

CAPÍTULO 8

TRATAMIENTO DE AGUA

1. NORMAS DE AGUA POTABLE

Las normas de agua potable indican o fijan límites generales aceptables para las impurezas de las aguas que están destinadas al abastecimiento público (condiciones mínimas de calidad física, química y bacteriológica).

Los normas de agua potable no se deben considerar como un criterio para evaluar o controlar la operación de las plantas de tratamiento de agua sino como especificaciones generales para la aceptación del producto. Cuando el tratamiento de las aguas está bien controlado, se pueden obtener mejores resultados que los establecidos en las normas.

1.1 *Guías para la calidad del agua potable. Organización Mundial de la Salud, 1998*

Tabla 1
CALIDAD BACTERIOLÓGICA DEL AGUA DE BEBIDA

ORGANISMOS	GUÍAS
a) Todo tipo de agua de bebida <i>E. Coli</i> o bacterias coliformes termotolerantes.*	No deben ser detectadas en ninguna muestra de 100 mL.

ORGANISMOS	GUÍAS
b) Agua tratada que ingresa al sistema de distribución <i>E. Coli</i> o bacterias coliformes termotolerantes.* Bacterias coliformes totales.	No deben ser detectadas en ninguna muestra de 100 mL.
c) Agua tratada en el sistema de distribución <i>E. Coli</i> o bacterias coliformes termotolerantes* Bacterias coliformes totales.	No deben ser detectadas en ninguna muestra de 100 mL. No deben ser detectadas en ninguna muestra de 100 mL. En el caso de grandes abastecimientos, en donde se haya examinado un número suficiente de muestras, no deben estar presentes en el 95% de las muestras recolectadas a lo largo de un periodo de 12 meses.
* Si se detectan bacterias <i>E. Coli</i> o coliformes totales, la situación debe investigarse de inmediato. La mínima medida que se debe adoptar en el caso de coliformes totales es repetir el muestreo; si la bacteria se detecta en la nueva muestra, debe determinarse de inmediato el origen de la contaminación mediante una investigación más profunda. No obstante que la <i>E. Coli</i> es el indicador de contaminación fecal más preciso, el conteo de bacterias coliformes termotolerantes es una alternativa aceptable. Si fuera necesario, deben desarrollarse pruebas confirmativas apropiadas. Las bacterias coliformes totales no son un indicador aceptable de la calidad sanitaria de los sistemas rurales de abastecimiento de agua, particularmente en áreas tropicales, donde muchas bacterias no tienen significación sanitaria, pues se presentan en casi todos los sistemas de abastecimiento que carecen de tratamiento. Se admite que en la gran mayoría de los sistemas rurales de abastecimiento de agua de los países en desarrollo, la contaminación fecal está diseminada. En estas condiciones, la agencia nacional de vigilancia deberá establecer metas de mediano plazo para la progresiva mejora del agua de bebida.	

Los siguientes son ejemplos comunes de niveles de contaminación altamente indeseables, encontrados inclusive en abastecimientos protegidos: el agua de un manantial protegido sin cloración puede contener 10 coliformes fecales por cada 100 mL de agua y el agua superficial protegida puede dar un recuento de más de 1.000 coliformes fecales por cada 100 mL.

Por razones de simplicidad, para sistemas de abastecimiento en pequeñas comunidades, las guías de calidad del agua potable se limitan al análisis microbiológico del grupo coliforme, ya que este grupo es mejor conocido y de medición relativamente fácil. Normalmente, cuando se detectan bacterias coliformes en el agua se halla información adecuada para tomar las decisiones necesarias respecto a medidas correctivas, particularmente si se cuenta también con los resultados de una inspección sanitaria realizada paralelamente.

En abastecimientos de agua sin tratamiento ni cloración, provenientes de aguas superficiales o de aguas de pozos superficiales o profundos, la sola detección de coliformes fecales puede servir generalmente como una guía adecuada para determinar la presencia de organismos patógenos en el agua y tomar las medidas que correspondan.

La Tabla 2 presenta una serie de medidas correctivas y preventivas, recomendadas para la protección de las fuentes de agua y para el modo de abastecimiento.

Tabla 2
Químicos inorgánicos de significación para la salud
en el agua de bebida

INORGÁNICOS	VALOR GUÍA (mg/L)	OBSERVACIONES
Antimonio	0,005	(P)
Arsénico	0,01*	(P) Grado de riesgo de ocurrencia de cáncer a la piel de 6(10)-4. Se acumula en el organismo y puede causar efectos tóxicos.
Bario	0,7	
Berilio	--	No hay información adecuada para establecer un valor guía.
Boro	0,3	
Cadmio	0,003	Efecto tóxico, afecta el riñón y el aparato circulatorio.
Cromo	0,05	(P) Principalmente, el hexavalente es tóxico y potencialmente carcinógeno.
Cobre	2	ATO (P)
Cianuro	0,07	Inhibe el metabolismo del oxígeno.
Fluoruro	1,5	Concentraciones altas afectan la dentadura y los huesos. Puede producirse una fluorosis endémica.
Plomo	0,01	Altamente tóxico. Se acumula en el organismo.
Manganeso	0,5	ATO (P)
Mercurio (total)	0,001	Tiene efectos tóxicos. Se acumula en el organismo. Afecta principalmente las glándulas salivares y renales, las funciones psicológicas y psicomotoras.
Molibdeno	0,07	
Níquel	0,02	
Nitrato (como NO ₃)	50	La relación de la suma de las concentraciones de cada uno con su respectivo valor guía no deberá exceder de 1 (P).
Nitrito (como NO ₂)	3	
Selenio	0,01	
Uranio	--	NIA

Notas

- ATO Concentraciones de la sustancia menores o iguales al valor guía, sobre la base de criterios de salud, pueden afectar el olor o sabor del agua.
- NIA No hay información adecuada para recomendar y establecer un valor guía sobre la base de criterios de salud.
- (P) Valores guía provisionales. Este término se usa en constituyentes para los cuales hay alguna evidencia de riesgo potencial. La información disponible se limita a efectos en la salud donde un factor de incertidumbre mayor de 1.000 se emplea en la deducción del límite de ingestión diaria tolerable (TDI). También se recomiendan valores guía provisionales: (1) para aquellas sustancias en las cuales el valor guía calculado podría ser: a) más bajo que el nivel práctico de cuantificación, b) más bajo que el nivel que se puede alcanzar mediante los métodos de tratamiento utilizados en la práctica, o (2) cuando la desinfección puede influir haciendo exceder el valor guía.
- * Para sustancias que se consideran carcinogénicas, el valor guía es la concentración en el agua de bebida, con un grado de riesgo de cáncer durante el periodo de vida de 10⁻⁵ (un caso adicional de cáncer en una población de 100.000 que ingiere el agua de bebida con un contenido de la sustancia igual al valor guía, durante 70 años).

Tabla 3
Químicos orgánicos de significación para la salud
en el agua de bebida

ORGÁNICOS	VALOR GUÍA (µg/L)	OBSERVACIONES
<i>Alcanos clorados</i>		
Tetracloruro de carbono	2	
Diclorometano	20	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
1,1-dicloroetano	--	NIA
1,2-dicloroetano	30*	
1,1,1-tricloroetano	2.000	(P) ATO

ORGÁNICOS	VALOR GUÍA (µg/L)	OBSERVACIONES
<i>Etenos clorados</i>		
Cloruro de vinilo	5	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
1,1-dicloroeteno	30*	
1,2-dicloroeteno	50	
Tricloroeteno	70	(P)
Tetracloroeteno	40	
<i>Hidrocarburos aromáticos</i>		
Benceno	10*	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
Tolueno	700	ATO
Xilenos	500	ATO
Etilbenceno	300	ATO
Estireno	20	
Benzopireno	0,7*	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
<i>Bencenos clorados</i>		
Monoclorobenceno	300	ATO
1,2-diclorobenceno	1.000	ATO
1,3-diclorobenceno	--	NIA
1,4-diclorobenceno	300	ATO
Triclorobencenos (total)	20	ATO
<i>Orgánicos misceláneos</i>		
Adipato de di-2-etilhexil	80	
Ftalato de di-2-etilhexilo	8	
Acilamida	0,5*	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
Epiclorhidrina	0,4	(P)
Hexaclorobutadieno	0,6	
(EDTA) ácido edético	200	
Ácido nitrilotriacético	200	
Dialquilos de estaño	--	NIA
Óxido de tributilestaño	2	

PLAGUICIDAS	VALOR GUÍA (µg/L)	OBSERVACIONES
Alacloro	20*	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
Aldicarb	10	
Aldrina/dieldrina	0,03	
Atrazina	2	
Bentazona	30	
Carbofurano	5	
Clordano	0.20	
Clorotolurón	30	
DDT	2	
1,2-dibromo-3-cloropropeno	1*	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
2,4-D	30	
1,2-dicloropropano	20	(P)
1,3-dicloropropano	--	NIA
1,3-dicloropropeno	20*	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
Dibromuro de etileno	--	NIA
Heptacloro y heptacloroepóxido	0,03	
Hexaclorobenceno	1*	Grado de riesgo de 10 ⁻⁵ .
Isoproturón	9	(P)
Lindano	2	
MCPA	2	
Metoxicloro	20	
Metolacloro	10	
Molinate	6	
Pendimetalina	20	
Pentaclorofenol	9	
Permetrina	20	
Propanil	20	
Piridato	100	
Simazina	2	
Trifluralina	20	

HERBICIDAS		OBSERVACIONES
Fenóxidos distintos del 2,4-D y el MCPA		
Fenoprop	9	
Dicloropropano	100	
2,4-DB	90	
2,4,5-T	9	
Mecoprop	10	
MCPB	--	NIA
DESINFECTANTES	VALOR GUÍA (mg/L)	OBSERVACIONES
Monocloramina	3	
Di- y tricloramina	--	NIA
Cloro	5	ATO Para una desinfección efectiva se debe tener un cloro libre residual > 0,5 mg/L después de por lo menos 30 min de tiempo de contacto a pH < 8,0.
Dióxido de cloro		No se ha establecido un valor guía porque el dióxido de cloro rápidamente baja y porque el valor guía de clorito es una protección adecuada para el potencial de toxicidad del dióxido de cloro.
Yodo		NIA
PRODUCTOS SECUNDARIOS DE LA DESINFECCIÓN	VALOR GUÍA (µg/L)	OBSERVACIONES
Bromato	25*	(P) Grado de riesgo de $7(10)^{-5}$.
Clorito	200	(P)
Clorato	--	NIA
Clorofenoles		
2-clorofenol	--	NIA
2,4-diclorofenol	--	NIA
2,4,6-triclorofenol	200*	Grado de riesgo de $7(10)^{-5}$.
Formaldehído	900	
MX		NIA

<i>Trihalometanos</i>		La relación de la suma de las concentraciones de cada uno con su respectivo valor guía no deberá exceder de 1.
Bromoformo	100	
Dibromoclorometano	100	
Bromodiclorometano	60*	Grado de riesgo de 10^{-5} .
Cloroformo	200*	Grado de riesgo de 10^{-5} .
Ácidos acéticos clorados		
Ácido monocloroacético	--	NIA
Acido dicloroacético	50	(P)
Ácido tricloroacético	100	(P)
Hidrato clorado (tricloroacetaldehído)	10	(P)
Cloroacetona	--	NIA
Acetonitrilos halogenados		
Dicloroacetonitrilo	90	
Dibromoacetonitrilo	100	
Bromocloroacetonitrilo	--	NIA
PRODUCTOS SECUNDARIOS DE LA DESINFECCIÓN	VALOR GUÍA (µg/L)	OBSERVACIONES
Tricloroacetonitrilo	1	(P)
Cloruro de cianógeno (como CN)	70	
Cloropicrina	--	NIA

Notas

- ATO Concentraciones de la sustancia menores o iguales al valor guía, sobre la base de criterios de salud, pueden afectar el olor o sabor del agua.
- NIA No hay información adecuada para recomendar y establecer un valor guía sobre la base de criterios de salud.

- (P) Valores guía provisionales. Este término se usa en constituyentes para los cuales hay alguna evidencia de riesgo potencial. La información disponible se limita a efectos en la salud donde un factor de incertidumbre mayor de 1.000 se emplea en la deducción del límite de ingestión diaria tolerable (TDI). También se recomiendan valores guía provisionales: (1) para aquellas sustancias en las cuales el valor guía calculado podría ser: a) más bajo que el nivel práctico de cuantificación, b) más bajo que el nivel que se puede alcanzar mediante los métodos de tratamiento utilizados en la práctica, o (2) cuando la desinfección puede incluir haciendo exceder el valor guía.

* Para sustancias que se consideran carcinogénicas, el valor guía es la concentración en el agua de bebida, con un grado de riesgo de cáncer durante el periodo de vida de 10^{-5} (un caso adicional de cáncer en una población de 100.000 que ingiere el agua de bebida con un contenido de la sustancia igual al valor guía, durante 70 años).

2. MÉTODOS GENERALES DE TRATAMIENTO

2.1 Objetivos del tratamiento

Los objetivos del tratamiento para mejorar la calidad del agua de abastecimiento son de los siguientes tipos:

Higiénico: remover bacterias y elementos venenosos o nocivos, así como resolver la mineralización excesiva y las concentraciones elevadas de compuestos orgánicos, protozoarios y otros microorganismos.

Estético: corregir el color, la turbidez, el olor y el sabor.

Económico: reducir la corrosividad, la dureza, el color, la turbidez; reducir las concentraciones de hierro y manganeso; resolver problemas de olor y sabor, etcétera.

2.2 Procesos de tratamiento

Los procesos de tratamiento son los siguientes:

- aeración;
- coagulación;
- floculación;
- decantación o sedimentación;
- filtración;
- tratamiento por contacto;
- corrección de la dureza;
- desinfección;
- sabor y olor;
- control de la corrosión, y
- cloración.

3. AERACIÓN DEL AGUA

3.1 Introducción

La aeración es el proceso de tratamiento mediante el cual se incrementa el área de contacto del agua con el aire para facilitar el intercambio de gases y sustancias volátiles.

La aeración se realiza por tres razones:

1) Remoción de gases disueltos:

- a) Gas carbónico presente en el agua en forma natural;

- b) gas sulfhídrico proveniente de la putrefacción o fermentación de los depósitos orgánicos putrescibles o fermentables del fondo de los reservorios;
- c) cloro en exceso (proveniente de la supercloración).

2) Introducción del oxígeno del aire en el agua:

- a) Para oxidar el fierro y el manganeso, cuya remoción se realiza mediante la decantación y filtración (de esta manera también se reduce el sabor debido al hierro y al manganeso);
- b) para añadir oxígeno en el agua hervida o destilada.

3) Remoción de sustancias causantes de sabores y olores:

- a) Sustancias oleaginosas provenientes de algas y otros organismos (cuando son volátiles);
- b) gas sulfhídrico;
- c) sabores debidos al hierro y al manganeso;
- d) descomposición de la materia orgánica (quema).

Cuando se remueve el gas carbónico o se reduce la tendencia corrosiva del agua y el consumo de alcalis, se obtiene un aumento del pH. En la práctica, es imposible la reducción por aeración de todo gas carbónico presente en el agua debido a que el gas carbónico del aire también puede disolverse.

La remoción del gas sulfhídrico por aeración es lo suficientemente eficaz para reducir los olores, sabores y demanda del cloro.

3.2 Principales tipos de aeradores

1) Aeradores de gravedad: son los siguientes:

- a) *Aeradores de cascada*: el principio general consiste en esparcir el agua al máximo y dejarla correr sobre obstáculos para producir turbulencia. La estructura más simple es la de escaleras, las cuales esparcen el agua y permiten la caída de un nivel a otro.
- b) *Aeradores de bandejas*: consisten en una serie de bandejas con hendiduras o perforaciones o con un fondo de malla de alambre sobre las cuales se distribuye el agua para que caiga en un estanque de recolección. Algunos aeradores de este tipo están dotados de un lecho grueso de trozos de carbón o bolas de cerámica, cuyo espesor varía de 5 a 15 centímetros y que se coloca en las bandejas para lograr mayor eficacia y producir mayor turbulencia. Los lechos gruesos son eficaces, especialmente cuando se utilizan como auxiliares catalizadores de las reacciones de oxidación, para causar la precipitación del óxido de fierro y el manganeso (pirolusita).

2) Aeradores de aire difuso: por lo general, son tanques rectangulares de concreto con tubos perforados o placas porosas u otros dispositivos que se encuentran cerca del fondo y a través de los cuales el aire comprimido se inyecta en el sistema. Como resultado, se producen burbujas de aire que aumentan el contacto entre el agua y el aire.

La cantidad de aire que se requiere depende de la finalidad de la aeración.

3) Aeradores de aspersión: están compuestos por boquillas colocadas en un tubo de distribución. Los aeradores de aspersión poseen un valor estético y agradan al público (son fuentes luminosas). Necesitan un área grande y por ello no son económicos. Son los aeradores más eficaces para el intercambio de gases y sustancias volátiles.

3.3 Control del proceso de aeración

El control del proceso de aeración consiste en determinar la concentración de oxígeno disuelto, gas carbónico libre, gas sulfhídrico y el valor del pH.

El proceso de aeración tendrá éxito si se cumplen las siguientes tres condiciones simultáneamente:

- cuando la concentración de oxígeno disuelto está entre 7 y 10 ppm;
- cuando la concentración de gas carbónico se ubica entre 3 y 5 ppm;
- cuando hay ausencia total de gas sulfhídrico.

3.4 Limitaciones

El oxígeno que se incorpora al agua durante el proceso de aeración puede volverla más corrosiva y formar, con el hierro de la tubería, tubérculos que reducen su diámetro y su capacidad de escurrimiento.

Por ello, la aeración no se debe utilizar indiscriminadamente sino solo cuando las finalidades están controladas.

La aeración no siempre es un método eficaz para la remoción o reducción de los sabores y olores debido a que muchas de las sustan-

cias que causan estas características indeseables no son suficientemente volátiles. Por ejemplo, los aceites esenciales de las algas.

4. COAGULACIÓN

4.1 Generalidades

Las impurezas que contiene el agua pueden estar en los siguientes estados:

- en suspensión;
- disueltas;
- suspensiones concentradas: en particular vegetales, restos de hojas, vegetales (macroscópicos), sílice, etcétera, que pueden flotar o sedimentarse fácilmente cuando el agua está en reposo;
- suspensiones finas: turbidez, bacterias, plancton, etcétera;
- coloidales: dureza, en parte (sales de calcio y magnesio); fierro y manganeso no oxidados, etcétera.

La coagulación tiene como finalidad anular las cargas eléctricas de las partículas y transformar las impurezas que se encuentran en suspensiones finas o en estado coloidal y algunas que están disueltas en partículas que puedan ser removidas por la decantación (sedimentación) y la filtración. Tales aglomerados gelatinosos se agrupan y producen los flóculos (floculación).

4.2 Sustancias químicas utilizadas

Las sustancias químicas utilizadas en la coagulación se pueden clasificar en tres categorías:

1) Coagulantes: compuestos de aluminio o de fierro que generalmente pueden producir hidróxidos gelatinosos no solubles y absorber las impurezas.

2) Alcalinizantes: cal viva (óxido de calcio), hidróxido de calcio, hidróxido de sodio (soda cáustica), carbonato de sodio (carbonato sódico), que pueden proporcionar la alcalinidad necesaria para la coagulación.

