad U_{ar} de arrastre de las partículas sedimentadas.

El valor de U_{em} deberá determinarse mediante las siguientes expresiones o las aceptadas por ENOHSa:

- $U_{em} \leq U_{ar} = (R_e/8)^{1/2} \cdot U_{sc} \text{ (m/s ó cm/min) para } R_e < 2000$
- $U_{em} \leq U_{ar} = 18 U_{sc} \text{ (m/s ó cm/min) para } R_e > 15000$

donde:

$R_e = 4 \rho \cdot U_{em} \cdot R_h / \mu = 4 U_{em} \cdot R_h / \nu$ = número de Reynolds, siendo:

$R_h = A_s / (2H + B)$ = radio hidráulico (m)

ρ = masa específica del agua a temperatura $T^\circ\text{C}$, ($\text{Kg}/\text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)

$\mu = \nu \cdot \rho$ = viscosidad dinámica del agua a temperatura $T^\circ\text{C}$, ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)

$\nu = \mu / \rho$ = viscosidad cinemática del agua a temperatura $T^\circ\text{C}$, (m^2/s)

B = ancho constante de la zona de sedimentación (m)

H = altura o profundidad útil de la zona de la sedimentación (m)

En el caso de partículas floculentas y cuando no sea posible determinar en laboratorio el valor de U_{sc} , el ENOHSa puede aceptar con la adecuada justificación los siguientes valores para la velocidad media del escurrimiento longitudinal en sedimentadores convencionales de flujo horizontal.

- $U_{em} \leq 0,5 \text{ cm/s}$ para plantas de potabilización con capacidad menor o igual a $10.000 \text{ m}^3/\text{día}$.
- $U_{em} \leq 0,75 \text{ cm/s}$ para plantas de potabilización con capacidad mayor o igual a $10.000 \text{ m}^3/\text{día}$, con operación calificada.

- $U_{em} \leq 1,00$ cm/s, para plantas de potabilización con capacidad mayor o igual a 10.000 m³/día, con operación calificada y remoción continua o semicontinua del barro depositado.
- Las dimensiones de los sedimentadores deben observar las siguientes relaciones:
 - Relación longitud-ancho: $2 \leq L/B \leq 5$.
 - Relación longitud-profundidad útil: $2,5 \leq L/H_D \leq 25$.
- La altura útil H de la zona de sedimentación, se puede obtener con las siguientes expresiones:

$$H = Q / (U_{em} \cdot B) = \text{altura útil (m)}$$

$$H = t_p \cdot (Q / A_s) = \text{altura útil}$$

Donde:

Q = caudal de pasaje o de diseño (m³/s)

U_{em} = velocidad media de escurrimiento en el sentido del flujo (m/s)

$A_s = B \cdot L$ = área superficial de la zona de sedimentación (m)

L = longitud de la zona de sedimentación (m)

$t_s = Q / V_s = Q / (L \cdot B \cdot H)$ = tiempo de detención hidráulica (día)

V_s = volumen líquido en la zona de sedimentación (m³)

 - Para ese cálculo el período de detención hidráulica t_s , debe ser función de la carga superficial hidráulica $q_s = Q/A_s$ (m³/m².día) = velocidad de sedimentación crítica o de diseño (cm/min)

El valor de t_s (hora) puede variar entre:

$t_s = 1,5$ a $2,5$ hora, para $Q/A_s = 50$ a 60 m³/m².día (valor mínimo)

$t_s = 3,5$ a $4,5$ hora, para $Q/A_s = 15$ a 20 m³/m².día (valor máximo)

 - En todos los casos debe cumplirse con las restricciones indicadas para la velocidad media de escurrimiento, U_{em} , siendo su valor adoptado debe ser justificado adecuadamente y contar con la aprobación del ENOHSA.- El número mínimo de unidades adoptado debe ser de 2.
- La distribución del caudal de agua floculada a todas las unidades de una batería de sedimentadores, debe cumplir con los siguientes requisitos:
 - Repartición uniforme del caudal en todas las unidades de igual capacidad.
 - Repartición proporcional del caudal en las unidades de distintas capacidades.
 - En ambos casos el desvío máximo del caudal entre unidades extremas de la batería y del caudal de cada una respecto a su caudal nominal, no debe exceder del 15% y preferentemente no ser mayor del 5%.

- En caso que se realice por canales y compuertas, para evitar rotura de flóculos y deposiciones, la velocidad de escurrimiento debe cumplir que $0,1 \leq U_{em} \leq 0,60$ m/s y el gradiente de velocidad debe ser inferior al de la última cámara de floculación.
- El ENOHSA puede exigir para la entrada en sedimentadores convencionales de flujo horizontal la colocación de una pantalla perforada (tabiques difusores), la que debe cumplir los siguientes requisitos:
 - Garantizar el paralelismo de los filetes líquidos y la velocidad de escurrimiento horizontal.
 - Tener el mayor número de orificios, repartidos según su altura útil H y su ancho B con espaciamiento igual o menor a 0,50 m.
 - En el caso de partículas floculentas el gradiente de velocidad en el pasaje por cada orificio no debe ser superior al mínimo de la última etapa de la floculación o a $20s^{-1}$ si fuere mayor.
 - La relación entre la sumatoria de las áreas de pasaje Σa_o (m^2) de los orificios de superficie (m^2), debe ser inferior a 0,5

$$\Sigma a_o / A_e < 0,5 \text{ ó } [\Sigma a_o / (B \cdot H)] < 0,5$$
 - La distancia L_a entre la pared frontal inicial del sedimentador y el tabique difusor transversal al mismo, debe dejar espacio superficial para la limpieza y ser aproximadamente igual a:

$$L_a = 1,5 \cdot \Sigma a_o \cdot H / A_e = 1,5 \Sigma a_o / B = \text{separación libre entre la pared frontal inicial del sedimentador y el tabique inferior (m)}$$
- La remoción del barro depositado se debe realizar en forma continua, semicontinua o periódica, pudiendo ser manual o mecanizada.
- En los sedimentadores con remoción manual de barro se debe cumplir con las siguientes condiciones:
 - La o las descargas de fondo deben ser realizadas en un lapso menor a 6 horas.
 - La o las descargas deben estar localizadas en la zona de mayor acumulación de barro.
 - La pendiente mínima del fondo hacia el lugar de la descarga debe ser mayor del 5%.
 - En los decantadores convencionales debe diseñarse una altura adicional suficiente para acumular el barro generado entre limpiezas sucesivas.
 - Debe disponerse de un equipo de lavado por chorro que debe alcanzar todo el fondo y paredes del decantador.
- La remoción hidráulica del barro acumulado debe diseñarse a través de una tolva de volumen tronco piramidal o de cono invertido con ángulo mayor a 50° respecto a la horizontal, con la descarga localizada en la base inferior.
- La descarga automática debe ser diseñada con un dispositivo de ajuste del tiempo de funcionamiento.

- La carga hidráulica H (m) sobre los puntos de descarga debe ser mayor a la suma de $H' = 1,50$ m y H_p = pérdida de carga en el pasaje del barro evacuado. Caso contrario debe diseñarse una instalación de bombeo para retirar ese barro.
- El diámetro mínimo de la cañería de descarga debe ser de 150 mm para una longitud inferior a 10 m, y de 200 mm y más para una longitud mayor o situada debajo de estructuras de difícil acceso.
- En todos los casos se debe poder observar visualmente la calidad del barro.
- Los sedimentadores deben estar dotados de remoción hidráulica del lodo, con o sin dispositivo mecánico de arrastre, cuando el agua cruda contenga concentración relativamente elevada de materia orgánica no estabilizada; además cuando se demuestre que es más ventajosa que la remoción manual.
- Cuando se diseñen raspadores mecánicos deben respetarse las siguientes condiciones:
 - Tener un pozo de descarga con las características de las tolvas especificadas anteriormente.
 - La descarga del pozo debe ser siempre automática y sincronizada con el movimiento del raspador.
 - Velocidad máxima del raspador igual a 30 cm/min.
- Cuando el dispositivo mecanizado para el retiro del barro sea un sifón fluctuante, la disposición del barro descargado debe hacerse en una canaleta lateral dispuesta en toda la longitud del decantador.
- Para sedimentadores de limpieza manual de hasta 20 m de longitud, la descarga debe ubicarse en la mitad inicial, mientras que para longitudes mayores la canaleta central debe comenzar en el medio y terminar en las extremidades donde se localizan las descargas.
- La descarga del fondo de una unidad debe ser dimensionada de manera que el tiempo de vaciado sea el menor posible, posiblemente menor a 2,0 horas con un máximo de 6,0 horas, debido a minimizar el tiempo operativo.

Esa descarga puede calcularse con las siguientes expresiones:

$$A_d = (A_s / 4880 t_d) \cdot H_d^{1/2} = \text{área de la compuerta de descarga (m}^2\text{)}$$

Donde:

$$A_s = \text{área superficial del sedimentador (m}^2\text{)}$$

$$H_d = \text{altura o carga hidráulica desde la superficie líquida del sedimentador hasta la compuerta o válvula de descarga (m)}$$

$$t_d = \text{tiempo de vaciado (hora)}$$

5.6. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS CON ESCURRIMIENTO VERTICAL

- Son unidades generalmente patentadas provistas o no de equipos para extracción de barro, pudiendo ser unidades independientes con remoción del lodo hidráulica o mecanizada.
- Cuando el ingreso del agua coagulada se realiza en la zona de barro, se denominan, decantadores de manto de lodo que operan con una carga hidráulica superficial normalmente mayor al de flujo horizontal.
- En algunos equipos patentados, en una misma unidad se producen los procesos de floculación y sedimentación en la zona del lodo.
- Se puede aceptar el empleo de decantadores de mantos de lodo sólo cuando el escurrimiento sea continuo y no existan variaciones significativas de caudal y de calidad del agua cruda.
- Los decantadores de manto de lodo pueden ser hidráulicos o mecanizados, con o sin recirculación de lodo, con o sin control de la altura del manto a través del vertedero y con escurrimiento continuo, constante o pulsante.
- Los decantadores de manto de lodos deben verificar las siguientes condiciones:
 - La carga hidráulica superficial, q_s , debe variar entre 50 y 100 $m^3/m^2 \cdot día$, dependiendo de la calidad del agua cruda, de la eficiencia de la coagulación y del uso de polímeros.
 - La altura del manto de lodo debe variar entre 1 y 3 m, con una concentración de sólidos entre 2 y 10%.
- En todos los casos se debe presentar al ENOHSA para su aprobación los datos garantizados y los que solicitare, correspondiente al diseño y operación del sistema patentado, que deben cumplir con las normas generales correspondientes a los sedimentadores desarrollados en el Numeral 5.4.
- El ingreso del agua en los decantadores convencionales de flujo vertical debe efectuarse en puntos, ranuras o por el borde inferior de una pantalla, a fin de asegurar la distribución uniforme del agua en toda la superficie del decantador.
- La recolección del agua decantada debe realizarse en vertederos o en caños perforados, con carga hidráulica unitaria inferior a 2,5 l/s.m, debiendo estar separados no más de dos veces la altura líquida sobre el manto de lodo.

5.7. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS EN ESCURRIMIENTO INCLINADO

5.7.1. Velocidad de Sedimentación Crítica de Diseño

- Siendo un parámetro fundamental en el diseño, la velocidad de sedimentación crítica de diseño debe determinarse de acuerdo a las especificaciones establecidas en el Numeral 5.4.
- En el caso de partículas floculentas, de no ser posible determinar la velocidad de sedimentación crítica U_{sc} en el laboratorio, situación que debe ser justificada, se debe

cumplir con la adopción de un valor conservador para la carga hidráulica superficial q_s , aprobado por el ENOHSA, no mayor a un intervalo comprendido entre 20 y $25 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, de acuerdo a la metodología de cálculo adoptada en el diseño.

5.7.2. Dimensionamiento de la Zona de Sedimentación

- El cálculo de la zona de sedimentación debe realizarse mediante uno de los métodos que se indican a continuación:

- Se puede considerar que la retención de partículas se produce en toda la zona de escurrimiento inclinado, compuesta de un tramo inicial con flujo de transición y el final con escurrimiento laminar (completamente desarrollado). En este caso el cálculo debe considerar tres parámetros básicos: la velocidad de sedimentación crítica U_{sc} , determinada experimentalmente o en su reemplazo por la carga hidráulica superficial q_s ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ ó cm/min), la longitud total de la zona de sedimentación l (m) y la velocidad media de escurrimiento inclinado en esa zona, U_{em} ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ ó cm/min).

En el caso de escurrimiento entre placas planas paralelas se debe aplicar los valores de la **Tabla 3**, en donde el ENOHSA puede aceptar las interpolaciones lineales necesarias entre sus valores.

- En el caso de adoptarse valores relativamente bajos de la velocidad de sedimentación crítica U_{sc} , o de la carga hidráulica superficial, q_s , se puede dimensionar la zona de sedimentación mediante la siguiente expresión de Yao aplicada solamente en la zona de escurrimiento laminar:

$$U_{sc} = S_c \cdot U_{em} / [\sin \theta + L \cdot \cos \theta] = U_{em} / f = \text{velocidad de sedimentación de diseño (m/s, m/d ó cm/min)}$$

donde:

$f = (\sin \theta + L \cos \theta) / S_c$ = factor de forma para decantadores con elementos de escurrimiento inclinado.

S_c = factor de eficiencia, siendo igual a 1,0 para placas planas paralelas y conductos rasos (de poca altura respecto al ancho), de 4/3 para conductos circulares y 11/8 para conductos cuadrados.

θ = ángulo de inclinación de los conductos o placas planas paralelas respecto al plano horizontal.

U_{em} = velocidad media de escurrimiento longitudinal en los conductos y placas planas paralelas (m/s, m/d ó cm/min), que sirve para determinar el número de conductos o de placas planas en cada línea o calle de los decantadores.

$L = l_L/d = (l - l_t)/d$ = longitud de cálculo = longitud relativa de la zona con escurrimiento laminar (valor adimensional)

$l_L = l - l_t$ = longitud de la zona de escurrimiento laminar (m)

d = diámetro equivalente de los conductos o separación libre entre placas planas paralelas (m)

l = longitud de escurrimiento inclinado = ancho de cada placa plana ó longitud de cada conducto (m)

$l_t = C_t \cdot (4 R_h \cdot d/v)$ = longitud del tramo de transición.

C_t = coeficiente de Sparrow, cuyo valor es: 0,0065 para placas planas y 0,0080 para conductos rectangulares.

R_h = radio hidráulico de la sección de escurrimiento (m) = sección mojada/perímetro mojado (m)

ν = viscosidad cinemática del agua para la temperatura del agua, (m^2/s)

En casos especiales para valores muy bajos de la sedimentación crítica U_{sc} , se puede despreciar en forma conservadora, la longitud l_t del tramo de transición.

- En todos los casos se debe convenir con el ENOHSA el procedimiento de cálculo a utilizar. A su vez, en el futuro el ENOHSA podrá ajustar los criterios de diseño de sistemas de sedimentación en plantas de potabilización en base a nuevas evidencias teóricas, experimentales y operativas.

U_{sc} (cm/min)	Velocidad de E scorrimiento U_{em} (cm/min)														
	10 cm/min			15 cm/min			20cm/min			25 cm/min			30 cm/min		
	transición*	total**	perf. des.***	transición*	total**	perf. des.***	transición*	total**	perf. des.***	transición*	total**	perf. des.***	transición*	Total**	perf. des.***
1.0	0.3780	1.1941	0.8161	0.5659	1.8331	1.2672	0.7537	2.5091	1.7554	0.9439	3.1733	2.2294	1.1317	3.8183	2.6866
1.5	0.3780	0.7617	0.3837	0.5659	1.1906	0.6237	0.7537	1.6527	0.8990	0.9439	2.0992	1.1553	1.1317	2.5344	1.4027
2.0	0.3780	0.5449	0.1669	0.5659	0.8649	0.2990	0.7537	1.2217	0.4680	0.9439	1.5564	0.6125	1.1317	1.8844	0.7527
2.5	0.3780	0.4119	0.0339	0.5659	0.6676	0.1007	0.7537	0.9554	0.2017	0.9439	1.2201	0.2762	1.1317	1.4823	0.3506
3.0	0.3303	0.3303	0	0.5372	0.5372	0	0.7537	0.7789	0.0252	0.9439	1.0006	0.0567	1.1317	1.2191	0.0874
3.5	0.2673	0.2673	0	0.4501	0.4501	0	0.6516	0.6616	0	0.8428	0.8428	0	1.0245	1.0245	0
4.0	0.2195	0.2195	0	0.3750	0.3750	0	0.5539	0.5539	0	0.7213	0.7213	0	0.8823	0.8823	0

Tabla 3. Longitud necesaria de los conductos (en metros) en función de la velocidad de sedimentación de partículas discretas, U_{sc} (cm/min) y de la velocidad media de escurrimiento U_{em} (cm/min), en el conducto de 60 x 600 mm

Referencias:

* : Longitud del tramo de transición (m)

** : Longitud total del conducto (m)

***: Longitud del tramo de perfil de velocidad totalmente desarrollado

- La velocidad media de escurrimiento inclinado U_{em} (m/s) debe ser menor a la velocidad de arrastre U_a (m/s) en conducciones inclinadas dada por la siguiente expresión, debida a (Camp):

$$U_a = \cos\theta \sqrt{\frac{8\beta_a \cdot g \cdot d_p (\delta_s - 1)}{f}} = \text{velocidad de arrastre (m/s), donde se tienen los siguientes parámetros a justificar:}$$

β_a = coeficiente, función de las características de los flóculos (varía entre 0,04 y 0,25)

d_p = tamaño de las partículas floculentas (varía entre 0,00002 y 0,004 m)

$\delta_s = \rho_s/\rho$ = densidad relativa de los flóculos (varía entre 1,002 y 1,030)

f = coeficiente de Darcy – Weisbach (varía entre 0,02 y 0,10)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

5.7.3. Sistema de Ingreso del Agua a Cada Unidad

- Se debe aplicar el mismo sistema indicado en el Numeral 5.5 para sedimentadores convencionales, respecto a la repartición uniforme de caudal a la cámara de acceso de cada uno de los sedimentadores, desde el canal común de agua floculada.
- Dentro del decantador también debe distribuirse el caudal en forma uniforme debajo de los elementos donde se produce el escurrimiento inclinado y ascendente. Para ello se debe proyectar uno o más conductos sumergidos, de altura decreciente en el sentido del flujo y con orificios practicados simétricamente en cada sección, de igual área a_o (m^2) y separación s (m) entre dos consecutivos.
- Para lograr la repartición uniforme se debe cumplir la siguiente relación:

$$r = (a_o/A) \cdot (Q/q_o) \leq 0,5, \text{ donde:}$$

A = área de la sección del conducto (m^2), inmediatamente anterior al orificio de sección a_o (m^2) y caudal de pasaje q_o (m^3/s), siendo Q = caudal de pasaje por esa sección A (m^3/s)

- El diseño del sistema de distribución interior del líquido floculado debe ser aprobado por ENOHSA y debe cumplir con las siguientes condiciones:
 - El gradiente medio de velocidad G (s^{-1}) en los conductos, orificios y compuertas no debe ser mayor al correspondiente a la última cámara de floculación y en ningún caso mayor a $20 s^{-1}$, debiendo ser verificado cuando se suprima una unidad de la batería de decantadores por mayor aporte de caudal, a fin de evitar rotura de los flóculos.
 - La velocidad media del flujo en los conductos no debe producir depósitos indeseables de flóculos.

- En ningún caso se debe diseñar un sistema de ingreso directamente debajo de los conductos y placas planas paralelas, desde la cámara de acceso a cada unidad.

5.7.4. Sistema Recolector del Barro Depositado en las Tolvas

- En Plantas de Potabilización existentes, mediante ensayos en Laboratorio con Cono Imhoff, se debe determinar el volumen de barro producido diariamente en períodos críticos (mayor turbiedad).
- En proyectos nuevos de Plantas de Potabilización, el volumen de barro a producir, se debe determinar en base a la calidad del agua cruda y dosis de productos químicos a aplicar en esos períodos, además de adoptar nuevas experiencias de diseño.
- En ambos casos, se debe programar la frecuencia de las descargas diarias de barro, generalmente efectuados en períodos de diferentes calidades.
- Se debe proyectar y justificar el método de extracción de barro depositado en las tolvas: mecánico o hidráulico (normalmente utilizado).
- Se debe diseñar el sistema individual de cada tolva o el “manifold” cuando se proyecta una tolva por fila de elementos de sedimentación.
- En ambos casos se debe presentar a ENOHSA la metodología de cálculo para su aceptación.
- Para tener una recolección uniforme (variación máxima del caudal extraído del 10 % entre las tolvas de barro), la relación entre la sumatoria del área de los laterales y la correspondiente al área del colector principal en cada sección, debe ser inferior a 0,3 (preferentemente 0,2). Por ese motivo, para proyectos nuevos se debe preferir el diseño de canales principales de sección creciente. En caso de ampliaciones de obra, las tuberías deben tener un diámetro mínimo de 150 mm, cuando su longitud sea superior a 10 m.
- La carga hidráulica disponible debe ser igual a la altura de agua sobre el orificio menos la sumatoria de las pérdidas de carga producida en el lateral y principal hasta su descarga en el canal colector general de la batería incluso la válvula o compuerta de descarga de ese conducto principal. Con la carga disponible se debe calcular el caudal de pasaje q_o (m^3/s) por el lateral, siendo $Q_L = \Sigma q_o$ = caudal total instantáneo de descarga del lodo depositado.
- Para la remoción hidráulica de los barroes acumulados, debe proyectarse cámaras o tolvas de volumen tronco piramidal invertido, con paredes laterales con una inclinación no inferior a 50° respecto a la horizontal, debiendo situarse en el fondo los orificios o aberturas de descarga.
- Las válvulas o compuertas de descarga deben situarse en cámaras exteriores de fácil acceso, las que deben permitir la observación directa del barro descargado.
- La descarga automática de los barroes debe contar con un dispositivo de ajuste del tiempo de funcionamiento.
- Se debe estudiar el destino final del barro extraído, que debe estar sujeto a disposiciones legales y aspectos técnicos económicos y ambientales.

- En los sedimentadores de flujo ascendente inclinado para la recolección de los lodos depositados en las tolvas deben aplicarse los mismos criterios y especificaciones indicadas en el apartado correspondiente a sedimentadores convencionales de escurrimiento horizontal.

5.7.5. Zona Líquida Entre Placas Paralelas o Conductos Inclinados y la Base Mayor y Superior de las Tolvas de Barro

- Debe proyectarse un sistema que evite la influencia de la energía cinética del chorro emergente de cada orificio del canal de alimentación a las placas paralelas o conductos, tanto sobre el flujo de ingreso del agua floculada a los mismos como sobre los lodos que sedimentan o que se encuentran depositados en las tolvas, lo que debe ser aprobado por ENOHSA.

5.8. RECOLECCIÓN SUPERFICIAL DEL LÍQUIDO SEDIMENTADO

En los sedimentadores de flujo horizontal y en los de escurrimiento ascendente e inclinado, la recolección del agua sedimentada debe efectuarse mediante caños con orificios practicados en la generatriz superior o en canaletas colectoras. En ambos sistemas la descarga al interior de los mismos, debe ser libre.

