

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD PROFESIONAL LIC. ADOLFO LOPEZ MATEOS**

**ALTERNATIVAS DE POTABILIZACIÓN PARA EL AGUA QUE
ABASTECERÁ A LA AMPLIACIÓN DEL AEROPUERTO
INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO.**

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL:

PRESENTA:

NANCY VERA BRITO

ASESOR:

ING. MARGARITA P. REYES QUINTERO



MÉXICO D.F.

2007

ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN.....1

OBJETIVO ESPECÍFICO.....3

CAPITULO I GENERALIDADES

1.1 DEFINICIÓN DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....5

1.2 IMPORTANCIA DEL AGUA POTABLE.....5

1.2.1 Tipo de fuentes de abastecimiento.....5

1.3 PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE LAS AGUAS SUPERFICIALES
Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....7

1.4 TIPO DE PLANTAS POTABILIZADORAS.....8

1.5 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO.....12

1.6 NORMA DE CALIDAD PARA AGUA POTABLE EN MÉXICO.....13

1.7 SIGNIFICADO DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL AGUA18

CAPITULO II. PROCESOS APLICABLES PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

2.1 PROCESOS PARA LA REMOCIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

2.1.1 Carbón activado.....26

2.1.2 Aireación.....29

2.1.3 Coagulación - floculación.....33

2.1.4 Sedimentación.....45

2.1.5 Filtración.....49

2.2 PROCESOS PARA LA REMOCIÓN DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.

2.2.1 Precipitación Química.....56

2.2.2. Ablandamiento.....58

2.2.3 Intercambio iónico.....62

2.2.4 Electrodiálisis.....63

2.2.5 Ósmosis inversa.....65

2.2.6 Nanofiltración.....68

2.2.7 Ultrafiltración.....69

2.2.8 Microfiltración.....70

2.3 PROCESOS PARA LA REMOCIÓN DE CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS Y BIOLÓGICAS.

2.3.1 Cloración.....	71
2.3.2 Desinfección.....	74
2.3.3 Ozonización.....	78
2.3.4 Luz UV.....	82

CAPITULO III. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE TRATAMIENTO Y CARÁCTERÍSTICAS DE UNIDADES PROPUESTAS

3.1 MUESTREO LLEVADO A CABO EN LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO.....	88
3.2 CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS CERCANAS AL SITIO EN ESTUDIO.....	92
3.3 UNIDADES DE POTABILIZACIÓN.....	94

CONCLUSIONES.

ANEXO

BIBLIOGRAFÍA.

INTRODUCCIÓN

El agua y la energía son un binomio interdependiente, indestructible e indivisible. Sin agua, no se transforman ni se aprovechan las fuentes primarias de energía. Sin energía, no se reactiva el clima ni se produce el ciclo hidrológico. Sin agua ni energía, ninguna sociedad ni nación puede vivir ni desarrollarse. El agua no se puede importar, cada país depende de sus propios recursos.

El agua es uno de los recursos naturales fundamentales y es uno de los cuatro recursos básicos en que se apoya el desarrollo, junto con el aire, la tierra y la energía. Es el compuesto químico más abundante del planeta y resulta indispensable para el desarrollo de la vida ya que constituye del 50 al 90 % de la masa de los organismos vivos.

La naturaleza a través del ciclo del agua, trabaja para limpiarla, sin embargo no tiene la capacidad suficiente para eliminar todas las sustancias y contaminantes que se vierten en ella. Por ello, una vez que es captada de alguna fuente es llevada por una línea de conducción, a una planta potabilizadora para purificarla y hacerla potable y apta para el consumo humano.

El recurso agua en la actualidad y conforme transcurre el tiempo, destaca por su fundamental importancia, tanto por influir en la calidad y forma de vida de la sociedad, como por ser el elemento básico durante los procesos de transformación masiva de energéticos primarios. Esto significa que de un aprovechamiento eficiente del agua superficial y subterránea, las perspectivas para lograr el anhelado progreso de un país serán mucho mayores.

Considerar que de alcanzar un uso óptimo de los recursos “agua - energía”, con su eficiente y confiable disponibilidad y distribución, dependerá invariablemente el futuro, desarrollo e integridad de México.

La potabilización del agua es un grave problema que aqueja a cientos de habitantes tanto en zonas urbanas como en zonas rurales, que requiere soluciones si no fáciles sí eficaces y económicamente viables. Para ello se requiere encontrar la forma más conveniente de hacerlo, tanto desde el punto de vista técnico como el económico.

La centralización de actividades y funciones en la Zona Metropolitana del Valle de México, junto con el incremento de las actividades operacionales que presenta el aeropuerto “Benito Juárez”, contempla la construcción de otra terminal de pasajeros la nueva “Terminal 2” en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Por lo antes mencionado, es necesaria la construcción de una línea de abastecimiento de agua potable a esta zona, con las siguientes características:

- Construcción de pozo de extracción de agua.
- Instalación y puesta en operación de Planta Potabilizadora.
- Construcción de línea de conducción por bombeo, con una longitud total de 3,879 m.
- Construcción de 7 ramales de distribución a cisterna, los cuales son:
 1. Terminal 2.
 2. UEETAM.
 3. Plataforma de Aviación Comercial.
 4. Plataforma de Aerounión.
 5. Plataforma de Helicópteros.
 6. Plataforma de Aeroméxico.
 7. Centro AICM.

El siguiente trabajo será enfocado a estudiar los procesos que se llevarán para potabilizar el agua de acuerdo a sus características físicas, químicas y biológicas, se propondrá una solución al problema de potabilizar el agua que abastecerá la nueva terminal de la Ciudad de México.