3) Coadyuvantes de la coagulación: compuestos (arcilla, sílice activada, polielectrólitos, etcétera), que se pueden convertir en partículas más densas y hacer que los flóculos sean más firmes.

Los coadyuvantes de fórmulas desconocidas se deben utilizar con mucha reserva porque en su composición pueden contener elementos no recomendables para la salud.

4.3 Propiedades de los coagulantes

1. Actúan con los alcalis para producir hidróxidos gelatinosos que contienen y absorben impurezas. Esta propiedad es más adecuada para la remoción de la turbidez.
2. Producen iones trivalentes de cargas eléctricas positivas, que atraen y neutralizan las cargas eléctricas de los coloides protegidos que, por lo general, son negativas. Esta propiedad es más adecuada para la remoción del color.

4.4 Factores que influyen en la coagulación

1. Tipo de coagulante:
 - de aluminio;
 - de hierro.
2. Cantidad de coagulante. Esta cantidad tiene relación con dos factores:

- la turbidez y el color que se va a remover;
- la concentración bacteriológica.

Las dosis de coagulantes más adecuadas son las que reducen más la concentración bacteriológica y dan como resultado mayor economía en la desinfección.

Hay tablas que relacionan la cantidad de coagulante con la de turbidez del agua. Sin embargo, la cantidad exacta solamente se puede determinar con una prueba. En esta investigación, el equipo de prueba de jarras es de gran ayuda.

3. Concentración y tipo de color y turbidez:

- mayor o menor cantidad de coloides protegidos;
- mayor o menor cantidad de partículas en suspensión;
- sustancias coloreadas disueltas, etcétera.

4. Otras características químicas del agua:

- alcalinidad natural;
- concentración de hierro;
- materia orgánica, etcétera.

Cada mg/L (ppm) de sulfato de aluminio aplicado actúa con 0,45 mg/L (ppm) de alcalinidad.

5. Concentración de iones-hidrógeno en el agua (pH):

- hay un pH óptimo de floculación, que se determina experimentalmente.

6. Tiempo de retención de las unidades de mezcla rápida y lenta:

- *unidades de mezcla rápida:* el tiempo deberá ser instantáneo y en este lapso se debe dispersar el coagulante de tal modo que la reacción de coagulación se produzca en toda la extensión de la masa líquida;
- *lenta:* para la formación de flóculos (floculación). Aglomeración del material gelatinoso (coágulo) en partículas mayores que se decantan con mayor rapidez (flóculos).

7. Temperatura:

- la coagulación es mejor cuando la temperatura es alta.

8. Agitación:

- si hay poca velocidad en la agitación, la formación de flóculos disminuye y dificulta la decantación.

9. Presencia de núcleos:

- los coadyuvantes de la floculación (aditivos de floculación) son sustancias que pueden impulsar núcleos más densos para obtener flóculos más pesados.

Observación: el proceso de coagulación implica la dispersión del coagulante, su reacción con la alcalinidad para la formación del gel e inclusive la aglomeración de dicha gelatina para la formación del flóculo (floculación).

En una planta de tratamiento de agua, tal fenómeno sucede de dos maneras distintas: mezcla rápida y mezcla lenta.

4.5 Coagulantes de aluminio

Sulfato de aluminio: es el más utilizado para el tratamiento del agua.

Fórmula química: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$

Se puede presentar de tres formas:

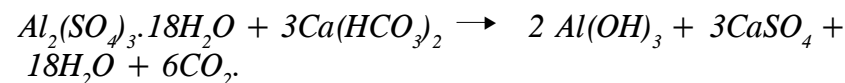
Blanco: llamado también *libre de hierro*. Es más costoso debido a que posee una característica que no es indispensable (libre de hierro).

Amarillo: es el más común y económico. Se produce mediante la reacción del ácido sulfúrico comercial con la bauxita pulverizada.

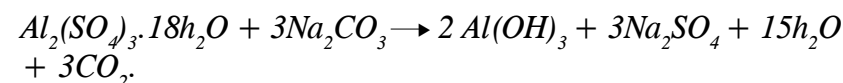
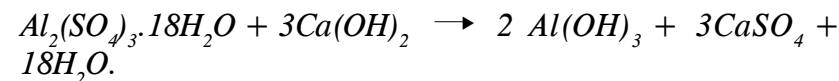
Negro: mezcla homogénea de sulfato de aluminio (blanco o amarillo) con 2 a 5% de carbón activo. Se utiliza para el control del sabor y del olor. La coagulación con hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$ se realiza en la zona de pH entre 5,0 y 8,0 por la reacción del sulfato con la alcalinidad natural o cuando se añade al agua.

Teóricamente, las reacciones son las siguientes:

- con la alcalinidad natural;



- con la alcalinidad agregada;



- sulfato doble de aluminio y amonio:

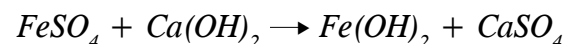
$Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$, llamado también *alumbre de amonio*.

- alumbre de sodio:

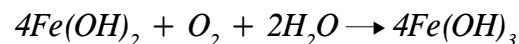
$Na_2O \cdot Al_2O_3$, llamado también *alumbre de soda*.

4.6 Coagulantes del hierro

Sulfato de hierro II ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), sulfato ferroso (vitriolo verde). No muy utilizado, subproducto de bajo costo de industrias siderúrgicas; en el agua se transforma en hidróxido de hierro III [$Fe(OH)_3$], después de pasar por las siguientes dos etapas:



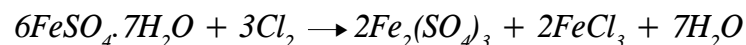
El $Fe(OH)_2$ se oxida y se transforma en $Fe(OH)_3$ debido al oxígeno disuelto en el agua.



Proceso de extraer el aire del agua (reducir el O_2 disuelto).

Esta reacción se produce en la zona de pH entre 9,0 y 11,0.

Sulfato de hierro II-clorado (sulfato ferroso clorado):



La oxidación de Fe^{++} a Fe^{+++} dependerá del cloro y no del oxígeno disuelto.

La coagulación se produce en dos zonas de pH: entre 4,0 y 6,0 ó por encima de 9,0 sin peligro de que el floculo formado se vuelva a disolver.

Sulfato de hierro III: $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$

Cloruro de hierro III: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

Anhidro: $FeCl_3$



Zona de floculación: pH entre 4,0 y 11,0.

4.7 Alcalinizantes

- La cal virgen o viva, la cal hidratada o extinta y la cal dolomítica son denominaciones comerciales del óxido de calcio (CaO), del hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$] y de mezclas derivadas tales como el óxido de magnesio (MgO) y el hidróxido de magnesio [$Mg(OH)_2$] en proporciones que pueden alcanzar el 50%. Los efectos de la neutralización del CaO o MgO , $Ca(OH)_2$ o $Mg(OH)_2$ son teóricamente equivalentes. En la práctica, en la corrección final del pH, la parte de magnesio de la mezcla tiene menor solubilidad que la del calcio. Inicialmente, se presenta en el agua como turbidez. La parte de calcio se solubiliza y actúa hasta alcanzar el pH deseado. La turbidez de magnesio (de solubilidad retardada), al solubilizarse en la tubería, vuelve a producir el pH.

Especificaciones para la adquisición:

Cal virgen: CaO. En el extintor, deberá extinguirse rápidamente sin producir una cantidad excesiva de material no disuelto o extinto.

No se debe aceptar cal con menos del 70% en CaO.

Cal hidratada: CaO 90%. No aceptable menos de 60%.

Carbonato de sodio: Na₂CO₃

99,4% de Na₂CO₃

58% de Na₂O

5. DOSIFICADORES

Sulfato de aluminio.

Se puede dosificar por las siguientes vías:

- vía húmeda;
- vía seca.

5.1 Dosificadores por vía húmeda

Las soluciones se preparan en tanques apropiados (de concreto, asbesto, cemento o fibra de vidrio), debidamente protegidos con pintura antiácida.

Tales tanques poseen un dispositivo manual o mecánico de agitación para homogeneizar la solución. La agitación debe mantenerse durante una a dos horas, dependiendo del tipo de coagulante que se esté empleando.

En aguas poco turbias (o en el uso del sulfato negro), el trabajo del agitador es conveniente para mantener las partículas insolubles en suspensión.

Para otros tipos de agua, se utiliza la solución decantada.

La solución se debe preparar en una concentración de 1 a 2% y se debe aplicar en el agua mediante dosificadores que pueden ser los siguientes:

- tanque de nivel constante, con orificio graduable;
- tanque de nivel constante, con dosificador rotativo;
- tanque de nivel constante y bomba con retorno del líquido excedente, y
- bomba de diafragma regulable.

5.2 Dosificadores por vía seca

Para utilizar el sulfato en el dosificador por vía seca, este debe tener tal granulometría que no menos del 90% pase por una malla de 10 orificios por pulgada y 100% por una malla de 4 orificios por pulgada. No deberá contener mucho polvo para que el arco formado por la compactación del polvo en las paredes no interrumpa la dosificación.

Los dosificadores pueden ser:

- dosificadores volumétricos de disco rotativo;
- volumétricos vasculantes;
- volumétricos de correa, y
- gravimétricos.

Para la disolución del sulfato, posterior al dosificador, el volumen de agua debe ser por lo menos equivalente a la preparación de una solución al 1 % del producto dosificado.

Observaciones: toda tubería utilizada en el transporte de la solución de sulfato de aluminio debe ser superficial (es decir, no debe estar enterrada) y con un PVC de rigor clase 12. Los registros deben ser del tipo membrana, cuyo interior resiste la corrosión.

Es preferible que la tubería que conduce la solución no esté tendida horizontalmente. En caso de necesitar codos, se los debe usar operculados o con tubos en forma de te o una cruz con tapón, para facilitar la limpieza.

La dosificación requerida para el tratamiento se realiza a partir de experiencias en laboratorio (ensayo de coagulación).

Es importante y económico elegir para la aplicación del coagulante el punto de mayor agitación. La reacción del sulfato de aluminio y la alcalinidad natural (o adicionada) es instantánea y debe producirse en toda la extensión de la masa líquida (para no tener porciones de agua sin tratamiento).

Lo establecido para los coagulantes de aluminio también es válido para los coagulantes de fierro.

Cal viva (CaO), cal hidratada Ca(OH)_2 . La cal virgen o hidratada se emplea para los siguientes fines:

- 1) optimizar la coagulación; ajuste del pH óptimo;
- 2) corrección del pH final del agua tratada (después de la cloración).

La dosis, en ambos casos, se puede aplicar en forma de lechada de cal o de agua saturada de cal, o inclusive, con dosificadores al seco (cal hidratada).

Lechada de cal. La preparación de la lechada de cal se realiza en el extintor, donde la cal virgen se quema y la hidratada se mezcla con el agua por medio de agitadores.

La mezcla se diluye en tanques de alimentación y de dosificación, provistos de agitadores para mantener la cal permanentemente en suspensión.

La suspensión dosificada de dicha manera se envía a la entrada (en el caso de ajuste del pH óptimo de floculación) o a la salida del tratamiento (en el caso de la corrección final del pH) o a ambos puntos de la planta de tratamiento de agua, mediante tuberías y con una inyección de agua auxiliar.

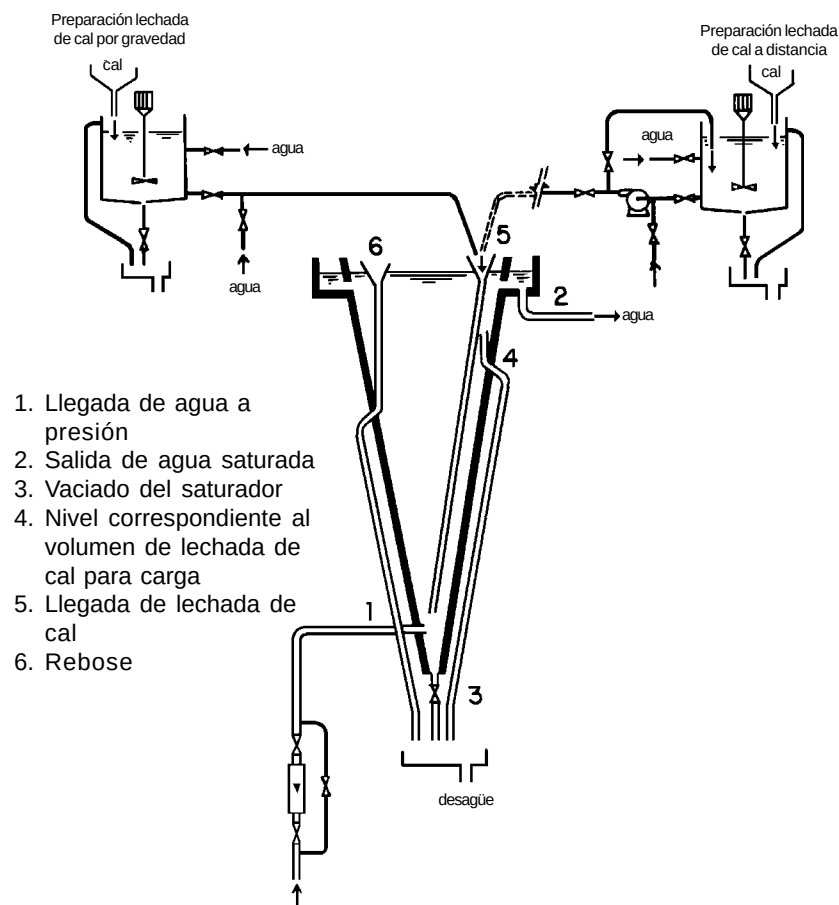
La suspensión de lechada de cal se prepara en una concentración de 5 %.

Agua saturada de cal. Primero se prepara una suspensión con cal virgen o hidratada en el extintor, como en el caso anterior y luego dicha solución se dirige a los saturadores mediante la tubería. El saturador es un compartimiento de forma cónica apoyado en el vértice, que tiene como centro una tubería que baja hasta el fondo próximo.

La suspensión preparada en el extintor se coloca en el saturador y luego se deposita. El agua añadida por la pileta atraviesa la capa de cal precipitada de la suspensión y, al saturarse, se derrama de una cubeta que hay en el extremo superior del tanque. Luego, el agua

saturada se transporta hacia la entrada o la salida de la planta de tratamiento de agua mediante tuberías (véase la Figura 1).

Figura 1



Saturador estático de cal

La dosificación se regula con el volumen de entrada de agua al saturador y la carga se controla mediante análisis, por titulación, del agua saturada.

En seco

Mide la dosis de cal en seco. El proceso es idéntico al del dosificador en seco de sulfato de aluminio.

La dosificación de cal se debe realizar según la finalidad que se persiga:

- para mejorar la coagulación;
- para la corrección final del pH.

La dosis de cal para mejorar la coagulación del agua (en caso de ser necesaria) se determina en función de un ensayo de laboratorio (ensayo de prueba de jarras).

La dosis de cal para la corrección final del pH se determina mediante el ensayo de saturación de carbonato (pHs).

La corrección final del pH se realiza con el propósito de eliminar la posibilidad de corrosión de la tubería, así como para colocar una película de carbonato de calcio que evite el contacto del agua con el hierro de la tubería.

6. CÁMARAS DE MEZCLA

6.1 Introducción

Una vez que se han agregado las sustancias químicas al agua, tenemos dos fases:

- mezcla rápida;
- mezcla lenta o floculación.

La mezcla rápida tiene el propósito de dispersar en forma uniforme e instantánea los productos químicos en el agua que se va a tratar.

La mezcla lenta va a permitir el desarrollo de los flóculos.

6.2 Cámaras de mezcla rápida

Los reactivos químicos se deben distribuir de manera rápida y uniforme por toda la masa líquida.

Para lograr este objetivo se deben aplicar en puntos de mucha turbulencia, originados por resaltos hidráulicos, cámaras con deflectores, mezcladores mecánicos, etcétera.

Los mezcladores mecánicos se componen de tanques provistos de agitadores mecánicos; con entrada de agua por la parte inferior o por el fondo y la salida por la parte superior.

En los mezcladores no mecanizados o hidráulicos se aprovecha la energía del agua para realizar la mezcla.

Los tipos más comunes son los siguientes:

a) Cámaras con deflectores:

- deflectores para introducir movimiento horizontal al agua;
- deflectores con movimiento vertical del agua (son más comunes).

b) Resalto hidráulico: medidores Parshall, vertederos rectangulares, rampas, etcétera.

c) Difusores en canales o en tuberías.

6.3 Cámaras de mezcla lenta. Floculadores

Están destinados a promover una agitación moderada, para que los flóculos se formen bien. Las cámaras de mezcla lenta pueden ser mecanizadas o hidráulicas:

- Floculadores mecánicos: pueden ser de eje vertical u horizontal.
- Floculadores hidráulicos:



Floculadores de pantallas de flujo horizontal (fotografía superior) y vertical (inferior)

- cámaras con deflectores o pantallas con movimiento horizontal del agua;
- cámaras con deflectores o pantallas con movimiento vertical del agua (son más comunes).
- cámaras del tipo Alabama, conformadas por compartimientos donde el agua realiza un movimiento ascendente-descendente. Estas unidades son poco comunes por su alta sensibilidad a las variaciones del caudal de operación. Con caudales muy bajos, puede anularse el trabajo de la unidad.

6.4 Observaciones

- 1) Puede haber una combinación de floculador mecánico y floculador de pantallas para obtener una agitación más rápida al principio y más lenta después.
- 2) Asimismo, los floculadores de pantallas deben tener varios tramos con espaciamentos diferentes entre las pantallas. El espaciamiento entre las primeras pantallas debe ser menor, para que la agitación del agua sea mayor que en las últimas.
- 3) Los floculadores de pantallas se calculan de acuerdo con la cantidad de agua que se va a tratar. Cuando la cantidad aumenta, el agua pasa más rápidamente y la floculación no es buena. Si, por el contrario, la cantidad de agua disminuye, la velocidad del agua también lo hace, el flóculo no se forma bien y se produce sedimentación entre las pantallas.

Cuando se trata de unidades mecánicas, estos inconvenientes se pueden compensar si se regula la velocidad de agitación de las paletas.

- 4) Aspectos que deben recibir especial atención y cuidado por parte de los operadores:



Floculadores mecánicos

- a) lubricación de las partes mecánicas;
- b) limpieza periódica: esta limpieza se realiza vaciando la unidad. Debe ser simultánea a la limpieza de los decantadores;
- c) comprobar en qué parte de la unidad se está empezando a formar el flóculo. Lo deseable es que se forme en el primer tercio de la unidad.
- d) si en los primeros compartimientos se está formando una espuma amarillenta sobre la superficie del agua, se requiere revisar la dosis coagulante que se está aplicando o el ajuste o calibración del dosificador porque esto indica que la dosis de coagulante es excesiva;
- e) verificar la existencia de zonas muertas, donde se pueden depositar los flóculos. Este material depositado se fermenta fácilmente y puede producir sabor y olor en el efluente de la planta;

- f) verificar si por el exceso de velocidad de las aguas, los flóculos no se rompen en la entrada de los decantadores. Si esto sucede, se debe disminuir el caudal;
- g) revisar si faltan pantallas, porque esto distorsiona el flujo dentro de la unidad, lo cual crea zonas muertas y pasos directos del agua que anulan el recorrido entre el conjunto de pantallas. Esto disminuye el tiempo de permanencia del agua en la unidad y afecta la formación del flóculo;
- h) revisar la disposición de las pantallas después de una actividad de mantenimiento en que estas hayan sido removidas y comprobar que no se haya alterado el espaciamiento entre ellas y la amplitud de las vueltas. Cuando el espaciamiento entre las pantallas se reduce, se crean variaciones en la velocidad del flujo, que afectan muy negativamente la formación del flóculo.