- La recolección de agua sedimentada debe ser uniforme para evitar corrientes preferenciales que pueden arrastrar flóculos o partículas discretas sin sedimentar. Esta condición es más importante que uniformar el flujo horizontal en la cámara de sedimentación en los convencionales o el escurrimiento ascendente entre las placas paralelas y conductos inclinados.
- Para los sedimentadores de flujo horizontal, en donde se diseñan generalmente canaletas colectoras, se deben considerar las siguientes especificaciones:

- La descarga libre del líquido sedimentador sobre los coronamientos de las canaletas, cuando se tiene una velocidad crítica de sedimentación, U_{sc} (m/d), correspondiente a una carga hidráulica superficial, q_s ($m^3/m^2.día$), deducida mediante ensayos de Laboratorio, debe cumplir:

$Q_s \leq 0,018 H \cdot (Q/A_s)$ = caudal unitario de agua sedimentada que escurre sobre los bordes de las canaletas (l/s . m), donde:

H = altura útil del sedimentador (m)

Q_s = caudal sedimentado en la unidad (m^3/d)

A_s = área líquida de la unidad (m^2)

$q_s = U_{sc} = Q/A_s$ = carga hidráulica de sedimentación ($m^3/m^2.día$)

- Cuando no se disponga de ensayos de laboratorio para determinar U_{sc} de diseño, el valor de Q debe ser igual o menor a 1,8 l/s . m.

- El caudal Q que escurre por una canaleta de sección rectangular (o equivalente a una rectangular), está dado por:

$$Q = 1,38 b_c \cdot h_{om}^{1,5} \text{ (m}^3\text{/s)}, \text{ para descarga libre al final de la canaleta}$$

$$Q = [h_{om}^2 - h_{em}^2] \cdot g \cdot b_c^2 \cdot h_{em}/2]^{1/2}, \text{ para descarga sumergida al final de la canaleta}$$

donde:

h_{om} = altura líquida máxima dentro de la canaleta (m) y a una distancia mínima de 10 cm entre los bordes de las canaletas y la superficie líquida

h_{em} = altura líquida máxima en la salida de las canaletas (m)

b_c = ancho constante de cada canaleta (m)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

- El sistema de caños con orificios y canaletas colectoras en sedimentadores de escurrimiento inclinado, debe cumplir las siguientes especificaciones:
 - La distancia centro a centro entre caños con orificios o canales colectores, deberá ser $S \leq 2 H_1$, siendo H_1 (m) la altura de agua sobre las placas planas o conductos de escurrimiento inclinado (distancia entre la superficie líquida y el extremo superior de esas placas planas o conductos).
 - El caudal unitario de descarga por metro lineal de caños con orificios o canaletas, no debe ser superior a 2,5 l/s . m y excepcionalmente a 3,5 l/s . m cuando se deba suprimir una unidad de la batería de sedimentadores.
 - En el caso de caños con orificios, para tener recolección uniforme de agua sedimentada, todos los orificios deben tener descarga libre. La altura líquida sobre la generatriz superior donde se practican los orificios, debe estar comprendida entre 0,05 y 0,15 m, normalmente 0,10 m, mientras el tirante líquido máximo dentro de los caños no debe exceder de 0,75 D, siendo D (m) el diámetro interno de los mismos.

En cañerías colectoras se debe calcular:

- Número de caños en cada fila de placas o conductos inclinados, de acuerdo a la primera especificación.
- Número y separación, centro a centro, de los orificios practicados en la generatriz superior de los caños.
- Diámetro nominal de cada caño (igual para todos los caños), siendo un criterio de cálculo el siguiente:

$$A_o = 0,462 a_c / n_o = \text{sección de cada orificio (m}^2\text{)}, \text{ siendo:}$$

$$a_c = \pi \cdot D_c^2/4 = \text{sección del caño (m}^2\text{)}, \text{ de diámetro nominal } D_c \text{ (m)}$$

n_o = número de orificios por caño

Las canaletas colectoras deben dimensionarse de igual forma que para sedimentadores convencionales.

La descarga de los caños con orificios y canaletas en el colector general de agua sedimentada de cada unidad, debe ser libre, con caída mínima cuando se diseñan filtros con velocidad decreciente (compatible con el nivel máximo N_3 que ocurre mientras se lava la unidad más sucia de la batería de filtros).

En todos los casos el método de cálculo debe ser sujeto a la aprobación de ENOHSA.

6. FLOTACIÓN

- Por flotación mediante aire disuelto (FAD) se entiende un sistema que por medio de la utilización de finas burbujas de aire, es aplicable para la separación de partículas suspendidas en el líquido, especialmente en aguas con las siguientes características:
 - Bajas turbiedades y baja alcalinidad. (Turbiedades menores a 100 UNT y sólidos suspendidos menores a 50 mg/l).
 - Aguas con contenidos importantes de algas ($> 10 \mu\text{g/l}$ de clorofila "a").
 - Aguas con color debido la presencia de sustancias húmicas.
- Un sistema FAD debe estar compuesto como mínimo por los siguientes elementos:
 - Tanque de saturación.
 - Compresor y bomba de presurización.
 - Tanque de flotación: en general puede dividirse en dos zonas, la zona de mezcla donde ingresa el agua saturada y se producen los aglomerados flóculo-burbujas y la zona de flotación. Asimismo, el tanque de flotación debe contar con un sistema mecánico de barrido de material flotante.
- La conveniencia de incorporar un proceso de flotación en la línea de tratamiento debe justificarse mediante ensayos en laboratorio y de ser necesario en planta piloto.
- Los ensayos de laboratorio deben ser programados de modo de comparar la eficiencia del proceso de flotación frente a otras alternativas de separación. Estos ensayos deben servir para determinar:
 - Necesidad de la utilización de un agente químico coagulante.
 - Tipo de coagulante, dosis y pH óptimos, necesidad o no de agregar polielectrolitos, tipo y dosis de polielectrolito.
 - Tiempos de mezcla rápida y de floculación, gradientes óptimos.
- En base a los resultados obtenidos en laboratorio, el proyectista debe estudiar la necesidad de realizar ensayos en planta piloto para determinar:
 - Dosis de aire.
 - Cargas superficiales para la zona de flotación.
 - Tiempos de retención.
 - Relación de recirculación.
 - Frecuencia de eliminación de flotantes.
 - Características y concentración de sólidos flotantes.
 - Características del barredor de fondo de la unidad y del barredor superficial.
 - Frecuencia de limpieza de la unidad

Los ensayos a escala piloto deben incluir todas las etapas de la línea de procesos a emplear en la planta definitiva.

Se debe operar la planta piloto durante un período que abarque las posibles variaciones en la calidad del agua a tratar.

- Para el diseño de una planta piloto se debe justificar la utilización de los siguientes parámetros de diseño (pudiéndose adoptar como referencia los valores indicados)

Gradiente de velocidad para la etapa de floculación:	50-120 s ⁻¹
Tiempo de floculación:	4-15 min
Tiempo de retención en la zona de mezcla:	60-240 s
Carga hidráulica (basada en el caudal total: alimentación +recirculación)	40-100 m ³ /m ² .h
Velocidad de ingreso en la zona de flotación:	20-100 m/h
Carga hidráulica(basada en el caudal total: alimentación +recirculación)	5 -11 m ³ /m ² .h
Profundidad:	1,5-3,00 m
Recirculación:	6,0-10,0 %
Dosis de aire:	6,0-8,0 mg/l

Tanques de saturación con medios empacados

Carga hidráulica:	50-80 m ³ /m ² .h
Profundidad del lecho:	0,80-1,20 m
Presión de saturación:	300-600 kPa (kN/m ²)

Tanques de saturación sin medios empacados

Carga hidráulica:	0-60 m ³ /m ² .h
Tiempo de retención:	20-60 s
Presión de saturación:	400-600 kPa (k.N/m ²)

- Cuando se haya realizado ensayos en planta piloto, debe atender y prever adecuadamente los siguientes aspectos del proyecto de la planta definitiva:
 - *Diseño del equipo barredor*: la elección del equipo debe asegurar que no se produzca el deterioro de la calidad del agua tratada por rotura de la capa flotante. La elección del sistema de barrido queda condicionada por la calidad del agua tratar y de los lodos generados.

- *Diseño del tanque de saturación:* debe asegurarse la máxima eficiencia en la disolución de aire. Se recomienda el uso de tanques de saturación con medios empacados.
 - *Elección del mecanismo de reducción de presión:* debe seleccionarse las válvulas o toberas, de modo de generar burbujas de diámetros entre 30 y 100 micras. El ingreso del agua saturada debe hacerse de forma tal que exista una adecuada distribución del flujo.
 - *Tanques de flotación:* Cuando los tanques de flotación sean de planta rectangular, las zonas de mezcla y de flotación deber estar separadas por una pantalla inclinada aproximadamente 60 grados respecto a la horizontal. Debe procurarse que al pasar el agua hacia la zona de flotación, no se rompan los aglomerados flóculos-burbuja generados en la zona de mezcla.
- Cuando se considere que los sistemas FAD puedan ser provistos por fabricantes de equipos como un sistema completo, se debe realizar un anteproyecto de las instalaciones y especificar los principales parámetros de diseño en base a la calidad del agua tratada y a los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio. Debe exigirse, en ese caso en los documentos de licitación, que el fabricante demuestre que el equipo que ofrece puede cumplir con las exigencias establecidas mediante ensayos en planta piloto. Estos ensayos deben exigirse al proveedor del equipo como requisito previo necesario para la aprobación definitiva del sistema y procesos propuestos.

7. FILTRACIÓN

7.1. GENERALIDADES

7.1.1. Definición del Proceso

- Es el proceso mediante el cual se logra la remoción de partículas suspendidas, coloidales y microorganismos presentes en el agua que escurre a través de un medio poroso.

7.1.2. Velocidad de Filtración

La velocidad de filtración U_f puede expresarse en m/s ó cm/s y también como carga hidráulica superficial q_f en $m^3/m^2 \cdot día$ ó en $m^3/m^2 \cdot min$.

Se tiene que:

$$U_f = q_f = Q_f / A_f$$

donde:

Q_f = caudal a filtrar que ingresa a cada unidad (m^3/s ó cm^3/s)

A_f = área superficial filtrante de cada unidad (m^2 ó cm^2)

7.1.3. Clasificación del Proceso de Filtración

- Según las características del agua cruda: filtración lenta, para un tratamiento de tipo biológico, con baja velocidad de filtración y filtración rápida, como proceso final de un tratamiento de coagulación, floculación y sedimentación de partículas floculentas, con alta velocidad de filtración.
- Según el pretratamiento: filtración rápida convencional con coagulación, floculación y decantación y filtración directa con coagulación y prefloculación o solamente con coagulación.
- Según el sentido del escurrimiento a través del lecho poroso: filtración ascendente, filtración descendente y mixta ascendente-descendente.
- Según la carga hidráulica sobre el lecho filtrante: filtración a presión y filtración a gravedad.
- Según la velocidad de filtración durante una carrera: filtración de velocidad constante y de velocidad declinante.

7.1.4. **Parámetros Básicos Adoptados de Diseño y Operación**

- Para todas las alternativas de filtración rápida (convencional a presión, directa ascendente, directa descendente, directa ascendente-descendente) y lenta (convencional y dinámica), se debe seleccionar la alternativa y los parámetros de diseño y de operación mediante estudios efectuados en Laboratorio.
- Esos estudios deben consistir en pruebas efectuadas con filtros de laboratorio o filtros pilotos, según sea la importancia del proyecto, en base a muestras sustraídas de la fuente de agua adoptada, durante los períodos donde el agua cruda se mantiene constante en su calidad y en los períodos con variaciones de la misma, determinando su frecuencia en el tiempo.
- El ENOHSA podrá exigir esos estudios para justificar los parámetros de diseño y operación.
- De no poder efectuar esos estudios, se debe justificar ante el ENOHSA, para su aprobación, parámetros de diseño y operación, obtenidos en experiencias de plantas de potabilización existentes y en estudios de investigación recientes. En el desarrollo de las distintas alternativas se desarrollan esos parámetros.

7.1.5. **Parámetros Característicos de los Medios Filtrantes**

- Medios filtrantes: arena, antracita, granate e ilmenita.
 - Las características de los medios filtrantes deben determinarse mediante una serie granulométrica de tamices (IRAM, TYLER ó ASTM).
- Los parámetros característicos de los materiales filtrantes deben ser:
 - D_{10} : tamaño efectivo (mm) = abertura (mm) del tamiz por donde pasa el 10 % (en peso) del material
 - D_{60} : abertura (mm) del tamiz por donde pasa el 60 % (en peso) del material granular
 - D_{90} = abertura (mm) del tamiz por donde pasa el 90 % (en peso) del material, considerado como tamaño mayor en el lavado de los filtros
 - C_u = D_{60}/D_{10} = coeficiente de uniformidad (adimensional)
 - C_e = coeficiente de esfericidad (adimensional), que considera la forma de los granos, ó
 - F : factor de forma (adimensional) que también considera la forma de los granos del material)
 - ρ : masa específica del material (Kg/m^3 ó $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)
 - L_f = espesor de cada subcapa que compone el lecho filtrante (m), siendo $L_F = \Sigma L_f$ = espesor total del lecho (m)
 - $D_{\text{máx}}$ = tamaño máximo de las partículas de cada subcapa (m)
 - $D_{\text{mín}}$ = tamaño mínimo de las partículas de cada subcapa (m)

- $D_{eq} = (D_{m\acute{a}x} \cdot D_{m\acute{i}n})^{1/2}$ = tamaño equivalente de cada subcapa (m)
- δ_g = densidad relativa del grano del lecho filtrante (adimensional)
- p_o = porosidad del manto limpio (adimensional)

- Capa soporte

- Las características de la capa soporte deben depender del sistema de drenaje adoptado, del lecho filtrante y del tipo de filtración adoptado, siendo los parámetros más importantes, los siguientes:

e = espesor de cada subcapa (m), siendo Σe = espesor total (m)

$D_{m\acute{a}x}$ = tamaño máximo de las partículas del material de cada subcapa (mm)

$D_{m\acute{i}n}$ = tamaño mínimo de las partículas del material de cada subcapa (mm)

$D_{eq} = (D_{m\acute{a}x} \cdot D_{m\acute{i}n})^{1/2}$ = tamaño equivalente de cada subcapa (mm)

δ_g = densidad relativa del material de la capa soporte (adimensional)

p_o = porosidad del manto limpio (adimensional)

C_e = coeficiente de esfericidad (adimensional)

7.2. FILTRACIÓN RÁPIDA CONVENCIONAL

7.2.1. Características de la Alternativa

- Se debe aplicar filtración rápida convencional cuando las características del agua cruda superficial, especialmente en cuanto a la turbiedad y al color verdadero, determinen un tratamiento completo, integrado por los siguientes procesos:
 - Eventualmente tratamiento preliminar.
 - Coagulación, generalmente por el mecanismo de barrido.
 - Floculación hidráulica o mecánica.
 - Sedimentación o flotación de partículas floculentas.
 - Filtración rápida.
 - Desinfección y neutralización del pH del agua filtrada.
- El escurrimiento a través del manto filtrante debe realizarse en sentido descendente.
- Para el lavado del filtro sucio de una batería se debe inyectar agua y/o aire en sentido ascendente.
- El manto filtrante puede estar constituido por las siguientes alternativas:
 - Capa única de arena con subcapas de distinto tamaño.

- Capa única de arena con tamaños prácticamente uniformes (bajo valor del coeficiente de uniformidad).
 - De manto dual: antracita (superior o superficial) y arena (inferior o de fondo).
 - De manto triple: granate o ilmenita, capa situada debajo del manto dual de antracita y arena.
- Se debe adoptar la velocidad de filtración constante o variable durante una carrera de filtración.

7.2.2. Límites de Calidad del Agua Cruda para Filtración Rápida Convencional

A continuación se indican los límites de calidad del agua cruda aceptados de acuerdo a experiencias reconocidas. Otros límites deben ser justificados.

Procesos	90 % del tiempo	80 % del tiempo	Eventualmente
<ul style="list-style-type: none"> • Turbiedad T (UT) 	≤ 1000	≤ 800	≤ 1500 Para > 1500 añadir eventualmente un período de detención en un embalse.
<ul style="list-style-type: none"> • Color verdadero C (UC) 	≤ 150	≤ 70	-
<ul style="list-style-type: none"> • Coliformes fecales (NMP/100 ml) 	≤ 600	≤ 600	≤ 600 Si CF > 600 , preclorar

Tabla 4. Límites aceptables de calidad del agua cruda para filtración rápida convencional

7.2.3. Parámetros de Diseño y Operación

A continuación se indican a título ilustrativo los valores de los parámetros de diseño y operación correspondientes a experiencias de plantas de potabilización con filtración rápida y además a estudios recientes. Estos valores pueden utilizarse como orientación general cuando no se pueden obtener resultados de ensayos de Laboratorio (según se establece en el Numeral 7.1.4).

Parámetros de diseño y operación	Rango de valores	Observaciones
<ul style="list-style-type: none"> Velocidad media de filtración U_f o carga superficial q_f expresada en $m^3/m^2 \cdot día$ 		Operación con:
➤ Con capa única de arena de distintos tamaños	≤ 200	Velocidad de filtración constante
➤ Con capa única de arena prácticamente uniforme	≤ 360	Velocidad de filtración constante
➤ Con capa única de arena de distintos tamaños	≤ 300	Velocidad de filtración declinante
➤ Con capa única de arena prácticamente uniforme	≤ 500	Velocidad de filtración declinante
➤ Con manto dual de arena y antracita	≤ 400	Velocidad de filtración constante
<ul style="list-style-type: none"> ➤ $K = q_{m\acute{a}x}/q_{med}$ = relación entre la velocidad máxima de filtración $q_{m\acute{a}x}$ y la media q_{med} ($m^3/m^2 \cdot día$), en filtración declinante, siendo: $Q_{med} = Q_f/(N_f \cdot A_f)$ = velocidad media de filtración ($m^3/m^2 \cdot día$) 	1,3 a 1,5	Batería de filtros que funcionan como vasos comunicantes (ingresos sumergidos) de una batería de N_f = número de filtros de área A_f (m^2) que trata un caudal Q_f (m^3/d)
<ul style="list-style-type: none"> Manto de arena sílicea 		Densidad 2,5 a 2,7
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Capa única de arena con subcapas de distinto tamaño <ul style="list-style-type: none"> ❖ Espesor (m) ❖ Tamaño efectivo (mm) ❖ Tamaños límites ❖ Coeficiente de uniformidad 	0,60 a 0,80 0,45 a 0,65 0,60 a 1,41 $\leq 1,6$	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Capa torpedo <ul style="list-style-type: none"> ❖ Espesor (m) ❖ Tamaño efectivo (mm) ❖ Tamaños límites (mm) ❖ Coeficiente de uniformidad 	0,10 a 0,20 0,9 a 1,1 0,84 a 2,00 $\leq 1,7$	Aplicado eventualmente entre el lecho filtrante y la capa soporte para optimizar la operación de lavado del filtro.
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Capa única de arena prácticamente uniforme <ul style="list-style-type: none"> ❖ Espesor (m) ❖ Tamaño efectivo (mm) ❖ Rango de tamaños (mm) ❖ Coeficiente de uniformidad 	$\leq 1,00$ 0,9 a 1,3 0,84 a 1,68 $\leq 1,2$	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Manto dual de arena y antracita <ul style="list-style-type: none"> ❖ Espesor de la arena (m) ❖ Espesor de la antracita (m) ❖ Tamaño efectivo de la arena (mm) ❖ Tamaño efectivo de la antracita (mm) ❖ Tamaños límites de la arena (mm) ❖ Tamaños límites de la antracita (mm) ❖ Coeficiente de uniformidad de la arena ❖ Coeficiente de uniformidad de la antracita ❖ Tamaño grueso de la antracita D_{90} / tamaño efectivo de la arena D_{10} ❖ Tamaño efectivo de la antracita D_{10} / tamaño grueso de la antracita D_{90} ❖ Velocidad ascensional (m/s) en el lavado del tamaño grueso D_{90} de la antracita / velocidad ascensional (m/s) en el lavado del tamaño grueso D_{90} de la arena (para producir una expansión $E = 5$ al 10 %) 	0,20 a 0,30 0,45 a 0,60 0,40 a 0,60 0,90 a 1,10 0,42 a 1,41 0,59 a 2,00 $\leq 1,6$ $\leq 1,6$ 3 a 3,5 0,5 1,1 a 1,2	Densidad de la antracita 1,4 a 1,7 Para una limitada intermezcla Para una limitada intermezcla Para una limitada intermezcla

Tabla 5. Parámetros de diseño y operación de la filtración rápida convencional

7.2.4. Estructuras y Elementos de la Filtración Rápida Convencional

- Manto filtrante

- La arena debe estar constituida esencialmente por granos de cuarzo, producidos por la erosión natural de las rocas, con las siguientes características:
 - ❖ Contenido de sílice no inferior al 99 %.
 - ❖ Solubilidad máxima del 5 % en ácido clorhídrico concentrado (1,18 g/cm³).
 - ❖ Masa específica comprendida entre 2500 y 2700 Kg/m³.
- Para la antracita se pueden aceptar los siguientes parámetros recomendados por la Organización Mundial de la Salud, OMS y por la American Water Works Association, AWWA y por el material importado (M.I.):
 - ❖ Humedad: 4,4 % (M.I.)
 - ❖ Material soluble en ácido clorhídrico: densidad relativa $\delta = 1,2$ A 2,0 %) : 1 % (AWWA)
 - ❖ Material volátil: 7,90 (M.I.)
 - ❖ Cenizas: 12,50 % (M.I.)
 - ❖ Carbono fijo: 85 % (OMS)
 - ❖ Azufre total: 0,49 (M.I.)
 - ❖ Porosidad: 56,0 % (M.I.)
 - ❖ Coeficiente de uniformidad: 1,7 (AWWA)
 - ❖ Dureza: superior a 2,5 en la escala MOHS (AWWA)
 - ❖ Masa específica: comprendida entre 1400 y 1700 Kg/m³ (M.I.)

En todos los casos las especificaciones adoptadas y expresamente indicadas, ya sea de esas organizaciones internacionales o de materiales importados, deben ser aprobadas por el ENOHSA.

- Sistema de drenaje: falso fondo y capa soporte

- El sistema de drenaje de los filtros rápidos debe cumplir las siguientes funciones:
 - ❖ Colectar el agua filtrada.
 - ❖ Distribuir uniformemente el agua y eventualmente el aire para el lavado de la unidad.
 - ❖ La capa soporte debe estar conformada de acuerdo al tipo de falso fondo aceptado. Puede suprimirse cuando se proyectan placas porosas (para soportar el lecho filtrante) o boquillas con ranuras menores o iguales a 0,35 mm.

- ❖ La elección del tipo de falso fondo debe depender principalmente de la calidad de la operación y mantenimiento, de las formas de suministrar el agua para el lavado de los filtros y de factores económicos.

- Falso fondo con boquillas

- Deben aplicarse en función del método de lavado, pudiendo ser simples cuando el lavado es con agua solamente o especiales cuando conducen agua y aire. Generalmente se tienen entre 20 a 25 boquillas simples por metro cuadrado y 50 a 60 boquillas especiales por metro cuadrado.
- El sistema drenante debe estar compuesto por placas premoldeadas donde se insertan las boquillas y el falso fondo o cámara inferior, que deberá tener una altura mínima $D + 0,20$ m, siendo D = diámetro de la cañería del agua del lavado (que podrá ser común a la colectora de agua filtrada de la unidad).
- La capa soporte de grava en el falso fondo con boquillas debe estar constituida por subcapas de arriba hacia abajo, de tamaños D y espesor e .