OBJETIVO ESPECÍFICO

Esta investigación y análisis pretende contribuir a dar una selección apropiada de los procesos y operaciones de tratamiento más adecuados para producir agua de la calidad requerida para la Planta Potabilizadora que se pondrá en operaciones dentro de la "Terminal 2" del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

El objetivo básico es el poder integrar de la manera más económica, los procesos y operaciones de tratamiento, para que cuando sea operada, pueda proveer sin interrupción el caudal de diseño y satisfacer los requerimientos de calidad de agua potable.

CAPITULO 1.-

GENERALIDADES

1.1. DEFINICIÓN DE POTABILIZACIÓN.

Al conjunto de operaciones y procesos, físico y/o químicos que se le aplican al agua en los sistemas de abastecimiento públicos o privados, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano.

1.2. IMPORTANCIA DEL AGUA POTABLE.

El agua destinada a uso de poblaciones se toma de la naturaleza, ya sea de fuente superficial o subterránea, prácticamente en ningún caso, se encuentra potable porque al caer en forma de lluvia empieza arrastrando las impurezas de la atmósfera, sigue recibiendo materiales en su recorrido superficial y a través de la capa del subsuelo.

A lo largo de la historia, el hombre ha recurrido a los cuerpos de agua para abastecerse, así como para eliminar sus propios desechos, lo que ha provocado que con el paso del tiempo la cantidad y tipo de residuos que se liberan en el agua se hayan incrementado y al mismo tiempo que la calidad original del agua se haya degradado y se convierta en origen y vehículo de diferentes enfermedades.

El agua natural que servirá como abastecimiento de poblaciones deberá tener calidad "POTABLE", o sea, que llene los requisitos de las "Normas de Calidad para Agua Potable".

1.2.1. TIPOS DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO.

Desde un punto de vista hidráulico se conocen tres tipos de fuentes de abastecimiento:

AGUAS METEÓRICAS.- Pueden encontrarse en estado de vapor, como líquido suspendido en nubes, o cayendo en forma de granizo, lluvia o nieve. Es prácticamente pura, se caracteriza por su carencia de sales minerales, es blanda, saturada de oxígeno, con alto contenido de CO₂ y por consiguiente corrosiva. En nuestro país debido a la precipitación tan irregular que se presenta, no es muy común aprovechar este tipo de aguas.

AGUAS SUPERFICIALES.- Son aguas que escurren o se almacenan sobre la superficie terrestre tales como: ríos, arroyos, lagos, embalses, mares. Al escurrir por la superficie estas corrientes naturales están sujetas a contaminaciones derivadas del hombre y sus actividades transformándolas en muchos casos en nocivas o impropias para la salud. Su calidad depende del tipo de suelo y vegetación.

AGUAS SUBTERRÁNEAS.- Son las que penetran por las porosidades del suelo mediante el proceso denominado infiltración. Se distinguen dos tipos de esta agua:

1. **AGUA FREÁTICA.**- Es aquella que está contenida entre la superficie de la tierra y la primera capa o estrato impermeable.
2. **AGUA ARTESIANA.**- Es el agua que está contenida entre dos estratos impermeables, no se mueve libremente, está confinada y tiene una presión diferente a la atmosférica.

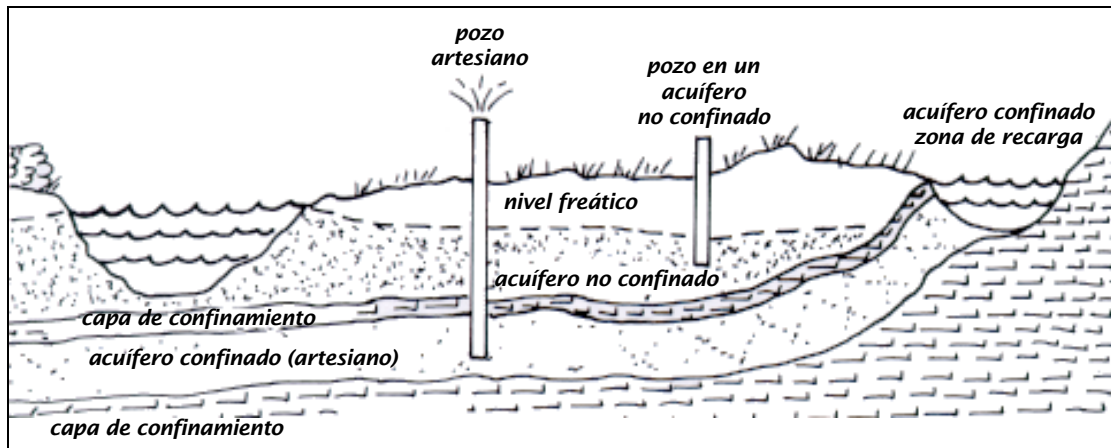


Figura N° 1 Acuíferos confinados y no confinados
(Stewart 1990)

Las aguas subterráneas constituyen la principal fuente de abastecimiento en nuestro país. Se forman a partir del agua que se precipita y penetra en el suelo hasta alcanzar un estrato impermeable y constituir un acuífero (Figura N° 1).

Por lo general, los acuíferos por estar cubiertos presentan una buena calidad de agua libre de sólidos suspendidos. Con excepción de las áreas donde la infiltración de aguas contaminadas ocurre rápidamente o en un corto trayecto, las aguas subterráneas no tienen problemas de contaminación. También es común que estén libres de patógenos. Por ello, no requieren grandes sistemas de potabilización y una simple desinfección es suficiente.

Esta agua subterránea puede aflorar formando manantiales o alimentando cursos de agua o lagos. Al escurrir por las diferentes capas de terreno entra en contacto con sustancias orgánicas e inorgánicas, algunas de ellas muy solubles. Puede dar servicio de agua potable desde viviendas aisladas hasta poblaciones con consumos importantes.