7. DECANTACIÓN

7.1 Introducción

La decantación es el proceso mediante el cual se promueve el depósito del material en suspensión por acción de la gravedad.

Por lo general, las aguas en movimiento arrastran partículas granulares y materia floculenta que, por su carácter liviano, se mantienen en suspensión.

La remoción de materiales en suspensión se obtiene al reducir la velocidad del agua, hasta lograr que las partículas en suspensión se depositen en determinado tiempo de retención. Este proceso se produce en los decantadores.

El decantador es un tanque generalmente de sección rectangular o circular, cuyo fondo muchas veces está inclinado hacia uno o más puntos de descarga. Este tanque posee dispositivos de entrada y salida del agua, previstos para evitar cortocircuitos y zonas muertas y obtener una mejor distribución del líquido en el interior de la unidad.

7.2 Mecanismos de la decantación

Cada partícula tiene una velocidad máxima por encima de la cual no hay decantación.

Esta velocidad depende de la forma y, principalmente, de la densidad de la sustancia considerada.

Una partícula dentro de la masa de agua del decantador está sujeta a la acción de dos fuerzas:

- 1) fuerza horizontal resultante del movimiento del agua en el decantador, que origina la velocidad horizontal (V_H);
- 2) fuerza vertical debida a la acción de la gravedad, que causa la velocidad de sedimentación (V_s).

En consecuencia, la partícula avanza en el decantador y baja simultáneamente hasta aproximarse al fondo.

Si en el decantador la partícula solo posee tales movimientos, entonces el tiempo necesario para que el agua lo atravesase sería igual al tiempo que demora en llegar al fondo, pero esto, en la práctica, no sucede, porque existen movimientos ascendentes del agua que se deben a las variaciones de temperatura, a la acción de los vientos, etcétera.

El periodo teórico de retención en un decantador equivale al volumen del tanque dividido por el caudal. Como en todo decantador existen espacios muertos, cortocircuitos, etcétera, el periodo real de retención siempre es inferior al teórico (el tiempo normal de travesía del agua en el decantador es de 4 a 6 horas).

7.3 Zonas del decantador

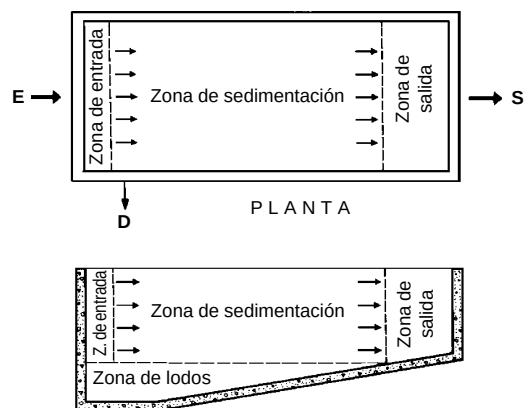
La conformación de esta estructura depende del tipo de decantador. En la práctica, los más usuales son los convencionales, los decantadores de placas y los clarificadores de manto de lodos.

a) Decantador convencional de flujo horizontal

Este decantador se puede dividir en cuatro zonas:

- 1) zona de turbulencia o de entrada;
- 2) zona de sedimentación o de decantación;
- 3) zona de recolección o de salida;
- 4) zona de depósito de lodos.

Figura 2



Corte longitudinal de un decantador

- 1) **Zona de entrada.** En esta zona las partículas se encuentran en turbulencia. Se caracteriza por cierta agitación; la ubicación de las partículas varía y las “nubes” de flóculos cambian de lugar constantemente (fenómeno de entrada).
- 2) **Zona de decantación.** Es la zona donde las “nubes” de flóculos se mantienen aparentemente inmóviles o estacionarias. En esta zona no hay agitación y las partículas avanzan de manera longitudinal y simultánea y descienden lentamente en dirección a la zona de reposo o zona de depósito de lodos.
- 3) **Zona de recolección o de salida.** Esta zona es relativamente tranquila, como la segunda. Sin embargo, en la salida, los flóculos que no llegaron a depositarse en la zona de reposo siguen el movimiento ascendente del agua y traspasan la estructura de salida (efecto de salida).
- 4) **Zona de depósito de lodos o tolvas de almacenamiento de lodos.** Es la zona de reposo, donde finalmente se acumula el lodo. Esta zona no sufre la influencia de la corriente de agua del decantador, a no ser que ocurran anomalías (inversión de las capas de agua por un cambio brusco de temperatura, fermentación del lodo, etcétera).

Cuando el lodo llena las tolvas de almacenamiento de lodos y comienza a alcanzar otras zonas, se debe lavar el decantador para que la corriente de agua ascendente no arrastre los flóculos fuera de la unidad.



Decantador convencional

Tal aumento de flóculos se observa en el canal de salida del decantador (zona de recolección). Sin embargo, la fermentación (putrefacción) del lodo inferior puede comenzar antes de que se produzca dicha situación y puede darse un desprendimiento de gases que provocan olor y sabor desagradables en el efluente de la planta.

b) Decantador laminar de placas paralelas

En estas unidades la estructura de entrada está constituida por un canal de altura variable, ubicado en el nivel inferior del canal central de la unidad. Este canal tiene orificios a ambos lados del fondo, por donde sale el agua floculada y se eleva por el módulo de placas y, finalmente, alcanza el sistema de tuberías de recolección de agua decantada, que descargan en el nivel superior del canal central.

La capacidad de producción de estas unidades es muy superior a la de una unidad convencional de la misma área, debido a la serie de placas paralelas inclinadas a 60° , colocadas en la zona de decantación.



Decantador laminar de placas paralelas

7.4 Lavado del decantador

Se realiza por dos motivos:

- a) cuando la tolva de almacenamiento de lodo se llena;
- b) cuando comienza la fermentación del lodo almacenado.

El primer caso ocurre cuando el agua presenta alta turbidez y se produce gran cantidad de lodo.

El segundo caso se produce cuando el tratamiento es discontinuo o el agua cruda está clara y se forma poco lodo. En este caso, la fermentación se inicia antes de que el lodo llegue a llenar las tolvas.

En la zona de turbulencia, se sabe que hay fermentación cuando aparecen unas pequeñas burbujas de gas en su superficie.

Si el operador no observa este fenómeno y la fermentación continúa, no solo se van a producir sabor y olor desagradables sino que,

además, van a aparecer grandes placas de lodo en la zona de decantación (lo que producirá un aspecto similar a la piel de un reptil).

Por lo general, la capa espesa de lodo o el inicio de fermentación se produce después de tres o cuatro meses de usar el decantador, según la calidad del agua y la temperatura ambiental.

En este caso, se debe proceder con el lavado del decantador, que, de preferencia, se realiza con una manga de agua.

Algunas veces, en las paredes del decantador y en los canales, tanto de entrada como de salida, se forman incrustaciones de algas y de lodo, que dan un mal aspecto y pueden llegar a los filtros e impedir su buen funcionamiento. Cuando esto sucede, se debe realizar una limpieza para retirar tales incrustaciones con más frecuencia sin tener que vaciar el decantador.

Los decantadores de placas están provistos de sistemas hidráulicos de extracción de lodo y no es necesario ingresar a la unidad para efectuar la limpieza en forma manual. Por esta razón, las tolvas de almacenamiento no son tan grandes como en el caso de las unidades convencionales. En época de lluvias, pueden operar sin interrupciones y efectuar descargas de lodo cada cuatro horas. Para ello se procederá del siguiente modo:

- cerrar la compuerta de ingreso de agua floculada;
- abrir las válvulas de los colectores o canales de extracción de lodo;
- observar que el nivel del agua sobre las placas baje 30 centímetros, y
- cerrar la válvula de lodo y abrir la compuerta de entrada.

En época de seca, esta operación se efectuará cada semana y en climas cálidos, como mínimo, cada tres días, para evitar la descomposición del lodo.

7.5 Sistemas de remoción de lodo

- **Simple:** remoción manual, remoción continua.
- **Mecanizado:** remoción intermitente, remoción continua.

La mecanización del decantador para extraer el lodo se puede realizar por dos razones: debido a la gran cantidad de material sedimentable existente en el agua que va a ser tratada y por la naturaleza del lodo, que es rápidamente putrescible.

7.6 Observaciones

La decantación es una operación de preparación del agua para la filtración. Cuanto mejor sea la decantación, más eficiente será la filtración.

En consecuencia, para tener una decantación perfecta, se deben tomar las siguientes precauciones:

- 1) correcta aplicación de coagulantes al pH óptimo (incluye la aplicación de alcalinizante, en caso de que sea necesario);
- 2) mezcla rápida eficaz;
- 3) mezcla lenta suficiente para producir buenos flóculos, grandes y pesados;
- 4) limpieza rutinaria de los decantadores.

Cuando la flora acuática es relativamente grande (algas), se recomienda pintar las paredes de los decantadores con caldo bordelés.

Operación: lave bien las paredes con cepillo. Deje secar y pinte con caldo bordelés y con ayuda de pinceles o pulverizadores. No llenar el decantador hasta que la pintura esté bien seca.

Preparación de caldo bordelés:

- disuelva un kilo de sulfato de cobre en 50 litros de agua;
- añada 500 gramos de cal a otros 50 litros de agua;
- añada gotas del indicador fenolftaleína a una muestra de la mezcla (a + b). Debe dar la coloración característica de alta alcalinidad; de no ser así, agregue más preparado (b). Pinte las paredes con caldo bordelés.

Cantidad

Se debe considerar que la cantidad de caldo bordelés que se necesita para la pintura de un decantador debe ser tal que al llenar el decantador, considerando que toda la pintura esté disuelta, la dosis de sulfato de cobre en el agua no sea superior a un miligramo por litro (un gramo de CuSO_4 por metro cúbico de agua).

7.7 Control de proceso de decantación

Para ahorrar agua en el lavado de los filtros, es importante que el agua decantada que ingrese a estas unidades sea de la mejor calidad posible, para que las carreras de operación de los filtros sean largas.

En ese caso, se debe considerar lo siguiente:

- el agua decantada debe tener un color bajo, de 5 a 10 UC como máximo.
- la turbidez debe ser baja; idealmente, no mayor de 2 UNT. El decantador debe remover por lo menos 90% de la turbidez del agua cruda.

$$\frac{(\text{turbidez del agua cruda} - \text{turbidez del agua decantada}) \times 100}{\text{turbidez del agua coagulada}} \cong 90\%$$

Una turbidez o color elevado puede significar que la decantación no es eficaz debido a alguna de las siguientes razones:

- dosis de coagulante inadecuada;
- pH óptimo de coagulación erróneo;
- problemas de diseño o de mantenimiento del floculador, y
- decantadores sucios.

La determinación del oxígeno consumido también es un óptimo proceso de control de la eficiencia de la decantación, que se puede comparar con la del agua cruda. El porcentaje de reducción debe ser el siguiente:

$$\frac{(O_2 \text{ consumido del agua cruda} - O_2 \text{ consumido del agua decantada}) \times 100}{O_2 \text{ consumido del agua cruda}} > 50\%$$

La comparación de conteo de colonias en placas Petri de agar patrón (agua cruda y agua decantada) también constituye un proceso de control de la decantación.

El control con todos los medios puede ofrecer al operador formas distintas de garantizar la eficiencia del proceso de decantación y mejorar sus instrumentos para corregir eventuales deficiencias.

Observación: estas determinaciones, comparadas con el modelo final del agua, pueden proporcionar al operador excelentes parámetros de decantación para el sistema que opera.

Si al lavar el decantador los parámetros mencionados no fueran alcanzados:

- la turbidez del agua decantada aumenta y el porcentaje de reducción disminuye (cuando la zona de reposo llega a otras zonas, la zona de ascensión presenta un gran número de flóculos);
- el O_2 consumido aumenta (el porcentaje de reducción disminuye) cuando el lodo entra en fermentación, etcétera.

8. FILTRACIÓN

La filtración del agua consiste en hacerla pasar por sustancias porosas que puedan retener o remover algunas de sus impurezas.

Por lo general, se utiliza como medio poroso la arena soportada por capas de piedras, debajo de las cuales existe un sistema de drenaje.

Con el paso del agua a través de un lecho de arena se produce lo siguiente:

- la remoción de materiales en suspensión y sustancias coloidales;
- la reducción de las bacterias presentes;
- la alteración de las características del agua, inclusive de sus características químicas.

Los fenómenos que se producen durante la filtración son los siguientes:

- a) la acción mecánica de filtrar;
- b) la sedimentación de partículas sobre granos de arena;
- c) la floculación de partículas que estaban en formación, debido al aumento de la posibilidad de contacto entre ellas;
- d) la formación de la película gelatinosa en la arena, producida por microorganismos que se reproducen allí (filtro lento).

8.1 Clasificación de los filtros

1) Según la tasa o velocidad de filtración:

- *filtros lentos:* funcionan con una tasa media de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$;
- *filtros rápidos:* con una tasa media de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$.

2) Según la presión, los filtros rápidos pueden ser de dos tipos:

- *de presión:* cerrados, metálicos, en los cuales el agua que va a ser tratada se aplica a presión (usados en piscinas e industrias);
- *de gravedad:* los más comunes.

8.2 Filtros lentos

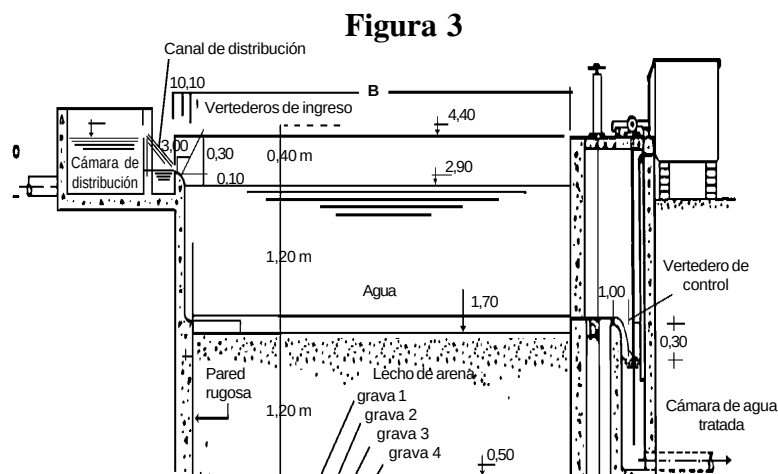
Se utilizan para la remoción de concentraciones poco elevadas de color y turbidez (color + turbidez = 50 ppm) sin ayuda de la coagulación.

Por lo general, se aplican en comunidades pequeñas.

Tienen forma rectangular y, por lo general, debido a la baja tasa de filtración, son relativamente grandes.

Están conformados por una caja de mampostería o concreto en el fondo de la cual existe un sistema de drenaje cubierto por piedras y sobre este hay arena (más fina y menos uniforme que la de los filtros rápidos).

Tamaño efectivo: 0,25 a 0,35 mm. Coeficiente de uniformidad entre 2 y 3.



Elevación de un filtro lento

Operación del filtro lento. Al iniciar la puesta en marcha del filtro lento, la operación de llenado debe hacerse en forma ascendente, con el agua de otro filtro en funcionamiento.

Después de llenar el filtro, se abre el ingreso y el desagüe.

Como el agua producida al inicio de la operación no es de buena calidad, se debe desechar hasta que se presente con la calidad deseada.

Periodo de maduración del filtro lento. A medida que el filtro funciona, la arena retiene el material más grueso en suspensión (algas, protozoarios, etcétera), que forman sobre esta una capa de lodo (capa biológica).

A medida que se forma esta capa gelatinosa, absorbe partículas menores (coloides, emulsoides, etcétera) y mejora la calidad del agua. Solo cuando el agua está en buenas condiciones por el tratamiento, se cierra el desagüe y se abre el efluente para enviar el agua al reservorio de distribución después de que haya sido clorada y el pH se haya corregido.

La operación de maduración puede durar de dos a tres semanas y el filtro operado de esta manera puede proporcionar agua de buena calidad por un lapso de dos a tres meses.

Pérdida de carga. Durante el proceso de filtración, la capa de lodo aumenta y ofrece mayor resistencia al paso del agua (pérdida de carga) y el filtro pierde caudal. Cuando la pérdida de carga alcanza de 0,90 a 1,50 m (límite común: 1,20 m), se debe lavar el filtro porque el caudal ya no es económico.

Limpieza del filtro lento (Figura 3). Cuando se alcanza el límite de la pérdida de carga, se cierra el ingreso y se deja al filtro operando con la capa de agua que tiene sobre el lecho. Esta operación debe iniciarse al atardecer y se debe dejar que el filtro opere toda la noche de esta manera. A la mañana siguiente, apenas hay luz, debe iniciar-

se el raspado del filtro. Es necesario abrir la válvula de desagüe del fondo y dejar que el nivel descienda alrededor de 0,20 m por debajo del nivel de la arena.

La operación de limpieza debe efectuarse en el menor tiempo posible para que los microorganismos benéficos que constituyen la capa biológica no perezcan por efecto de los rayos del Sol y por falta de nutrientes. Se retira una capa de uno a dos centímetros de arena con el lodo de toda la superficie filtrante.

Después de extraer la capa de arena de dos centímetros, se rastrilla el lecho para esponjar la superficie y se le pasa un emparejador.

El filtro se llena por debajo. Cuando el filtro no estuvo fuera de funcionamiento por más de 24 horas, el periodo de maduración es prácticamente nulo.

Observación: por lo general, una instalación de filtros lentos posee más de una unidad filtrante. Mientras uno está lavado y maduro, los otros están en funcionamiento.

8.3 Filtros rápidos de gravedad

Los filtros rápidos de gravedad se utilizan en las plantas de tratamiento para la filtración de grandes volúmenes de agua previamente coagulada.

Tienen forma rectangular y se lavan con agua tratada que se introduce de abajo hacia arriba (sistema que se denomina *de retrolavado*). Debido a ello, se construyen en áreas más pequeñas.

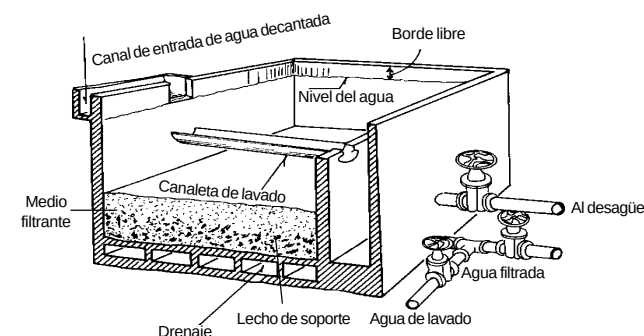
Están conformados por una caja de concreto en el fondo de la cual hay un sistema de canalización central y canales laterales cubiertos por varias capas y diámetros de grava que sostienen la capa de arena gruesa y la de arena preparada (Figura 4).



Sistema de canalización del fondo del filtro

También pueden estar contruidos con un sistema de fondo falso (de concreto) donde se ha colocado un drenaje cuya finalidad es distribuir el agua filtrada y el agua de lavado de manera uniforme en toda el área filtrante.