1 : $e_1 = 5,0$ a $1,5$ cm	$D_1 = 4,8$ a $2,4$ mm	(superior)
2 : $e_2 = 5,0$ a $7,5$ cm	$D_2 = 12,7$ a $4,8$ mm	
3 : $e_3 = 7,5$ a $10,0$ cm	$D_3 = 19,0$ a $12,7$ mm	
4 : $e_4 = 7,5$ a $10,0$ cm	$D_4 = 38,0$ a $19,0$ mm	
5 : $e_5 = 10,0$ a $15,0$ cm	$D_5 = 63,0$ a $38,0$ mm	(fondo)
- Cuando se utilizan boquillas especiales con pequeñas ranuras (0,6 a 0,7 mm), el manto soporte de grava se debe reemplazar por arena torpedo especificada en el Numeral 7.2.2.

Si se utiliza arena prácticamente uniforme no es necesaria la capa de arena torpedo.

- Falso fondo con vigas en V (Falso fondo californiano)

- Las vigas prefabricadas en forma de V invertida, con dos alas, en donde se insertan orificios revestidos que las atraviesan, deben colocarse adosadas y tener las siguientes dimensiones:

altura h : 25 a 30 cm

base b : 25 a 30 cm

longitud máxima l : 4,00 m

diámetros de los orificios d_o : 9,6 a 19,0 mm

separación entre orificios s_o : 25 a 30 cm
- Generalmente se usan para lavado con agua. Previa adecuada justificación en cada caso, el ENOHSA podrá aprobar su utilización para distribuir también aire.
- La capa soporte de grava debe apoyarse sobre los espacios formados entre vigas adosadas longitudinalmente y debe estar constituida por las siguientes subcapas de arriba hacia abajo de tamaños D y espesor e .

1 : $e_1 = 7,5$ a $10,0$ cm	$D_1 = 1,7$ a $3,2$ mm	(parte superior)
-----------------------------	------------------------	------------------

2 : $e_2 = 7,5$ a $10,0$ cm	$D_2 = 3,2$ a $6,4$ mm
3 : $e_3 = 7,5$ a $10,0$ cm	$D_3 = 6,4$ a $12,7$ mm
4 : $e_4 = 7,5$ a $10,0$ cm	$D_4 = 12,7$ a $25,4$ mm
5 : $e_5 = 10,0$ a $15,0$ cm	$D_5 = 25,4$ a $50,0$ mm (fondo)

- El sistema drenante se debe completar con un falso fondo, de igual área que la caja del filtro.

• Cañerías con orificios

- El sistema debe estar constituido por un conducto principal desde el cual se derivan a cada lado, conductos secundarios (laterales) en donde se practican orificios simétricos inferiormente, formado a cada lado un ángulo de 45° . Los orificios distribuidores deben generalmente tener diámetros entre 6,4 y 12,7 mm, con separaciones entre 5 y 20 cm.
- Se debe dimensionar el sistema con el método de distribución de caudales de Hudson, considerando que la relación entre la sumatoria de las áreas de los laterales y la correspondiente al principal debe ser menor a 0,5.
- La composición del manto soporte debe seguir lo indicado por Baylis:

Para lavado con agua solamente

$e_1 = 7,0$ cm	$D_1 = 2,4$ a $3,2$ mm	(parte superior)
$e_2 = 9,0$ cm	$D_2 = 3,2$ a $6,4$ mm	
$e_3 = 9,0$ cm	$D_3 = 6,4$ a $12,7$ mm	
$e_4 = 5,0$ cm	$D_4 = 12,7$ a $19,0$ mm	
$e_5 = 10,0$ cm	$D_5 = 19,0$ a $38,0$ mm	
$e_6 = 15,0$ cm	$D_6 = 38,0$ a $75,0$ mm	(Fondo; donde se coloca el lateral)

Para lavado con agua y aire

$e_1 = 10,0$ cm	$D_1 = 50,0$ a $25,4$ mm
$e_2 = 5,0$ cm	$D_2 = 25,4$ a $12,7$ mm
$e_3 = 5,0$ cm	$D_3 = 12,7$ a $6,4$ mm
$e_4 = 10,0$ cm	$D_4 = 25,4$ a $12,7$ mm
$e_5 = 15,0$ cm	$D_5 = 50,0$ a $25,4$ mm

• Bloques

- Se debe proponer en cada caso al ENOHSA para su aprobación el tipo de bloque a utilizar, especificando sus características, pérdidas de carga si se utilizarán para lavado con agua solamente o con agua y aire, forma de colocación y ventajas que presenta.

- Manto soporte

El manto soporte debe estar constituido por grava o canto rodado conformado por fragmentos de rocas originarias del lecho de río o de yacimientos y cumplir con las siguientes especificaciones:

- Tamaños límites: no más del 8 % en peso podrá superar el límite máximo o ser menor al límite mínimo establecidos en el diseño.
- La masa específica debe ser mayor o igual a 2.500 Kg/m³.
- Tener un máximo del 2 % en peso de granos de tamaño pequeño, laminares o alargados.
- Los tamaños superiores a 12,7 mm deben tener un máximo del 25 % en peso de grava triturada y angular.
- Para gravas con tamaños de hasta 9,5 mm, la solubilidad en ácido clorhídrico concentrado no debe exceder del 5 % y del 10 % para los tamaños mayores.
- La subcapa en contacto directo con el medio filtrante debe tener grava con tamaño mínimo igual o mayor al tamaño máximo de ese medio filtrante.
- En ningún caso el espesor de cada subcapa debe ser menor a 5,0 cm.

- Altura de la capa líquida sobre el lecho filtrante o sobrenadante

El nivel de agua sobre el manto filtrante y el de la salida del agua filtrada, deben ser establecidos para eliminar o disminuir la posibilidad de presiones negativas en el manto filtrante (arrastre de aire y bloqueo de los poros entre los granos), o sea presiones inferiores a la atmosférica.

7.2.5. Pérdida de Carga en el Manto Filtrante Fijo

- Parámetros de cálculo

Las pérdidas de carga se deben calcular en base a los siguientes parámetros:

$Q_f = Q/N_f$ = caudal medio a filtrar en cada unidad de una batería (m³/s), siendo:

Q = caudal total a filtrar (m³/s)

N_f = número de filtros iguales de una batería

$U_f = Q_f/A_f$ = velocidad media de filtración (m/s)

A_f = área filtrante de cada unidad (m²)

- Determinación de las pérdidas de carga en el inicio de una carrera de filtración (lecho filtrante limpio)

Se deben calcular las siguientes pérdidas de carga (m):

- $h_1 = K \cdot U_f^n$ = pérdida de carga (m) en el fondo de los filtros (vigas en forma de V, bloques, múltiples con laterales y falso fondo), donde:

K y n = coeficiente a justificar en función de las características del fondo

- h_2 = pérdida de carga en el manto soporte no uniforme (m). Se debe aplicar la expresión de Ergun (indicada en el presente Numeral), por ser flujo turbulento (número de Reynolds $R_e > 6$)
- $h_3 = 1,67 U_c^2 / 2g = 1,67 (A_f \cdot U_f / A_c)^2 / 2g$ = pérdida de carga (m), en la compuerta de entrada de los filtros, siendo:

U_c = velocidad de pasaje por la compuerta (m/s)

A_c = área de la compuerta (m²)

- $h_4 = [10,643 Q_f^{1,85} \cdot C^{-1,85} \cdot D^{-4,87}] \cdot L_{eq} = [10,643 (A_f \cdot U_f)^{1,85} \cdot C^{-1,85} \cdot D^{-4,87}] \cdot L_{eq}$ = pérdida de carga (m), en el sistema de salida del líquido filtrado a través de la longitud equivalente de las piezas especiales que interconectan al filtro con la cámara que contiene el vertedero de descarga (entrada a la cañería, salida de la cañería, ramal T de salida lateral, válvula de regulación abierta, curvas, etc.), siendo:

C = coeficiente de pérdida de carga por fricción, de la expresión de Williams-Hazen (adimensional)

D = diámetro equivalente del conducto de salida de los filtros (m)

L_{eq} = longitud equivalente de las piezas especiales (m)

- $h_5 = [A_f \cdot U_f / (1,838 B)]^{2/3}$ = pérdida de carga (m), en el vertedero de control de la descarga del líquido filtrado, ubicado en una cámara individual, cuando se tenga velocidad de filtración declinante, donde:

B = ancho del umbral horizontal del vertedero (m)

- h_{fo} = pérdida de carga inicial producida en cada material granular del filtro

Según sea la uniformidad de los granos de cada material se deben adoptar las siguientes expresiones:

$$\diamond h_{fo} = \frac{K_K \mu \cdot (1 - \epsilon_o)^2 \cdot L_f \cdot U_f}{g \cdot \rho \cdot \epsilon_o^3} \left(\frac{6}{C_e \cdot D_{eq}} \right)^2 = \alpha \cdot U_f = \text{ecuación de}$$

Karman-Koseny para el medio filtrante limpio uniforme (coeficiente de uniformidad $C_u \leq 1,3$)

$$\diamond h_{fo} = \frac{K_K \mu \cdot (1 - \epsilon_o)^2}{g \cdot \rho \cdot \epsilon_o^3} \left(\frac{6}{C_e \cdot D_{eq}} \right)^2 \cdot \sum X_i / (D_{eq})^2 = \beta \cdot U_f = \text{ecuación de}$$

Fair-Hatch para el medio filtrante limpio no uniforme ($C_u > 1,3$)

K_K = coeficiente de Koseny. Para el diseño se debe adoptar $K_K = 4,17$ (puede variar entre 4,0 y 4,5)

ε_o = porosidad inicial del manto granular limpio

C_e = coeficiente de esfericidad de los granos

L_f = espesor del manto filtrante (m)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

μ = viscosidad dinámica del agua a temperatura $T^\circ C$ ($N \cdot s/m^2$)

ρ = masa específica del agua a temperatura $T^\circ C$ (Kg/m^3)

X_i = fracción correspondiente a la subcapa i de espesor L_i , del medio filtrante no uniforme = L_i/L_f

$D_{eq} = (D_{máx} \cdot D_{mín})^{1/2}$ = tamaño equivalente de los granos de un lecho filtrante uniforme o de cada subcapa del lecho total (m)

U_f = velocidad de filtración o de aproximación (m/s)

❖ Para $U_f > 500 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, se debe aplicar la fórmula de Ergun:

$$h_{fo} = \frac{150\mu \cdot (1-\varepsilon_o)^2 \cdot L_f \cdot U_f}{g \cdot \rho \cdot \varepsilon_o^3 \cdot C_e^2 \cdot D_{eq}^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon_o) \cdot U_f}{\varepsilon_o^3 \cdot g \cdot C_e \cdot D_{eq}} = \text{pérdida de carga en lechos limpios de granos uniformes (m)}$$

$$h_{fo} = \frac{150 \cdot \mu \cdot (1-\varepsilon_o)^2 \cdot L_f \cdot U_f}{g \cdot \rho_a \cdot \varepsilon_o^3} \cdot \sum X_i / D_{eq}^2 + \frac{1,75 (1-\varepsilon_o) \cdot U_f}{g \cdot \varepsilon_o^3 \cdot C_e} \cdot \sum X_i / D_{eq} = \text{pérdida de carga en lechos limpios compuestos por subcapas de granos no uniformes (m)}$$

En consecuencia:

$H_{fo} = h_1 + h_2 + h_3 + h_{fo}$ = pérdida de carga total en un filtro con velocidad de filtración constante (nivel líquido operativo constante) (m)

$H_{fo} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_o$ = pérdida de carga total en un filtro con velocidad de filtración declinante (nivel líquido operativo variable) (m)

- Pérdida de carga durante la carrera de un filtro

- Las pérdidas de carga producidas en un filtro durante una carrera se deben calcular según la velocidad de filtración, ya sea constante o declinante.
- $h_f = H_d - H_{fo}$ = pérdida de carga variable y decreciente producida en la carrera de filtración (m)

donde:

H_d = carga hidráulica disponible para producir la velocidad de filtración constante declinante (m)

H_{fo} = pérdida de carga total inicial (filtro limpio) (especificada en este Numeral), que depende de si se diseña un dispositivo de control en velocidad de filtración constante o un vertedero de control del efluente filtrado en la declinante (m)

➤ Carga hidráulica disponible H_d

La carga hidráulica disponible debe ser fijada considerando factores técnicos, económicos y operativos.

$H_d = N_L - N_s$ = diferencia entre el nivel líquido constante N_L y el de salida N_s del líquido filtrado, en filtración con velocidad constante

$H_d = N_{m\acute{a}x} - N_v$ = diferencia entre los niveles líquido máximo en el sobrenadante y sobre el vertedero de control en filtración con velocidad declinante (m)
Esa carga hidráulica disponible debe ser fijada de tal manera que la velocidad de filtración máxima no supere 1,5 veces la velocidad media de diseño en el inicio de la carrera

➤ Control de la velocidad de filtración de una unidad

La pérdida de carga h_f producida durante una carrera de filtros con velocidad de filtración y nivel líquido constantes, es una pérdida de carga adicional variable y decreciente, que debe introducir un dispositivo de control proyectado en la salida del efluente filtrado a fin de mantener constantes a ambos parámetros.

El elemento de control en los filtros de velocidad declinante debe ser un vertedero de umbral horizontal ubicado en la descarga del líquido filtrado. En el sobrenadante se produce una variación de los niveles líquidos, siendo el mínimo en el inicio de la carrera y el máximo en el final de la misma.

• Cargas negativas

Los niveles de agua sobre el manto filtrante y salida del agua filtrada, deben calcularse para evitar presiones negativas o sea presiones inferiores a la atmosférica, ya que pueden liberar burbujas de aire en el lecho filtrante y en consecuencia disminución prematura del volumen de agua filtrada.

El proyectista tiene libertad de utilizar otras expresiones adecuadas a las características especiales de su diseño, debiendo verificarlas en cada caso, quedando a juicio del ENOHSA su aceptación.

7.2.6. Fluidificación de Medios Granulares

- Finalidad de la fluidificación
 - Producir la expansión del medio filtrante con liberación de las impurezas retenidas, utilizando agua en sentido ascensional.
 - Hay una velocidad mínima de fluidificación U_{mf} (m/s), para la cual la fluidificación es incipiente.
 - En base a las características del medio granular y a la velocidad ascensional del lavado U_L (m/s), se debe prever su expansión.
 - Para lechos granulares duales o de más materiales filtrantes, la expansión total es igual a la suma de la expansión de cada material.
- Pérdida de carga en lechos granulares expandidos

Se la debe calcular considerando la porosidad ε_o inicial y el espesor L_{fo} del medio granular antes de su expansión, teniendo en cuenta que el coeficiente de arrastre es igual a uno y en consecuencia se tiene:

$$h_L = L_{fe} \cdot (1 - \varepsilon_e) \cdot (\delta_s - 1) = L_{fo} (1 - \varepsilon_o) \cdot (\delta_s - 1) = \text{pérdida de carga en el medio granular expandido durante la operación del lavado de la unidad (m)}$$

donde:

L_{fe} = espesor del medio granular expandido (m)

L_{fo} = espesor del medio granular antes de su expansión (m)

ε_e = porosidad del lecho granular expandido (adimensional)

ε_o = porosidad inicial del lecho granular antes de su expansión (adimensional)

$\delta_s = \rho_s / \rho$ = densidad relativa del material granular (adimensional)

ρ_s = masa específica de los granos del lecho filtrante (Kg/m³)

ρ = masa específica del agua a temperatura T° C (Kg/m³)

- Determinación de la velocidad mínima de fluidificación

$$U_{mf} = [\mu / (\rho \cdot D_{eq})] \cdot [(33,7^2 + 0,0408 G_a)^{1/2} - 33,7] = \text{velocidad mínima de fluidificación (m/s)}$$

donde:

$$G_a = D_{eq}^3 \cdot \rho (\rho_s - \rho) \cdot g / \mu^2 = \text{número de Galileo (adimensional), considerando constante a la pérdida de carga } h_L \text{ (m), tanto para el lecho inicial fijo como para el fluidificado (de acuerdo a lo indicado anteriormente en este Numeral 7.2.6)}$$

μ = viscosidad dinámica del agua a temperatura T° C (N.s/m²)

ρ = masa específica del agua a la temperatura $T^{\circ}\text{C}$ (Kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

D_{eq} = diámetro equivalente o tamaño medio de los granos de un lecho granular entre mallas consecutivas de la serie granulométrica (m)

- En los lechos granulares uniformes o prácticamente uniformes, se debe aplicar en la expresión U_{mf} , el valor de D_{eq} correspondiente a los granos de la subcapa superior o de menor tamaño, o sea lechos granulares preparados entre dos tamices consecutivos de la serie granulométrica adoptada.
- En lechos granulares no uniformes se debe adoptar el valor de D_{eq} , igual al de la abertura del tamiz de la serie granulométrica por donde pasa el 90 % (en peso) de los granos (según proposición de Cleasby y Fan) a fin de garantizar que todo el lecho filtrante fluidifique. Igual criterio debe adoptarse en el lavado de los filtros.

• Porosidad del lecho expandido

- Para cada subcapa i de un lecho granular, se puede calcular la porosidad ε_{ei} del lecho expandido aplicando las curvas siguientes, donde se la determina en función del número de Reynolds, el coeficiente de esfericidad de los granos y del número de Galileo.

donde:

$$R_{emf} = \rho \cdot D_{eq} U_{mf} / \mu = \text{número de Reynolds (adimensional)}$$

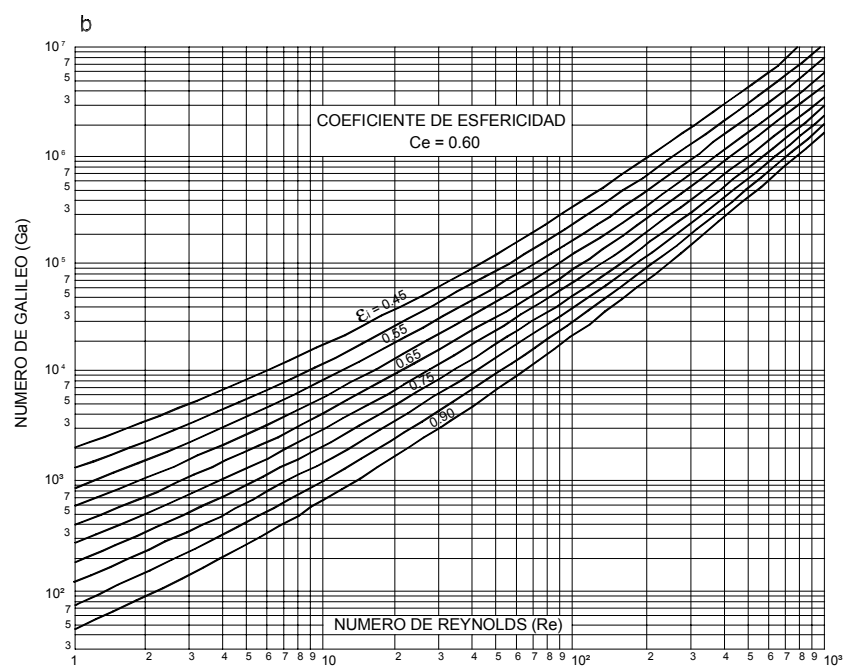
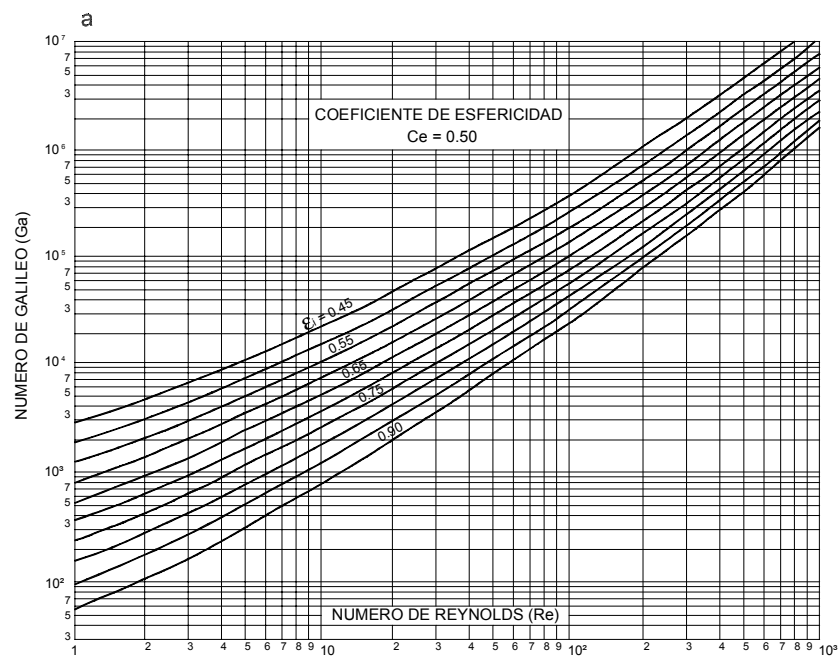
$$G_a = D_{eq}^3 \cdot \rho \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g / \mu^2 = \text{número de Galileo (adimensional)}$$

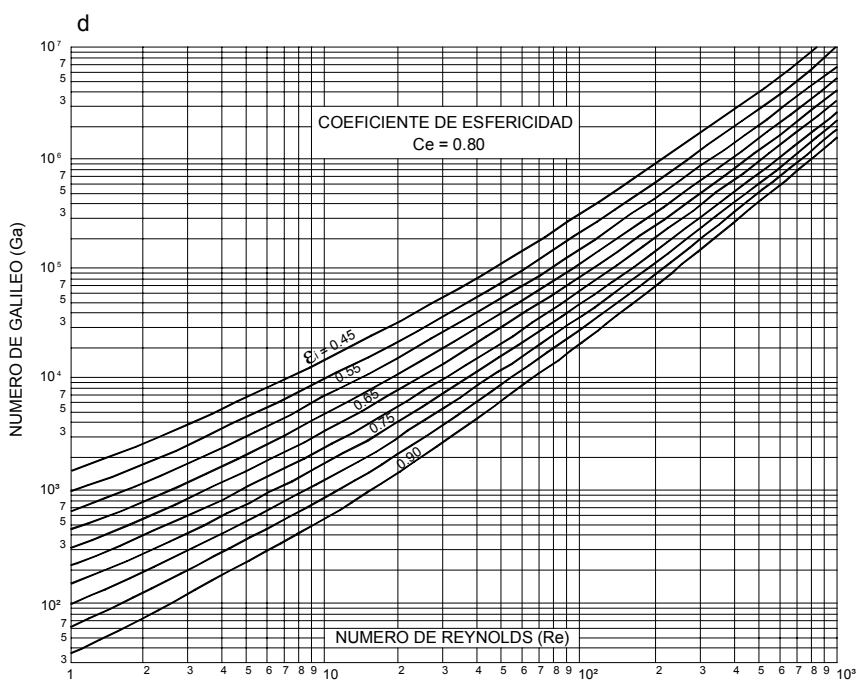
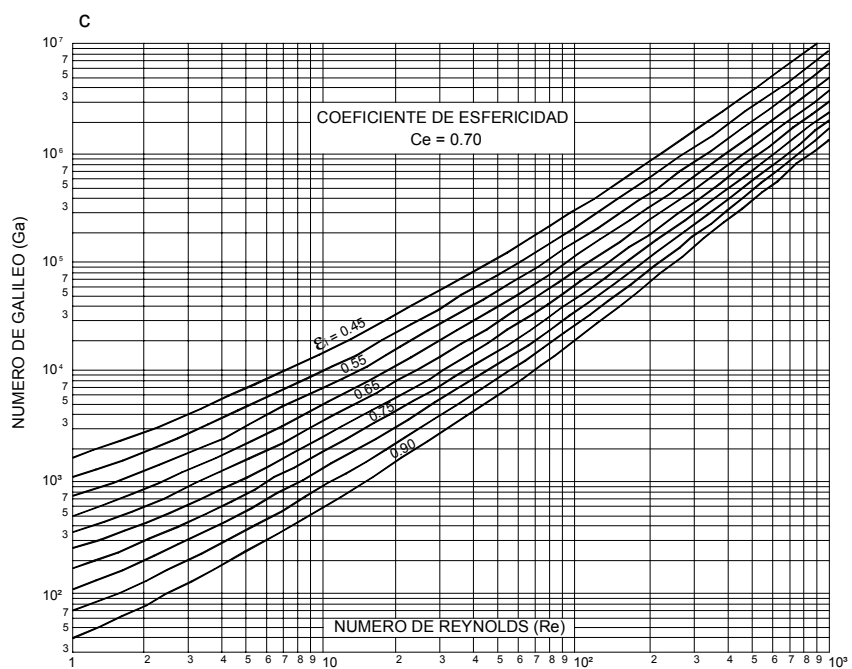
$$\text{➤ } (1 - \varepsilon_e) = 1 / \sum_{i=1}^n X_i / (1 - \varepsilon_{e1})$$

donde:

X_i = espesor de cada subcapa i (m)

ε_{ei} = porosidad de cada subcapa expandida (calculada con los gráficos siguientes)





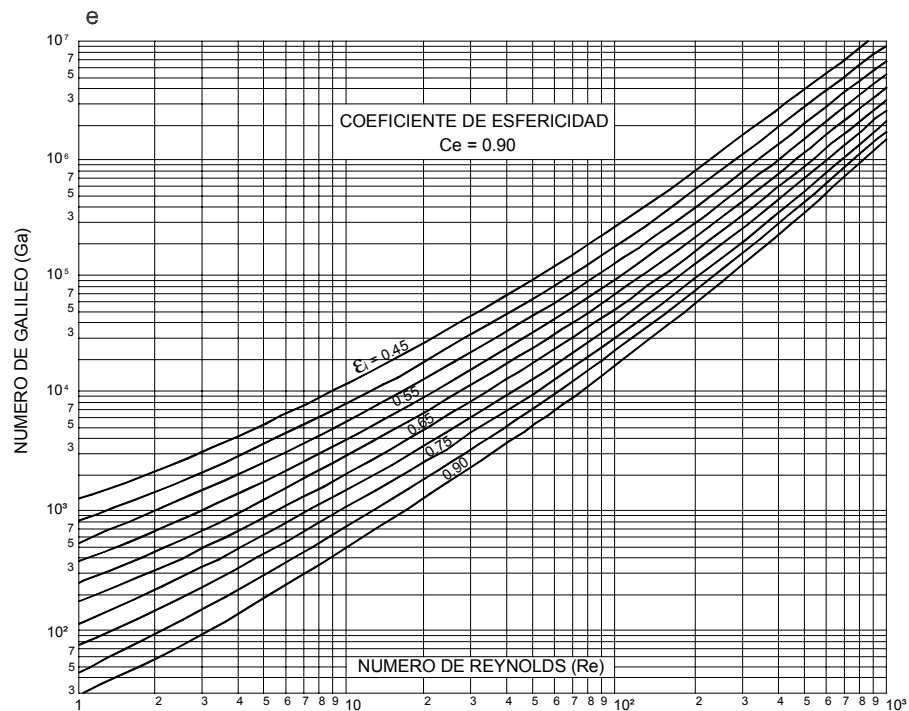


Figura 3. Porosidad del lecho expandido (ϵ_e) en función del número de Reynolds (R_e) y del número de Galileo (G_a)

- Expansión del lecho fluidificado

$$E \% = [(L_{fe} - L_{fo}) / L_{fo}] \cdot 100 = [(\epsilon_e - \epsilon_o) / (1 - \epsilon_e)] \cdot 100 = \text{porcentaje de la expansión del lecho de espesor total } L_{fo}$$

En consecuencia:

$$L_{fe} = L_{fo} \cdot (1 - \epsilon_o) / (1 - \epsilon_e) = \text{espesor del lecho expandido (m)}$$

- Otro procedimiento de cálculo de la pérdida de carga en lechos granulares expandidos, debe ser justificado.

7.2.7. Lavado de los Filtros

a) Finalización de una carrera y necesidad del lavado de una unidad

- El lavado de un filtro debe efectuarse cuando ocurra primeramente cualquiera de las siguientes causas:
 - La pérdida de carga alcanzada durante la carrera de filtración es igual a la máxima admisible en el diseño.

- La calidad del efluente desmejora bruscamente (rotura del manto) o se alcanza gradualmente una turbiedad previamente establecida.

b) Pérdida de carga en lechos filtrantes expandidos

- Durante el lavado de una unidad colmatada (y en la filtración con escurrimiento ascendente), debe calcularse la pérdida de carga en el lecho filtrante fluidificado.
- La pérdida de carga h_L (m) en cada capa de distinto material del lecho filtrante es constante durante su fluidificación. Su cálculo debe ser realizado con la expresión arriba indicada (Numeral 7.2.6).
- También se puede calcular h_L aplicando la fórmula de Ergún (Numeral 7.2.5)
- Como valores indicativos se tienen:
 - $h_{La} = 0,94 L_a$ = pérdida de carga en la capa de arena de espesor L_a , densidad relativa $\delta_s = 2,65$ y porosidad inicial $p_o = 0,43$ (m)
 - $h_{Lant} = 0,24 L_{ant}$ = pérdida de carga en la capa de antracita de espesor L_{ant} , densidad relativa $\delta_s = 1,50$ y porosidad inicial $p_o = 0,48$ (m)
 - Para lechos duales de arena y antracita, se tiene:

$$h_L = h_{La} + h_{Lant} = \text{pérdida de carga total en el lecho dual fluidificado (m)}$$

- La determinación de la pérdida de carga en el lecho expandido debe ser justificada y aprobada por el ENOHSa.

c) Métodos de lavado

Se pueden considerar los siguientes métodos de lavado:

- Lavado solamente con agua en sentido ascendente: en lechos filtrantes de arena y en plantas potabilizadoras pequeñas.
- Lavado auxiliar superficial con cañería fija o con molinetes hidráulicos y lavado simultáneo o no, con agua en sentido ascendente: en lechos de arena convencional y en plantas de operación calificada.
- Lavado auxiliar subsuperficial con cañería fija o con torniquetes hidráulicos y lavado simultáneo o no, con agua en sentido ascendente: en lechos de arena y antracita y en plantas con operación calificada.
- Inyección de aire seguida de lavado con agua en sentido ascendente: en lechos de antracita y arena o arena prácticamente uniforme y en plantas con operación calificada.
- Inyección de aire e introducción simultánea de agua en sentido ascendente: en lechos de antracita y arena o de arena prácticamente uniforme y en plantas con operación calificada.

d) Velocidad ascensional en el lecho fluidificado

- La velocidad ascendente debe ser adoptada en función de la velocidad mínima de fluidificación para un lecho granular expandido.

e) Lavado con agua en sentido ascendente

- El lavado con agua en sentido ascendente debe diseñarse de acuerdo a las siguientes condiciones:
 - La expansión total del lecho filtrante debe estar comprendida entre 20 y 30 % como máximo.
 - Para lavado con agua solamente se puede fijar la velocidad de lavado U_L entre 0,80 y 1,00 m/min. durante un período de 7 a 10 minutos para filtros de velocidad constante y cercano a 15 minutos para los de velocidad decreciente variable.
 - Con la velocidad ascensional de lavado adoptada U_L (m/s), se debe determinar el caudal de agua para lavado $Q_L = A_f \cdot U_L$ (m^3/s), siendo A_f = área filtrante (m^2), las pérdidas de carga en el medio filtrante expandido, sistemas de drenes, capa soporte, conductos, orificios, válvulas y compuertas, además del dimensionamiento de las canaletas colectoras de agua del lavado, fijando su posición en relación a la superficie del manto filtrante en reposo.

f) Lavado auxiliar superficial y subsuperficial

- El lavado auxiliar superficial se puede realizar por medio de conductos fijos con orificios ubicados arriba y afuera del lecho filtrante o a través de molinetes hidráulicos los que deben cumplir con las siguientes exigencias:
 - Deben estar dispuestos para cubrir el máximo del área del filtro, con una presión mínima de 0,3 m.c.a y un caudal unitario de 20 l/min . m^2 .
 - Las boquillas deben estar instaladas cada 0,60 a 0,75 m y dotadas de orificios en un número tal para que la velocidad de pasaje sea de 3 m/s aplicando un caudal superficial de 20 l/min. m^2 .
 - Los caños horizontales espaciados entre 0,80 y 1,00 m deben poseer orificios espaciados 0,20 m como máximo y con las especificaciones de las boquillas.
 - Las boquillas fijas o los caños horizontales deben ubicarse entre 5 a 10 cm sobre la superficie del manto filtrante expandido.
 - Los chorros de agua provenientes de los orificios de los sistemas de las boquillas y caños horizontales, deben tener una inclinación aproximada de 15° respecto a la vertical en el sector inferior.
 - El lavado superficial debe iniciarse cuando el nivel líquido se encuentre próximo a alcanzar el borde de las canaletas colectoras del agua de lavado y debe mantenerse de 2 a 4 minutos. Posteriormente al lavado superficial, debe realizarse un lavado con flujo ascendente para producir una expansión total entre 20 y 30 % en el lecho filtrante y ser mantenido por un período de 1 a 10 minutos.
- El lavado auxiliar subsuperficial debe realizarse con molinetes hidráulicos o conductos provistos de boquillas con tapones de gomas especiales y ranuras que se abren durante el lavado auxiliar.

- El lavado subsuperficial debe efectuarse simultáneamente con el lavado mediante agua de flujo ascendente, a fin de producir una expansión total entre el 20 y 30 % en el lecho filtrante, aplicando un caudal unitario de 20 a 50 l/min . m² y una duración del orden de 10 minutos para filtros de flujo descendente y de 15 minutos para los filtros descendentes.
- El lavado subsuperficial generalmente dura 1 minuto después del inicio del lavado, o sea con el lecho expandido.
- La presión requerida en las boquillas debe variar entre 30 y 70 m.c.a.
- Los dispositivos para el lavado subsuperficial deben estar situados entre 0,20 y 0,50 m debajo de la superficie del lecho filtrante en reposo.

g) Lavado con aire y agua

- El lavado con agua y aire en forma independiente debe realizarse de la siguiente manera:
 - a) Primera fase: disminución del nivel de agua de la unidad hasta 0,20 a 0,30 m sobre la superficie del manto filtrante.
 - b) Segunda fase: inyección de aire durante alrededor de 2 a 5 minutos con un caudal unitario de 10 a 20 l /min . m² .
 - c) Tercera fase: lavado solamente con agua a una velocidad ascensional que produzca una expansión mínima del 5 % de la subcapa con tamaño D₉₀ (mm) del material granular, siendo entre 0,60 a 0,80 m/min, un valor normal.
- El lavado con agua y agua simultáneamente debe realizarse de la siguiente manera:
 - a) Primera fase: inyección de aire con un caudal unitario comprendido entre 4 y 8 l /min . m² y agua con velocidad ascensional de 0,15 a 0,30 m/min. en un período alrededor de 2 a 5 minutos.
 - b) Segunda fase: lavado solamente con agua de velocidad ascensional comprendida entre 0,6 y 1,0 m/min, durante un periodo alrededor de 2 a 5 minutos.

h) Métodos para aplicar el agua de lavado

- El agua para el lavado de los filtros puede provenir de:
 - Un tanque elevado.
 - Un sistema de bombeo.
 - De otros filtros que operan al mismo tiempo en paralelo (autolavado).

h1) Tanque elevado

- El agua se debe impulsar generalmente desde un canal o cámara de agua filtrada que no haya recibido productos químicos, como cloro para desinfección, flúor para fluoración y cal para la corrección del pH.

- Volumen del tanque:
 - Debe calcularse para un tiempo mínimo de lavado t , igual a 10 minutos = 600 segundos y con el caudal correspondiente a la velocidad ascensional adoptada $Q_L = U_L \cdot A_f$ (m^3/s).
 - Se debe tener en cuenta el número de filtros de la batería y otros usos de la planta de potabilización: grifos ubicados en otros sectores (floculación, decantación, casa química y lavado de las instalaciones).
 - El volumen total de un tanque elevado V_T (m^3), debe ser función del volumen de agua requerido en el lavado de una unidad, $V_L = t_L \cdot Q_L$ (m^3) y del número de unidades de la planta de potabilización, n_F . O sea:
 - a) $V_T \geq 1,5 V_L$ (m^3), para $n_F \leq 6$
 - b) $V_T \geq 2,0 V_L$ (m^3), para $n_F \leq 7$
- El tiempo del llenado del tanque debe ser de 60 minutos, mediante equipos de bombeo de accionamiento automático.
- El tanque elevado debe estar situado a una cota que permita efectuar el lavado con el caudal unitario y la velocidad ascensional de diseño.
- La velocidad en la cañería de conducción del agua para el lavado, debe fijarse generalmente entre 2 y 4 m/s.
- La diferencia entre los niveles del fondo del tanque y del coronamiento de las canaletas colectoras del agua del lavado, debe ser como mínimo igual a la sumatoria de pérdidas de carga producidas por el caudal de lavado Q_L en: conductos y accesorios, orificios compuertas, sistema de drenaje, capa soporte, manto filtrante expandido y tirante líquido sobre el coronamiento de las canaletas.

h2) Bombeo directo

- El caudal de bombeo Q_L (m^3/s) debe determinarse en función de la velocidad ascensional U_L (m/s) adoptada y la superficie filtrante A_f (m^2).
- De proyectarse una cámara de aspiración de los equipos de bombeo, el volumen de la misma V_b (m^3), debe tener una capacidad suficiente para el lavado de una unidad y llenarse en 60 minutos como máximo.
- La altura manométrica H_b (m) se debe determinar sumando al desnivel geométrico (diferencia entre el nivel líquido sobre el coronamiento de las canaletas colectoras del agua del lavado y el nivel líquido mínimo operativo en la cámara de aspiración), todas las pérdidas de carga indicadas para calcular la altura del tanque.
- En el caso de un tanque elevado como cámara de aspiración (desnivel geométrico inferior a la suma de las pérdidas de carga), debe estudiarse el uso del mismo conducto para el llenado del tanque y para el bombeo directo.
- En todos los casos debe existir un equipo de reserva para el bombeo directo.
- Para los equipos de bombeo directo se debe presentar la curva característica que permita el ajuste del caudal Q_b del agua de lavado.

- Los equipos de bombeo deben ser instalados siempre ahogados, por seguridad, a fin de impedir por cualquier motivo, la formación de vórtices y de cavitación.
- El accionamiento de los equipos de bombeo directo deben ser efectuados desde la galería de comando o en el lugar de operación de los filtros.
- Debe estudiarse la conveniencia de instalar un medidor de caudales.

h3) Lavado con agua proveniente de los demás filtros de una batería (autolavado).

- Para adoptar el lavado con agua proveniente de las restantes unidades de la batería, deben considerarse las siguientes condiciones:
 - La salida de agua filtrada de las unidades debe ser diseñada de tal manera que cuando una compuerta o válvula de descarga del agua sucia del lavado se abra, parte o el total del caudal filtrado de los restantes filtros de la batería se encamine hacia el filtro a limpiar.
 - Se debe ajustar la cota del umbral horizontal del vertedero general o de todos los vertederos individuales de descarga del agua filtrada de la batería, a fin de establecer el caudal Q_L (m^3/s) requerido en el lavado que provoque la expansión óptima de diseño.
 - Esa operación de ajuste del caudal Q_L requerido en el lavado debe ser efectuada conociendo el caudal total filtrado Q_r (m^3/s) por la batería para tener el caudal excedente a descargar por el o los vertederos.
 - El número de unidades de la batería debe ser función de la velocidad de lavado U_L (m/s) que garantice la expansión óptima $E(\%)$ de diseño, siendo cuatro el número mínimo de filtros admitidos (ver 7.2.10).
 - Se debe proyectar un canal cerrado o conducto que intercomunique a todas las unidades de la batería, con la condición de colocar válvulas o compuertas de bloqueo en cada filtro, en ocasión del mantenimiento o reparación de cualquier unidad de la batería, sin interrumpir el funcionamiento de la restantes.
 - La diferencia entre la cota del o de los vertederos de descarga del agua filtrada y el nivel líquido sobre las canaletas de lavado, debe ser igual a la suma de las pérdidas de carga del escurrimiento del caudal de lavado adoptado Q_L (m^3/s), por las compuertas, falso fondo, sistema de drenaje, capa soporte y manto filtrante expandido.

i) Lavado con aire

- Debe calcularse la velocidad de aplicación del aire U_{ai} ($m^3/m^2 \cdot \min$) en las condiciones normales de presión y temperatura, en función de la velocidad ascensional del agua adoptada U_{aL} ($m^3/m^2 \cdot \min$) y de la velocidad mínima de fluidificación U_{mf} ($m^3/m^2 \cdot \min$), correspondiente al tamaño D_{60} (abertura del tamiz que pasa el 60% en peso) del grano del lecho filtrante, en base a la expresión de Amirtharajah para velocidades del aire entre 0,1 y 1,8 ($m^3/m^2 \cdot \min$):

$$4,84 (U_{ai})^2 + 10^2 (U_a / U_{mf}) = 41,9$$

- Debe calcularse el flujo de aire, en peso, que escurre en orificios y conductos
 $q_{a1} = Q_{ai} \cdot \rho_{ai} \text{ (Kg/s)}$

donde:

Q_{ai} = caudal de aire (m^3/s)

ρ_{ai} = masa específica del aire (Kg/m^3)

- Debe calcularse la potencia del compresor P (Kw), determinando la pérdida de carga (desde el compresor) hasta la salida del aire debajo de las boquillas o bloques especiales, mediante ecuaciones empíricas a utilizar. La transformación de esa presión en pérdida de carga (en m.c.a) se debe efectuar considerando el peso específico del agua a la temperatura de diseño γ , (N/m^3).
- La cañería de conducción del aire debe calcularse con un diámetro constante, fijando una velocidad de escurrimiento entre 15 y 30 m/s, siendo de 10 a 25 m/s en los orificios de pasaje del aire al manto filtrante. La longitud equivalente de las piezas especiales debe ser obtenida de la literatura hidráulica.
- Otro sistema de determinación del lavado con aire debe ser justificado.

7.2.8. Sistema de Recolección y Disposición de Agua Sucia del Lavado

- La recolección del agua de lavado se debe efectuar mediante canaletas que descarguen en un canal frontal, central o lateral, en cuyo extremo se encuentre ubicada la compuerta de descarga del caudal total del lavado.
- Las canaletas colectoras deben dimensionarse de acuerdo a las siguientes condiciones, semejantes a las correspondientes a canaletas o caños con orificios colectores del agua decantada:
 - El fondo de las canaletas colectoras deben estar a una cota superior al nivel del manto filtrante expandido, a una altura que no sea inferior al 15 % de la dimensión del filtro perpendicular a la canaleta.
 - La separación entre los bordes o coronamientos de las canaletas colectoras, debe ser como mínimo de 1 m y de un máximo igual a seis veces la altura libre del agua sobre el nivel del manto filtrante expandido, no debiendo exceder de 3 m.
 - La sección transversal de las canaletas debe ser simétrica en relación al plano longitudinal que pasa por su eje.
 - En el interior de las canaletas colectoras debe preverse pendientes en los sentidos longitudinal y transversal, para evitar el depósito de material.
 - El diseño de las canaletas colectoras de sección rectangular y descarga libre en el canal receptor general, se debe diseñar con el mismo criterio que las colectoras de agua decantada, pudiendo utilizarse la siguiente expresión:
 $Q = 1,3 b_c \cdot h_o^{1,5} = \text{caudal colectado (m}^3/\text{s)}, \text{ donde}$
 b_c = ancho de la canaleta (m)

h_o = altura líquida en el extremo opuesto al de su descarga (m)

- La disposición de las canaletas debe diseñarse para tener una repartición uniforme del caudal Q_L (m^3/s) de lavado en toda la superficie filtrante A_f (m^2).
- Se puede aceptar la descarga directa al canal colector general, cuando la dimensión del filtro perpendicular a ese canal sea igual o menor a 3 m.
- La disposición final del agua sucia del lavado debe cumplir con las normas establecidas para las descargas de establecimientos de agua potable, debiendo en aquellos casos que fuera necesario a criterio del ENOHSA proyectarse el reciclaje de ese volumen del lavado, al igual que la correspondiente al resto de los desagües de la planta potabilizadora, según se indica en el Capítulo 13 de los presentes Criterios de Diseño.

7.2.9. Sistema de Control de la Filtración Rápida

- Cuando el ENOHSA lo considere necesario se debe diseñar un sistema de control de la operación de los filtros para su instalación en los siguientes sitios:
 - Entrada del agua a cada unidad, pudiendo ser agua decantada o coagulada y/o floculada en filtración directa.
 - Salida del agua filtrada de cada unidad.
 - Entrada regulada de agua para el lavado del filtro.
 - Salida regulada de agua sucia del lavado.
 - Entrada del agua auxiliar, superficial o subsuperficial.
 - Entrada de aire para el sistema de lavado agua y aire.
- El proyectista puede además justificar la instalación de mecanismos de control que operen conjuntamente con elementos como son:
 - Compuertas: libre, segmentada y montada en guías.
 - Válvulas: esclusas, mariposa simple o con dispositivo de control del caudal o abertura lenta, de esfera, de diafragma.
 - Vertederos.
- La operación de los filtros debe ser controlada por medio de los siguientes elementos:
 - Dispositivos para medición de las pérdidas de carga.
 - Medidor de caudal para el control de la salida.
 - Determinación de la turbiedad del agua filtrada.
- Se debe diseñar y justificar cuando así lo indique el ENOHSA, el método de control que relacione la velocidad de filtración con la carga hidráulica disponible y con la resistencia total del filtro al flujo, de acuerdo a los dispositivos controladores

adoptados: de niveles y de caudales o con vertederos y/o compuertas, en la entrada y salida del flujo en cada unidad.

- Debe evaluarse la operación y la eficiencia de la remoción de partículas suspendidas y de microorganismos. Entre las acciones a desarrollar se mencionan las siguientes:
 - Precisión de los instrumentos de control de la filtración.
 - Control del lavado.
 - Análisis del medio filtrante: granulometría, determinación de bolas de barro, peso específico, porosidad, dureza y solubilidad en ácido clorhídrico.
- Los comandos de los filtros deben estar situados en un área que permita el control completo de la operación.
- Debe cubrirse el área de los equipos que exigieren cuidados especiales, además de estar comprendida entre paredes de acuerdo a las condiciones climáticas locales.
- Los canales de agua filtrada deben diseñarse en todos los sectores con cubiertas y accesos estancos o sea sanitariamente seguros.
- En canales abiertos debe impedirse la acción de agentes exteriores que pudieren alterar la calidad del agua transportada.