Los acuíferos combinados son los más viejos (la edad se relaciona con la salinidad, exceso de hierro y manganeso, problemas de gases y ausencia de oxígeno disuelto) y se caracterizan por un menor contenidos de nitratos y contaminantes.

1.3. PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En la *Tabla N° 1* se presentan las principales diferencias que existen entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Se puede observar que en las aguas superficiales hay mayor variabilidad, tanto de las sustancias como de los parámetros presentes, debido a la exposición del agua.

Tabla N° 1.-Principales Diferencias entre las Aguas Superficiales y las Aguas Subterráneas.

CARACTERÍSTICAS EXAMINADAS	AGUAS SUPERFICIALES	AGUAS SUBTERRÁNEAS
Temperatura	Variables según la época del año	Relativamente constante
Turbiedad (materia en suspensión)	Variable, a veces elevada	Baja o nula
Mineralización	Variable en función de los terrenos, precipitación ,vertidos , etc.	Sensiblemente constante, generalmente mayor que en la superficie de la misma región
Hierro y manganeso divalentes en estado disuelto	Generalmente ausentes, salvo en el fondo de cuerpos de agua en estado de eutroficación.	Generalmente presentes
Dióxido de carbono	Generalmente ausente	Normalmente presentes en gran cantidad
Oxígeno disuelto	Normalmente próximo a saturación	Ausencia total en la mayoría de los casos presencia frecuente, sin ser un índice sistemático de contaminación
Amonio	Presente sólo en aguas contaminadas	Presencia frecuente, sin ser un índice sistemático de contaminación
Ácido Sulhídrico	Ausente	Normalmente presente
Sílice	Contenido moderado	Contenido normalmente elevado
Nitratos	Poco abundante en general	Contenido a veces elevado, riesgo de metahemoglobinemia
Microorganismos	Bacterias (algunas patógenas), virus, plancton.	Fuentes ferrobacterias

Fuente: Degrémont, 1979

1.4. TIPOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS.

Dependiendo de la calidad del agua cruda, el grado de complejidad del tratamiento es diferente. Como no existe una norma o fórmula que permita determinar el tipo de planta requerida para tratar un agua, es necesario realizar los estudios de tratabilidad. Se han formulado criterios generales de tratamiento de agua cruda, según la calidad del efluente, los cuales sirven como guía (Ver Tabla N°2).

Tabla N° 2.- Estándares para Fuentes de Aguas Crudas.

PARÁMETRO	FUENTE EXCELENTE <i>Requiere solamente desinfección como tratamiento.</i>	FUENTE BUENA <i>Requiere tratamiento usual tal como filtración y desinfección.</i>	FUENTE POBRE <i>Requiere tratamiento especial o adicional y desinfección.</i>
DBO mg/l			
Promedio mensual	0.75 - 1.5	1.5 - 2.5	> 2.5
Máximo diario o muestra	1.0 - 3.0	3.0 - 4.0	> 4.0
NMP de coliformes/100			
ML promedio mensual	50 -100	50 - 5000	> 5000
Máximo diario o muestra	< 5% sobre 100	< 20 % sobre 5000	< 5% sobre 20000
OD			
Promedio mg/l	4 - 7.5	4.0 - 6.5	4.0
%saturación	> 75	> 60	-
ph Promedio	6.0 - 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5
Cloruros mg/l máx.	< 50	50 - 250	>250
Fluoruros mg/l	< 1.5	1.5 - 3.0	> 3.0
Fenoles mg/l máx.	0	0.005	> 0.005
Color - unidades	0 - 20	20 - 150	> 150
Turbiedad, unidades	0 - 10	10 - 250	> 250

El método que se ha de utilizar en la purificación depende básicamente de las características del agua cruda. La selección del proceso de tratamiento se hace con base en la experiencia y en estudios de tratabilidad realizados en laboratorio. En el Cuadro N° 1 se resumen los procesos de purificación de agua más usados en la actualidad.

Cuadro N° 1.- Procesos de Purificación del Agua.

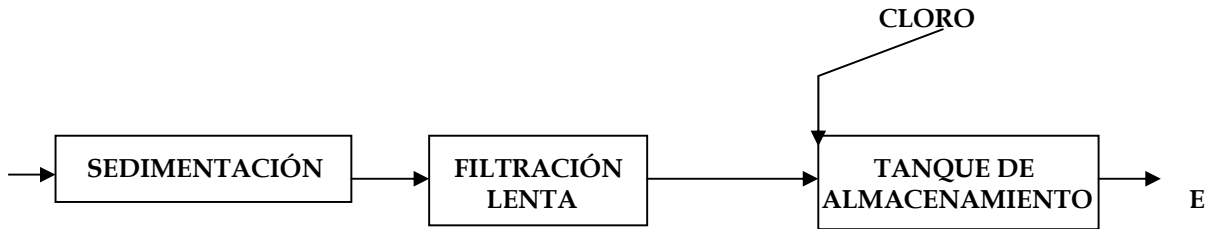
PROCESO	PROPÓSITO
TRATAMIENTO PREELIMINAR	
Cribado.	Remoción de desechos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.
Pretratamiento Químico.	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color.
Presedimentación.	Remoción de grava, arena, limo y otros materiales sedimentables.
Aforo.	Medida de agua cruda por tratar.
TRATAMIENTO PRINCIPAL.	
Aireación.	Remoción de olores y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar sabor.
Coagulación / Floculación.	Conversión de sólidos no sedimentables en sólidos sedimentables.
Sedimentación.	Remoción de sólidos sedimentables.
Ablandamiento.	Remoción de dureza.
Filtración.	Remoción de sólidos finos, flóculo en suspensión y la mayoría de los microorganismos.
Adsorción.	Remoción de sustancias orgánicas y color.
Estabilización.	Prevención de incrustaciones y corrosión.
Fluoración.	Prevención de caries dental.
Desinfección.	Exterminio de organismos patógenos.