Figura 4



Esquema de un filtro rápido de gravedad con fondo falso

Al inicio de la filtración, como la arena está expandida, el agua arrastra parte del material en suspensión y el filtrado no es de buena calidad.

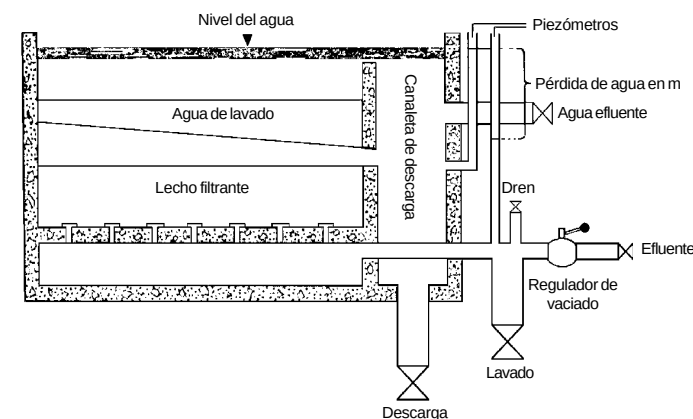
Los materiales en suspensión en el agua, que son más grandes que los espacios intergranulares de la arena, quedan retenidos en la superficie filtrante. Los que son más pequeños se van adhiriendo a la superficie interna de los granos y, de esa manera, disminuyen los espacios por donde pasa el agua. Así, a medida que el filtro se ensucia, hay una mayor resistencia al paso del agua.

El aumento de resistencia al paso del agua por la arena corresponde a una reducción del caudal del filtro. Cuando el filtro está limpio, es posible filtrar un volumen de agua mayor (tasa: $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$); a medida que el filtro se obstruye por la suciedad (lo que se denomina *colmatación*), la tasa disminuye.

Para evitar que esto suceda, los filtros de tasa y nivel constante están provistos de un aparato controlador de caudal que mantiene la tasa de filtración constante de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ (desde el inicio de la filtración hasta el momento del lavado del filtro). En los filtros de tasa declinante y nivel variable no se controla el caudal de operación del filtro sino que se deja que cada filtro tome buenamente lo que su estado de colmatación le permita.

El fenómeno que se produce con la obstrucción del filtro por la suciedad retenida se llama *pérdida de carga*, que puede ser medida rápidamente de la siguiente manera (véase la Figura 5):

Figura 5



Filtro rápido de gravedad. Corte vertical

- El canal de descarga del filtro se conecta a un tubo (piezométrico) transparente, para que cuando el agua suba por este, indique el nivel de agua en el filtro.
- Se adhiere otro tubo (piezométrico) transparente a la tubería de salida del agua filtrada, de manera que cuando la válvula del efluente esté cerrada, indique también el nivel de agua en el filtro.

Cuando el filtro está en funcionamiento, el nivel del agua es más bajo en el tubo piezométrico unido a la tubería del agua filtrada, debido a que la arena ofrece cierta resistencia al paso del agua. La diferencia en metros entre los niveles del agua de los dos tubos es la medida de la pérdida de carga. En los filtros limpios recién lavados la diferencia de nivel se ubica alrededor de 0,50 metros, según la configuración del filtro y la granulometría de la arena.

Conforme el filtro se ensucia, la diferencia de nivel entre los dos tubos piezométricos aumenta (se incrementa la pérdida de carga) y cuando alcanza de 1,80 a 2,50 m (por lo general 2 m), el filtro se debe lavar.

En los filtros de tasa declinante no hay un aparato regulador de caudal, en el diseño se deja una carga hidráulica disponible, que actúa sobre la tasa máxima del filtro cuando, recién lavado, reinicia la operación. En estas condiciones, la tasa máxima del filtro no será mayor que 1,5 veces la tasa promedio del proyecto, para evitar que el efluente se deteriore. Conforme aumenta la pérdida de carga (por suciedad de la arena), el caudal disminuye. El lavado del filtro se realiza cuando la tasa de filtración ya no es económica.

Observación: cuando las partículas en suspensión en el agua (flóculos, etcétera) son más grandes que los espacios intergranulares de la arena, se quedan retenidas en la superficie. Cuando son más pequeñas, accionadas por la fuerza centrífuga, se adhieren a las superficies de los gránulos debajo de la superficie. La capa superior de la arena (que es más fina) realiza el trabajo de filtración. Actualmente, para que la obstrucción sea más lenta, se utilizan dos procesos:

- filtración en sentido contrario, en el mismo sentido del lavado (filtros rusos);
- filtros de doble capa (con una capa de antracita). Se coloca una capa de antracita (un determinado tipo de carbón mineral), de granulometría mayor a la de la arena, sobre la arena preparada. La antracita (cuyos espacios intergranulares son más grandes que los de la arena) retiene las partículas en suspensión en el agua (filtrada por gravedad) y la arena cumple una labor de pulimento.

De esta manera, el filtro no se ensucia tan rápido. Como la antracita tiene una densidad menor a la de la arena, durante el lavado permanece en la superficie sin mezclarse.

- Filtros de triple capa:
 - granulada (más densa que la arena);
 - arena, y
 - antracita (menos densa que la arena).

Por lo general, el proceso de lavado es el mismo en los diversos tipos de filtros.

8.4 Lavado de los filtros

a) Filtros convencionales de tasa y nivel constante

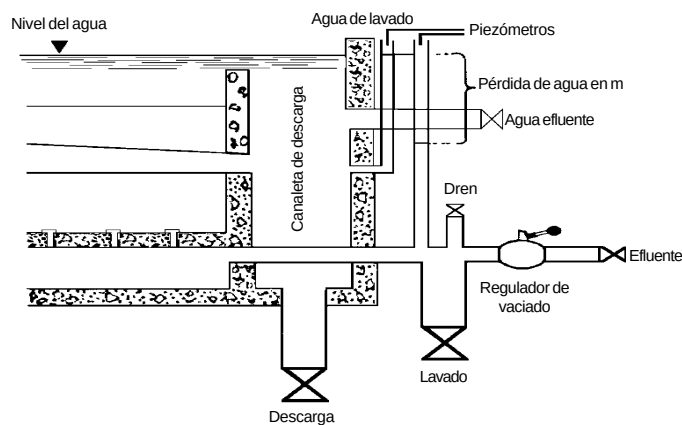
Para lavar los filtros se invierte la corriente (el agua se introduce de abajo hacia arriba). A este proceso se le denomina *de retrolavado*.

En el lavado, la arena que constituye el lecho filtrante se debe expandir en el agua.

La velocidad ascendente del agua de lavado debe ser suficiente para expandir la arena entre 25% y 30%, pero no tanta como para conducirla hacia la canaleta de recolección del agua de lavado.

Cuando la pérdida de carga del filtro alcanza 1,80 a 2,50 m (usualmente 2 m), se debe lavar de la siguiente manera:

Figura 6



Lavado simple

1. Cerrar el ingreso de agua decantada.
2. Cerrar la salida de agua filtrada.
3. Abrir el desagüe.
4. Abrir la válvula de lavado (al principio, lentamente). Cuando el agua comience a caer en la canaleta de agua de lavado, iniciar el conteo de tiempo (tiempo de lavado).
5. Cerrar el ingreso de agua de lavado cuando el filtro esté limpio (lo cual se sabe por la clarificación y la ausencia de flóculos en el agua que rebalsa por la canaleta). Cuando el agua deja de correr en la canaleta, verificar el tiempo transcurrido entre el inicio y este instante (tiempo de lavado de cuatro a siete minutos, según la época del año: estiaje o creciente).
6. Cerrar el desagüe.
7. Abrir el ingreso de agua decantada.

8. Cuando el filtro este lleno, abrir el drenaje de fondo por un lapso de 2 a 3 minutos.
9. Cerrar el drenaje.
10. Llenar el filtro primero por el fondo; dejar una capa de agua de 0,10 m sobre la arena.
11. Cerrar el desagüe.
12. Abrir la salida de agua filtrada. *El filtro está en uso.*

Tiempo de lavado. Se cuenta desde el instante en que comenzó a caer el agua por las canaletas de agua de lavado (operación 4) hasta el instante en que el agua de lavado dejó de caer en la canaleta (operación 5).

Dado:

Tiempo = t minutos.

Área del lecho filtrante = $A \text{ m}^2$.

Velocidad ascendente del agua de lavado = 0,60 m/minutos.

Cálculo del agua de lavado:

$A \times 0,60 \times t = m^3 \text{ de agua usada en el lavado del filtro (pérdida).}$

- El tiempo de lavado de un filtro depende de varios factores y puede variar de cuatro a siete minutos.
- El tiempo en el que un filtro queda fuera de funcionamiento durante las operaciones de lavado oscila entre 8 y 15 minutos.
- El volumen de agua empleado para lavar un filtro se puede determinar de manera empírica: tomando un tiempo para el lava-

do equivalente a seis minutos, se multiplica el caudal de agua máximo en un minuto por seis (caudal máximo de agua = velocidad ascendente del agua de lavado en metros por minuto x área del lecho filtrante).

- En una instalación debidamente proyectada y operada, el volumen que se gasta con el lavado de los filtros debe ir de 2 a 2,5 % del volumen de agua filtrada en la instalación.

$$\frac{\text{Volumen gastado para el lavado de los filtros (día, mes o año) m}^3}{\text{Volumen total del agua filtrada (día, mes o año) m}^3} \times 100 = 2 \text{ a } 2,5\%$$

Tiempo de drenaje. Por lo general, se acostumbra drenar un filtro durante dos o tres minutos, inmediatamente después del lavado. El drenaje se realiza para acomodar el lecho filtrante y preparar el filtro para el proceso.

Como la arena está expandida debido al lavado, en los primeros instantes, el agua que atraviesa el filtro arrastra partículas en suspensión (turbidez). La turbidez se reduce conforme disminuyen los espacios intergranulares de la arena (por el acomodamiento de esta).

Para determinar el tiempo necesario de drenaje, se deben recolectar muestras continuas del agua del drenaje (de 10 en 10, de 20 en 20 ó de 30 en 30 segundos) y determinar la turbidez de tales muestras. El tiempo transcurrido entre la abertura del drenaje y el instante de recolección de la muestra que presentó turbidez en el límite usual del agua filtrada en la planta corresponde al tiempo de drenaje necesario para la preparación del filtro.

La velocidad ascendente del agua de lavado varía de acuerdo con el tamaño de la arena; si, por ejemplo, fuera de 0,60 m por minuto, querría decir que en un minuto el agua de lavado debe subir en el área filtrante con una velocidad de 0,60 metros.

La expansión de la arena durante el lavado del filtro (expresada en porcentajes de la altura de la capa de arena preparada) debe ser de 25 a 30%; es decir, si la capa de arena preparada es, por ejemplo, de 0,60 metros, la expansión de la arena debe ser de 0,15 a 0,18 metros adicionales a su nivel normal.

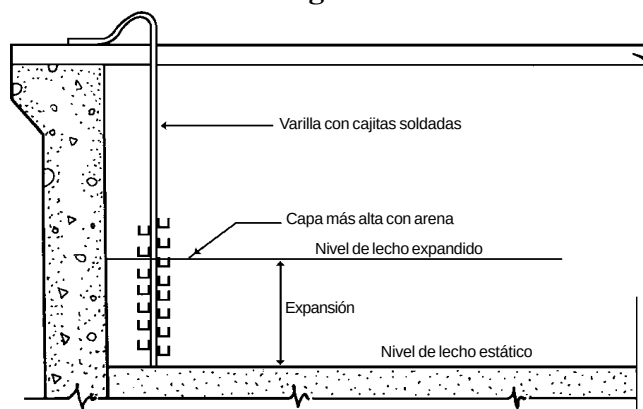
En el caso de filtros con sistema de lavado mediante aire y agua, la expansión solo debe ser de 10%, porque en este caso la fricción de los granos de arena para desprender la suciedad adherida la hace el aire comprimido y no el agua.

La tasa de filtración (velocidad de filtración) de un filtro rápido clásico, de arena, debe ser de 120 m³/m²/d; es decir, por cada metro cuadrado de área filtrante debe pasar 120 m³ de agua por día.

8.5 Determinación de la expansión de la arena

Esta determinación se puede realizar con la ayuda de un sencillo aparato que consiste en una vara metálica (cuya longitud será la que corresponda a la altura existente entre la superficie del lecho estático y el borde superior del muro de la caja del filtro), con cajitas intercaladas cada 0,05 metros a partir del extremo inferior (Figura 7).

Figura 7



Medición de la expansión de la arena

La varilla se debe fijar en la parte superior de la caja del filtro para que no se mueva durante la prueba. Las cajas deben quedar en posición horizontal.

1. Colocar la varilla sobre el nivel del lecho estático (antes de que se inicie el lavado).
2. Iniciar la operación de lavado y dejar dos a tres minutos la varilla en la posición seleccionada.
3. Retirar con cuidado la varilla.
4. Volver a colocar la varilla de tal manera que la última plataforma quede a 15 centímetros de la superficie anterior de la arena. Para lograrlo se utiliza la medida grabada en la vara en el lado opuesto al extremo en el que están las cajas y se ajusta con el tornillo de ajuste.
5. Se abre nuevamente el lavado en la abertura convencional como para el lavado simple.

6. Cerrar el lavado. Cuando el agua deje de correr por la canaleta de lavado, se retira la vara metálica con cuidado y se verifica hasta qué plataforma tiene arena.

Si la arena quedó retenida en la primera y segunda plataformas y no en la tercera, se sabe que esta se expandió hasta 25 centímetros de la superficie anterior de la arena.

De esta manera, con medidas sucesivas, es posible determinar la expansión real de la arena.



Varilla para medir la expansión del lecho

Cálculo:

capa de arena preparada	0,575 m
expansión de la arena	0,25 m

$$\frac{\text{expansión de la arena (en m)}}{\text{altura de la capa de arena (en m)}} \times 100 = \% \text{ expansión}$$

$$\frac{0,25 \times 100}{0,575} = 43\% \text{ de expansión}$$

El rango de expansión de la arena debe estar entre 30 y 50%.

Observación: cuando el caudal y, por consiguiente, la velocidad del agua de lavado cambian, el porcentaje de expansión de la arena también varía.

7. Cerrar la descarga de agua de lavado.
8. Abrir el efluente.
9. Drenar el filtro.
10. Abrir el efluente. *El filtro está en funcionamiento.*



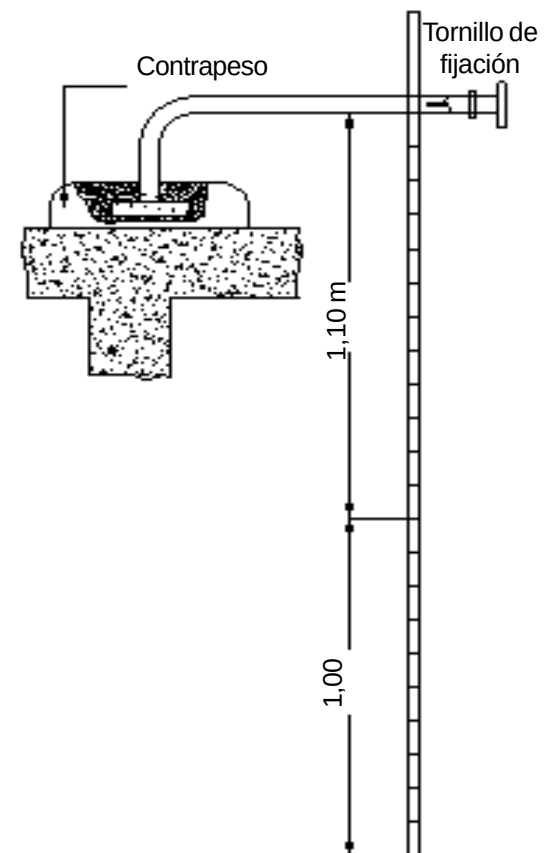
Pérdida de arena o antracita durante el lavado

Si después de la operación de lavado se encuentra material filtrante en las canaletas de lavado, esto es signo de que la expansión es excesiva y si no tomamos medidas para solucionar el problema, el lecho filtrante se irá perdiendo poco a poco. Debemos calibrar el caudal de lavado hasta que la expansión se encuentre en el rango adecuado.

8.6 Determinación de la velocidad de lavado

Para determinar experimentalmente la velocidad ascendente del agua de lavado y la expansión de la arena (cuando un filtro alcanzó la pérdida de carga de 1,80 a 2,50 metros), se procede de la siguiente manera:

Figura 8



1. Cerrar el ingreso y esperar a que el nivel del agua baje hasta aproximadamente cuatro centímetros de la superficie de la arena.
2. Cerrar el efluente.
3. Abrir la descarga de agua de lavado.
4. Colocar el aparato de la Figura 8 a exactamente 10 centímetros de la superficie de la arena.
5. Abrir el lavado (ligeramente al principio).
6. Cuando el lavado esté abierto por completo, cronometrar el tiempo que lleva el agua en recorrer el espacio entre dos o tres marcas de una regla graduada.

Datos:

t = tiempo en segundos, y

d = distancia recorrida por el agua en cm (10 ó 20 cm).

Cálculo:

$$\frac{d \times 60}{t} = \text{elevación del agua durante el lavado, en cm/min}$$

= velocidad del agua de lavado

Ejemplo:

$d = 10 \text{ cm};$

$t = 12 \text{ segundos}$

$$\text{Velocidad de lavado} = \frac{10 \times 60}{12} = 50 \text{ cm/min}$$

Nota: para obtener dicha medida, se debe utilizar la altura disponible debajo de las canaletas de recolección del agua de lavado para que el volumen de estas no influya en la velocidad ascendente del agua.

7. Continuar el lavado hasta la clarificación del agua.
8. Cerrar la descarga de agua de lavado cuando el agua deje de correr por las canaletas.
9. Retirar con cuidado la regla graduada.

8.7 Determinación experimental de la velocidad de filtración (tasa de filtración)

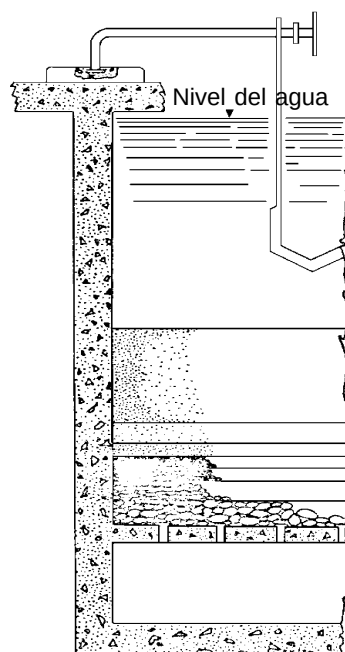
Para determinar experimentalmente la tasa de filtración, se utiliza el mismo aparato empleado para determinar experimentalmente la velocidad ascendente del agua de lavado (Figura 9).

Se deben tomar las siguientes precauciones:

- a) El filtro debe estar lleno y en funcionamiento, en su nivel máximo.
- b) El aparato debe colocarse sobre el borde de la canaleta como en la Figura 9.

Se debe tomar esta precaución para que las canaletas de lavado o las paredes internas del filtro no ocupen volumen en el espacio en que se va a medir el agua. Si este fuera el caso, este volumen debe ser descontado en los cálculos que se van a efectuar.