7.2.10. Filtración con Velocidad Declinante

- Es uno de los sistemas de filtración más utilizados en el presente en América Latina, siendo una modificación del filtro con velocidad constante y nivel variable.
- En la filtración con velocidad declinante, la compuerta de entrada del caudal a tratar debe estar siempre ahogada para que los filtros de la batería funcionen como vasos comunicantes.
- La alimentación de los filtros debe hacerse preferiblemente por medio de un canal con dimensiones suficientes para contar con un volumen de almacenamiento y así obtener que todos los filtros de la batería operen con la misma carga hidráulica disponible.
- La carga hidráulica disponible para la filtración H_d (m), debe ser adoptada para que la velocidad máxima $U_{f \max}$ no supere 1,5 veces la velocidad media de la batería de filtros, momento que alcanza el nivel máximo operativo durante los ciclos de la carrera de una unidad y debe lavarse la unidad más sucia retirándola de la operación.

La elaboración del proyecto de una batería de filtración con velocidad declinante debe considerar los siguientes criterios:

- Para evitar presiones negativas el umbral del vertedero de salida individual o general de la batería de filtros, debe estar situado a una cota de algunos centímetros sobre la superficie del manto filtrante.
- Las entradas del agua a tratar y las canaletas colectoras de agua del lavado deben estar siempre sumergidas.

- Se debe colocar una válvula o compuerta en la salida del agua filtrada, para ajustar el flujo y en consecuencia introducir una pérdida de carga requerida en el proceso, a fin de levantar niveles operativos o cuando disminuye el caudal afluente.
 - El canal común de ingreso del agua a tratar en una batería de filtros, debe diseñarse de tal manera que las unidades reciban el mismo caudal.
 - El diseño de la salida de agua tratada debe realizarse considerando el sistema de lavado. Cuando se realiza con el caudal de los restantes filtros de la unidad, se deben utilizar canales y compuertas de pared. Cuando el caudal de lavado proviene de un tanque elevado o bombeo directo, se deben utilizar normalmente cañerías con válvulas. Además como se indicó anteriormente siempre debe diseñarse el vertedero general o individual de agua filtrada, para tener el nivel mínimo deseable dentro de la unidad.
 - En el caso de variaciones del caudal afluente a los filtros, se deben diseñar cañerías individuales en la salida conectadas al canal común de carga filtrada, en donde se debe instalar una válvula mariposa, con accionamiento automático y programado para cada caudal previsto.
- El modelo matemático para el diseño de una batería de filtros con velocidad declinante en cada carrera, debe contemplar la determinación de las velocidades de filtración y las variaciones del nivel de agua en un filtro de la batería (mínimo N_1 , máximo N_2 y durante el lavado de una unidad N_3), tanto durante los ciclos de una carrera como en el período durante el lavado de la unidad más sucia de la batería. Se denomina ciclo al período entre los lavados secuenciales de cada uno de los filtros de la batería compuesta por N_f unidad y carrera al período entre dos lavados sucesivos de un filtro, siendo igual a N_f ciclos.
 - Los proyectistas pueden usar el modelo propuesto por el Di Bernardo (1985-1986), complementado por el modelo desarrollado por Di Bernardo y Machado (1996), que contempla el almacenamiento aguas arriba de los filtros, como herramientas para el diseño de filtros con velocidad declinante.
 - Se deben desarrollar exhaustivamente todos los cálculos necesarios para determinar los niveles dinámicos de operación, máximo y mínimo de un filtro de la batería durante cada ciclo de una carrera y el nivel líquido durante el lavado del filtro más sucio.
 - El proyectista debe además desarrollar todos los cálculos necesarios para determinar los siguientes parámetros:
 - Pérdida de carga disponible: H_d (m).
 - Nivel líquido mínimo en el comienzo de un ciclo de la carrera de un filtro, cuando se ha limpiado el más sucio: $N_{\min} = N_1$ (m).
 - Nivel líquido máximo cuando termina un ciclo de ese filtro, momento en que se debe limpiar el más sucio de la batería: $N_{\max} = N_2$ (m).
 - Nivel líquido de ese filtro cuando se limpia el filtro más sucio de la batería: $N_L = N_3$ (m).

- Incremento del nivel mínimo N_1 cuando se considera el almacenamiento: ΔH_0 (m).
- Velocidad de filtración máxima cuando un filtro comienza una carrera: U_{\max} (m/s).
- Velocidad de filtración mínima cuando ese filtro debe ser lavado al terminar su carrera U_{\min} (m/s).
- Velocidades de filtración intermedias de ese filtro en los siguientes ciclos de su carrera: U (m/s).

7.2.11. Número de Filtros

- En la primera etapa de la construcción de una batería de filtros, con velocidad de filtración constante, se debe proyectar dos unidades como mínimo, siendo deseable por lo menos tres unidades.
- El número mínimo de unidades de una batería de filtros con velocidad declinante y lavado mutuo (el lavado de un filtro se realiza con el caudal aportado por las restantes unidades), debe ser siempre de cuatro filtros, aún en la primera etapa constructiva del proyecto. Ese número mínimo debe incrementarse si la velocidad de lavado requerida exigiera mayor caudal de lavado según 7.2.7 h3).

7.3. FILTRACIÓN DIRECTA ASCENDENTE

7.3.1. Características del Proceso

- Se puede aplicar cuando los valores del agua cruda están dentro de los siguientes límites de calidad:

Características del agua cruda	Valores máximos
• Turbiedad (UT)	
➤ 90 % del tiempo	≤ 25
➤ 95 % del tiempo	≤ 50
➤ 100 % del tiempo	≤ 100
• Color verdadero (UC)	
➤ 90 % del tiempo	≤ 20
➤ 95 % del tiempo	≤ 50
➤ 100 % del tiempo	≤ 100
• DBO_5 (mg/l)	≤ 5
• Coliformes totales CT(NMP/100 ml)	≤ 5000
• Coliformes fecales CF(NMP/100 ml)	≤ 1000
• Carbono orgánico total (mg/l)	≤ 2
• Densidad algal (UPA/ml)	≤ 500

Tabla 6. Valores máximos de la calidad del agua cruda para aplicar Filtración Directa Ascendente

- Para la adopción de la filtración directa ascendente se debe considerar que es un sistema de filtración rápida que se caracteriza por los siguientes aspectos:
 - Se aplica únicamente para agua que ha tenido solamente un proceso previo de coagulación, sin los posteriores de floculación y sedimentación.
 - El escurrimiento es en el sentido ascendente a través del lecho filtrante, o sea ingreso del líquido a filtrar por el fondo y colecta superficial del líquido filtrado.
 - Posibilidad de efectuar lavados intermedios en una carrera de filtración, efectuando descargas periódicas de fondo (a mayor número mejor eficiencia).
 - Se pueden proyectar filtros con velocidad de filtración constante o declinante.
 - Puede ser la primera etapa en un sistema de filtración ascendente-descendente (ver 7.4).
 - El mecanismo de la coagulación del agua a filtrar es por neutralización de cargas, con bajas dosis de coagulante (2 a 20 mg/l de sulfato de aluminio) y pH entre 6,9 y 7,1, valores inferiores a los establecidos para plantas de potabilización convencionales, ya que no se requieren flóculos sedimentables (grandes y pesados) y partículas desestabilizadas para su retención en el lecho filtrante.
 - En la terminación de una carrera de filtración se tiene “ruptura del manto” (aumento brusco de la turbiedad o fluidificación del lecho filtrante).
 - Se obtienen mayores resultados aumentando el espesor del lecho filtrante (menor posibilidad de fluidificación y aumento brusco de la turbiedad).
 - Se obtiene mayor volumen de agua filtrada cuando se la compara con la filtración convencional descendente, ya que la retención de las impurezas se produce en todo el manto filtrante.
 - Posibilidad de inyectar agua de fuente externa en la interfase grava-arena, para evitar la formación de una bolsa de aire durante las descargas de fondo, que al ascender puede causar perturbaciones sensibles en el medio granular con el transporte de impurezas, significando deterioro en la calidad física y bacteriológica del efluente filtrado.
 - Se reduce las dimensiones de la planta potabilizadora proyectada con filtración rápida convencional, al eliminarse los procesos de floculación y sedimentación.
 - Se pueden obtener carreras de filtración más prolongadas colocando una malla en la superficie de la unidad.
 - La inyección conjunta de agua y aire en el lavado al finalizar una carrera, puede ser efectiva para la limpieza del medio granular.
 - Puede utilizarse un pretratamiento sin coagulación química cuando se tengan aguas crudas que excedan los parámetros especificados en la **Tabla 6**.
 - Puede aplicarse filtración directa ascendente con velocidad declinante, cuando el agua cruda presenta valores inferiores a los estipulados en la **Tabla 6** y especialmente respecto a la turbiedad y color.

- Debe proyectarse cámaras de carga individuales para la alimentación de cada filtro cuando se diseñan descargas de fondo intermedias.

7.3.2. Determinación de Parámetros de Diseño y Operación

- En base a las ventajas y desventajas de la aplicación de la filtración directa ascendente, el proyectista debe aplicar generalmente parámetros de diseño obtenidos en determinaciones efectuadas en Laboratorio, con las siguientes alternativas:
 - Filtrando en papel Whatman 40 el agua previamente coagulada, metodología generalmente aceptada para plantas de potabilización con capacidad no mayor a 500 l/s.
 - En filtros de laboratorio.
 - En filtros pilotos con una altura similar a los filtros diseñados, para plantas de mayor capacidad.
- Los principales parámetros que deben ser analizados y someter sus resultados a consideración del ENOHSA para justificar el proceso a adoptar, son los siguientes:
 - Dosis y pH de coagulación (valores básicos para el mecanismo de neutralización de cargas).
 - Polímero más efectivo.
 - Secuencia de aplicación de los coagulantes.
 - Intensidad y tiempo de mezcla.

7.3.3. Parámetros de Diseño y Operación de la Filtración Directa Ascendente

Se debe seleccionar y justificar la adopción de los parámetros de diseño y operación, dentro de los siguientes rangos deducidos de experiencias en plantas con filtración directa ascendente:

Parámetro	Rango de valores	Observaciones
<ul style="list-style-type: none"> Velocidad media de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$) Velocidad mínima de fluidificación (m/min), para evitar fuga de los tamaños menores de los granos Velocidad de aplicación del agua en la interfase en descargas de fondo ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$) Velocidad de aplicación del aire ($\text{l/s} \cdot \text{m}^2$) cuando se lo inyecta conjuntamente con el agua Manto de arena sílicea <ul style="list-style-type: none"> ➤ Espesor (m) ➤ Tamaños límites (mínimo y máximo) de los granos (mm) ➤ Tamaño efectivo D_{10} ➤ Coeficiente de uniformidad Manto soporte <ul style="list-style-type: none"> ➤ Subcapa inferior (de fondo): espesor (m) ➤ Subcapa intermedia: espesor (m) ➤ Subcapa intermedia: espesor (m) ➤ Subcapa intermedia: espesor (m) ➤ Subcapa intermedia: espesor (m) ➤ Subcapa intermedia: espesor (m) ➤ Subcapa superior (superficial): espesor (m) Capa líquida superficial o sobrenadante (m) Mecanismo de coagulación 	<p>120 a 240</p> <p>0,56 a 1,1</p> <p>600 a 1000</p> <p>1,5</p> <p>1,20 a 1,60</p> <p>0,5 a 2,0</p> <p>0,70 a 0,85</p> <p>1,50 a 1,65</p> <p>10,0 a 7,5</p> <p>10,0 a 7,5</p> <p>10,0 a 7,5</p> <p>12,5 a 7,5</p> <p>20,0 a 15,0</p> <p>12,5 a 7,5</p> <p>10,0 a 7,5</p> <p>0,60 a 1,00</p> <p>-</p>	<p>t_L: tiempo de lavado 10 min</p> <p>h_f: pérdida de carga $\leq 2,00 \text{ m}$</p> <p>E: expansión = 20%</p> <p>U_L: velocidad de aplicación del agua = 0,35 m/min</p> <p>Tamaños límites (mm): 31,7 a 25,4</p> <p>Tamaños límites (mm): 25,4 a 15,9</p> <p>Tamaños límites (mm): 15,9 a 9,6</p> <p>Tamaños límites (mm): 9,6 a 4,8</p> <p>Tamaños límites (mm): 4,8 a 2,4</p> <p>Tamaños límites (mm): 9,6 a 4,8</p> <p>Tamaños límites (mm): 15,9 a 9,6</p> <p>Neutralización de cargas</p>

Tabla 7. Parámetros de diseño y operación para la Filtración Directa Ascendente

7.3.4. Estructuras y Sistemas de la Filtración Directa Ascendente

- Sistema drenante

Pueden utilizarse:

- Vigas longitudinales premoldeadas con orificios (V invertida) (sistema californiano).
- Bloques de volumen tronco – piramidal invertido.

- Sistema de ingreso del agua coagulada
 - Un conducto debe conducir el agua coagulada desde el sistema de mezcla rápida hasta el falso fondo del sistema drenante.
 - Cuando se proyectan descargas intermedias durante la carrera de un filtro, debe diseñarse un by-pass en ese conducto de ingreso del agua coagulada a la unidad.
- Sistema de salida superficial del agua filtrada
 - Puede estar compuesto por canaletas o conductos perforados, cámara colectora, vertederos y conductos de descarga.
- Sistema de descarga superficial del agua de lavado
 - En algunos diseños es común con el sistema colector de agua filtrada y con un conducto de salida separado. En otros el conducto con orificios se proyecta a un nivel inferior del correspondiente al de agua filtrada.
- Sistema de aporte del agua de lavado
 - Conducto de ingreso en el falso fondo, con derivación hacia la interfase de la grava y arena para descargas periódicas de fondo, cuando se proyecta, mediante otro conducto perforado.
- Sistema de aire para el lavado

Se proyecta cuando se lo requiera para optimizar el lavado.

7.3.5. Descargas de Fondo Intermedias

Se deben considerar los siguientes aspectos:

- Los picos de turbiedad en el efluente se atenúan efectuando varias descargas de fondo.
- Las carreras de filtración aumentan con el mayor número de descargas.
- El número de descargas de fondo intermedias debe depender esencialmente de las características del agua cruda y de la evolución de la pérdida de carga en el lecho granular (grava y arena).
- Cuando se produzcan vacíos perjudiciales en la grava durante las descargas de fondo intermedias, se debe inyectar agua en un sector cercano a la interfase, arena – grava, mediante una cañería con orificios, con una velocidad de alrededor de $800 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{día}$.
- Los períodos entre descarga de fondo deben programarse de acuerdo a la pérdida de carga total disponible H_F (m) y al número de descargas de fondo calculadas N:

$$\Delta H = H_F / (N + 1) = (H_f + H_o + H_t) / (N + 1) = \text{crecimiento de la pérdida de carga entre dos descargas de fondo consecutivas (m), siendo:}$$

H_f = pérdida de carga por retención de impurezas en una carrera (m)

H_o = pérdida de carga inicial en el lecho de arena y grava (m)

H_t = pérdida de carga turbulenta en el pasaje por drenes, orificios, compuertas y vertederos (m)

- Se debe calcular el número N de descargas de fondo.

7.4. FILTRACIÓN DIRECTA DOBLE: ASCENDENTE – DESCENDENTE

7.4.1. Características del Sistema

- Se lo debe diseñar cuando los parámetros de calidad del agua cruda exceden los máximos especificados en la **Tabla 6** del Numeral 7.3 – Filtración Directa Ascendente, especialmente para obtener turbiedades inferiores a 10 UT.
- Se debe considerar a la filtración ascendente como un pretratamiento de la descendente.
- En la filtración directa doble, las unidades de la filtración ascendente pueden tener mantos filtrantes de arena gruesa o grava.
- Puede aplicarse mayores velocidades de filtración que en la filtración ascendente.
- Se tiene una mayor eficiencia bacteriológica que en la filtración ascendente.
- Debe estudiarse la posibilidad de obviar la coagulación proyectando un pretratamiento para reducir la turbiedad y eventualmente el color.

7.4.2. Características de la Filtración directa Ascendente en la Filtración Directa Doble

- Se la considera como pretratamiento de la filtración descendente en la filtración directa doble.
- Las características del agua cruda a tratar son similares a las de la filtración directa ascendente, respecto a la turbiedad (UT) y color aparente (UC).
- El manto filtrante puede ser de arena gruesa o grava.
- A continuación se desarrollan los valores máximos de las características del agua cruda, determinados en plantas existentes con filtración directa ascendente en la filtración doble. Esos valores corresponden a experiencias en donde se aplica el sistema y a conclusiones de investigaciones recopiladas hasta el presente.

Características del agua cruda	Manto de arena gruesa	Manto de grava
• Turbiedad (UT)		
➤ 90 % del tiempo	50	100
➤ 95 % del tiempo	100	200
➤ 100 % del tiempo	200	250
• Color verdadero (UC)		
➤ 90 % del tiempo	50	100
➤ 95 % del tiempo	100	200
➤ 100 % del tiempo	200	250
• DBO ₅ (mg/l)	10	10
• Coliformes totales (mg/l)	20000	20000
• Coliformes fecales (mg/l)	5000	5000
• Carbono orgánico total (mg/l)	5	5
• Densidad algal (UPA/ml)	2500	5000

Tabla 8. Valores máximos de parámetros de calidad del agua cruda para la Filtración Ascendente en la Doble Filtración Directa (Ascendente-Descendente)

- Los parámetros de operación de plantas de potabilización que aplican el sistema, se indican en la siguiente tabla:

Parámetros de diseño y operación	Manto de arena gruesa	Manto de grava
• Velocidad de filtración en el filtro ascendente ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	120 a 240	24 a 144
• Velocidad de filtración en el filtro descendente ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	200 a 400	200 a 400
• Velocidad ascensional del lavado (m/min)	$\leq 1,00$	$\leq 1,00$
• Tiempo de lavado (min)	10	10
• Número de descargas de fondo en el filtro ascendente durante la carrera de filtración	≤ 4	≤ 4
• Velocidad de aplicación del agua en la interfase del filtro ascendente ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	600 a 1000	600 a 1000
• Mecanismo de coagulación	Neutralización de carga	Neutralización de carga

Tabla 9. Rango de valores de los parámetros de diseño para la Filtración Ascendente en la Doble Filtración Directa

7.4.3. Características de la Filtración Descendente en la Filtración Directa Doble

- Parámetros de diseño

También para la Filtración Descendente los valores de los parámetros de Diseño y Operación que se deben aplicar, son el resultado de experiencias y estudios efectuados hasta el presente.

Parámetros de diseño y operación	Rango de valores
• Velocidad de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	270 a 285
• Velocidad de lavado (m/min)	0,60 a 1,00
• Tiempo de lavado con agua solamente (min)	10
• Espesor del manto de arena (m)	0,60 a 0,80
• Características granulométricas de la arena	Semejante a la filtración rápida convencional
• Espesor (m) y tamaño de la capa soporte	
➤ Subcapa superior	0,05 m – 4,8 a 2,0 mm
➤ Subcapa intermedia	0,05 – 7,9 a 4,8 mm
➤ Subcapa intermedia	0,10 – 15,8 a 7,9 mm
➤ Subcapa intermedia	0,15 – 25,4 a 15,8
➤ Subcapa inferior	0,15 – 38,0 a 25,4 mm

Tabla 10. Rango de valores de los parámetros de diseño de la Filtración Descendente en la Filtración Directa Doble

7.5. FILTRACIÓN DIRECTA DESCENDENTE

7.5.1. Características del Proceso

- Generalmente se debe aplicar Filtración Directa Descendente cuando se dispone de un agua a tratar con valores relativamente bajos de la turbiedad y color, ya que es más eficiente técnica y económicamente que el tratamiento convencional con filtración rápida y pretratamiento con coagulación, floculación y sedimentación.
- El proceso de filtración directa descendente debe estar basado en una coagulación por neutralización de cargas y en la eliminación de la sedimentación, como pretratamiento previo a la filtración rápida.
- La floculación puede no ser utilizada, dependiendo de la calidad del agua cruda, del tamaño de las partículas de las características del medio filtrante y de la velocidad de filtración. En consecuencia se tiene la filtración Directa con Floculación y la Filtración Directa sin Floculación.
- Para tener en cuenta la posibilidad de cambios en las características del agua cruda y del proceso, se deben proyectar “by pass” entre los procesos de coagulación, floculación y filtración.
- En la Filtración Directa Descendente, la velocidad de filtración debe ser constante.
- Características del agua cruda a tratar:

En la **Tabla 11**, se desarrollan las frecuencias de los valores límites de las características del agua cruda a tratar, también consecuencia de experiencias y estudios realizados sobre este sistema de filtración y que deben considerarse para aplicar Filtración Directa Descendente.

Características del agua cruda	Frecuencia del valor límite máximo	
	95 %	100 %
• Turbiedad (UT)	< 25	< 100
• Color verdadero (UC)	< 25	< 50
• Carbono orgánico total (mg/l)	-	< 5
• Sólidos suspendidos totales (mg/l)	< 50	< 150
• Concentración de algas (UPA/ml)	< 500	< 1000
• Coliformes fecales	< 100	< 500
• Coliformes totales	< 500	< 2500
• Hierro total (mg/l)	< 5	< 10
• Manganeseo total (mg/l)	< 1	< 2
• Turbiedad para color verdadero inferior a 10 UC	-	200
• Color verdadero para turbiedad inferior a 5 UT	-	100

Tabla 11. Frecuencia de los valores límites máximos que caracterizan al agua cruda para el empleo de la Filtración Directa Descendente

- Características de los mantos de arena, antracita y granate, que deben considerarse en la Filtración Directa Descendente

Material filtrante	Rango de valores
• Manto de arena sola prácticamente uniforme	
➤ Tamaño de los granos (mm)	0,84 a 1,68
➤ Tamaño efectivo (mm)	1,00 a 1,30
➤ Coeficiente de uniformidad	< 1,20
➤ Espesor del manto (m)	1,00 a 1,50
• Manto únicamente de antracita	
➤ Tamaño de los granos (mm)	1,00 a 2,40
➤ Tamaño efectivo (mm)	1,20 a 1,50
➤ Coeficiente de uniformidad	< 1,3
➤ Espesor del manto	1,20 a 1,80
• Manto de dos o tres capas	
➤ Antracita	
❖ Tamaño de los granos (mm)	0,71 a 2,40
❖ Tamaño efectivo (mm)	1,0 a 1,3
❖ Coeficiente de uniformidad	< 1,5
❖ Espesor de la capa (m)	0,50 a 0,80
➤ Arena	
❖ Tamaño de los granos (mm)	0,42 a 2,00
❖ Tamaño efectivo (mm)	0,5 a 0,6
❖ Coeficiente de uniformidad	< 1,5
❖ Espesor de la capa (m)	0,20 a 0,40
➤ Granate	
❖ Tamaño de los granos (mm)	0,21 a 0,59
❖ Tamaño efectivo (mm)	0,25 a 0,35
❖ Coeficiente de uniformidad	< 1,5
❖ Espesor de la capa (m)	0,10 a 0,15

Tabla 12. Rango de valores del material filtrante en Filtración Directa Descendente

- Parámetros de diseño

A continuación se desarrollan los rangos de valores de los parámetros de diseño que deben considerarse en la filtración directa Descendente, según experiencias:

Parámetros de diseño	Rango de valores
• Velocidad de filtración constante o variable ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	≤ 600
• Carga hidráulica disponible (medio filtrante limpio y retención de impurezas) en una carrera mínima de 12 h (m)	2,00 a 2,50
• Aplicación de polímero sintético no iónico para turbiedad mayor a 10 UT	0,2 mg/l
• Tiempo de floculación (min)	5 a 20
• Gradiente de velocidad (s^{-1})	50 a 150
• Mecanismo de coagulación	Neutralización de cargas

Tabla 13. Rango de valores de parámetros de diseños y operación en la Filtración Directa Descendente

7.6. FILTRACIÓN LENTA

7.6.1. Características del Proceso

Para adoptar la Filtración Lenta se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Disponer de agua cruda cuya calidad normal tenga bajos contenidos de turbiedad, color, coliformes fecales y densidad algal, según se indica en el Numeral 7.6.3.
- Bajas velocidades de filtración (menores a $6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$).
- Se considera el mejor proceso de filtración en lo relativo a la eficiencia bacteriológica.