El agua debe purificarse para que este siempre libre de todo organismo patógeno, es decir, que sea biológicamente segura. La desinfección es efectiva para dicho propósito si el agua carece de material suspendido.

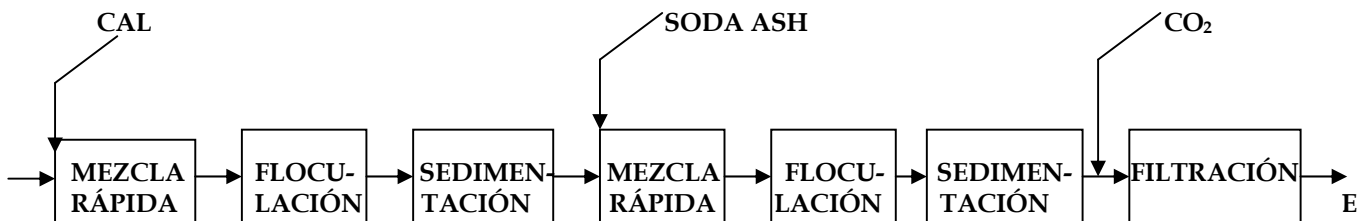
PLANTA DE COAGULACIÓN Y FILTRACIÓN CONVENCIONAL PARA REMOCIÓN DE COLOR, TURBIEDAD Y MICROORGANISMOS.



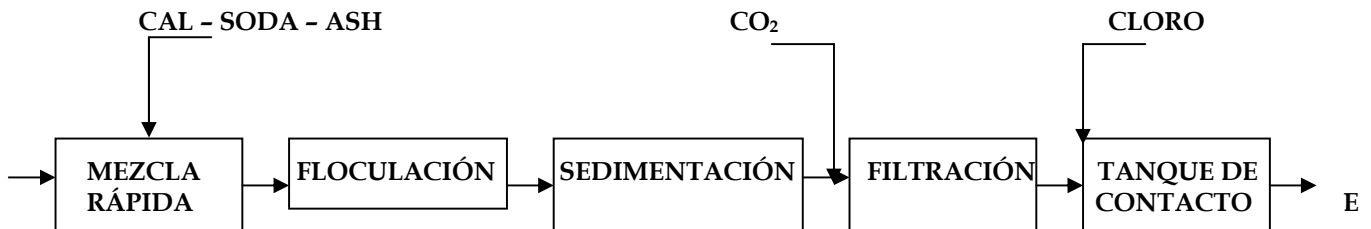
PLANTA PARA UN SUMINISTRO PEQUEÑO CON AGUA CRUDA DE BUENA CALIDAD.



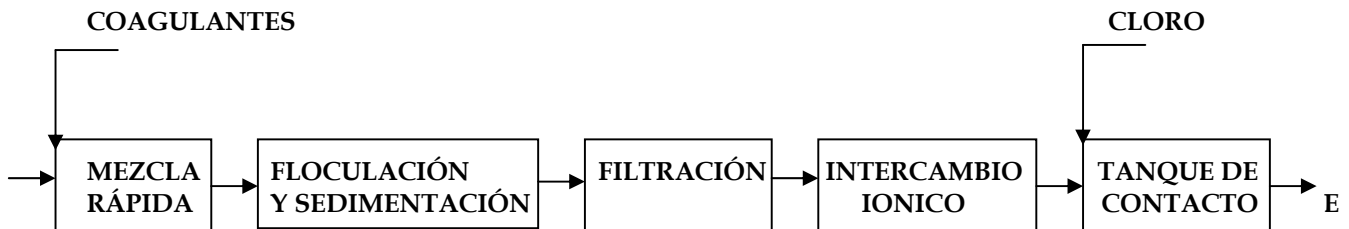
PLANTA DE ABLANDAMIENTO.



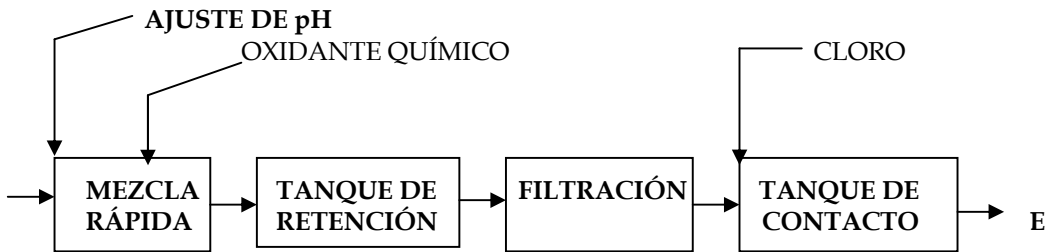
PLANTA DE ABLANDAMIENTO.



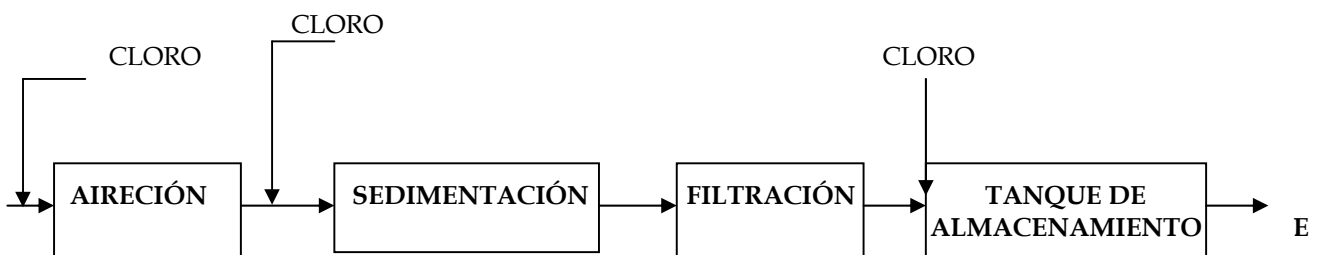
PLANTA DE ABLANDAMIENTO.