Figura 9



c) Calcular el área total del filtro (ATm^2).

- El área total del filtro comprende el área filtrante y el área de la canaleta de descarga. La longitud total del filtro, en metros, multiplicada por el ancho del filtro, en metros.
- Por ejemplo, dado $ATm^2 = 20 m^2$.

d) Calcular el área del lecho filtrante (AFm^2).

Longitud del área filtrante, en metros, multiplicada por el ancho del área filtrante en metros.

- Por ejemplo, dado $AFm^2 = 15 m^2$.

Una vez que se han tomado las precauciones anteriores:

- 1) Cerrar el ingreso del filtro.
- El nivel del agua va a bajar.
- 2) Cronometrar el tiempo (t segundos) que toma el nivel para bajar a la altura h (en metros) correspondiente al borde de una de las plataformas hasta la siguiente o a otra (0,10 a 0,20 metros).

Por ejemplo, dado un tiempo $t = 192$ seg y una altura $h = 0,20$ m.

Cálculo de la tasa de filtración

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$tasa\ de\ filtración = \frac{ATm^2 \times hm \times 86.400\ seg}{t\ (segundos) \times AF(m^2)} = m^3/m^2/día$$

Por ejemplo:

Según los datos numéricos sugeridos, la tasa de filtración será:

$$tasa\ de\ filtración = \frac{20\ m^2 \times 0,20\ m \times 86.400\ seg}{192\ seg \times 15\ m^2} = 120\ m^3/m^2/día$$

Observación: un día tiene 86.400 segundos.

8.8 Determinación de la pérdida de carga

Por lo general, los filtros poseen aparatos que indican la pérdida de carga.

Para calibrar tales aparatos o para los filtros que no los poseen, se pueden adaptar tubos piezométricos como en la Figura 8.

Tales tubos pueden ser de vidrio o de plástico cristal (transparente).

Detrás de los tubos se debe colocar una regla de 2,80 metros, graduada en centímetros, para poder medir la diferencia de nivel del agua entre los dos tubos.

Dicha diferencia, en metros, es la medida de la pérdida de carga.

El filtro se debe lavar cuando la diferencia entre los dos niveles es de 1,80 a 2,50 metros.

8.9 Estado de un filtro

Es el conjunto de características que define las condiciones de funcionamiento de un filtro en un momento determinado.

El estado de un filtro varía continuamente en el periodo de filtración (entre un lavado y otro) y se modifica lentamente con el paso de los años.

El filtro comienza a funcionar mal cuando las condiciones normales no son las correctas.

Las causas de las perturbaciones en el lecho filtrante pueden ser causadas por los siguientes factores:

- a) Dosis incorrectas de coagulantes, mala floculación y mala decantación, que hacen que el filtro reciba material gelatinoso y materia orgánica que van a obstruir el lecho filtrante.
- b) Desprendimiento del aire que normalmente está disuelto en el agua, en forma de burbujas.

Este fenómeno se produce debido a la pérdida de carga excesiva (es decir, una pérdida de carga que sobrepasa el límite aconsejado) y podrá causar efectos nocivos: irregularidades en la filtración y en el lavado, arrastre del material filtrante durante el lavado, etcétera.

- c) Formación de bolas de lodo provenientes de material gelatinoso (organismos, hidróxido de aluminio y arena). La dosificación inadecuada, el lavado deficiente de los filtros y la excesiva pérdida de carga durante el funcionamiento producen la compresión del lecho filtrante y la consecuente compactación de las bolas de lodo.
- d) Presencia de algas y otros microorganismos que llegan a los filtros y se reproducen en ellos.

Colmatación de la arena. La colmatación de la arena se produce cuando, debido a la deficiencia en las operaciones, se da alguna de las siguientes situaciones:

- a) No se usa la dosificación adecuada de sulfato de aluminio (coagulación deficiente).
- b) El pH de floculación no es óptimo; los coágulos se cargan eléctricamente y, al repelerse, no floculan de manera correcta.

- c) El tiempo de los floculadores o su agitación es excesiva o escasa (los flóculos no se forman o se forman pero se vuelven a romper).
- d) Hay corrientes preferenciales en los decantadores, decantadores sucios, alta velocidad del agua en los decantadores, etcétera.
 - Gran parte de los coágulos o pedazos diminutos de los flóculos atraviesan los decantadores y, al llegar a los filtros,
 - 1) se pueden adherir entre sí y en los granos de arena debido a la fuerza centrífuga a la que están sujetos al atravesar la capa filtrante (en zigzag alrededor de los granos de arena);
 - 2) debido a la fricción que ejercen al pasar por la arena, descargan su carga eléctrica para poder formar flóculos en el filtro entre los granos de arena;
 - 3) los flóculos formados y arrastrados por las corrientes de agua en los decantadores, de tamaño mayor que los espacios intergranulares de la arena, quedan depositados en su superficie.

Tales fenómenos se producen por la colmatación de la arena.

Los granos de arena quedan revestidos por una capa gelatinosa de hidróxido de aluminio, materia orgánica y otros materiales absorbidos por los coágulos; en la superficie queda una espesa capa gelatinosa y todo esto contribuye a aumentar la pérdida de carga.

Si el filtro no está adecuadamente lavado, la acumulación de esa suciedad hace que las condiciones del filtro sean deficientes.

Al lavar el filtro, la arena colmatada, por quedar con menor densidad, puede ser arrastrada por el agua de lavado.

Al poner a funcionar el filtro nuevamente después de un lavado, como la presión del agua y los granos están envueltos con material gelatinoso y adheridos unos a otros, se produce una reducción de volumen, tanto vertical como horizontal, lo cual puede producir un desplazamiento de la arena contra las paredes del filtro.

El agua pasará, de preferencia, por tales retracciones y perjudicará la calidad del efluente.

- El aparato controlador de la pérdida de carga se vuelve irregular.
- El filtro no se lavará a la hora exacta.
- El problema tiende a agravarse y la colmatación de la arena llega a profundidades mayores.

Desprendimiento del aire. Cuando el filtro no se lava en el tiempo exacto —es decir, cuando la pérdida de carga (1,80 a 2,50 m) es correcta—, sucede lo siguiente:

- Si se lava antes de tiempo, se consume mayor cantidad de agua.
- Si se lava con exceso de pérdida de carga, se puede producir lo siguiente:
 - a) La colmatación de la superficie ofrece mayor resistencia y proporciona al agua una presión negativa en el interior del lecho filtrante. Los gases son solubles en razón directa a la presión y, con la presión negativa, los gases disueltos (O_2 , CO_2 , etcétera) abandonan el agua, primero en pequeñas burbujas que se unen y luego tienden a subir a la superficie del lecho filtrante.

- b) Por el aire introducido directamente hacia los filtros por la empaquetadura de succión de las bombas que impiden la expansión del agua.
- c) Cuando la válvula lo permite, tales bombas se vacían y la tubería de bombeo se llena de aire.
- d) Cuando se utiliza toda el agua del reservorio de agua de lavado y este se seca al final de la operación.
- e) Cuando se forma un remolino dentro del reservorio, etcétera.

Ese volumen de gas obstruye el paso del agua en el filtro, lo cual ocasiona una pérdida de carga mayor y reduce el área filtrante.

Se puede observar que cuando se cierra el efluente del filtro o se abre el registro de lavado, el aire produce un burbujeo.

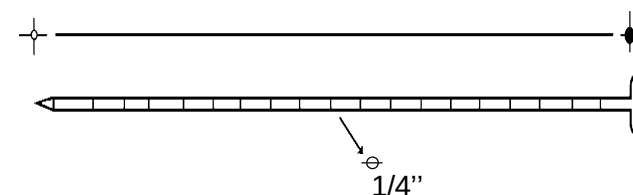
Distribución uniforme de la filtración y del agua de lavado. Cuando se lava un filtro, al inicio de la operación de retrolavado, se debe observar si la suciedad retenida en la superficie de la arena sube horizontalmente en toda el área filtrante.

Cuando esto no sucede, es porque el sistema de drenaje del filtro es deficiente, o bien por un error en el lavado:

- formación de aire en el lecho filtrante;
- aire en la cámara bajo el fondo falso;
- repentina abertura del registro de lavado;
- las capas de grava se agitaron y no se encuentran en nivel.

Es posible comprobar esta imperfección con una varilla de fierro de 1/4 de pulgada de diámetro y dos metros de largo, graduada de 10 en 10 centímetros.

Figura 10



Varilla graduada para determinar la profundidad de la arena

Se introduce dicho instrumento en la arena del filtro seco, hasta percibir que llegó a la grava. La profundidad de la grava en relación con el nivel de la arena se mide con las marcas del instrumento.

Con cambios sucesivos en líneas predeterminadas y a distancias preestablecidas, se puede hacer lo siguiente:

- concluir si la capa de grava está o no nivelada;
- levantar el perfil de la superficie de la grava en el filtro.

Donde existe depresión en la grava, también existen corrientes preferenciales de agua de filtración o de lavado.

Esta imperfección se puede corregir con la remoción, separación (por tamizado) de los diversos tamaños de piedras y arena y su reubicación adecuada.

- Las bolas de lodo se pueden acumular en la grava del filtro.

Bolas de lodo. Las bolas de lodo aparecen cuando el agua en tratamiento es rica en algas (principalmente, las que se adhieren a las paredes) o los filtros no se lavan completamente debido a un periodo de lavado muy corto o con una velocidad ascendente del agua de lavado incorrecta (baja). Los flóculos más densos, que el agua de lavado no condujo hacia afuera, se vuelven a sedimentar en la superficie filtrante; crecen debido a la adherencia de más flóculos y se vuelven más densos al recibir granos de arena.

Tales agregados, inicialmente pequeños y por lo general de forma esférica, pueden llegar a medir tres centímetros o más. Estos se pueden eliminar mediante el lavado mecánico o evitar con la agitación del material del lecho filtrante durante el lavado con rastrillos.

Las bolas de lodo en la superficie del filtro no tienen importancia sanitaria. Sin embargo, al volverse densas y crecer, pueden penetrar en la arena y, al llegar a la grava, formar masas homogéneas que obstruyen el paso del agua.

8.10 Método de Baylis para clasificar el lecho filtrante mediante el volumen de bolas de lodo

Muestreo de la arena

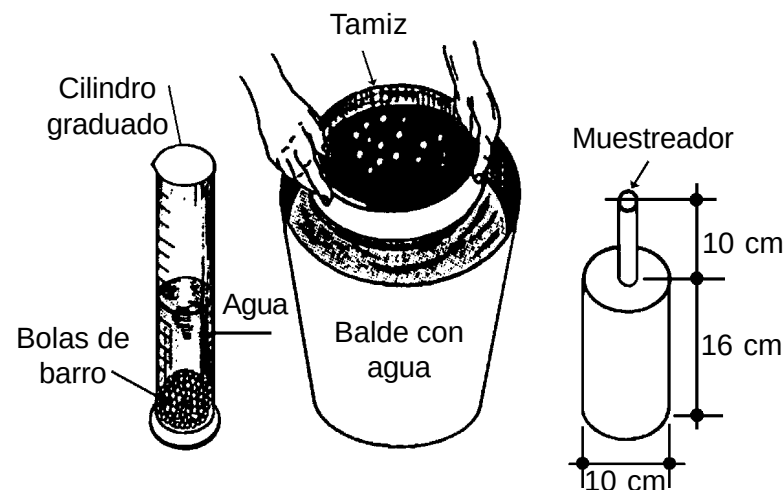
1. Lavar el filtro de la manera usual.
2. Secar el filtro abriendo el drenaje.
3. Recolectar por lo menos cinco muestras de arena de distintas partes del lecho, con la inserción vertical completa en la arena de un tubo de muestra. Cerrar la base del tubo de muestreo y transferir la arena del tubo a un recipiente portátil (por ejemplo, un balde).

Tubo de muestreo o muestreador. Es un tubo metálico de 7,5 centímetros de diámetro por 15 centímetros de altura (véase la Figura 11). Completamente lleno, contiene 662 mililitros de material filtrante, recolectado en la lámina de 15 centímetros del tope de la arena del filtro.

Las cinco muestras tendrán un volumen total de $5 \times 662 = 3.310$ mL.

Separación de las bolas de lodo. En otro balde de agua, se coloca un tamiz US Standard 10 mesh (10 hilos por pulgada) como se indica en la Figura 11. La arena recolectada se coloca dentro del tamiz, mientras que el tamizado se hace lentamente; de esta manera, la arena se separa de las bolas de lodo, pues estas no pasan por la malla.

Figura 11



No se debe colocar mucha arena en el tamiz porque ello puede hacer que las bolas de lodo —que deben colocarse en una probeta de 500 mililitros n.º 1— se rompan.

Medición del volumen de las bolas de lodo. Con otra probeta de 500 mililitros (n.º 2), llena de agua hasta la marca, se vierte cuidadosamente el agua en la probeta que contiene las bolas de lodo (n.º 1), y se llena hasta la marca.

El volumen del agua que sobre en la probeta n.º 2 será igual al volumen que ocupen las bolas de lodo.

Se puede utilizar el siguiente cuadro:

FILTRO N.º	VOLUMEN DE LA MUESTRA DE ARENA mL (B)	VOLUMEN DEL LODO mL (A)	% DE BOLAS DE LODO (A/B x 100)
1			
2			
3			

Si, por ejemplo, la cantidad total de bolas de lodo y la arena recolectada tienen un volumen igual a 3.310 mililitros y el volumen de bolas de lodo es de 120 mililitros, el porcentaje de bolas de lodo será 3,26% de la muestra.

$$\begin{array}{rcl} 3.310 \text{ mL} & \text{—————} & 100\% \\ 120 \text{ mL} & \text{—————} & x \\ \\ x = & \frac{100 \times 120}{3.310} & = 3,62 \% \end{array}$$

Clasificación

La clasificación del siguiente cuadro para la línea de tope de 15 centímetros se utiliza en Chicago y está basada en pruebas efectuadas en numerosas instalaciones.

% EN VOLUMEN DE BOLAS DE LODO	CONDICIONES DEL MATERIAL FILTRANTE
0,0-0,1	excelente
0,1-0,2	muy bueno
0,2-0,5	bueno
0,5-1,0	regular
1,0-2,5	de regular a malo
2,5-5,0	malo
7,5	muy malo

El operador de la planta de tratamiento de agua se debe esforzar por mantener las bolas de lodo en una concentración inferior a 0,1 % en la capa correspondiente al tope del lecho filtrante, de 15 centímetros de espesor.

Grietas y ranuras en el lecho filtrante

Cuando el material filtrante se encuentra en malas condiciones, aparecen grietas o ranuras en el lecho filtrante. Las bolas de lodo penetran en la arena y en la grava durante los lavados debido al crecimiento y a la densidad; todo ello forma una masa compacta impermeable con la grava mientras que el agua filtrada y el agua de lavado son desviadas del flujo natural. En consecuencia, se produce un lavado y una filtración deficientes.

Durante el lavado, la arena no se expande de manera uniforme. Durante la filtración, la arena más expandida y compactada se separa de la menos expandida y compactada mediante ranuras o grietas que terminan llenas de lodo.

Ese lodo se mezcla con la arena y se forman nuevas bolas.

Para encontrar los lugares donde se encuentran obstrucciones de la grava, se utiliza un aparato (Figura 12) que tiene un asta de madera de 2,50 metros en el extremo de la cual se coloca una pequeña tabla de 10 x 5 centímetros (observe la Figura 12).

El aparato se introduce verticalmente en la arena expandida durante el lavado.

En los lugares obstruidos la vara no puede llegar hasta la grava por falta de expansión.

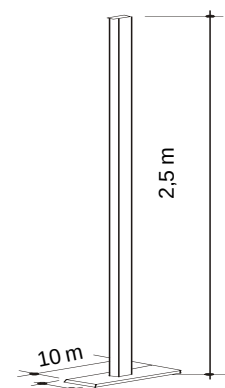
Una vez señalados los lugares resistentes, se pueden romper las compactaciones mediante la introducción de rastrillos en dichos puntos durante el lavado (con agua en dirección contraria a la corriente) para mejorar la condición de los filtros.

Precauciones para la corrección de las alteraciones en los filtros:

1. Correcta aplicación de la dosificación de coagulante.
2. Buena decantación.
3. Lavado con una velocidad de agua correcta y expansión de arena adecuada.
4. Lavado de la superficie de la arena con chorros de agua cuando el filtro no posee un dispositivo para el lavado superficial (Palmer).

5. Lavado mecánico de la arena; renovación de la arena superficial, después de un lavado normal, con paletas, rastrillos y mallas (para deshacer las bolas de lodo).
6. Eventualmente, se puede hacer un lavado químico de la arena, en soda o ácido, dentro o fuera del filtro.
7. Sustitución total de la arena.

Figura 12



Lavado mecánico de la arena:

- a) Hacer un lavado normal como lo indican los puntos 1 a 5.
- b) Abrir el drenaje para el secado de la arena.
- c) Revolver, con paletas, una capa de más o menos 0,20 metros de la arena del filtro y mezclar la arena colmatada de la superficie con la más limpia de la misma profundidad.

Se debe cuidar de que la arena que se encuentra en las esquinas y junto a las paredes sea sustituida por mezclas de arena con aquella que se encuentra en el centro del filtro.

- d) Después de la renovación, se utilizan los rastrillos para encontrar el nivel de la arena. Los dientes de los rastrillos deben ser largos, para que las bolas de lodo eventualmente formadas se rompan con la penetración y el rastrillaje.
- e) Cerrar el drenaje.
- f) Abrir el lavado (al inicio, lentamente). Fijar el tiempo de lavado.
- g) Mantener el lavado normal como en el punto 5.

8.11 Fijación racional del tiempo de lavado

El filtro se debe lavar cuando la tasa de filtración deja de ser económica. Cuando esto sucede, se dice que el filtro está sucio u obstruido.

Normalmente, para lavar los filtros se toma como criterio el tiempo de filtración o el valor de la pérdida de carga.

El tiempo de lavado depende de las condiciones del agua.

Si el tratamiento permanece más o menos constante, se puede lavar el filtro una vez por día, una vez cada dos días, etcétera, después de verificar cuál es el tiempo en que se ensucia el filtro.

Para determinar ese tiempo experimentalmente, se realizan lavados a intervalos crecientes hasta que el filtro presente un burbujeo de aire. Se adopta el tiempo inmediatamente anterior a la formación del burbujeo.

Consecuentemente, cuando no hay constancia en el tratamiento, el único criterio que se debe adoptar es el de la pérdida de carga. Para cada filtro hay una pérdida de carga máxima hasta la cual el filtro funciona bien (y suministra agua de buena calidad). Luego aparecen

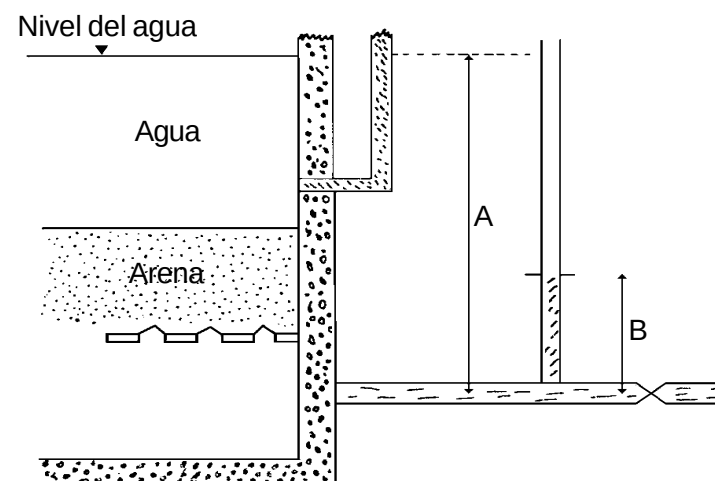
anormalidades y, entonces, se debe lavar el lecho filtrante. Rara vez la pérdida de carga llega a 2,5-3,0 metros, debido a que el lecho filtrante pierde calidad antes.