7.6.2. Selección del Proceso de Filtración Lenta

- Para seleccionar el proceso debe tenerse en cuenta entre otras consideraciones, además de la calidad del agua cruda, el riesgo sanitario que representa la fuente y la capacidad económica de los futuros usuarios.
- Cuando en ciertas épocas del año varía la calidad normal del agua, se debe efectuar ensayos de sedimentabilidad y filtrabilidad. Si en esas pruebas se superan los valores límites máximos establecidos para filtración lenta de arena sola, se debe adicionar un pretratamiento, según se establece en la **Tabla 14**.
- Excepcionalmente cuando no se pueda aplicar pretratamiento por razones técnicas y económicas, se tiene la alternativa del eventual uso en caso de emergencias, de un pretratamiento compuesto por coagulación y por una floculación y sedimentación incluidas en una sola unidad.

- En todos los casos se debe proyectar desinfección final y reserva del agua filtrada.

7.6.3. Límites de Calidad del Agua Cruda

En la **Tabla 14** se especifican los límites de la calidad que se deben considerar para diseñar filtración lenta de arena solamente o con pretratamiento previo a la filtración lenta de arena. Ese pretratamiento puede ser presedimentación en estanques, embalses, reservorios naturales, sedimentación preliminar, filtración gruesa de grava o filtración dinámica de grava.

Parámetros básicos del agua cruda	Valores máximos para tecnologías sin coagulación química				
	Filtración lenta solamente	Filtración lenta con mantas sintéticas	Filtración gruesa + filtración lenta	Filtración gruesa + filtración lenta con mantas sintéticas	Filtración dinámica de grava + filtración gruesa + filtración lenta con mantas sintéticas
	FL solamente	FL con MS	FG + FL	FG + FL con MS	FD + FG + FL con MS
Turbiedad (UT)	10	10	25	50	100
Color verdadero (ua)	5	5	5	5	10
DBO ₅ (mg/L)	5	5	10	10	10
Coliformes totales (NMP/100 ml)	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	500	500	1.000	3.000	5.000
Densidad algal (UPA/ml)	250	250	1.000	1.000	2.000
Oxígeno disuelto (mg/L)	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4	≥ 4
Hierro total (mg/L)	1	3	3	3	3
Manganeso (mg/L)	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5
Sustancia potencialmente perjudicada a la salud pública	Corresponden a valores máximos establecidos en Normas de Potabilización				

Fuente: "Métodos y Técnicas de Tratamiento de Agua" de Luis Di Bernardo (Publicación patrocinada por ABES-Brasil-1993).

Referencias:

- FD: filtración dinámica con manto de grava.
- FG: filtración gruesa con manto de grava o arena gruesa.
- FL: filtración lenta de arena, con o sin manta sintética sobre la superficie filtrante (MS).
- D: desinfección del efluente filtrado que debe aplicarse en todos los casos.
- N: neutralización del pH cuando los valores superen o sean inferiores a los límites establecidos en Normas de Potabilización.

Tabla 14. Tecnologías aplicadas para tratamiento sin coagulación química, de acuerdo a los parámetros básicos máximos del agua cruda

7.6.4. Criterios de Diseño y Operación

Se debe efectuar ensayos de Laboratorio para determinar los parámetros óptimos para el diseño y operación de los filtros lentos con el agua cruda, especialmente de épocas normales y eventuales cuando cambia la calidad de la misma.

Caso contrario se puede presentar al ENOHSA la justificación de criterios de diseño y operación basados en los indicados en la tabla siguiente, resultado de muchas experiencias realizadas hasta el presente.

Parámetro de diseño y operación	Rango de valores	Observación
<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad media de filtración ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$) <ul style="list-style-type: none"> ➤ Únicamente filtración lenta 2,4 a 4,8 ➤ Sedimentación preliminar o filtración gruesa en grava más filtración lenta 3,6 a 7,2 ➤ Sedimentación preliminar o filtración gruesa, más mantas sintéticas, más filtración lenta 7,2 a 12,0 ➤ Solamente filtración de dos unidades en paralelo, operando solamente una 4,8 • Número de filtros de una batería <ul style="list-style-type: none"> ➤ Para superficie $A_f \leq 50 \text{ m}^2$ ≥ 1 ➤ Para superficie $A_f = 50$ a 100 m^2 ≥ 2 ➤ Para superficie $A_f = 100$ a 250 m^2 ≥ 3 ➤ Para superficie $A_f = 250$ a 500 m^2 ≥ 4 ➤ Para superficie $A_f = 500$ a 1000 m^2 ≥ 5 ➤ Para superficie $A_f \geq 1000 \text{ m}^2$ ≥ 10 • Manto de arena silíceo <ul style="list-style-type: none"> ➤ Espesor e (m) 0,80 a 1,00 ➤ Tamaño efectivo D10 (mm) 0,10 a 0,40 ➤ Coeficiente de uniformidad C_u ≤ 3 ➤ Densidad relativa de los granos 2,60 a 2,70 • Manto de grava: subcapas <ul style="list-style-type: none"> ➤ Superior (superficial) <ul style="list-style-type: none"> ❖ Espesor e (m) 0,05 ❖ Tamaño máximo (mm) 1,5 a 4,0 ❖ Tamaño mínimo (mm) 0,5 a 2,0 ➤ Intermedia <ul style="list-style-type: none"> ❖ Espesor e (m) 0,05 ❖ Tamaño máximo (mm) 2,5 a 2,6 ❖ Tamaño mínimo (mm) 4,0 a 15,0 ➤ Inferior <ul style="list-style-type: none"> ❖ Espesor e (m) 0,10 ❖ Tamaño máximo (mm) 10,0 a 40,0 ❖ Tamaño mínimo (mm) 5,0 a 20,0 ➤ Densidad de la grava 2,60 a 2,70 ➤ Altura líquida o sobrenadante (m) $\leq 2,00$ 		<p>Valores máximos</p> <p>Limpieza manual</p> <p>Limpieza manual</p> <p>Limpieza manual</p> <p>Limpieza manual o mecanizada</p> <p>Limpieza manual o mecanizada</p> <p>Según aspectos económicos</p> <p>Capa activa $e' > 0,40$</p> <p>0,10 para claras y 0,40 para aguas turbias</p> <p>En la puesta en marcha</p>

Tabla 15. Rango de valores de los parámetros de diseño y operación de la Filtración Lenta de Arena

7.6.5. Estructuras de la Filtración Lenta

- Sistema de drenaje del agua filtrada
 - Debe justificarse la adopción del sistema de drenaje en función de la velocidad media de filtración U_f ($m^3/m^2 \cdot día$).
 - De acuerdo a experiencias las alternativas más eficientes resultan las de ladrillos comunes colocados para formar canales colectores inferiormente y una capa superior con juntas abiertas para sostener a los mantos de arena, siendo la restante de conductos perforados y juntas abiertas.

- Ingreso del líquido a filtrar

Debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- Asegurar una repartición uniforme en todas las unidades de una batería de filtros, regulando el caudal a filtrar.
- Uniformar el flujo de ingreso a la unidad.
- Reducir la energía hidráulica del chorro sobre la superficie del lecho filtrante.
- Drenar el agua del sobrenadante cuando se limpia.
- Graduar el nivel líquido del sobrenadante.

- Salida del líquido filtrado

- Debe cumplir con las siguientes funciones:
 - ❖ Mantener constante el caudal filtrado Q_f (m^3/d) y en consecuencia la velocidad media de filtración U_f ($m^3/m^2 \cdot día$).
 - ❖ Evitar presiones negativas dentro del lecho de arena.
 - ❖ Permitir el llenado inferior de un filtro puesto fuera de servicio, con el flujo de las restantes unidades de la batería.
 - ❖ Regular y bloquear la salida del agua filtrada.
 - ❖ Posibilitar la medición del caudal filtrado.

- Diseño del sistema de salida

- Mientras el sistema de ingreso debe regular el caudal a filtrar, el sistema de salida del efluente filtrado debe ser diseñado para mantener constante la velocidad de filtración de diseño.
- Para ello debe mantenerse constante la carga hidráulica disponible sobre el lecho filtrante.
- Esa situación se logra permitiendo una variación de niveles líquidos operativos, ya sea en el sobrenadante del filtro o en la cámara colectora del líquido filtrado, (donde se instala el elemento de control), según sea el sistema adoptado.
- Esa variación de niveles líquidos operativos debe acompañar al correspondiente incremento de las pérdidas de carga producidas por el

escurrimiento del líquido durante una carrera de filtración, a través del lecho filtrante, capa soporte, sistema drenante, conductos, orificios y vertederos de descarga del efluente filtrado (cuando se la diseña).

- En ambos casos los niveles líquidos de esa variación (máximo y mínimo), deben ser determinados especialmente por razones económicas y constructivas.
- Los sistemas de ingreso y salida deben ser adoptados de acuerdo a experiencias positivas y ser aceptados por ENOHSA.

7.6.6. Especificaciones Generales

- El lecho filtrante debe estar constituido por granos de arena silícea redondeados y duros, libres de arcilla y materia orgánica al igual que la grava.
- La arena debe contener un máximo de 2 % de carbonato de calcio y magnesio.
- Debe garantizarse que antes de su colocación en la caja del filtro, la arena y la grava estén libres de limo y materia orgánica, debiendo ser lavadas de no cumplir con este requisito.
- Debe especificarse el sistema de limpieza de la subcapa colmatada del manto filtrante.

7.7. FILTROS DINÁMICOS DE ARENA

7.7.1. Características

- Es una variante de los filtros lentos convencionales.
- La limpieza se realiza con el flujo horizontal de autolavado.
- Se requiere aproximadamente mayor caudal afluente en cada unidad.
- El tirante líquido sobre el lecho de arena es pequeño ($h \leq 2$ cm).
- Menor espesor del lecho filtrante.
- El sistema ha demostrado ser eficiente en la reducción bacteriana.

7.7.2. Característica del Agua Cruda

Para utilización de los filtros dinámicos de arena se deben considerar los siguientes valores de la calidad requerida del agua cruda:

- Turbiedad
 - Durante la mayor parte del año: ≤ 50 UT.

- En períodos de corta duración (no mayor a 48 h) con bruscos aumentos de la turbiedad: ≤ 150 UT.
- Color aparente
 - Durante la mayor parte del año: ≤ 30 UC.
 - En períodos de corta duración (no mayor a 48 h) con bruscos aumentos del color aparente: ≤ 50 UC.
- Coliformes fecales
 - Valor máximo: 10^4 NMP/100 ml.

7.7.3. Velocidad Media de Filtración

- Para el diseño y operación pueden adoptarse, los siguientes valores de la velocidad media de filtración U_f (m^3/m^2 , día o m/h):
 - Para turbiedad comprendida entre 10 y 50 UT:

$$U_f = 2,4 \text{ m}^3/m^2 \cdot \text{día} \text{ (0,10 m/h)} \text{ a } 4,8 \text{ m}^3/m^2 \cdot \text{día} \text{ (0,20 m/h)}, \text{ siendo el valor menor para aguas con mayor turbiedad y viceversa}$$
 - Para aguas claras, con turbiedad < 10 UT: $U_f = 7,2 \text{ m}^3/m^2 \cdot \text{día} \text{ (0,30 m/h)}$.

7.7.4. Caudal de Ingreso al Filtro

- Caudal total de ingreso a cada unidad: $Q = 10 Q_f$, siendo:

$$Q_f = \text{caudal a filtrar en la unidad (m}^3/\text{d ó m}^3/\text{s)}$$

$$Q_L = Q - Q_f = \text{caudal del escurrimiento sobre el lecho de arena, denominado de autolimpieza (m}^3/\text{d ó m}^3/\text{s)}$$
- Otro valor de Q en relación a Q_f debe ser justificado de acuerdo a experiencias valederas.

7.7.5. Dimensionamiento

- $A_f = Q_f / U_f = \text{área rectangular del lecho filtrante (m}^2\text{)}$
- $A_f = L_f / B_f = r \cdot B_f \cdot B_f = r \cdot B_f^2 = \text{área filtrante, siendo:}$
 - $r = L_f / B_f = 5 = \text{relación entre la longitud } L_f \text{ y el ancho } B_f$
- $B_f = (A_f / r)^{1/2} = \text{ancho de la superficie filtrante, que debe justificarse si es mayor de 2,40 m o menor de 1,20 m}$
- $L_f = A_f / B_f = r \cdot B_f = \text{longitud del lecho filtrante (m)}$
- $H = 0,96 \text{ a } 1,65 \text{ m} = \text{altura total de la caja filtrante}$

- Número de unidades de una batería: debe aplicarse el criterio adoptado para los filtros lentos de arena, siendo su número igual o mayor a 2.

7.7.6. Lecho Filtrante de Arena

H_a = 0,50 a 0,70 m = espesor de la capa de arena filtrante. Se deben justificar otros valores.

D_{10} = 0,25 a 0,35 mm = tamaño efectivo de la arena, con tamaños límites entre 0,2 y 1,10 mm. Los tamaños menores deben corresponder a los 0,15 mm superficiales, siendo el coeficiente de uniformidad máximo $C_U = 3$

7.7.7. Manto Sostén

Debe diseñarse de igual forma que para los filtros lentos convencionales y depende del sistema de drenaje adoptado.

7.7.8. Sistema de Drenaje

Debe ser similar al de los filtros lentos convencionales, generalmente de ladrillos comunes formando canales longitudinales.

7.7.9. Regulación de la Velocidad de Filtración

- Debe proyectarse en la cámara colectora de agua filtrada, un dispositivo hidráulico para regular el pasaje del caudal efluente, de tal manera que se mantenga constante el tirante líquido del sobrenadante y del escurrimiento superficial de autolimpieza, evitando también presiones negativas en el lecho filtrante.
- Puede aplicarse el sistema telescópico compuesto por un caño fijo vertical dentro del cual se desliza el caño suspendido mediante un elemento flotante. Otro dispositivo debe ser justificado ante el ENOHSA.
- El dispositivo debe tener las siguientes funciones:
 - Mantener constante el caudal filtrado del efluente, regulando la carga hidráulica sobre el caño móvil.
 - Acompañar las variaciones del nivel líquido en la cámara colectora de agua filtrada dentro de dos límites. El máximo cuando se termina la carrera por colmatación del lecho filtrante y el mínimo cuando comienza la carrera con el manto filtrante limpio.
 - La diferencia de niveles líquidos debe corresponder a las pérdidas de carga durante una carrera, en el lecho de arena, capa soporte, sistema drenante, orificios, conductos y la referida carga hidráulica sobre el caño móvil.
 - El nivel líquido mínimo de la cámara colectora debe ser superior al de la superficie del lecho filtrante, para evitar presiones negativas en el mismo.

7.7.10. Sistema de Autolimpieza de una Unidad

- El flujo de autolimpieza sobre la superficie filtrada, debe calcularse como escurrimiento en un canal con las mismas dimensiones de la caja filtrante de ancho B_f (m) y longitud L_f (m), entre el ingreso del caudal total Q (m^3/s) hasta el vertedero de descarga del caudal sobrante $Q_d = Q - Q_f \cong 9 Q_f$ (m^3/s).
- La velocidad de autolimpieza debe calcularse aplicando la expresión:
 $U_{au} = Q_e / (h \cdot B_f)$ (m/s), siendo:

$Q_e = (Q - Q_f) / 2 \cong 9,5 Q_f$ = caudal medio superficial de autolimpieza (m^3/s). Debe oscilar entre 0,20 y 0,30 m para evitar arrastres del lecho de arena.

B_f = ancho del canal de autolimpieza (m)

h = tirante líquido del escurrimiento superficial que deberá variar entre 0,8 y 2,0 cm.

- La pendiente del fondo del canal de autolimpieza o de la superficie filtrante, debe calcularse con la siguiente expresión:

$i = (n \cdot U_e / R^{2/3})^2 = (n \cdot U_e / h^{2/3})^2 \cong (0,02 U_e / h^{2/3})^2$ = pendiente de autolimpieza, (mm) (generalmente del 6 ‰ para el caudal $Q = 10 Q_f$), donde:

$n \cong 0,02$ = coeficiente de Manning para lecho de arena.

R = radio hidráulico del flujo $\cong h$

U_e = caudal de autolimpieza (m/s)

$\Delta h = i \cdot L_f$ = desnivel del canal de autolimpieza (m)

7.7.11. Sistema de Ingreso a Cada Unidad de una Batería

- Se debe diseñar para tener repartición uniforme y evitar depósitos o erosiones en las estructuras diseñadas, especialmente en la zona inicial del lecho filtrante o sea en el comienzo del canal de autolimpieza.

7.7.12. Operación y Mantenimiento

- Debe indicarse el método de limpieza de cada unidad colmatada, que debe ocurrir cuando se tenga el nivel máximo $N_{m\acute{a}x}$ (m) en la cámara colectora de agua filtrada. Generalmente el método más aplicado debe ser el de rastrillado superficial con el flujo del caudal de autolimpieza Q_e (m^3/s), mientras la filtración queda bloqueada.

7.7.13. Generalidades

Todos los parámetros de diseño, operación y mantenimiento de sistemas con filtros dinámicos, deben ser justificados y aprobados por el ENOHSA.

7.8. FILTRACIÓN A PRESIÓN

7.8.1. Características del Proceso

- Puede proyectarse la filtración rápida directa en unidades a presión, con flujo descendente en lechos uniformes o estratificados, duales o triples.
- Los filtros a presión son filtros rápidos donde el proceso se realiza dentro de recipientes cerrados, generalmente contruidos con chapa de acero.
- Esos recipientes reciben el agua floculada a presión y suministran agua filtrada también a presión.

7.8.2. Diseño Adoptado

- En todos los casos se debe justificar la adopción de filtración a presión como alternativa a la filtración a gravedad.
- Se debe justificar además, en detalle, la adopción del tipo de filtro de los parámetros de diseño y de las características constructivas y operativas, las que deben ser aprobadas por ENOHSA.

7.8.3. Características Aconsejadas Para el Sistema de Filtros a Presión

- Posición: verticales u horizontales.
- Flujo: descendente.
- Presión de trabajo: 3 Kg/cm².
- Diámetro máximo: 3,00 m.
- Altura máxima del vertical: 2,50 m.
- Longitud máxima del horizontal: 8,00 m.
- Colector inferior (tipos):
 - Colector y laterales.
 - Colector, laterales y toberas.
 - Falso fondo y toberas.

- Lavado
 - Con agua solamente: $36 \text{ a } 60 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$.
 - Con agua y aire: $40 \text{ a } 50 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ para el aire y $20 \text{ a } 40 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ para el agua
 - Pérdida de carga: 4,50 m.c.a.
- Altura del lecho filtrante
 - Simple: verticales entre 0,60 y 0,80 m de arena y horizontales entre 0,30 y 0,80 m.
 - Dual: (70% antracita y 30% arena): verticales entre 0,60 y 0,90 m y horizontales entre 0,30 y 0,80 m.
 - Triple: (60% antracita, 25% arena y 15% granate): verticales entre 0,60 y 0,90 m y horizontales entre 0,60 y 0,80 m.
- Altura del manto soporte (según sea el sistema colector inferior):
 - Grava estratificada: verticales entre 0,30 y 0,40 m y horizontales entre 0,40 y 0,80 m.
 - Grava uniforme: 0,10 a 0,20 m.

7.8.4. Presiones Manométricas de Diseño y Operativas

- La presión de lavado debe estar comprendida en un rango de 0,8 a 1,2 Kg/cm².

7.8.5. Recipientes

- Deben ajustarse a la norma IRAM 1-4 (1993) o las que se aprueben en el futuro, para los siguientes aspectos:
 - Cálculo del proyecto y su fabricación.
 - Ubicación de las instalaciones.
 - Preparación de las superficies de los recipientes.
 - Revestimientos exteriores e interiores de los recipientes.
- Debe diseñarse todos los elementos del exterior de los recipientes de los filtros a presión: materiales, conductos medidores (presión y caudales), válvulas, conexiones y todo elemento requerido en la operación del sistema.

7.8.6. Elementos Interiores de los Filtros

La distribución del agua a filtrar la recolección del agua filtrada y la impulsión y recolección del agua de lavado, deben ser uniformes y producir reducidas pérdidas de carga.

7.8.7. Instrumentación Requerida

Para la operación normal de una planta de potabilización con filtración a presión, el proyecto debe prever el equipamiento necesario para controlar los siguientes parámetros:

- Temperatura del agua.
- Presión.
- Caudal.
- pH.
- Turbiedad.
- Indicadores.
- Registros.
- Control y comando.
- Automatización: pérdida de carga, turbiedad, carreras de filtración.

7.8.8. Datos Garantizados

En caso de adquirirse un filtro a presión se debe exigir la presentación y posterior cumplimiento de, por lo menos, los siguientes datos garantizados:

1). De proceso

- Calidad del agua tratada:
 - Turbiedad (UNT).
 - pH.
 - Composición química.
- Productos químicos
 - Coagulante: (dosis, tipo).
 - Ayuda de coagulación (polielectrolito, dosis, tipo).
 - Alcalinizante (dosis, tipo).
- Caudales
 - Caudal neto producido (m³/día).
 - Caudal medio (m³/día).
 - Caudal máximo (m³/día).
 - Presión de diseño y presión de trabajo (Kg/cm²).

- Tipo de lavado (agua solamente, aire – agua, aire y agua).
- Caudal y presión del agua de lavado (m^3/h ; Kg/cm^2).
- Caudal y presión de aire (m^3/h ; Kg/cm^2).
- Duración de lavado (según tipo – minutos).
- Volumen de agua de lavado ($\text{m}^3/\text{día}$).
- Duración de la carrera (en función del agua a tratar).
 - Para $T = 50 \text{ UNT}$ $D_c = \dots\dots\dots$ (horas)
 - Para $T = 30 \text{ UNT}$ $D_c = \dots\dots\dots$ (horas)
 - Para $T = 20 \text{ UNT}$ $D_c = \dots\dots\dots$ (horas)
 - Para $T < 20 \text{ UNT}$ $D_c = \dots\dots\dots$ (horas)

2) De materiales

- Electrobombas
 - Tipo, modelo, marca.
 - Características constructivas.
 - Curvas de funcionamiento.
 - Motor, modelo, marca, potencia
- Filtros
 - Tipo (horizontal o vertical).
 - Diámetro (m).
 - Largo (m).
 - Superficie filtrante (m^2).
 - Presión de diseño (kg/cm^2).
 - Material constructivo:
 - ❖ Cilindro y casquetes; espesores (mm).
 - ❖ Revestimientos, interiores y exteriores.
 - Material filtrante:
 - ❖ Composición (granulometría; TE; CU).
 - Material soporte.
 - ❖ Composición (granulometría).
 - Internos, material constructivo; tipo.
 - Válvulas: tipo, marca, diámetro.