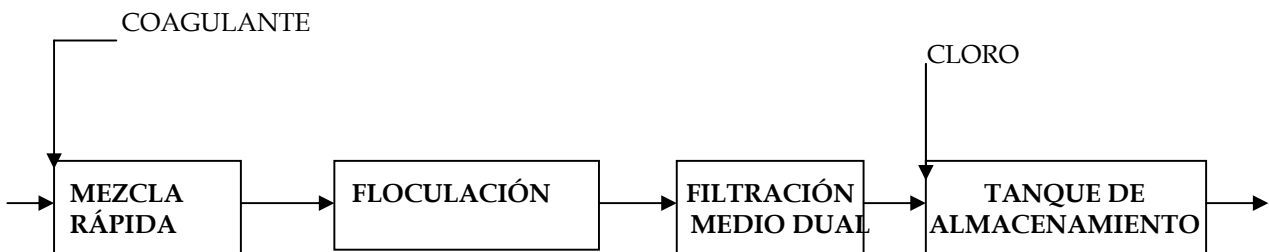
PLANTA DE REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO.



PLANTA DE REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO.



PLANTA DE FILTRACIÓN DIRECTA.



PLANTA DE FILTRACIÓN DIRECTA.



1.5. CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO.

La planta de purificación debe tener máxima confiabilidad y flexibilidad, mínima operación y mantenimiento, y solamente los controles e instrumentación indispensables.

En general se recomienda tener en cuenta, entre otros, los siguientes preceptos de diseño:

- No existe un problema típico de diseño de una planta de purificación. Los proyectos varían desde una pequeña adición a un sistema existente hasta el diseño de un sistema completo.
- En el diseño debe considerarse además la fuente y el sistema de distribución, si se requiere lograr la “producción económica” de agua de buena calidad.
- Debemos familiarizarnos con las especificaciones, normas, leyes y requerimientos oficiales aplicables al proyecto.
- El tipo de tratamiento dependerá de la fuente de suministro y de la calidad deseada en el agua producida.
- Cuando no existe información suficiente sobre la calidad de la fuente, debe recopilarse información proveniente de plantas en operación similares en el área.
- La capacidad de diseño de una planta es generalmente mayor que la demanda máxima diaria de diseño.
- Es necesario que la planta opere continuamente con uno o más equipos fuera de servicio por mantenimiento.
- Las condiciones específicas deben garantizar una construcción económica, pero durable, teniendo en cuenta que las plantas son usadas por muchos más años que los de su periodo de diseño.

1.6. NORMA DE CALIDAD PARA AGUA POTABLE EN MÉXICO.

NOM-127-SSA1-1994

El propósito de esta norma, es el poder establecer las especificaciones sanitarias del abastecimiento de agua para uso y consumo humano, con el propósito de prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se han establecido límites permisibles en cuanto a sus características biológicas, físicas, organolépticas, químicas y elementos radioactivos.

LÍMITES PERMISIBLES PARA LA CALIDAD DEL AGUA.

Límites permisibles de características biológicas.

El contenido de organismos resultante de una muestra de agua simple, deberá ajustarse a lo establecido en el *Cuadro N° 2*.

Bajo situaciones de emergencia sanitaria, las autoridades competentes dictaran las medidas necesarias para identificar la presencia de otros agentes biológicos nocivos para la salud.

Cuadro N° 2.- Límites permisibles de las características biológicas.

Característica	Límite permisible
Organismos coliformes totales.	Ausencia o no detectables en ninguna muestra
Organismos coliformes fecales.	Ausencia o no detectables. En sistemas de abastecimiento de localidades con una población mayor de 50 000 habitantes; estos organismos deberán estar ausentes en el 95% de las muestras tomadas en un mismo sitio de la red de distribución, durante un periodo de doce meses de un mismo año.

Los resultados de los exámenes bacteriológicos deberán reportar en unidades de NMP/ 100 ml (número probable por 100 ml), si se utiliza técnica de número mas probable o UFC/ 100 ml (unidades formadas de colonias), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS.

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en el *Cuadro N°3*.

Cuadro N° 3.- Límites permisibles de las características físicas y organolépticas.

Característica.	Límite permisible.
Color.	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor.	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad.	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en el *Cuadro N° 4* los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra cosa.

Cuadro No. 4 Límites permisibles de las características químicas.

Parámetro, en mg/l	Límite permisible
Aluminio.	0.20
Arsénico.	0.05
Bario.	0.70
Cadmio.	0.005
Cianuros (como CN ⁻).	0.07
Cloro residual libre.	0.2 a 1.50
Cloruros (como Cl ⁻).	250.00
Cobre.	2.00
Cromo total.	0.05
Dureza total (como CaCO ₃).	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos.	0.30
Fierro.	0.30
Fluoruros (como F ⁻).	1.50

Hidrocarburos aromáticos, µg/l	
Benceno.	10.00
Etilbenceno.	300.00
Tolueno.	700.00
Xileno (tres isómeros).	500.00
Manganeso.	0.15
Mercurio.	0.001
Nitratos (como N).	10.00
Nitritos (como N).	1.00
Nitrógeno amoniacal (como N).	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH.	6.50 – 8.50
Plaguicidas, µg/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados).	0.03
Clordano (total de isómeros).	0.20
DDT (total de isómeros).	1.00
Gamma-HCH (lindano).	200.00
Hexaclorobenceno.	1.00
Heptacloro y epóxido de heptacloro.	0.03
Metoxicloro.	20.00
2,4 - D.	30.00
Plomo.	0.01
Sodio.	200.00
Sólidos disueltos totales.	1000.00
Sulfatos (como SO ₄ ⁼).	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM).	0.50
Trihalometanos totales.	0.20
Yodo residual libre.	0.20 a 0.50
Zinc.	5.00

LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS RADIOACTIVAS.