8.12 Determinación de la pérdida de carga cuando el nivel de agua en los filtros se mantiene constante

En este caso, se puede utilizar un tubo de vidrio o plástico transparente, fijado a una escala graduada en centímetros y conectada al tubo de salida del efluente de cada filtro.

La pérdida de carga será la diferencia entre la altura de la carga (eje de tubería efluente y la altura del nivel de agua constante) y la altura del nivel de agua en el tubo transparente (medida a partir del eje de la tubería efluente del filtro) (Figura 13).

Figura 13



Pérdida de carga = $A - B$ (en m)

Para graduar los medidores e indicadores se considera:

- a) el caudal;
- b) la pérdida de carga;
- c) la velocidad de agua de lavado;
- d) la expansión de la arena.

Evaluación de la filtración

En el control sistemático del color y turbidez del agua filtrada en cada unidad de filtración es importante saber lo siguiente:

Un aumento del color y de la turbidez en una unidad filtrante puede significar:

- necesidad de lavado;
- filtro con grietas o desplazamiento de la arena contra las paredes, etcétera.

La determinación de la albúmina residual en el agua filtrada es una confirmación sobre el pH óptimo de floculación, pero la misma prueba en el agua de salida de cada filtro (albúmina soluble e insoluble) puede indicar el paso de flóculos por el lecho filtrante y, de esa manera, ayudar a evaluar las condiciones del filtro en estudio.

La eficacia del tratamiento se evalúa mediante la determinación del O_2 consumido o el conteo de colonias de bacterias en una placa de agar patrón. Las mismas determinaciones en las unidades filtrantes pueden controlar la eficacia de la filtración de cada una de ellas.

El tiempo transcurrido entre dos lavados del mismo filtro (controlado por la pérdida de carga) muestra la eficacia del tratamiento (coagulación y decantación).

Cuando ese tiempo comienza a disminuir, ello significa que las condiciones del tratamiento son malas o que el lecho filtrante es deficiente.

El control y las determinaciones citadas anteriormente en relación con la pérdida de carga ayudan a evaluar la filtración y proporcionan al operador los medios para fijar convenientemente el instante de lavado (el límite de la pérdida de carga para cada unidad filtrante) con el fin de producir el mejor efluente.

El consumo de agua para el lavado del filtro debe ser del orden de 2% a 2,5% del caudal diario (mensual o anual) de la planta de tratamiento de agua.

- Pérdida de carga de 1,80 a 2,50 m;
- O_2 consumido menor que 1,80 ppm;
- albúmina residual total menor que 0,3 ppm, y
- reducción conveniente (90%) del conteo de colonias del agua cruda/agua filtrada.

9. DESINFECCIÓN DEL AGUA (cloración)

9.1 Introducción

La desinfección del agua en las plantas de tratamiento de agua se realiza con cloro y, por ello, el término *desinfección* comúnmente se substituye por *cloración*.

La desinfección es una medida que se debe adoptar en todos los sistemas de abastecimiento, bien con carácter correctivo, bien preventivo. Esto se debe a que toda agua pura o purificada en una estación de tratamiento puede tener un largo recorrido hasta el momento en que es consumida. Del mismo modo, los reservorios pueden ocasionar su contaminación.

La cloración se puede realizar con los siguientes elementos:

- a) cloro líquido;
- b) cal clorada, e
- c) hipocloritos.

9.2 Cloro líquido

Se suministra en cilindros especiales, bajo presión, con una pureza de hasta 99,99%, con pesos de 40, 68 y 900 kilogramos.

Cuando se retira el gas del recipiente, la presión interior disminuye y se pierde calor. Para conservar el calor y la presión, se necesita una fuente de calor externa que puede ser agua o un irradiador en el caso de temperaturas bajas (frío).

La cantidad de cloro que se puede retirar de los cilindros a una temperatura de 25 °C sin congelación será:

8 kg/día por cilindro de 40 kg;
16 kg/día por cilindro de 68 kg;
180 kg/día por cilindro de 900 kg.

En caso de que se necesiten cantidades mayores, se utilizan baterías de cilindros, pero cada cilindro debe proporcionar solo la cantidad indicada anteriormente.

9.3 Precauciones sobre el uso del cloro líquido

Cuando el cloro se utiliza sin cuidado, es peligroso para las personas y puede destruir materiales. Por ello, se necesitan cuidados constantes de parte de los operadores de las plantas de tratamiento de agua, así como un mantenimiento eficaz en el equipo de cloración:

Los cloradores se deben mantener en temperatura ambiente entre 10 y 30 °C. En ningún caso se deben mantener sobre 65 °C.

Cuando el cloro es altamente tóxico, es indispensable usar una máscara.

El gas seco no es corrosivo; las tuberías que conectan los cilindros a los aparatos dosificadores pueden ser de cobre, pero la solución concentrada de cloro es altamente corrosiva, por lo cual sus tuberías deben ser de material adecuado (caucho, tuberías de plástico PVC, etcétera).

Para verificar y localizar pequeñas fugas de cloro, se utiliza amoníaco en los cilindros o en los dosificadores. La combinación de amonio con cloro produce un humo blanco visible.

Nunca se debe aplicar agua en la fuga de cloro, porque se formará ácido clorhídrico (cloro húmedo), que es muy corrosivo y con lo cual aumentará la fuga.

La soda cáustica puede absorber rápidamente el cloro gaseoso: se necesitan 800 gramos de soda cáustica para 500 gramos de cloro. Once kilogramos de soda cáustica pueden disolverse en 38 litros de agua.

En resumen, se deben seguir las siguientes indicaciones:

- 1) El cloro puede ser utilizado solamente por una persona preparada y de confianza.
- 2) Se deben evitar los residuos. También se debe garantizar que los recipientes no se golpeen, pues se puede quebrar el tubo y se pueden dañar las válvulas.
- 3) Los recipientes se deben almacenar a temperaturas medias, lejos del calor.
- 4) Nunca hay que hacer una conexión de un recipiente lleno al tubo de enlace con otros recipientes mientras las temperaturas y presiones no sean aproximadamente las mismas.
- 5) Conservar las tapas sobre las válvulas de los recipientes cuando estos no estén en uso y volver a colocarlas cuando estén vacíos.
- 6) Cerrar la válvula del recipiente cuando este vacío.
- 7) No aplicar fuego o soplete para calentar el recipiente.
- 8) Los cilindros de cloro, antes de ser conectados al aparato, deben tener sus válvulas probadas al aire libre. Cuando el cilindro no está en buen estado, debe ser rechazado y marcado.

9.4 Dosificadores para el cloro líquido

Existen dos tipos:

a) **Alimentación directa:**

El gas se disuelve directamente en el punto de tratamiento.

b) **Alimentación por solución:**

El gas se disuelve en una corriente de agua menor y la solución resultante se coloca en el punto de tratamiento.

En la operación y mantenimiento de los dosificadores (cloradores), se debe tomar las siguientes precauciones:

- a) Cerrar todos los extremos de las tuberías que estén desconectados con la tapa de jebe o plástico para impedir que la humedad entre.
- b) Mantener siempre ventilado el compartimiento de los cloradores o el del depósito de los cilindros.
- c) Manejar las válvulas lentamente y sin forzarlas.
- d) Controlar el flujo de cloro y la dosificación de la respectiva aplicación permanentemente en función de los análisis de cloro residual.
- e) Prever la reparación o sustitución de todas las piezas gastadas o dañadas.
- f) Conservar el equipo limpio, bien preparado y seco.
- g) Prever la sustitución inmediata de los cilindros a medida que se vacían y tener siempre un almacén adecuado para ellos.

9.5 Compuestos de cloro más utilizados

Cal clorada (cloruro de cal). Polvo blanco con una proporción de 25 a 30% de cloro disponible.

Cuando se almacena en un lugar seco y frío, se pierde poco cloro, pero cuando el lugar es húmedo y caliente, se deteriora rápidamente.

Se utiliza en instalaciones pequeñas, en casos de emergencia, fábricas y piscinas, con una solución de hasta 2,5% de cloro disponible.

Hipoclorito de calcio (Perchloron, HTC, etcétera). Polvo blanco con aproximadamente 70% de cloro disponible. En su empleo, se deben tomar las mismas precauciones que las del almacenamiento de la cal clorada. Se aplica en una solución de hasta 2,5% de cloro disponible. Puede estar almacenado durante un año o más, siempre y cuando sea en un ambiente bien acondicionado.

Hipoclorito de sodio. Se encuentra en forma de solución a 10% de cloro activo almacenado en reservorios metálicos de 40%.

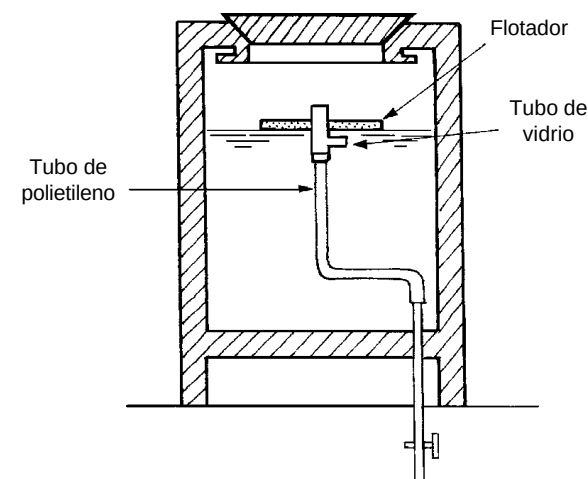
Cuando es una preparación reciente, dura tres meses y se debe guardar en un lugar oscuro y fresco.

9.6 Dosificadores

Los dosificadores para la solución de hipocloritos o de cal clorada son:

- 1) frasco de Mariote;
- 2) hipocloradores, y
- 3) dispositivos simples para instalaciones pequeñas y servicios de emergencia.

Figura 14



Esquema de dispositivo simple de cloración

Está formado por un tanque que contiene la solución que va a ser dosificada. En su interior se encuentra el recolector de la solución formado por un simple tubo de plástico que atraviesa un extremo situado debajo del nivel de la solución. El tubo de plástico se une mediante un tubo flexible (jebe) a una válvula externa para la aplicación del agua que va a ser tratada.

9.7 Demanda de cloro

La demanda de cloro se define como la diferencia entre la cantidad de cloro aplicado en el agua y la cantidad de cloro (libre o combinado) que permanece al final de un periodo de contacto específico.

La demanda de cloro es la cantidad de cloro que consumen las impurezas en un determinado lapso.

9.8 Práctica de la cloración

1. **Cloración simple** (marginal). Consiste en la aplicación de la cantidad mínima de cloro para obtener un residual pequeño.

Se aplica una determinada dosis de cloro (según el pH) y, después del intervalo recomendado, se verifica el residual; si es necesario, se gradúa la dosis de cloro.

Cuando se trata de aguas filtradas:

- cloro aplicado: 0,20 a 0,60 mg/L.

Cuando se trata de aguas no filtradas:

- cloro aplicado: 1 mg/L o más (según el pH del agua).

El examen bacteriológico frecuente demuestra la eficacia de la desinfección.

- 2) **Precloración.** Es la aplicación del cloro en el agua antes de cualquier otro tratamiento.

Como vimos en el capítulo sobre represas de almacenamiento, el cloro se puede aplicar como alguicida, solo o con sulfato de cobre.

La precloración también se puede realizar en agua cruda, a la entrada de la planta, con los siguientes objetivos:

- a) Para controlar o limitar el desarrollo de microorganismos en los decantadores y filtros (es decir, para evitar la prolifera-

ción de algas y otras plantas en las paredes del decantador y del filtro, además de retardar la fermentación del lodo).

- b) Para mejorar las condiciones de coagulación; en algunos casos, se utiliza menos coagulantes.
- c) Para reducir el número de bacterias en una instalación que trata agua muy contaminada (cuando el número de bacterias asciende a 5.000 por 100 mililitros, se recomienda la precloración).
- d) Reducción de la concentración del amonio libre en el agua.
- e) Reducción de la concentración de fierro y manganeso.

Por lo general, la precloración exige dosis elevadas (una ppm o más) debido a la presencia de grandes cantidades de impurezas concentradas.

- 3) **Poscloración.** Consiste en la aplicación de cloro en el agua después del tratamiento.

Esta aplicación completa la desinfección previa y proporciona el residual que se va a mantener.

- 4) **Cloración adicional.** Es la aplicación de cloro en el agua en uno o más puntos del sistema de distribución después de la poscloración.

Se utiliza para asegurar el mantenimiento de un residual de cloro adecuado en el sistema de distribución y constituye una protección adicional para evitar que las bacterias ingresen en la red de distribución.

10. CONTROL DEL SABOR Y DEL OLOR

10.1 Introducción

Con frecuencia se asocia el olor con el gusto del agua. Ambas características se pueden derivar de las mismas impurezas. El sabor constituye una asociación de las dos sensaciones y en ella predomina el olor, por ser más perceptible. Por ello, el agua que recibe el consumidor debe tener buen sabor y olor.

10.2 Causas del sabor y del olor

Los sabores y olores se pueden deber a los siguientes elementos:

- a) algas (es lo más frecuente);
- b) descomposición de vegetales;
- c) lodos ricos en bacterias;
- d) transformaciones bacterianas de ciertas sustancias inorgánicas;
- e) residuos industriales arrojados a las fuentes.

Uno de los olores más desagradables es el que producen los clorofenoles.

Los clorofenoles son producto de la reacción de los fenoles que contienen los residuos industriales, como el cloro añadido al agua.

10.3 Tratamiento

El tratamiento más eficaz es el preventivo. Entre los métodos preventivos podemos mencionar el tratamiento del agua cruda con sulfato de cobre, cloro, carbón activado y el lavado de los decantadores.

La cloramina se ha usado regularmente como tratamiento preventivo de sabores y olores, principalmente de los fenólicos.

El carbón activado es uno de los medios que más se utiliza para controlar el sabor y olor. Este se puede aplicar en el agua cruda, en la capa de mezcla, en el tanque de decantación y a la entrada del filtro.

La cantidad de carbón que se necesita para este trabajo es, en la práctica, de 0,24 a 120 g por m³, según la concentración de las sustancias productoras de sabor y olor.

La aeración elimina el sabor y el olor que provocan las sustancias volátiles o la presencia de H₂S, pero es ineficaz para combatir los olores y sabores causados por algas y otros vegetales, o bien por la descomposición de microorganismos.

11 CORRECCIÓN DEL pH

11.1 Introducción

La corrección del pH es un método preventivo de la corrosión de tuberías. Consiste en la alcalinización del agua para remover el gas carbónico libre y formar una película de carbonato en la superficie interna de las tuberías.

Para formar la capa o película protectora se eleva el pH del agua al punto de saturación (o incluso, una ligera sobresaturación) con carbonato de calcio.

11.2 Control de la dosificación de cal para evitar la corrosión o la incrustación excesiva

- 1) Se toma una muestra del agua que se va a distribuir:
 - a) se determina el pH;
 - b) se determina la alcalinidad.
- 2) Se agrega un exceso de carbonato de calcio precipitado, puro (una cucharadita de carbonato en cada 150 mililitros de la muestra) a una porción de la misma agua tratada.
- 3) Agitar por algunos instantes en un frasco cerrado y dejar que el carbonato se deposite.
- 4) Filtrar una porción y determinar el pH.
- 5) Repetir las operaciones (3) y (4) hasta que el pH sea constante.
- 6) Finalmente, filtrar una nueva porción (con el pH constante) y determinar el pH y la alcalinidad en el agua filtrada.
- 7) Comparar con el pH y la alcalinidad del agua inicial:
 - a) Si la alcalinidad o el valor del pH y m(a) y (b) es menor que en (6), entonces el agua no está saturada con carbonato y se debe aumentar la cal de corrección.
 - b) Si son iguales, el agua está saturada de carbonato de calcio (está en el pHs).
 - c) Si es menor, el agua está sobresaturada de carbonato de calcio y se debe reducir la cal de corrección. El pH de saturación es el que se encuentra en (6) y es el que se va a utilizar.

En los casos (a) y (b), el pH de corrección debe ser ligeramente más alto que el pH de saturación encontrado mediante la precipitación de carbonato para formar la película protectora en la tubería.

11.3 Control en la red

Para formar la película protectora interna en la tubería de distribución mediante la precipitación de carbonato, se debe controlar y observar la tubería para que la incrustación no sea mayor que lo deseado (un milímetro). Para ello se deben observar los tubos retirados de la red por ruptura, sustitución, etcétera.

12. FLUORACIÓN

La finalidad convencional del tratamiento de agua para el abastecimiento público es presentar agua de buena calidad física, química y bacteriológica.

Naturalmente, en un principio hubo oposición al empleo de compuestos químicos como el sulfato de aluminio, el cloro, etcétera, pero actualmente esto es de aceptación general.

Hace algunos años, cuando se reconoció que ciertas sustancias como el plomo, el selenio y el cromo hexavalente e incluso el flúor en exceso eran tóxicas, se trató de impedir el uso de tales aguas o remover los ingredientes indeseables. El objetivo siempre ha sido ofrecer agua de buen aspecto físico y calidad sanitaria segura.

La idea de añadir al agua sustancias que podrán estar presentes tanto en esta como en los alimentos con el propósito de asegurar el adecuado desempeño fisiológico del cuerpo humano constituye una nueva finalidad del tratamiento de agua.

Se sabe que muchas sustancias alimenticias básicas son necesarias para la salud. Muchas veces se desconoce que ciertos elementos que

se obtienen del agua o de los alimentos tienen la misma importancia en cantidades muy pequeñas.

Por ejemplo:

Cada individuo necesita cerca de dos miligramos de cobre, de 6 a 10 miligramos de hierro, de 0,01 a 0,1 miligramos de yodo por día (necesario para la actividad normal de la glándula tiroidea), etcétera.

Recientemente, después de polémicas exhaustivas, el flúor pasó a formar parte de esta lista de elementos esenciales.

La fluoración, por ejemplo, es un método preventivo contra la descomposición del esmalte de los dientes (el cual, una vez dañado, no tiene reparo). La caries dental ataca a cada 95 de 100 personas y, sin duda, es la enfermedad más expandida.

La fluoración de las aguas de abastecimiento público ayuda a que los dientes sean más resistentes y saludables.

Los dientes son huesos muertos y, obviamente, la acción benéfica del flúor tiene más ventajas durante el tiempo de su formación. Se trata de un proceso de largo plazo (10 años). Sin embargo, la aplicación del flúor no debe ser discontinua para que se pueda lograr el efecto deseado.