- Cañerías del filtro: material, tipo, diámetro.
- Instrumentos
 - Caudalímetros (tipo, marca, modelo).
 - pH metros (tipo, marca, modelo).
 - Turbidímetros (tipo, marca, modelo).
 - Analizador de cloro residual (tipo, marca, modelo).
 - Otros: (describir).
- Tablero eléctrico
 - Gabinete.
 - Interiores.
- Cañerías del sistema
 - Materiales, tipo, diámetros.

3). De operación

- Consumo de productos químicos (Kg/m^3 de Agua Tratada).
- Consumo de energía eléctrica (Kwh/m^3 de Agua Tratada).
- Personal.
 - Profesionales (horas/m^3 de Agua Tratada).
 - Técnicos (horas/m^3 de Agua Tratada).
 - Operarios (horas/m^3 de Agua Tratada).
- Repuestos necesarios para un año de operación.

8. LABORATORIO

- Cuando el sistema de potabilización abastezca a ciudades de gran población, la tarea de control de calidad del agua tratada y de la calidad del agua en la red puede estar a cargo de un Laboratorio Central. En estos casos, el Laboratorio de Planta se puede dedicar exclusivamente al control de la operación de los procesos de potabilización, mientras que el control de la calidad del agua final y del agua tratada en la red puede estar a cargo del Laboratorio Central.
- El Laboratorio de la Planta de Potabilización debe tener como mínimo las siguientes funciones:
 - Medir y registrar las características del agua a tratar y sus variaciones.
 - Medir, registrar y controlar las características del agua tratada que entra al sistema de distribución, verificando que cumpla con las normas establecidas.
 - Medir, registrar y controlar la calidad del agua en el sistema de distribución.
 - Medir, registrar y controlar la eficiencia de cada proceso clave del tratamiento, como por ejemplo: coagulación, floculación, sedimentación, filtración, ablandamiento, eliminación de hierro y manganés, desinfección, neutralización del pH, control de olores y sabores, entre otros, verificando que su operación se efectúe según lo previsto.
- La capacidad analítica del Laboratorio de Planta depende principalmente de la complejidad de los procesos a controlar y del tamaño de la Planta de Potabilización. Por lo general, es conveniente dividir al Laboratorio en zonas dedicadas a objetivos específicos, por ejemplo: recepción de muestras, análisis químicos generales, microbiología, microscopía, sala de balanzas, sector de análisis instrumentales orgánicos, sector de análisis instrumentales inorgánicos y otras que se pueden considerar adecuadas. Los lugares donde se almacenen las drogas y las muestras deben estar a resguardo de cualquier tipo de contaminación.
- El Laboratorio debe contar asimismo, con espacio suficiente para guardar las drogas, el material de vidrio y el equipamiento portátil así como mesadas suficientes para los instrumentos y áreas para el lavado del material. De este modo, el Laboratorio de Planta comprende, además de las áreas específicamente dedicadas a la realización de análisis, otras dependencias auxiliares tales como droguero, oficinas y depósitos. Cuando en la planta existen procesos de potabilización especiales, como por ejemplo adsorción o flotación, es conveniente prever un espacio para la instalación y prueba de sistemas piloto.
- El Laboratorio de Planta debe estar dotado de buena iluminación, ser un lugar limpio y bien mantenido, y constituir un lugar de trabajo agradable, con temperatura y humedad controladas, preferentemente equipado con aire acondicionado, siendo destinado exclusivamente a las finalidades para las que está previsto.
- El Laboratorio debe estar provisto de suficientes mesadas para el procesamiento de las muestras, así como de un número adecuado de piletas de lavado. Las líneas de abastecimiento de gas natural, gases especiales, agua y electricidad deben estar estratégicamente ubicadas, siendo preferentemente instaladas en forma externa y

respetando su identificación el código de colores correspondiente. Las balanzas y el equipamiento analítico instrumental debe instalarse en mesadas antivibratorias.

- Las actividades del Laboratorio se pueden dividir en las áreas Química y Microbiología. Los requerimientos de capacitación para el personal del Laboratorio se pueden clasificar en cuatro niveles: supervisor, analista de Laboratorio, técnico y extractor de muestras, tanto para el área Química como para la de Microbiología.
- El Supervisor del área Química debe tener al menos un año de experiencia en análisis de agua potable. Debe poseer conocimientos para asegurar la calidad. Tiene la responsabilidad inmediata para que todo el personal del Laboratorio esté debidamente entrenado a fin de realizar satisfactoriamente los análisis que se le han asignado y que todos los datos proporcionados por el Laboratorio cumplan con los requisitos de aseguramiento de la calidad.
- El Supervisor del área Microbiología debe haber realizado un curso universitario sobre Laboratorio de Microbiología que incluya el tema de Microbiología Ambiental y demostrar que puede estar presente con la suficiente frecuencia como para supervisar las tareas que se realizan.
- El Analista de Laboratorio del área Química debe tener por lo menos un año de experiencia en análisis de agua potable. Si el analista es responsable de la operación de instrumentos analíticos, debe haber seguido cursos de entrenamiento especiales a cargo de los proveedores del equipo o algún otro tipo de curso dictado por una institución calificada o realizar un período de aprendizaje con un analista experimentado. La duración del período de aprendizaje debe estar de acuerdo con la sofisticación del instrumento.
- El Analista del área Microbiología debe estar capacitado para realizar los análisis bacteriológicos con una supervisión mínima y debe poseer una experiencia no menor a tres meses en realización de análisis microbiológicos de agua o de alimentos.
- El Técnico de Laboratorio debe tener por lo menos un curso de entrenamiento bajo la supervisión de un analista experimentado y una experiencia de seis meses como mínimo en el análisis de agua potable.
- El personal que realiza la toma de muestras debe ser entrenado para la recolección de todo los tipos de muestras que debe coleccionar. Sus técnicas de muestreo deben ser revisadas por los analistas del Laboratorio.
- El Laboratorio debe tener capacidad para realizar un listado mínimo de determinaciones analíticas de rutina. Para ello, debe contar con un equipamiento básico y disponer de personal y superficie adecuados. A continuación se indican los requerimientos mínimos de personal, equipamiento y superficie del Laboratorio, de acuerdo con la población servida cuando la fuente de agua sea de tipo superficial.

Plantas de Potabilización para poblaciones de <50.000 habitantes

Laboratorio Químico	
Parámetros	Equipamiento
Color Dureza Oxígeno disuelto Turbiedad Cloro residual pH Sulfatos Conductividad Cloruros NH ₃ Alcalinidad Nitratos Nitritos Sólidos Disueltos Totales Aluminio residual	Estufa 180 °C Espectrofotómetro Mufla Turbidímetro Heladera Peachímetro Balanza de precisión Conductímetro Medidor de oxígeno y electrodo Material de vidrio y elementos de rutina de Laboratorio
Superficie	20 m ²

Laboratorio Microbiológico	
Parámetros	Equipamiento
Coliformes Totales y Fecales Bacterias Aerobias Protistológico sumario: Fito y zooplancton, cualitativo	Estufa Cultivo Contador Colonias Baño Termostatzado Estufa esterilización Autoclave Campana de extracción de gases Balanza granataria Heladera Destilador Cámara de Sedgwick-Rafter Microscopio binocular Lupa estereoscópica
Superficie	20 m ²

Análisis de Materiales y Productos Químicos	
Parámetros	Equipamiento
Mantos granulares (arena) Cal Coagulante Cloro	Serie de tamices Material de Vidrio
Superficie	9 m ²

Ensayos de Dosificación	
Parámetros	Equipamiento
Dosis de coagulante Demanda de cloro pH de saturación	Equipos para ensayos de jarras (JAR TEST) Material de vidrio y varios
Superficie	6 m ²

Archivos – Oficina – Depósito	
Superficie	10 m ²
Superficie Total	65 m²

Personal	
Supervisor Area Química	1 (uno)
Analista Químico	1 (uno)
Analista Microbiológico	1 (uno)
Extractor de Muestras	1 (uno)

Plantas de Potabilización para poblaciones de 50.000 a 100.000 habitantes

Laboratorio Químico (2 Salas)

En estos casos el Laboratorio Químico puede estar dividido en dos salas, una sala de trabajo y otra para el instrumental.

Parámetros	Equipamiento
Color Flúor Turbiedad Dureza pH Cloro residual Conductividad Oxígeno disuelto Alcalinidad Sulfatos Silice Cloruros Sólidos disueltos totales Nitritos Nitratos Amoníaco Aluminio residual	Medidor de oxígeno disuelto y electrodo Turbidímetro Espectrofotómetro Peachímetro Material de vidrio y varios Conductímetro Heladera Balanza de precisión Estufa 180 °c Mufla
Superficie	25 m ²

Laboratorio Microbiológico (2 Salas)

En estos casos el Laboratorio puede contar con dos salas: una sala de trabajo y otra para los análisis protistológicos.

Parámetros	Equipamiento
Coliformes totales y fecales	Estufa Cultivo
Bacterias Aerobias totales	Equipo de Filtración de Membrana
Protistológico sumario: zooplancton y fitoplancton	Estufa esterilización
	Autoclave
	Campana de extracción de gases
	Balanza granataria
	Heladera
	Destilador
	Baño termostatzado
	Contador de colonias
	Microscopio binocular
	Lupa estereoscópica
	Cámara de Sedwick –Rafter
Superficie	25 m ²

Análisis de Materiales y Productos Químicos	
Parámetros	Equipamiento
Mantos granulares (arena)	Serie de Tamices Tyler
Cal	Material de vidrio
Coagulante	
Cloro	
Superficie	9 m ²

Ensayos de Dosificación	
Parámetros	Equipamiento
Dosis de coagulante	Equipos Agitadores para ensayo de
Demanda de cloro	jarras (JARTEST)
Dosis de cal	
Superficie	8 m ²

Archivos – Oficina	
Superficie	8 m ²
Depósito	
Superficie	8 m ²
Instalaciones Planta Piloto	
Superficie	10 m ²
Baño y Cocina	
Superficie	7 m ²
Superficie Total	100 m²

Personal	
Supervisor Area Química	1 (uno)
Supervisor Area Microbiología	1 (uno)
Analista químico	1 (uno)
Analista microbiológico	1 (uno)
Auxiliar para extracción de muestras	1 (uno)

Plantas de Potabilización para poblaciones de 100.000 a 500.000 habitantes

Laboratorio Químico (3 Salas)

El Laboratorio Químico debe tener tres salas: una sala para el instrumental, una sala de trabajo y una sala de lavado del material.

Parámetros	Equipamiento
Turbiedad	Turbidímetro
Fenol	Balanza de precisión
pH	Balanza granataria
Nitratos	Peachímetro
Conductividad	Electrodos selectivos
Color	Conductímetro
Alcalinidad	Estufa 180 °c
Fluoruro	Medidor de oxígeno disuelto
Cloro	Espectrofotómetro
Sabor y Olor	Test DPD
NH ₃	Mufla
Detergentes	M.V. y varios
Nitritos	Heladera
SDT	
Cloruro	
DQO	
Sulfato	
Aluminio	
Oxígeno Disuelto	
Dureza	
Superficie	45 m ²

Laboratorio Microbiológico (2 Salas)

Una sala para bacteriología

Una sala para protistología

Parámetros	Equipamiento
Coliformes	Estufa 37°
Bacterias Aerobias	Estufa 180°
Ps. Aeruginosa	Autoclave
Protistológico	Campana
	Balanza 150 g
	Balanza granataria 2.000 g
	Heladera
	Destilador
	Baño María
	Contador de colonias
	Microscopio
	Filtros de membrana
	Cámara
	Centrífuga
	Lupa estereoscópica
Superficie	25 m ²

Ensayos de Dosificación	
Parámetros	Equipamiento
Dosis de coagulante	Equipos agitadores JARTEST
Dosis de cloro	Material de vidrio
pH de saturación	
Superficie	8 m ²

Análisis de Materiales	
Parámetros	Equipamiento
Mantos granulares (arena)	Tamices
Cal	Material de Vidrio - Mufla
Coagulante	Mufla
Cloro	
Superficie	9 m ²

Ensayos en Planta Piloto	
Superficie	16 m ²
Archivos - Oficina	
Superficie	10 m ²
Almacenamiento y Depósito	
Superficie	15 m ²
Baño y Cocina	
Superficie	7 m ²
Superficie Total	135 m²

Personal	
Laboratorio Químico:	
Supervisor	1 (uno)
Analista	1 (uno)
Técnico	2 (dos)
Extractor de muestras	1 (uno)
Laboratorio Microbiológico:	
Supervisor	1 (uno)
Analista	2 (dos)

- Cuando la fuente de agua es de tipo subterráneo, los requerimientos mínimos de superficie, personal y equipamiento del Laboratorio, de acuerdo con la población servida, son:

Plantas de Potabilización para poblaciones de < 50.000 habitantes

Laboratorio Químico y Bacteriológico	
Parámetros	Equipamiento
Color	Colorímetro
Dureza	Balanza granatoria 2000g
Turbiedad	Turbidímetro
pH	Heladera
Conductividad	Peachímetro
Cloro residual	Microscopio
Coliformes totales y fecales	Conductímetro
Nitratos	Baño termostatzado
Nitritos	Equipo DPD
NH ₃	Balanza precisión 0.1 mg
	Contador colonia
	Estufa cultivo
	Estufa esterilización
	Autoclave
Superficie	22 m ²

Archivos – Oficina	
Superficie	8 m ²
Superficie Total	30 m²

Personal	
Supervisor Area Química	1 (uno)
Analista microbiológico	1 (uno)
Extractor de muestras	1 (uno)

Plantas de Potabilización para poblaciones de >50.000 habitantes

Laboratorio- Químico y Microbiológico	
Parámetros	Equipamiento
pH	Horno Mufla
Sólidos disueltos totales	Microscopio
Alcalinidad	Baño Termostatzado
Cloruros	Espectrofotómetro
Sulfatos	Contador de Colonias
Nitratos, Nitritos, NH ₃	Estufa
Dureza	Balanza granatoria 2000 g
Calcio y Magnesio	Baño María
Mg, Fe y Mn *	Autoclave
Arsénico*	Campana Extractora de gases
Flúor *	Estufa de esterilización
Cloro residual	Bomba de vacío
Coliformes fecales y totales	Balanza de precisión 0.1 mg
	Estufa de Cultivo
	Heladera
	Equipo DPD
	Filtro de Membrana
	Conductímetro
	Destilador de agua
	Peachímetro
	Colorímetro
	Turbidímetro
Superficie	35 m ²

* estas determinaciones se efectuarán cuando el agua a tratar contenga dichos compuestos

Archivos – Oficina	
Superficie	10 m ²
Almacenamiento - Depósito	
Superficie	10 m ²
Baño y cocina	
Superficie	7 m ²
Superficie Total	62 m²

Personal	
Supervisor Area Química	1 (uno)
Analista Químico	1 (uno)
Analista microbiológico	1 (uno)
Extractor de muestras	2 (dos)

- Cuando sea necesario realizar en forma eventual análisis especiales que excedan la capacidad analítica de rutina del Laboratorio, como podría ser el caso de por ejemplo, la determinación de metales pesados, hidrocarburos o pesticidas, las muestras deben derivarse a Laboratorios centrales o a Laboratorios privados debidamente acreditados por organismos oficiales. En el caso en que se deba incorporar algún proceso especial al sistema de potabilización, debe contemplarse la incorporación de alguna determinación especial para ser realizada en forma rutinaria, aunque no esté prevista en los listados del punto anterior.

- Además del equipamiento básico indicado en este punto y el anterior, se debe contemplar la incorporación de equipamiento portátil para realizar determinaciones in situ, por ejemplo: peachímetros y colorímetros de bolsillo, espectrofotómetros de campo, turbidímetros portátiles y equipos semicuantitativos con instrumentos y reactivos colorimétricos que permitan determinar la concentración de cloro libre, total, y otros parámetros. De igual forma se puede emplear equipos de campo para la realización de análisis microbiológicos de calidad de agua in situ.
- Se entiende por muestreo a la recolección física de una porción representativa de una corriente proveniente de un cuerpo natural de agua o de una operación de tratamiento. Como criterio general, la toma de muestras se debe realizar en el marco de un plan de extracción de muestras que debe incluir, al menos, los siguientes elementos:
 - Objetivo del muestreo.
 - Tipo de muestras.
 - Ubicación de los puntos de muestreo.
 - Cantidad de muestras.
 - Frecuencia y tiempos de muestreo.
 - Técnicas de recolección y manipuleo de las muestras.
- El volumen de la muestra que se extrae debe depender del tipo y cantidad de parámetros que se pretende analizar, de la técnica analítica empleada y de las concentraciones que se espera encontrar de las variables de interés.
- Los tipos de muestra a extraer deben responder a los objetivos buscados. En el cuadro se presentan ventajas y desventajas de la estrategia adoptada:

Estrategia de muestreo	Definición	Aplicabilidad	Ventajas / Desventajas
Puntual	Muestra que se toma en un determinado lugar en distintos momentos.	Es el tipo de muestra mayormente utilizado en el muestreo aleatorio. Resulta de mucha utilidad para la determinación de variabilidad de una corriente	<p><i>Ventajas:</i> técnica muy simple, representa la mejor medida de la variabilidad.</p> <p><i>Desventajas:</i> puede requerir un número de muestras mayor que para el caso de muestra compuesta, para obtener una muestra representativa.</p>
Compuesta	Muestra que se compone de un número de alícuotas individuales y que se combinan en una única muestra para su análisis.	Se utilizan cuando se desea estimar la concentración promedio de los constituyentes de una corriente.	<p><i>Ventajas:</i> reduce los costos analíticos. Puede requerir de un número menor de muestras necesarias para garantizar la representatividad de la muestra.</p> <p><i>Desventajas:</i> únicamente provee las concentraciones promedio de la corriente. No es posible obtener la información referente al rango de concentraciones</p>

- La cantidad y frecuencia de extracción de muestras depende de la variabilidad del parámetro que se pretende medir y del uso dado a esa información. Cuando se produzcan variaciones cíclicas, por ejemplo épocas de estiaje, la frecuencia del muestreo debe contemplar los períodos de variabilidad. En todos los casos es conveniente seguir una metodología para la evaluación de la frecuencia de muestreo que consiste fundamentalmente en la recolección de información referente a las condiciones que afectan la calidad del agua, los requerimientos de la misma en función del uso propuesto y los datos existentes en cuanto a las determinaciones analíticas realizadas, así como la realización de estudios preliminares que permitan identificar los ciclos de variabilidad.
- La extracción de las muestras puede realizarse en forma manual o automática. La extracción manual de muestras se debe utilizar preferentemente en estudios preliminares, realizados para definir las características del plan de muestreo. La toma de muestras con muestreador automático resulta más conveniente cuando se necesite evaluar varios puntos de muestreo a intervalos frecuentes o cuando se requiera un registro continuo de los mismos.
- Cada Laboratorio puede establecer la metodología de extracción de muestras que considere conveniente. Sin embargo, cuando se tomen muestras para estudios microbiológicos se debe tener en cuenta, como mínimo, los siguientes cuidados, o métodos equivalentes debidamente justificados.
 - Se deben recoger las muestras en botellas cuidadosamente lavadas a las que se ha dado un enjuague final con agua destilada, y esterilizada. En algunos

casos las muestras pueden recolectarse en bolsas de plástico preesterilizadas. El volumen de las muestras debe ser suficiente para poder realizar todos los análisis necesarios, por lo general, no conviene que sea inferior a 100 mL.

- Las botellas a utilizar para la toma se deben mantener cerradas hasta el momento de llenarlas. Se retiran los tapones y las tapas a la vez, para no contaminar la superficie interna del tapón o la tapa ni el cuello de la botella. Se llena la botella sin enjuagarla, se cierra inmediatamente con el tapón o la tapa y, en su caso, se coloca el gancho de seguridad alrededor del cuello de la botella.
- Al hacer la toma de la muestra se debe dejar un amplio espacio aéreo en la botella (al menos 2,5 cm) para facilitar la mezcla por agitación antes de proceder al estudio. Se toman muestras representativas del agua objeto de la prueba, se limpia con agua y se desinfecta la salida de la muestra utilizando técnicas asépticas para evitar la contaminación de la misma.
- Si se toma una muestra de agua procedente de un grifo de una red de distribución, se debe elegir un grifo al que llegue el agua por una cañería conectada directamente con la principal y no, por ejemplo, procedente de una cisterna o un depósito de almacenamiento. Se abre completamente el grifo y se deja correr el agua durante 2 ó 3 minutos, o durante el tiempo suficiente para que se limpie la cañería de servicio. Se reduce el caudal de agua para poder llenar la botella sin que se derrame. Si la limpieza del grifo es dudosa, se debe aplicar a la boca del mismo una solución de hipoclorito de sodio (100 mg de NaClO/L) antes de tomar la muestra; dejar correr el agua otros 2 ó 3 minutos después del tratamiento. No se debe tomar de muestra de grifos que tengan fugas y dejen salir el agua por encima de su superficie externa. Cuando se toman muestras de grifos mezcladores, se debe retirar los filtros, protectores contra salpicaduras y demás accesorios semejantes; se debe dejar correr agua caliente durante 2 minutos, después agua fría durante 3 minutos, y se realiza la toma de muestra de la forma anteriormente indicada.
- Si se toma una muestra de un pozo con bomba de mano, se debe bombear agua durante alrededor de 5 minutos antes de hacer la toma. Si el pozo está equipado con una bomba mecánica, se debe hacer la toma en un grifo de descarga. En caso de que no exista sistema de bombeo, se debe hacer la toma directamente del pozo por medio de una botella esterilizada provista de un peso en la base, se debe evitar la contaminación de las muestras por la espuma superficial.
- En caso de ser necesario reducir la concentración de cloro activo en las muestras, debe añadirse un agente reductor a los recipientes en los que se vaya a recoger el agua con residuos de cloro u otros halógenos, a menos que dichos recipientes contengan caldos para siembra directa de la muestra. Puede emplearse como agente desclorante tiosulfato de sodio, en las muestras de agua potable 0,1 mL de una solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ al 3% en una botella de 120 mL proporciona una concentración final de 18 mg/L en la muestra, lo que basta para neutralizar hasta 5 mg/L de cloro residual.
- Las muestras de agua con alto contenido de cobre o zinc y las muestras de aguas residuales con alto contenido en metales pesados se deben recoger en botellas que contengan un agente quelante que reduzca la toxicidad del metal. Esto es especialmente importante cuando el tiempo de transporte de las

muestras sea superior a las 4 horas. Se debe emplear 372 mg/L de la sal disódica del ácido etilendiaminotetracético (EDTA) como agente quelante. Previamente, se debe ajustar el pH de la solución de EDTA a 6,5 y se añade entonces a la botella de toma de muestra antes de esterilizarla (0,3 m² de una solución al 15% para una botella de 120 m²) o se combina con la solución Na₂S₂O₃ antes de introducirla en la botella.