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en el *Cuadro N° 5*.

Cuadro N° 5.- Límites permisibles de las características radiactivas.

Característica	Límite permisible, bq/l
Radiactividad alfa global.	0.56 ⁽¹⁾
Radiactividad beta global.	1.85 ⁽²⁾

En cuanto al límite permisible para el Arsénico, la norma establece que será sujetado en forma anual, de conformidad con la *Cuadro N° 6*.

Cuadro N° 6.- Cumplimiento gradual para el As.

Límite permisible, mg/l	Año
0.045	2001
0.040	2002
0.035	2003
0.030	2004
0.025	2005

TRATAMIENTOS DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA.

La norma señala que los procesos que se emplearán deben ser justificados a partir de estudios de calidad y pruebas de tratabilidad realizados al nivel de laboratorio para asegurar su efectividad. Pero también menciona, que se deben aplicar los señalados en el *Cuadro N° 7* o los que resulten de las pruebas de tratabilidad.

Cuadro N° 7.- Tratamientos para la potabilización del agua según los contaminantes de acuerdo con la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994.

Contaminante(s)	Tratamientos
Contaminación microbiológica (Bacterias, helmintos, protozoarios y virus).	Cloro, compuestos de cloro, yodo, ozono, luz ultravioleta; plata iónica o coloidal; coagulación-sedimentación-filtración; filtración en múltiples etapas.
Características físicas y organolépticas (Color, olor, sabor y turbiedad).	Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado.
Arsénico.	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.
Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo.	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.
Cloruros.	Intercambio iónico, ósmosis inversa o evaporación.

Contaminante(s)	Tratamientos
Dureza.	Ablandamiento químico o intercambio iónico.
Fenoles o compuestos fenólicos.	Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.
Hierro y/o manganeso.	Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.
Fluoruros.	Alúmina activada, carbón de hueso u ósmosis inversa.
Hidrocarburos aromáticos.	Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.
Mercurio.	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado granular u ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 µg/l. Adsorción en carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 µg/l.
Nitratos y nitritos.	Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración.
Nitrógeno amoniacal.	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.
Ph	Neutralización.
Plaguicidas.	Adsorción en carbón activado granular.
Sodio.	Intercambio iónico.
Sólidos disueltos totales.	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.
Sulfatos.	Intercambio iónico u ósmosis inversa.
Sustancias activas al azul de metileno.	Adsorción en carbón activado.
Trihalometanos.	Oxidación con aireación u ozono y adsorción en carbón activado granular.
Zinc.	Evaporación o intercambio iónico.

1.7. SIGNIFICADO DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL AGUA.

CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS.

COLIFORMES TOTALES.

Los coliformes totales son ampliamente utilizados a nivel mundial como indicadores de potabilidad por ser fáciles de detectar y cuantificar. El término abarca bacterias de tipo bacilos, Gram negativas que crecen en presencia de sales biliares o de otros compuestos con propiedades similares de inhibición. Esta definición aplica aún cuando en la práctica ha sido modificada parcialmente por el empleo de técnicas más modernas de detección.

La prueba detecta tanto especies de agua contaminada como otras abundantes en la naturaleza que se multiplican fácilmente en agua de buena calidad, por lo que en realidad no sirve como indicador definitivo de un agua inapropiada para consumo humano ni de patógenos. Así mismo, los coliformes totales sirven para establecer si un agua ha sido adecuadamente potabilizada si arroja resultados negativos a la salida de una planta, de la misma forma que los coliformes fecales lo pueden hacer.

Los coliformes totales son eliminados del agua mediante procesos de desinfección como la cloración, radiación UV y ozonización.

COLIFORMES FECALES.

Los coliformes fecales son todos los bacilos cortos que difieren del grupo coliforme total por su capacidad para crecer a una temperatura de 44 a 45 °C.

De ellos, sólo "E. Coli" es específicamente de origen fecal y se encuentra siempre presente en las heces de humanos, otros mamíferos y gran número de aves. Los coliformes fecales no se encuentran en aguas y suelos que no han estado sujetos a contaminación fecal. Por ello desde el punto de vista de la salud, el grupo coliforme fecal es mucho más útil que el total, pues se relaciona con la probabilidad de encontrar patógenos excretados.

Las ventajas de este grupo como indicador son:

- El 95 % dan una respuesta positiva a la prueba de temperatura.
- Pueden estar ausentes, si la contaminación no es de origen fecal.
- Sobreviven menos tiempo en la naturaleza que los totales por lo que permiten suponer contaminación reciente si se encuentran en altas concentraciones.
- Son más exigentes que los coliformes totales para reproducirse en el ambiente.

-
- Los procedimientos de laboratorio para su cuantificación son relativamente sencillos. Sin embargo, algunas cepas dan respuesta negativa a la prueba de temperatura en el laboratorio.
 - Tienen la capacidad de reproducirse en aguas ricas en nutrientes, en sedimentos y aún en aguas poco contaminadas; algunas cepas de “Escherichia Coli” sobreviven menos tiempo que la Salmonella en aguas a bajas temperaturas y otras son patógenas al hombre.

Los coliformes fecales al igual que los totales, son eliminados mediante procesos de desinfección. Cabe mencionar que la filtración rápida elimina aproximadamente el 80% de estas bacterias coliformes en tanto que la lenta logra niveles de potabilidad, aunque esta última trabaja a velocidades mucho menores a las utilizadas en el proceso en estudio.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS

COLOR

El color es importante, ya que da una indicación rápida de la calidad del agua. Además, junto con el olor y el sabor determina la aceptación por parte del consumidor. Hay dos tipos de color: el verdadero, producido por sustancias disueltas y que es el parámetro considerado en la norma; y el aparente, provocado por el color verdadero más el efecto de los sólidos en suspensión.