La acción del flúor puede producirse por las siguientes razones:

- 1) aumento de la insolubilidad de la parte mineralizada del diente, con lo cual se vuelve más resistente a las bacterias;

- 2) mayor concentración de fluoruro en la cavidad oral e inhibición de los procesos enzimáticos que disuelven la sustancia orgánica protética y el material calcificador del diente;
- 3) su presencia hace que el medio se vuelva inadecuado para el desarrollo de *Lactobacillus acidophilus*.

La saliva tiene una gran acción protectora contra las caries dentales, la cual se refuerza cuando se utiliza agua fluorada.

12.1 Compuestos de flúor utilizados en la fluoración del agua

En la fluoración del agua se utilizan los siguientes compuestos:

- fluoruro de sodio comercial;
- fluosilicato de sodio;
- ácido fluosilícico;
- fluosilicato amónico (en escala reducida), y
- fluoruro de calcio o fluorita.

Fluoruro de sodio. Se presenta en forma de polvo fino o granulado, con una pureza de 95% y con 45% de flúor. Posee una solubilidad casi constante: 4,03% a 15 °C y 4,11% a 100 °C.

El pH de la solución a 1% es 6,5 y el de una solución saturada, entre 6,0 y 7,0, sin ser por ello corrosiva.

Fluosilicato de sodio. Es un polvo cristalino, blanco amarillento, no higroscópico, sin agua de cristalización. Su solubilidad es muy baja: 0,54% a 10 °C y 2,45% a 100 °C.

El pH de una solución saturada de fluosilicato de sodio es de 3,5, lo cual significa que es muy corrosiva.

Ácido fluosilícico. De uso y transporte peligrosos.

Fluoruro de calcio o fluorita. Solubilidad: 0,0016%. Soluble en ácidos y también en solución de sulfato de aluminio.

Aunque no se hayan superado las dificultades que impiden el uso del fluorito, se ha logrado una concentración de hasta 0,5 mg/L en el agua tratada mediante la aplicación de su solubilización.

Es probable que en el futuro esta forma de fluoración sea más económica.

12.2 Métodos de aplicación y uso

Fluoruro de sodio. Precauciones: evite respirar el polvo; báñese después de usarlo; limpie inmediatamente cuando se derrame; utilice máscaras protectoras, guantes, lentes, principalmente cuando el producto viene en polvo. Es preferible utilizar el fluoruro de sodio granulado para correr menos riesgos.

Aplicación:

Por lo general, se aplica una solución de 2% a 3%. Es lo más conveniente para las instalaciones pequeñas. La solución de fluoruro de sodio se prepara con agua (se debe realizar con guantes), en tanques con capacidad para 24 a 30 horas de consumo. La sal se deberá pesar con el máximo rigor y el agua se deberá medir de la misma manera. Una vez que la concentración de la solución se

conoce con exactitud, la aplicación de la dosis conveniente resulta más fácil.

La solución se podrá aplicar mediante el sistema de aplicación de hipocloritos: con frasco de Mariote, bombas volumétricas, dosificadores de nivel flotante, etcétera. En todos los casos, se recomienda medir la cantidad de solución que se está aplicando periódicamente. Si se conoce el escurrimiento, la concentración de la solución, el porcentaje de pureza de la sal y el volumen de agua en tratamiento, se puede mantener una dosificación perfecta.

El ensayo de laboratorio se utilizará como confirmatorio.

Ejemplo:

V (en m^3) = volumen de agua en tratamiento por minuto = sea 3 m^3 /minuto.

v (en mL) = escurrimiento de la solución en mL/minuto = x

P = pureza de la sal = 95%

C = concentración de la solución = 2%

D = dosis de fluoruro que se va a aplicar = 0,8 mg/L

Cálculo:

$$x = \frac{V \cdot D \cdot 10.000}{C \cdot P} = \frac{3 \times 0,8 \times 10.000}{2 \times 9,5} = 126,2 \text{ mililitros por minuto}$$

Solución saturada. Es el sistema recomendable para ciudades que tienen una población de hasta 80.000 habitantes, por ser sencillo, fácil de usar y por tener equipos de bajo costo.

Como la solubilidad del fluoruro de sodio es prácticamente constante (4%), se obtiene una solución aplicable por medio de dosificadores comunes con un saturador donde se puede aplicar sal para varios días.

Suspensión. La suspensión se puede preparar en agitadores o mezcladores mecánicos y dosificar mediante dosificadores similares a los que se usan para aplicar la lechada de cal.

Aplicación al seco. El fluoruro de sodio se puede aplicar al seco, en grandes instalaciones, mediante alimentadores comunes de tipo volumétrico o gravimétrico (observe el sulfato de aluminio).

Fluosilicato de sodio. El fluosilicato de sodio se utiliza directamente en polvo o en suspensión, debido a su solubilidad variable más baja.

La suspensión se prepara en agitadores o mezcladores mecánicos (hasta 20%) y se aplica con un dosificador de líquidos que debe ser de material anticorrosivo y especial para suspensiones espesas. Este sistema no funciona en instalaciones pequeñas, aunque el fluosilicato de sodio sea relativamente más barato que el fluoruro de sodio.

Aplicación al seco. Es semejante a la aplicación del fluoruro de sodio.

12.3 Dosis requeridas de compuestos de flúor

La cantidad o dosificación del compuesto de flúor, necesaria para la fluoración de un agua determinada, depende de los siguientes factores:

- 1) de la pureza del compuesto que se va a utilizar;
- 2) de la dosificación del fluoruro natural del agua;
- 3) de la concentración de ion fluoruro del compuesto;
- 4) de la concentración deseada para el agua tratada.

Se cree que el consumo per cápita de ion fluoruro debe ser de 1,5 miligramos por día. No se dispone de información segura sobre el consumo real de agua potable y hábitos de alimentación y bebidas, etcétera. Sin embargo, McClure señala que el consumo promedio de agua potable es de aproximadamente 1,2 a 1,6 litros per cápita por día.

Estudios realizados en California a inicios de los años cincuenta demostraron que cada aumento de grado de temperatura máxima del día, entre 10 °C y 38 °C, corresponde a un aumento de ingestión promedio de agua, lo que fue calculado sobre la base de los datos climatológicos de dos ciudades.

Tales conclusiones hicieron posible establecer una fórmula para determinar la concentración óptima de fluoruro para una colectividad, la cual se puede determinar simplemente con la temperatura mínima durante un periodo de cinco años o incluso mayor.

La mínima de las máximas temperaturas en °C es la única medida que se puede utilizar para determinar dicha concentración. El método se fundamenta en la siguiente ecuación.

La fórmula es la siguiente:

$$mg/L \text{ de fluoruro} = \frac{0,34}{E}$$

El número 0,34 es el promedio de ingestión de agua para niños de 10 años de edad en unidades de peso (28,691 g) por 0,453 g de peso corporal.

Esto se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$E = 0,1604 + 0,01116 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$^{\circ}\text{C}$ = temperatura menor máxima durante un periodo de 5 años o más.

Ejemplo:

Cuando la menor temperatura es 30 $^{\circ}\text{C}$, si aplicamos la fórmula tendremos lo siguiente:

$$\text{mg/L de fluoruro} = \frac{0,38}{E}$$

dado que:

$$E = 0,1604 + 0,1116 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ tendremos:}$$

$$E = 0,1604 + 0,01116 \times 30 = 0,4952. \text{ Si reemplazamos:}$$

$$\text{mg/L de fluoruro} = \frac{0,34}{0,4952} = 0,7 \text{ mg/L}$$

12.4 Toxicidad del flúor

La aplicación incorrecta de un compuesto de flúor requeriría un error de por lo menos 50 % por encima de la dosificación establecida

para producir una concentración de iones de fluoruro de 1,5 miligramos por litro o más. Este margen de error debería mantenerse durante varios meses antes de que el exceso de flúor cause manchas en los dientes de los niños que consumen el agua excesivamente dosificada.

Ese margen supera muchos errores inevitables, propios de los dosificadores químicos que fluctúan entre 1,5 y 10 %.

La ingestión de 0,25 gramos de fluoruro de sodio puede causar un estado agudo que se manifiesta mediante vómitos y un aumento de salivación. Tal cantidad, en un vaso de agua, equivale a la dosificación de una tonelada de fluoruro de sodio en un millón de litros de agua. Esto excedería la capacidad de los dosificadores que, por seguridad, se eligen con una capacidad de reserva tan solo ligeramente mayor de la establecida.

12.5 Conclusión

La fluoración del agua de un abastecimiento público constituye una mejora de la calidad del líquido distribuido a la población.

Cuando se desea favorecer esa mejora, es importante que las respuestas a las siguientes preguntas sean afirmativas:

- ¿Se abastece a toda la población con el agua tratada?
- ¿La población acepta, consume y confía en el abastecimiento?
- ¿El agua distribuida cumple los patrones de potabilidad?
- ¿El agua se mide antes de la llegada a la planta, en la planta de tratamiento de agua y durante la distribución?
- ¿La temperatura ambiente se conoce por un periodo largo para calcular la dosificación?

- ¿Es posible controlar el sistema de fluoración de manera eficaz?

13 DUREZA

13.1 Introducción

El agua pluvial, al caer, contiene pequeñas cantidades de materia orgánica y gases disueltos.

Al escurrirse o correr por la superficie de la tierra, ejerce su acción disolvente sobre los minerales y las sustancias orgánicas.

La corteza terrestre contiene una cantidad de sales minerales, como sulfatos de calcio y magnesio, que se disuelven en el agua.

Cuando hay un aumento de CO_2 en el agua, esa disolución aumenta aún más.

El calcio es el principal causante de la dureza del agua, seguido del magnesio, que se encuentra en las aguas naturales en una concentración de 5 a 20% sobre la concentración de calcio.

Tales elementos se encuentran en el agua como bicarbonatos y sulfatos y algunas veces como cloruros y nitratos.

La dureza, conformada por bicarbonatos de calcio y magnesio, se denomina *dureza temporal* y la conformada por sulfatos, cloruros y nitratos, *dureza permanente*.

La suma de las dos constituye la *dureza total*.

La dureza permanente está relacionada con los denominados *incrustantes*.

La dureza temporal puede removerse fácilmente con un simple proceso de ebullición, mientras que la dureza permanente solo podrá removerse con un tratamiento específico.

13.2 Ablandamiento

El ablandamiento del agua es económico (se ahorra jabón y combustible); prolonga la duración de los materiales; reduce las pérdidas, las reparaciones y la substitución de piezas, principalmente en los sistemas de agua caliente. Da comodidad a los hogares y facilita el trabajo casero. Atrae industrias nuevas y hay menos quejas por parte del consumidor.

Existen pocas desventajas del ablandamiento del agua y se presentan solo cuando la reacción de ablandamiento es excesiva.

El agua muy densa puede ser corrosiva.

Si la proporción sodio-calcio es muy alta, no se puede utilizar el agua sin perjuicio para irrigar los sembrados.

Existen varios procesos para determinar la dureza del agua. El más sencillo y rápido es la trituration de la muestra con una solución de jabón (alcohólica), graduada de tal forma que un mililitro de la solución sea equivalente a un miligramo por litro de dureza, en términos de CaCO_3 .

13.3 Métodos para expresar la dureza

DUREZA-CORRESPONDENCIA	PPM O MG/L	GRADOS US GALÓN	GRADO CLARK	GRADO FRANCÉS	GRADO ALEMÁN
ppm o mg/L	1	0,058	0,07	0,10	0,056
Grados US galón	17,1	1,0	1,2	1,71	0,96
Grado Clark	14,3	0,83	1,0	1,43	0,80
Grado francés	10,0	0,583	0,7	1,00	0,56
Grado alemán	17,8	1,04	1,25	1,78	1,00

13.4 Clasificación de la dureza de las aguas

DUREZA: PPM O µg/L EN CaCO ₃	CLASIFICACIÓN
0 a 55	densa
56 a 100	ligeramente dura
101 a 200	moderadamente dura
201 a 500	muy dura

13.5 Procesos de ablandamiento

Reducción de la dureza temporal

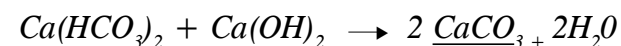
- Por calentamiento, y
- por la aplicación de hidróxido de calcio.

En caso de haber un ablandamiento del agua, este se puede explicar mejor si se representa con ecuaciones químicas.

Por calentamiento:



Por aplicación de hidróxido de calcio:



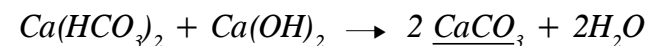
Como este proceso proporciona agua altamente cáustica (alcalinidad debida al OH⁻), se recomienda el tratamiento parcial. La mayor parte del agua recibe ese tratamiento y después se agrega agua cruda para compensar la causticidad.

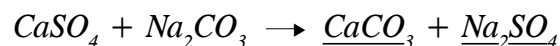
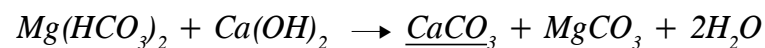
También se puede volver a carbonatar el agua con CO₂ hasta que la alcalinidad total, menos del doble de la alcalinidad para la fenolftaleína, sea aproximadamente igual a 5.

Reducción de la dureza temporal y permanente

- Mediante el uso de cal sodada (hidróxido de calcio + carbonato de sodio);
- mediante el cambio de cationes.

Uso de la cal sodada





Intercambio de cationes

El ablandamiento del agua mediante el proceso de intercambio de cationes depende de la capacidad que tienen ciertas sustancias insolubles (principalmente los silicatos) para intercambiar cationes con otras sustancias disueltas en el agua.

Cuando un agua dura pasa a través de un intercambiador de cationes de sodio, el sodio del dispositivo reemplaza el calcio y al magnesio del agua dura.

Cuando el intercambiador haya proporcionado todo el sodio (cuya proporción se conoce por la determinación de la dureza del agua efluente), tendrá que ser reproducido con una solución de cloruro de sodio (NaCl) en dirección contraria a la corriente y después con agua blanda hasta la remoción de los cloruros.

Nota: por lo general, son más económicas la reducción de la dureza temporal con cal y la reducción de la dureza permanente con un dispositivo para intercambiar cationes. En algunos casos, se puede utilizar una combinación de ambos procesos para disminuir el costo.

14 REMOCIÓN DE FIERRO Y MANGANESO

El hierro tiene más demanda que el manganeso, aunque, por lo general, se utilizan simultáneamente.

Las aguas almacenadas en represas en cuyo fondo quedan sumergidas formaciones mangano-ferruginosas, tienden a acumular hierro y manganeso debido a que la descomposición de la materia orgánica acumulada en la parte más profunda de la presa resulta en la eliminación del oxígeno y CO₂, de tal manera que los compuestos de hierro y manganeso existentes en el suelo y en las rocas sumergidas se convierten en compuestos solubles. Las aguas próximas a la superficie de las represas probablemente tienen menos hierro y manganeso.

Las capas de agua en profundidades diversas permiten obtener agua del nivel más adecuado.

En la aeración, el hierro se puede oxidar, pero en la remoción del manganeso, la aeración sola no es suficiente.

Es necesario elevar el pH de 8,5 a 10,0, pero la precipitación es mejor cuando la aeración está acompañada por un contacto de dióxido de manganeso o un lecho de mineral de pirolusita.

El cloro oxidará el hierro y el manganeso.

La coagulación convencional mediante el sulfato de aluminio, especialmente cuando se practica la precloración, remueve el hierro y el manganeso.

Se obtienen mejores resultados cuando se utiliza sulfato de hierro II clorado o sal de hierro III con cal como coagulante para la coagulación en valores altos de pH.

Cuando se remueve el hierro y el manganeso, estos se pueden acumular en los sistemas de distribución, transmitir sabor y olor al agua, darle color, interferir en la determinación del residual de cloro y provocar manchas en la ropa y en los sanitarios.

15 MÁS SOBRE LA CLORACIÓN

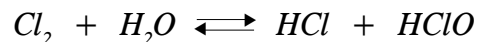
Hay una tendencia general a adoptar el término *cloración* como sinónimo de *desinfección*. Esto se debe a que, normalmente, en los abastecimientos de agua se realiza la desinfección con cloro.

Sin embargo, en las fuentes se puede emplear el cloro como alguicida, solo o con sulfato de cobre; también se puede emplear en la preclo- ración como oxidante del hierro y del manganeso natural del agua; como oxidante del amonio; como auxiliar de la coagulación en el sulfato ferroso, etcétera.

Entonces, sería mejor definir la cloración como la aplicación de cloro en el agua.

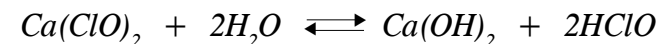
El término *desinfección* quedaría reservado para la definición inicial: la eliminación de los microorganismos nocivos.

Cuando se añade cloro gaseoso al agua, se mezcla y forma el ácido clorhídrico y el ácido hipocloroso.

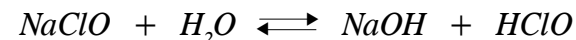


Cuando aplicamos hipoclorito de sodio:

- la sal se disocia por hidrólisis:

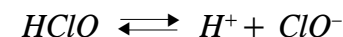


- Hipoclorito de sodio:



Para verificar la formación del HClO (ácido hipocloroso), se añade cualquiera de las sustancias representadas en las fórmulas anteriores.

A su vez, el HClO también se disocia.



La constante de disociación: $\frac{(H^+)(ClO^-)}{(HClO)} = K$

varía con la temperatura; pero también varía —y esto es más impor- tante— con la concentración hidrogénica del agua: el pH.

En los valores de pH bajo 5,0, el cloro también se halla en forma molecular.

Siempre son tres las formas en las que se puede encontrar el cloro en el agua:



En el pH inferior a 5,0 predomina el cloro en la forma Cl_2 ; en la zona de pH entre 5,0 y 7,5 predomina la forma HClO y en el pH de 7,5 a más, la más frecuente es la forma ClO^- , aunque también están presentes las otras formas, pero en una proporción mucho menor.

Para los valores corrientes del pH de las aguas que se van a tratar (sobre 5,0), en la práctica el cloro predominante siempre está en las formas de HClO y ClO^- .

El ácido hipocloroso, HClO , es aproximadamente 80 veces más poderoso como desinfectante que el ion hipoclorito ClO^- .

Se concluye, así, que el poder bactericida del cloro decrece a medida que el pH aumenta.

El cloro disponible en la forma de HClO y ClO^- se denomina *cloro residual libre*.

15.1 Demanda de cloro

Cuando se añade cloro al agua, este interactúa con la materia orgánica e inorgánica contenida en ella y, al mezclarse, provoca oxidaciones u origina la coagulación de ciertos compuestos orgánicos.

Mientras que con la materia inorgánica el cloro actúa rápidamente, la reacción con la materia orgánica es más lenta, hecho de gran importancia en el proceso de desinfección del agua.

Tomemos un ejemplo de tres muestras de la misma agua (de determinada calidad) a las que se añade cantidades crecientes de cloro en sendos frascos:

1	2	3
1	2	3

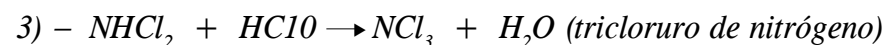
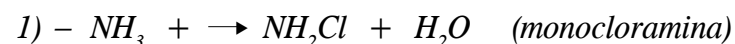
Los frascos tienen el mismo volumen del líquido y en ellos colocamos cantidades 1, 2 y 3 de cloro. Entonces, podremos verificar:

- frasco 1: el cloro añadido se mezcla y permite un residual;
- frasco 2: el cloro añadido se mezcla inicialmente y después se oxida (permite un residual), y
- frasco 3: el cloro añadido se mezcla, oxida, coagula y permite un residual.