- En el estudio de la calidad del agua potable de la red se debe hacer tomas de agua terminal y de distintos puntos del sistema de distribución, elegidos de forma que se asegure una cobertura sistemática todos los meses. Se debe elegir cuidadosamente los puntos de toma de muestras en el sistema de distribución, incluyendo las secciones ciegas, para demostrar la calidad bacteriológica de la totalidad de la red y asegurándose de que no haya contaminación localizada en las interconexiones transversales y no existan roturas en las tuberías de distribución, ni reducción de la presión positiva. Los lugares de toma de muestra pueden ser sitios públicos (comisaría, cuarteles de bomberos, edificios oficiales, escuelas, estaciones de trenes o autobuses, aeropuertos, parques públicos), establecimientos comerciales (restaurantes, estaciones de servicio, edificios de oficinas, plantas industriales), domicilios privados (viviendas unifamiliares, edificios de departamentos y complejos urbanísticos) así como estaciones de muestreo especialmente construidas al efecto en la red de distribución. Se debe establecer un programa de toma de muestras de acuerdo con las autoridades sanitarias locales.
- El análisis microbiológico de las muestras debe iniciarse inmediatamente después de realizada la toma para evitar cambios imprevisibles. Si no pueden procesarse las muestras en la hora siguiente a su extracción, se deben guardar en una conservadora con hielo durante el transporte al Laboratorio. Si se sabe que los resultados van a ser utilizados en acciones legales, se debe recurrir a un transporte especial para hacer llegar las muestras al Laboratorio en menos de 6 horas y mantener una cadena de vigilancia. Asimismo se debe prever la extracción de contramuestras con el correspondiente lacrado de los envases.
- Las muestras extraídas deben preservarse “in situ”, siguiendo estrictamente las indicaciones del Laboratorio. El conservante utilizado debe indicarse claramente ya sea en el frasco o en la planilla de datos de campo. La metodología de preservación de la muestra debe tener en cuenta, como mínimo, las indicaciones provistas en el siguiente cuadro.

Parámetro	Envase	Conservante	Volumen mínimo [ml]	Plazo máximo
Acidez	P ó V (B)	4° C	100	14 días
Alcalinidad	P ó V	4° C	200	14 días
Amonio	P ó V	H ₂ SO ₄ pH:2 ; 4° C	1000	28 días
Arsénico	P	HNO ₃ pH:2	100	6 meses
Boro	P (A) ó V (A)	No Requiere	100	6 meses
Calcio	P (A) ó V (A)	HNO ₃ pH:2	250	6 meses
Cianuro	P ó V	NaOH pH:12 ; 4° C	1000	14 días
Cloro residual	V	No exponer a luz solar ; 4° C	500	2 hs.
Clorofila	P ó V	Oscuridad congelador	500	30 días
Cloruro	P ó V	No Requiere	100	28 días
Coliformes	P (E) ó V (E)	4° C	100	6 hs.
Color	P ó V	4° C	500	2 días
Conductividad	P ó V	4° C	250	28 días
Cromo (VI)	P (A) ó (A)	4° C	300	2 días
Cromo total	P (A) ó (A)	4° C	300	6 meses
DBO	P ó V	4° C	1000	2 días
DQO	P ó V	H ₂ SO ₄ pH:2 ; 4° C	200	28 días
Detergentes	P (A) ó V (A)	4° C	1000	2 días
Dureza	P ó V	HNO ₃ pH:2	100	6 meses
Fenoles	V	H ₃ PO ₄ pH:2 ; 4° C	1000	28 días
Flúor	P	No Requiere	500	28 días
Fósforo hidrolizable	V	H ₂ SO ₄ ; pH:1,5 ; 4° C	200	7 días
Fósforo total	V	H ₂ SO ₄ pH:1,5 ; 4° C	200	7 días
Grasas y aceites	V	HCl pH:2 ; 4° C	1000	28 días
Hierro	P (A) ó V (A)	HNO ₃ pH:2	250	6 meses
Magnesio	P (A) ó V (A)	HNO ₃ pH:2	250	6 meses
Hidrocarburos	V ©	HCl pH:2 ; 4° C	1000	6 meses
Manganeso	P (A) ó V (A)	HNO ₃ pH:2	500	6 meses
Nitrato	P ó V	H ₂ SO ₄ pH:2 ; 4° C	200	2 días
Nitrito	P ó V	4° C	250	2 días
Nitrógeno Kjeldahl	P ó V	H ₂ SO ₄ pH:2 ; 4° C	800	28 días
Ortofosfato soluble	V (A)	Refrigerar a 4° C	200	2 días
Oxígeno consumido	P ó V			
Oxígeno disuelto	P ó V		300	Inmediato
Ph	P ó V	4° C	100	2 hs.
Potasio	P	HNO ₃ pH:2	100	6 meses
Residuos	P ó V	4° C	1000	7 días
Sílice	P	4° C	200	28 días
Sodio	P (A) ó V (A)	HNO ₃ pH:2	100	6 meses
Sulfato	P ó V	4° C	500	28 días
Sulfuro	P ó V	Zn (AcO) ₂ 4° C	250	28 días
Turbidez	P ó V	4° C	100	7 días

P = Plástico (tipo polietileno o similar); V = Vidrio; P (E) = Plástico esterilizado; V (E) = Vidrio esterilizado; P (A) = Plástico enjuagado con Acido; V (A) = Vidrio enjuagado con Acido; V (S) = Vidrio enjuagado con solventes orgánicos; P (S)= Plástico enjuagado con solventes orgánicos; V (C)= Vidrio color caramelo; V (B)= Vidrio borosilicato.

- La preparación de recipientes para la colección de muestras se debe hacer tomando en cuenta, como mínimo, los criterios del siguiente cuadro:

Variables a ser analizadas		Recipiente recomendado (*)	Procedimiento para el lavado
Alcalinidad Calcio Cloruro Fluoruro Magnesio Ph	Sodio Sulfato Residuo no filtrable Potasio Arsénico	1.000 ml. polietileno	Enjuagar en este orden: tres veces con agua corriente una vez con ácido crómico tres veces con agua corriente una vez con 1:1 ácido nítrico y tres veces con agua destilada
Nitrógeno, amoníaco Nitrógeno, nitrato y nitrito Carbono Orgánico total Nitrógeno total		250 ml. Polietileno	Enjuagar en este orden: tres veces con agua corriente una vez con ácido crómico tres veces con agua corriente y tres veces con agua destilada
Fósforo Total		50 ml. Vidrio soviel)	
Aluminio Cadmio Cromo Cobre Hierro	Plomo Manganeso Níquel Selenio Zinc	500-1.000 ml. Polietileno (la elección del tamaño depende de la cantidad de metales a determinar y de la cantidad de muestras requeridas).	Enjuagar en este orden: tres veces con agua corriente una vez con ácido crómico tres veces con agua corriente una vez con 1:1 ácido nítrico y tres veces con agua destilada ultrapura
Mercurio			
Pesticidas organoclorados y PCBs Pentaclorofenol Compuestos fenólicos Herbicidas fenoxiácidos		100 ml. Vidrio (ámbar) con tapa recubierta de teflón.	Enjuagar en este orden: tres veces con agua corriente una vez con ácido crómico tres veces con agua libre de elementos orgánicos dos veces con acetona de lavado dos veces con acetona de grado especial (**) dos veces con hexano de grado pesticida y secar (destapado) en horno caliente a 360 °C durante una hora como mínimo.

(*) Los recipientes de teflón también se pueden usar para reemplazar a los recipientes de polietileno o de vidrio.

Ácido crómico – 35 ml. De dicromato de sodio saturado ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) por litro de ácido sulfúrico concentrado pureza reactivo (H_2SO_4).

El ácido crómico no debe utilizarse cuando la muestra se analiza para la determinación de cromo.

El agua destilada ultrapura se obtiene haciendo pasar agua destilada primero a través de una unidad de destilación de vidrio Corning Modelo Ag-11 y luego a través de un sistema que contenga un cartucho prefiltro, un cartucho de carbón activado y un cartucho con una columna mixta de deionización.

(**) Acetona de grado especial – grado pesticida cuando se hace un análisis GC, grado UV para análisis LC.

- Al entregar una muestra al Laboratorio, el frasco debe estar bien rotulado, consignando en él como mínimo la siguiente información:
 - Designación o localización del lugar de recolección de la muestra.
 - Fecha y hora de recolección de la muestra.
 - Indicación del tipo de muestra, puntual o compuesta con información apropiada de hora y volumen.
 - Nombre del operador, para consultas sobre posibles anomalías en la muestra.

La solicitud de análisis debe llegar al Laboratorio acompañada de una planilla donde se encuentren todos los datos obtenidos en campo.

- El transporte de las muestras se puede hacer en conservadoras que permitan mantenerlas con hielo durante el tiempo de almacenamiento. Se toman las debidas precauciones para evitar la rotura de envases de vidrio y la compresión de envases plásticos, con los consiguientes derrames.
- El proceso de Aseguramiento de la Calidad (QA) en campo consiste en un proceso sistemático que, junto con los programas de Garantía de la Calidad del Laboratorio y de Manejo de los Datos Obtenidos, debe permitir asegurar que los datos y las decisiones basadas en ellos son válidos desde el punto de vista técnico y estadístico y además, debidamente documentados.
- Las técnicas de muestreo empleadas deben conformar el primer paso del proceso de Aseguramiento de la Calidad. Se debe verificar que todos los equipos, aparatos e instrumentos se encuentren limpios y en condiciones óptimas de funcionamiento; que se apliquen en campo metodologías estandarizadas y aprobadas; y además, que se lleven los registros de todas las operaciones efectuadas y de los incidentes que puedan afectar el resultado del estudio. Por otra parte deben tomarse las precauciones necesarias para evitar la contaminación y el deterioro de las muestras, para lo cual se deben tomar en cuenta las siguientes medidas:
 - Las mediciones en campo se deben realizar en una submuestra separada de la que se envía al Laboratorio.
 - Los recipientes utilizados deben ser los recomendados para cada determinación y limpiarse de acuerdo con los procedimientos establecidos.
 - Los preservantes agregados deben ser de calidad analítica.
 - Los recipientes deben guardarse en un ambiente limpio, libre de polvo o gases, en este sentido los vehículos también deben mantenerse limpios.
 - Los recipientes esterilizados deben mantenerse en dicho estado hasta la recolección de las muestras, de modo que si se produce el deterioro del papel o de la tapa, el mismo debe descartarse.
 - Nunca debe medirse la conductancia específica en agua que haya sido utilizada con anterioridad para la medición de pH, ya que el cloruro de potasio que se difunde desde el electrodo altera la conductividad de la muestra.

- Se debe incorporar la presentación de blancos y muestras duplicadas para detectar errores introducidos por la pureza de los preservantes, contaminación de los recipientes o de cualquier otro equipo o material empleado en la recolección y manipuleo de la muestra, así como para encontrar errores sistemáticos introducidos desde el muestreo hasta el momento del análisis.
- Los procedimientos de cadena de custodia deben estar especificados en el programa de muestreo e implican la posesión de las muestras desde el tiempo en que se obtienen hasta que se envían hacia el Laboratorio para su análisis, asegurando que se mantenga la integridad de las mismas durante todo ese tiempo.
- Se debe considerar que una muestra está bajo custodia si se cumplen las siguientes condiciones:
 - Se encuentra en posesión física de una persona.
 - Se encuentra a la vista de la persona luego de su posesión.
 - Es resguardada por la persona, de modo que no pueda ser manipulada, o bien es resguardada por la persona en un área restringida a personal autorizado.
- Luego de la extracción de la muestra, la cadena de custodia de la misma implica los siguientes elementos:
 - *Etiquetado de la muestra:* Se debe utilizar papel engomado o etiquetas que tengan que incluir, como mínimo, el número de muestra, nombre de la persona que recogió la muestra, fecha y hora de recolección, lugar de la toma de muestra.
 - *Precintado de la muestra:* El precinto debe contener, como mínimo, el número de muestra, nombre de la persona que recogió la muestra, fecha y hora de recolección, lugar de la toma de muestra. El precinto debe colocarse antes de abandonar la custodia por parte del personal de muestreo, de modo tal que sea necesario romperlo para abrir el recipiente de la muestra.
 - *Libreta de registros de campo:* Dado que las situaciones de muestreo varían ampliamente, no existe una regla que especifique el alcance de la información a recoger, sin embargo, debe incluir los datos suficientes como para que cualquier persona pueda reconstruir el muestreo sin necesidad de recurrir a la memoria del operario que tomó la muestra. El registro que acompañe a cada muestra es necesario para establecer su ubicación y debe tener la siguiente información: número de muestra, firma del recolector de la muestra, fecha y hora de recolección, ubicación del punto de muestreo, tipo de muestra, firma de las personas involucradas en la cadena de custodia.
 - *Registro de cadena de custodia:* Los registros deben estar numerados en forma consecutiva y contener la siguiente información mínima: número de muestra, firma del operador que recolectó la muestra, fecha, hora y lugar de recolección, tipo de muestra y firma de las personas involucradas en la cadena de posesión.
 - *Formulario de petición de análisis de la muestra:* Este formulario debe acompañar la muestra al Laboratorio y consta de dos partes: una que corresponderá a la información de campo y que incluye la mayoría de la información de la libreta de campo, y una segunda parte que incluye la información del Laboratorio referente al número de muestra, nombre de la

persona que recibe la muestra, fecha de recepción y determinaciones analíticas a realizar.

- *Recepción y registro de la muestra:* En el Laboratorio, el custodio que recibe la muestra debe tener la responsabilidad de inspeccionar para verificar que no haya pérdidas en el recipiente, o que el precinto no se encuentre dañado, ya que esto puede significar un manipuleo de la muestra, que implica el descarte de la misma. Además debe cotejar los datos de la etiqueta y el precinto con la información del registro de cadena de custodia, asignar un número de Laboratorio, registrar la muestra en el libro de registros del Laboratorio y almacenar la muestra en un lugar adecuado hasta que se asigne para su análisis.
- *Asignación de la muestra para su análisis:* Una vez que la muestra ingrese en el Laboratorio, el supervisor de Laboratorio es el responsable del cuidado y custodia de la muestra, siendo además la persona encargada de asignar la muestra para su análisis.
- Los métodos analíticos a utilizar deben ser seleccionados por el supervisor del Laboratorio a partir de su experiencia y de las referencias bibliográficas autorizadas y actualizadas en forma periódica. En el proceso de selección de técnicas analíticas se debe tomar en cuenta, a modo de referencia, la información provista en el siguiente cuadro:

Parámetro	Método
Acidez	Potenciométrico. Este método es aplicable a todo tipo de aguas.
Alcalinidad a la Fenolftaleína	Potenciométrico. El método es aplicable a aguas superficiales, subterráneas y salinas, de distinto tipo.
Alcalinidad Total	Potenciométrico. El método es aplicable a aguas superficiales, subterráneas y salinas, de distinto tipo.
Amoniaco	Método del Fenato El método es aplicable a aguas superficiales y subterráneas. Método de Nesslerización El método es aplicable para todo tipo de aguas de escaso color y turbidez.
Arsénico	Método del Dietilditio Carbonato de Plata Este método es aplicable en aguas superficiales, subterráneas y efluentes industriales y domésticos.
Calcio	Titulométrico El método es aplicable en agua superficiales, subterráneas y efluentes de distinto tipo.
Color	Método por Comparación Visual El método es aplicable a aguas cuyo color provenga de sustancias naturales.
Conductividad	Electrométrico El método es aplicable a todo tipo de aguas.
Dureza Total	Titulométrico El método es aplicable en aguas superficiales, subterráneas y efluentes industriales y domésticos.
Flúor	Método del Spands El método es aplicable en aguas superficiales, subterráneas y efluentes de distinto tipo.

Parámetro	Método
Fósforo Hidrolizable	Método del Acido Ascórbico Este método es aplicable de idéntica manera que el método de fósforo de ortofosfato.
Fósforo Total	Método del Acido Ascórbico Este método es aplicable para todo tipo de aguas de forma similar al ortofosfato.
Magnesio	Método por Cálculo El método es aplicable a todo tipo de aguas.
Nitrato	Método del Salicilato El método es aplicable en aguas superficiales, subterráneas y efluentes de distinto tipo.
Nitrito	Método de la Sulfanilamida El método es aplicable en aguas superficiales, subterráneas y efluentes de distinto tipo.
Oxígeno Disuelto	Método de Winkler – Modificación de la Azida El método es aplicable en aguas superficiales, subterráneas y efluentes de todo tipo.
Oxígeno Disuelto	Método Electrométrico El electrodo de membrana de tipo polarográfico se utiliza para medir O.D. en lagos y reservorios, cursos superficiales y efluentes industriales.
pH	Método Electrométrico El método es aplicable a aguas en todo el rango de Ph.
Sulfuro	Método del Azul de Metileno Este método es aplicable a todo tipo de aguas pero generalmente se utiliza para concentraciones menores de 20 mg/L.
Temperatura	Termómetro Este método es aplicable a todo tipo de aguas.
Transparencia	El método es aplicable para la medición de transparencia in situ
Turbiedad	Nefelométrico El método es aplicable a todo tipo de aguas.
Sólidos Totales y Volátiles	Gravimétricos El método para sólidos totales es aplicable a la determinación del porcentual de residuo en sedimentos y otras muestras sólidas. En el caso de volátiles el parámetro es un estimador de aquellos compuestos inorgánicos y orgánicos, los cuales se pierden al ser calcinados a $550 \pm 50^{\circ} \text{C}$.
Coliformes	Método de los Tubos Múltiples En este método se determina la concentración de bacterias coliformes del agua tomando en cuenta el número de tubos que acusan resultados positivos.
Coliformes	Método del Filtro de Membrana En este método se determina la concentración de bacterias coliformes del agua tomando en cuenta el número de colonias bacterianas desarrollado sobre la membrana utilizada para filtrar una muestra de agua de volumen conocido. El grupo coliforme se caracteriza por estar formado por bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gramnegativas, no esporuladas y de forma alargada, que desarrollan una colonia roja con un brillo metálico en un medio tipo Endo que contenga lactosa tras una incubación de 24 horas a 35°C

- Se reconoce como proceso analítico al conjunto de operaciones que se lleva a cabo entre la muestra sin tomar, ni medir, ni tratar y los resultados expresados según requerimientos. Este proceso puede descomponerse en las siguientes etapas:

- Operaciones previas a la medición, por ejemplo extracción de muestras, acondicionamiento de la muestra, disolución, separaciones, reacciones analíticas, etc.
- Medición por medio de un instrumento que genera información.
- Registro y tratamiento de datos.
- Las propiedades analíticas básicas que definan esencialmente la calidad de los resultados obtenidos en el proceso analítico son:
 - *Exactitud*: se refiere al nivel de correspondencia que existe entre el resultado informado y el valor verdadero. La exactitud a su vez depende de las siguientes propiedades:
 - ❖ *Precisión*: el grado de concordancia que existe entre un resultado dado y un conjunto de ellos obtenidos aplicando el mismo procedimiento analítico a la misma muestra en circunstancias idénticas (repetibilidad) y algo o muy distintas (reproducibilidad).
 - ❖ *Selectividad*: La medida en que las interferencias afectan la medición del analito de interés.
 - ❖ *Sensibilidad*: Indica la concentración de analítico mínima medible.
 - *Representatividad*: toma en cuenta la concordancia entre la muestra tomada y la definición del problema analítico a resolver.
 - *Trazabilidad*: permite relacionar el resultado con estándares correspondientes a las unidades básicas del Sistema Internacional y a través de una cadena de comparaciones se puede asegurar su exactitud o más bien se puede conocer su grado de exactitud. La trazabilidad de un resultado implica que se pueda conocer claramente o rastrear todos los elementos analíticos que contribuyen a su generación, por ejemplo:
 - ❖ *Materiales*: muestra/s, reactivos, soluciones, materiales de referencia, blancos, equipos, etc.
 - ❖ *Instrumentación de la técnica*: que equipamiento se empleó, cual es el estado del mismo, como es su calibración y mantenimiento general.
 - ❖ *Metodología*: técnica analítica empleada y forma de aplicación.
 - ❖ *Temporales*: día y hora.
 - ❖ *Humanos*: técnicos y supervisores que contribuyeron a la obtención del resultado.
- Desde la etapa de diseño se deben prever todas las medidas de protección y seguridad de acuerdo con lo establecido por la ley 19587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo. El Laboratorio debe estar equipado, como mínimo, con los siguientes elementos de seguridad:
 - Extintores:
 - ❖ *De agua*: utilizados para el caso de fuegos producidos por combustibles tales como lana, papel o tela.

- ❖ *Productos químicos secos*: utilizados para la extinción de fuegos producidos por líquidos y metales inflamables o fuegos eléctricos.
- ❖ *De dióxido de carbono*: utilizados para fuegos pequeños producidos por líquidos inflamables.
- **Duchas de seguridad**:

Se deben utilizar en el caso de accidentes producidos por ácidos, soluciones cáusticas u otro tipo de líquidos peligrosos, o en el caso de que se produzca fuego en las ropas del personal. Las duchas deben ubicarse en el exterior en forma conveniente, preferiblemente cerca de una puerta de salida y en un espacio despejado, se debe inspeccionar su funcionamiento en forma periódica.
- **Lavador de ojos**:

Se deben utilizar en el caso de salpicaduras con productos químicos, y deben situarse cerca de las piletas, en zonas visibles y lejos de conexiones eléctricas. Como precaución general, se debe controlar su funcionamiento en forma periódica para asegurar su aplicación en el momento oportuno. La ubicación de los mismos debe ser tal que permita su localización con los ojos cerrados.
- **Campanas extractoras de gases**:

Se deben utilizar para contener y trabajar con materiales peligrosos, disponiéndose de diferentes tipos de campanas de flujo lento según los distintos niveles de peligrosidad. Se debe verificar que la velocidad del flujo de aire sea de aproximadamente 30 m/min.
- **Avisos de seguridad**

En diferentes sectores del Laboratorio deben existir láminas con esquemas de procedimientos ante un eventual accidente. También deben colocarse afiches para informar sobre las sustancias peligrosas existentes en el Laboratorio.
- El Laboratorio debe contar con procedimientos e instalaciones adecuadas para almacenar y disponer los líquidos y sólidos residuales generados en él.

Estudios en Planta Piloto

En todos los casos que se prevea la realización de estudios o ensayos en planta piloto, el proyectista debe:

- Informar al ENOHSA en forma previa a la realización de los ensayos, la diagramación de los mismos, dimensionamiento del equipamiento a utilizar, monitoreos previstos, técnicas analíticas a aplicar, variantes de proceso y/o reactivos que se planifiquen ensayar.
- Comunicar al ENOHSA las fechas de iniciación y finalización previstas para los ensayos con suficiente antelación a fin de facilitar la inspección del desarrollo de las mismas por parte de los profesionales del Ente.
- Los ensayos en escala piloto deben utilizar el agua de la fuente, objeto del proyecto que se elabore. No tendrá la misma validez la utilización de aguas preparadas para simular la composición natural de la misma, a menos que el ENOHSA los autorice expresamente.