El color en el agua de abastecimiento puede ser originado por la presencia de iones metálicos como el hierro y el manganeso, las sustancias húmicas (materia orgánica proveniente de suelos turbosos) y el plancton o las algas. Además, el color afecta negativamente la eficiencia de la desinfección.

Para eliminar el color aparente se aplica la coagulación-floculación seguida por sedimentación. La cantidad de coagulante depende de la concentración inicial del color y del pH óptimo (generalmente ácido). En el caso del color verdadero, se recurre a sistemas más complejos como la absorción en carbón activado, oxidación, según sea el origen del color.

TURBIEDAD

La turbiedad incrementa el color aparente del agua y se debe a la presencia de materia suspendida orgánica e inorgánica como la arcilla, sedimentos, plancton y organismos microscópicos. Lo que se mide como turbiedad es la pérdida de luz transmitida a través de la muestra por difracción de los rayos al chocar con las partículas, y por ello depende no sólo de su concentración sino también de su tamaño y forma.

En general, las partículas que producen turbiedad provienen de la erosión de suelos y materiales. La importancia sanitaria de la turbiedad radica en que por sus componentes arcillosos y orgánicos adsorben otros compuestos como plaguicidas, metales y microorganismos los cuales sí pueden ser dañinos. Particularmente, la turbiedad fomenta un mayor desarrollo de los microorganismos ya que sirve de superficie para que éstos se alimenten y reproduzcan. Además, la turbiedad protege a los microorganismos de los desinfectantes, que se meten adentro de las partículas por lo que se recomienda clorar agua sólo con niveles inferiores a 5 UTN. Este valor corresponde al de la guía de la OMS y a la norma de agua potable. En caso de no eliminar la turbiedad se pueden encontrar coliformes fecales en agua con cloro residual libre.

Por lo regular, la turbiedad de las aguas subterráneas es muy baja (< 5 UTN) en tanto que la de los cuerpos superficiales es mucho mayor, e incluso muy altas (hasta valores > 1000 UTN) y además variable.

Para remover la turbiedad se emplea la coagulación-floculación, seguida de sedimentación y filtración. En caso de que el agua contenga una turbiedad > 100 UTN se puede aplicar un paso previo de sedimentación.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

ALUMINIO (Al)

A pesar de que el aluminio no existe naturalmente en forma elemental, es uno de los metales más abundantes en la superficie terrestre (8%) y en el agua. Está presente en suelos, plantas y tejidos animales. Es un elemento de uso muy común en la industria y en las casas, sirve como antiácido, analgésico, antitranspirante, aditivo de alimentos, y en las vacunas.

Entra al organismo por los consumos de té, preservadores, colorantes, emulsificadores, polvo para hornear y productos de uso frecuente en la cocina. Los compuestos del Al son también comúnmente utilizados para la potabilización del agua.

CLORUROS (Cl)

Los cloruros son compuestos de cloro con otro elemento o radical, presentes en casi todas las aguas naturales y en un amplio intervalo de concentraciones. De los más abundantes y estables son el cloruro de sodio (sal común) y en menor grado el de calcio y magnesio. Los cloruros provienen de la disolución de rocas basálticas y sedimentarias así como de efluentes industriales. En aguas subterráneas el contenido es de 6 mg/l.

Los principales problemas causados por un exceso de cloruros se relacionan con la aceptabilidad durante el suministro. Concentraciones mayores a 250 mg/l son objetables y de 500 mg/l confieren un sabor desagradable.

A pesar de que los cloruros no implican un daño a la salud, la ingestión de sal puede ser perjudicial. Un exceso de cloruro de sodio genera enfermedades del corazón y del riñón.

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

El cloruro, por ser muy soluble, es muy difícil de eliminar, en este caso aplican los procesos de membrana (ultrafiltración y ósmosis inversa), el intercambio iónico y la destilación.

CROMO TOTAL (Cr)

El cromo está ampliamente distribuido en la corteza terrestre. En general, los alimentos parecen ser la principal fuente de ingesta de este elemento. Las concentraciones totales en el agua de bebida son habitualmente inferiores a 0.002 mg/l, aunque se han notificado concentraciones de hasta 0.120 mg/l.

Las principales fuentes de cromo en el agua son la industria de cromado (trióxido de cromo), el empleo de conexiones cromadas en circuitos de enfriamiento de agua y de acondicionamiento de aire, los catalizadores de síntesis orgánica y la industria fotográfica.

El cromo es un elemento esencial para mantener la salud del cuerpo pero a altas concentraciones puede ser tóxico. La OMS y la NOM 127 establecen un valor de cromo total de 0,05 mg/l.

La toxicidad del cromo esta en función de su estado de oxidación, ya que el trivalente no es tóxico, en tanto que el hexavalente sí lo es (*Cuadro N° 8*). En agua potable, agua clorada o airada, el cromo VI es la forma predominante y el cromo III rara vez se encuentra.

Para controlar el cromo es suficiente con reducirlo de su estado tóxico (valencia de VI) al no tóxico (valencia de III), ello se realiza con sosa cáustica o cal que forman un precipitado de hidróxidos a pH entre 8.5 y 9.5, con eficiencias superiores al 99%. El Intercambio iónico es eficiente y económico si se emplea para recuperar el metal. Las resinas catiónicas remueven cromo trivalente, mientras que las aniónicas remueven cromatos y dicromatos pero ello debe ser realizado a un pH menor de 4, para preservar la resina del ataque oxidante del ácido crómico, lo que encarece el proceso para fines de potabilización. Adicionalmente, el intercambio iónico y la ósmosis inversa permiten remover el cromo total del agua; de acuerdo a la NOM-127 también se puede utilizar la coagulación-floculación-sedimentación-filtración.