Hay una aceleración de las reacciones cuando hay mayor cantidad de cloro.

Entre las sustancias frecuentemente contenidas en el agua, con las cuales interactúa el cloro, el amonio (NH_3) tiene una importancia especial, así como otros compuestos nitrogenados orgánicos, tales como proteínas y aminoácidos, con los cuales el cloro forma las llamadas cloraminas y otros derivados del cloro de menor importancia.

La importancia de las cloraminas en la desinfección del agua reside en la particularidad de contener cloro disponible para nuevas reacciones, aunque *menos energéticas* que las del cloro libre.



En los valores de pH del agua superiores a 9,0 predominan las monocloraminas (NH_2Cl). En los valores de pH inferiores a 5,0 predominan la dicloramina (NHCl_2) y el tricloruro de nitrógeno (NCl_3).

En los valores de pH de 5,0 a 9,0, a medida que crece el pH se forma una mezcla de monoclорamina y dicloramina con concentraciones crecientes para la primera y decrecientes para la segunda.

La acción bactericida de las cloraminas se debe principalmente a la dicloramina, lo cual explica por qué los valores altos de pH del agua también son desfavorables.

El residual de cloro en la forma NHCl_2 y NH_2Cl se denomina *cloro residual combinado*.

Cuando se aplica cloro en el agua, las reacciones que se originan absorben una parte (del cloro) de tal manera que su poder desinfectante, en determinado momento, depende solo del cloro disponible para las nuevas reacciones; es decir, del *cloro residual disponible*. Este incluye no solo el cloro residual libre HClO y ClO^- sino también las cloraminas, cloro residual combinado: NHCl_2 y NH_2Cl .

Como ambos tienen velocidades de reacción diferentes, es importante distinguirlos (método OTA).

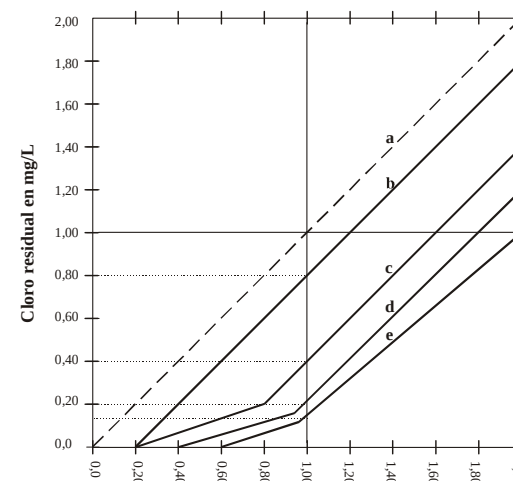
Se dice que la demanda de cloro de un agua determinada es la cantidad de cloro que absorbe sin dejar residual.

Como ciertas reacciones son lentas, la cantidad de cloro que se consume varía con el tiempo de contacto cloro-agua, por lo cual lo más correcto es hablar de *demanda de cloro para un determinado tiempo de contacto*.

Incluso se puede definir demanda de cloro de un agua para determinado tiempo de contacto cloro-agua como la diferencia entre la dosificación de cloro aplicada y el residual disponible (cloro residual

libre + cloro residual combinado) al final del periodo de contacto. Observe el siguiente gráfico:

Gráfico 1



- a) Demanda nula;
- b) demanda inorgánica;
- c) demanda orgánica (un minuto de contacto);
- e) demanda orgánica (10 minutos de contacto), y
- f) demanda orgánica (30 minutos de contacto).

Verifique en la perpendicular 1,00; para la dosificación de 1,00 miligramos por litro de cloro aplicado:

curva a. El residual correspondería a un agua sin demanda de cloro y el cloro residual equivaldría a la dosificación de cloro aplicada.

curva b. Demanda de un agua sin demanda de naturaleza orgánica. $(1,00 - 0,80 = 0,20)$; 0,20 mg/L de demanda inorgánica mediante una reacción rápida. La curva seguirá paralela si el tiempo no varía.

curva c. Demanda inorgánica inmediata = 0,20 mg/L y demanda orgánica = 0,40 mg/L. Demanda total = 0,60 mg/L. Cloro residual disponible = 0,40 mg/L.

Variaciones en un minuto.

curva d. Demanda inorgánica inmediata = 0,20 mg/L. Demanda orgánica = 0,60 mg/L al transcurrir 10 minutos. Demanda total = 0,80 mg/L. Cloro residual disponible = 0,20 mg/L.

curva e. Demanda inorgánica inmediata = 0,20 mg/L. Demanda orgánica = 0,70 mg/L al transcurrir 30 minutos. Demanda total = 0,90 mg/L. Cloro residual disponible = 0,10 mg/L.

Si la dosificación aplicada fuera de 2,00 mg/L, se obtendrían demandas ligeramente superiores para los mismos periodos de contacto debido a un aceleramiento de las reacciones en presencia de mayor cantidad de cloro.

Cuando los periodos de contacto son mayores, los valores de las demandas tienden a identificarse, sin importar cuál sea la dosificación aplicada.

15.2 Cloración al punto de quiebre

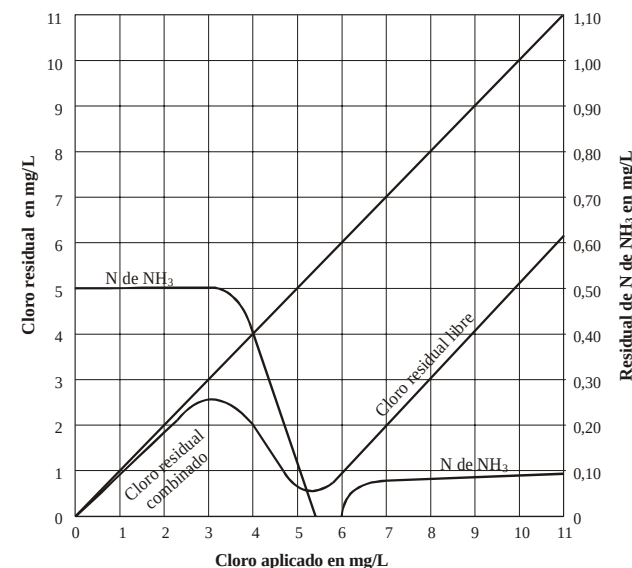
Cuando las dosis de cloro para un mismo tiempo varían, se produce un fenómeno que se llama *cloración al punto de quiebre*.

Ejemplo:

En volúmenes iguales de una muestra de un agua que contenía 0,50 mg/L de nitrógeno de amonio (N de NH_3), pH igual a 7,0 y una

temperatura comprendida entre 7,2 y 8,8 °C, se dosificó cloro de manera creciente. Después de dos horas de contacto, se determinó el cloro residual disponible.

Gráfico 2



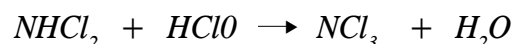
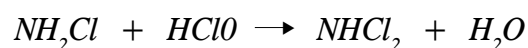
El cloro residual llega a un mínimo de punto de quiebre cuando la razón N y Cl de las concentraciones de amonio y de cloro aplicadas es aproximadamente 1:10. El amonio desaparece totalmente cuando la relación es de 1:11 ó 1:12.

A partir del punto de quiebre, el cloro residual empieza a crecer proporcionalmente a la dosificación del cloro aplicado. El amonio vuelve a aparecer en un valor de 1/5 de su concentración inicial.

Para verificar que el residual de cloro se mezcla en la línea ascendente y descendente de la curva (antes del punto de quiebre), se

analiza la naturaleza del residual de cloro. Después del punto de quiebre, el cloro residual es libre.

En la primera fase del proceso tenemos las siguientes reacciones:



El punto máximo de la curva se alcanza cuando todo el amonio disponible se ha mezclado con el cloro para la formación de las cloraminas.

En consecuencia, como estas son químicamente inestables, si se añade más cloro al agua cuando se alcanza el máximo de la curva, las cloraminas se oxidan y destruyen, lo cual da lugar a la formación de productos inertes como N_2 , N_2O , HCl , etcétera. A estas reacciones les corresponde la línea decreciente de la curva.

Se llega al mínimo del punto de quiebre después de la destrucción total de las cloraminas.

Una vez satisfecha la demanda de cloro del agua, aparecen nuevos derivados de cloro como cloro residual libre.

En la práctica, solo presentan un punto de quiebre pronunciado las aguas que contienen amonio en otros compuestos nitrogenados, como las aguas muy contaminadas.

Las aguas que no contienen amonio, pero sí nitrógeno albuminoide, pueden presentar un punto de quiebre poco pronunciado, que no muestran las aguas limpias y libres de materia orgánica.

Cuando la cloración realizada permite un residual de cloro anterior al punto de quiebre, comúnmente aparece un sabor y olor en el agua tratada debido a las aguas contaminadas que contienen amonio y otros compuestos nitrogenados. Por ello se ha convenido en que el residual de cloro se encuentre después del punto de quiebre.

15.3 Limpieza y desinfección de la red y reservorios de distribución

Generalidades. *Desinfectar* quiere decir eliminar los microorganismos que pueden causar enfermedades; es decir, los microorganismos patógenos.

Tales microorganismos pueden aparecer en el agua y sobrevivir durante varias semanas en temperaturas próximas a 21 °C o posiblemente durante varios meses en temperaturas bajas. Además de la temperatura, su supervivencia depende de varios factores ecológicos, fisiológicos y morfológicos, incluidos el pH, la turbidez, el oxígeno, los nutrientes, la competencia con otros organismos, la resistencia a sustancias tóxicas, la habilidad en la formación de esporas, etcétera.

Las aguas consideradas potables desde el punto de vista microbiológico se pueden contaminar en los sistemas de distribución, en la red de agua, la conducción por vehículos, el almacenamiento en depósitos, etcétera.

Agentes desinfectantes:

- tratamiento físico: aplicación de calor y otros agentes físicos;
- irradiación: luz ultravioleta;
- iones metálicos;

- compuestos alcalinos;
- tensoactivos, como los compuestos de amonio cuaternario (detergentes);
- oxidantes: halógenos, ozono y otros compuestos orgánicos e inorgánicos.

Los desinfectantes que se van a utilizar en el tratamiento del agua deben tener las siguientes propiedades:

- Pueden destruir, en un tiempo razonable, los organismos patógenos que se deben eliminar en la cantidad y condiciones en que se presentan en el agua.
- No son tóxicos para el hombre ni para los animales domésticos y, en dosis usuales, no producen olor ni sabor que perjudiquen el consumo del agua.
- Están disponibles a un costo razonable y tienen condiciones de facilidad, seguridad de transporte, almacenamiento y aplicación.
- Su concentración en el agua tratada se puede determinar fácil y rápidamente, de preferencia de manera automática.
- Producen residuales persistentes en el agua para formar una barrera sanitaria contra otra posible contaminación antes del uso.

La desinfección con cloro es el método más empleado en el agua de consumo público. Este es un poderoso agente oxidante.

Su acción bactericida se debe, posiblemente, a su propiedad de penetración en las células, lo cual provoca la oxidación de los sistemas proteína-enzima y, en consecuencia, la muerte del organismo.

Se recomienda el cloro como desinfectante del agua porque cumple las siguientes condiciones básicas:

- destruye los organismos patógenos;
- trabaja a temperatura ambiente y en corto tiempo;
- es de bajo costo, de fácil aplicación y uso;
- su concentración en el agua se puede determinar fácilmente;
- es inofensivo para el hombre, en las dosis utilizadas para desinfectar el agua, y
- permite un residual constante.

Fuentes de cloro

El cloro se puede encontrar de las siguientes formas:

- cloro gaseoso: envasado en cilindros de acero, con 7,5 kg/cm² de presión (99% de cloro disponible);
- hipocloritos:
 - de calcio (granulado o en polvo): 70% de cloro disponible;
 - de sodio: líquido (en solución): 10% de cloro disponible;
 - cloruro de cal (cal clorada): 25% de cloro disponible;
 - agua de lavandería o lejía (líquido): 2% de cloro disponible.

Desinfección de pequeños reservorios

De capacidad inferior a cinco metros cúbicos (reservorios domiciliarios o de pequeñas comunidades).

Técnica

- Calcular la capacidad del reservorio;
- lavar cuidadosamente el interior del reservorio para eliminar todos los cuerpos extraños;
- lavar con abundante agua toda la tubería conectada a este;

- disolver en agua, cloro o compuesto de cloro en cantidad necesaria para obtener una solución en el volumen del reservorio que contenga 100 mg/L (100 ppm) de cloro disponible.

Por ejemplo: dado un reservorio de 1 m³:

cloro gaseoso	100 g
hipoclorito:	
de calcio	143 g
de sodio	1.000 g
cloruro de cal	400 g
agua de lavado	5 litros

- Verter la solución en el reservorio, llenar de agua, agitar y mantenerlo así por cuatro horas. (Abrir todas las piletas varias veces para renovar el agua clorada en la tubería subsidiaria.)
- Transcurrido ese tiempo, determinar el residual de cloro en el agua. Si es menor que 25 miligramos por litro, se debe realizar una nueva desinfección.
- Si es mayor, dejar que el agua del reservorio se escurra por todas las piletas abiertas simultáneamente.
- Llenar y escurrir el reservorio por todas las piletas hasta que el residual de cloro sea el permitido antes de utilizar el agua.

Observaciones:

- Este sistema se puede utilizar para desinfectar pozos;
- para desinfectar en menos tiempo, se debe utilizar más cloro;
- para desinfectar en 2 horas, usar 200 mg/L;
- para desinfectar en 12 horas, 50 mg/L.

Desinfección de reservorios más grandes

Reservorios con capacidad superior a 5 m³:

La desinfección del reservorio se realiza:

- después de terminar la construcción del reservorio que se va a utilizar (los operarios y materiales empleados siempre contaminan los reservorios recién construidos);
- después de cualquier reparación interna;
- cuando hay una contaminación eventual.

Los reservorios se deben inspeccionar periódicamente, reparar cuando sea necesario y limpiar cuando sea conveniente.

Técnica

- Limpiar minuciosamente el fondo, las paredes y el techo del reservorio.

Una manera eficaz de ejecutar esta limpieza es mediante el uso de chorros de agua bajo presión, con el caudal necesario para arrastrar el lodo y las impurezas. Los operarios encargados de este trabajo deben tener una ficha médica (no deben ser portadores de males transmisibles). Deben utilizar botas de jébe desinfectadas previamente.

- Lavar y friccionar las paredes y el fondo con una solución de cloro que contenga 50 mg/L (50 ppm) de cloro disponible.

Se debe cuidar de que los operarios encargados de este trabajo no permanezcan todo el tiempo expuestos a la emanación del cloro.

Deben salir periódicamente para respirar. Deben utilizar máscaras o protegerse con algodón mojado sobre la nariz y la boca.

- Se enjuaga el fondo con un “trapeador” con borde de jebe y, cuando las paredes están secas, el reservorio se llena.

El examen bacteriológico del agua almacenada será el factor determinante con respecto a la desinfección. En caso de ser positivo, se debe realizar una nueva desinfección. La frecuencia de estos exámenes en las aguas almacenadas constituye una excelente medida de control.

Tubería nueva

Después de realizar la prueba de carga:

- Se realiza el lavado de la tubería para remover el material que quedó en el interior.
- Para realizar este lavado se recomienda una velocidad mínima de 0,75 m/seg.
- Después de lavar la tubería, se realiza la desinfección.

Técnica

- Con el registro de descarga del final del tubo parcialmente abierto, se añade, mediante una válvula, una solución de cloro preparada con cloro gaseoso o cualquiera de los compuestos de cloro.
- A medida que se añade el cloro, se abre el registro que une la red de abastecimiento al tramo que se va a desinfectar.
- En diferentes tramos de la red se determina la concentración de cloro para tener un mínimo residual de 50 mg/L.

- Cuando el agua impregnada de cloro llena la tubería totalmente, se cierran los registros de entrada y salida y la válvula de cloración. Se mantiene así por un plazo mínimo de 12 horas. Una vez transcurrido ese tiempo, debe existir en el agua un residual mínimo de 25 mg/L.

En caso de necesitar una desinfección en menos tiempo, se utilizan dosis mayores: 100 mg/L de cloro para desinfectar en cuatro horas ó 200 mg/L de cloro para desinfectar en dos horas.

Para la desinfección se puede utilizar tabletas de hipoclorito de calcio (70%). Tales tabletas, de aproximadamente 200 gramos, se colocan dentro de los tubos próximos al registro de la red:

- después de la desinfección, se lava la tubería con el agua del abastecimiento y solo funcionará cuando el cloro residual sea equivalente al que normalmente se encuentra en el suministro;
- si tal residual es menor que un miligramo por litro, por medidas de precaución, durante las primeras 24 horas después de terminada la desinfección, se debe mantener un residual de aproximadamente 1,5 a 2 mg/L, después de lo cual se regresa a la práctica adoptada en la localidad.

Las normas de la American Water Works Association (AWWA) recomiendan que después de la desinfección, la red solo funcionará si los resultados de los exámenes bacteriológicos de muestras escogidas de la red fueran satisfactorios. En caso de registrarse presencia de coliformes, se debe repetir la desinfección.

Canalización en uso:

- después de la “limpieza”, el método descrito anteriormente;

- en caso de ruptura de tubos:
 - se debe tener cuidado de que no entre agua sucia y lodo en la tubería después de la ruptura;
 - el tubo que va a ser colocado debe desinfectarse con una solución de cloro que contenga 500 mg/L como mínimo (desinfectar las uniones o la estopa);
 - cerrar con los registros de sección la parte de la red que se va a desinfectar;
 - Solicitar a los usuarios conectados a la red que no utilicen el agua durante la desinfección;
 - transcurrido el tiempo de contacto de la red con el cloro, descargarla, inclusive por las piletas de pedestal de los consumidores.

PRODUCTOS QUÍMICOS COMÚNMENTE UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

NOMBRE DEL COMPUESTO	FÓRMULA	NOMBRE COMERCIAL	TÍTULO (PUREZA)
Sulfato de aluminio	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Alumbre de filtro	15-22% . Al_2O_3
Hidróxido de calcio	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Cal hidratada o extinta	63-73% . CaO
Óxido de calcio	CaO	Cal virgen	75-99.
Carbonato de sodio	Na_2CO_3	Barrilla	99,4% Na_2CO_3
Cloro	Cl_2	Cloro gaseoso	99,8% Cl_2
Hipoclorito de sodio	NaOCl	Hipoclorito	12-15% Cl_2
Cal clorada	$\text{CaO} \cdot 2\text{CaOCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Cloruro de cal	25-37% Cl_2
Fluoruro de sodio	NaF	Fluoruro	90-95% NaF
Sílice fluoruro de sodio	Na_2SiF_5	Fluosilicato	99% Na_2SiF_6
Carbono	C	Carbón activo	
Hidróxido de sodio	NaOH	Soda cáustica	98% NaOH
Sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cobre	
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Sulfato de amonio	
Sulfato de hierro II	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato ferroso verde	100%
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	Ácido sulfúrico	77,67% H_2SO_4
Ácido clorhídrico	HCl	Ácido muriático	27,92% HCl
Sulfato de hierro III	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Ferricloc	60%
Cloruro de hierro III	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cloruro férrico	60% FeCl_3