Cuadro N° 8 Resumen de los efectos tóxicos del cromo.

Concentración	Comentario
0 - 0.05 mg/l	No se observan efectos adversos con esta exposición, no hay presencia de efectos estéticos. Riesgo mínimo de inducción de cáncer.
0.05 - 1.0 mg/l	Posible riesgo de inducción de cáncer gastrointestinal después de una larga exposición.
1.0 - 5.0 mg/l	Sabor desagradable, náuseas y se incrementa el riesgo de inducción de cáncer.
> 5.0 mg/l	Riesgo de toxicidad aguda.

DUREZA

La dureza es causada principalmente por las sales de Ca y Mg (en ese orden) y en menor grado por Al, Fe, Mn, Sr y Zn.

La dureza se clasifica en carbonatada (temporal) y no carbonatada (permanente). La primera es sensible al calor, precipita a altas temperaturas y equivale a la alcalinidad. Cuando el agua es "dura" significa que contiene sales incrustantes, dificulta la cocción de legumbres e impide la formación de espuma con el jabón.

Al proceso de eliminar la dureza se le denomina "ablandamiento" y se realiza por diferentes métodos. El más usado es la precipitación del Mg y del Ca con cal y carbonato de sodio para producir hidróxidos y carbonatos. Por medio del intercambio iónico se logra un ablandamiento total y con el calentamiento se elimina la dureza temporal, pero estos dos métodos se realizan casi sólo a nivel doméstico.

HIERRO (Fe)

El hierro es un elemento común en la corteza terrestre por lo que se encuentra naturalmente en el agua en concentraciones que van de 0.5 a 50 mg/l. Es un elemento esencial para la salud y sus requerimientos varían entre 10 y 50 mg/d en función de la edad, sexo y estado fisiológico.

El hierro con frecuencia se encuentra en agua subterránea y si ésta es anaerobia puede haber concentraciones de hasta varios miligramos por litro sin que el agua, esté coloreada o turbia.

En concentraciones superiores a 0.3 mg/l el hierro mancha la ropa y las tuberías. Como sabor, el hierro es aceptado hasta en niveles de 1 a 3 mg/l. Además, provoca la aparición de bacterias que lo consumen y forman una biopelícula gelatinosa en tuberías y

tanques que es rechazada por el consumidor. El criterio de la OMS es de 0.3 mg/l establecido con base en los aspectos estéticos y es igual al de la norma.

Para eliminar al hierro se emplea precipitación por oxidación con aire a pH de 7 a 7.5, sedimentación y filtración, con diversos oxidantes, intercambio iónico y ósmosis inversa.

MANGANESO (Mn)

El manganeso es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre, que por lo general se encuentra junto con el hierro. El manganeso se asocia con cloruros, nitratos y sulfatos. Las concentraciones de manganeso disueltas en las aguas subterráneas y superficiales pobres en oxígeno pueden alcanzar varios miligramos por litro. En aguas oxigenadas, el manganeso forma sólidos insolubles que precipitan fácilmente. Acelera el crecimiento biológico en los sistemas de distribución, tapa tuberías, mancha la ropa, contribuye con los problemas de olor, color y sabor del agua potable.

Concentraciones por arriba de 0.1 mg/l (valor guía de la OMS) generan problemas estéticos como la coloración del agua y un incremento en la turbiedad. En México, la NOM-127 establece un valor de 0.15 mg/l.

Para remover el manganeso se emplea precipitación por oxidación a pH alto (>9.5). El sistema de remoción típico es oxidación seguida de coagulación-floculación, sedimentación y filtración. Los agentes oxidantes más comunes son cloruro, oxígeno y permanganato de potasio.

SODIO (Na)

Es el catión principal en la biosfera y constituye el 2.83% de la corteza terrestre. Se encuentra sólo en estado combinado en sales extremadamente solubles por lo que está en altas concentraciones en toda agua. En océanos y lagos salinos se encuentra como cloruro de sodio (NaCl), y en menor grado como carbonato de sodio (Na₂CO₃), y sulfato de sodio (Na₂SO₄).

El sodio es un constituyente natural de los tejidos de plantas y animales. Se asocia con la alta presión en la sangre y enfermedades del corazón si es consumido en exceso. Sin embargo, la falta de evidencia certera así como el hecho del elevado consumo de sodio en los alimentos, han hecho que la OMS no establezca un valor guía para el agua con base en la salud. La sal se elimina mediante intercambio iónico o procesos de membrana como la ósmosis inversa y nanofiltración.

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT)

Se entiende por sólido disuelto todo residuo que queda después de filtrar en membranas de 1.2 μm de poro y evaporar el agua a 103°C. Contiene compuestos muy variados por lo que se dice que es una prueba global. Los sólidos incluyen tanto las sales inorgánicas (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos de sodio, potasio, calcio, magnesio y hierro) como materia orgánica.

El intervalo usual de sólidos disueltos totales en agua de abastecimiento varía de 25 a 5000 mg/l, en función de la geología local. La concentración normalmente deseable es de 200mg/l.

Los sólidos disueltos pueden tener importantes efectos en el sabor. Se considera que menos de 600 mg/l no se perciben aunque contenidos muy bajos producen un agua insípida. Asimismo, los sólidos disueltos promueven la corrosión.

Cuando el agua tiene iones (sodio, magnesio o sulfato, por ejemplo) la reducción de los sólidos disueltos totales se logra mediante la ósmosis inversa, la electrodiálisis, la destilación y el intercambio iónico; de acuerdo a la NOM-127 también se puede utilizar la coagulación-floculación-sedimentación-filtración seguido de alguno de los anteriores métodos. Tanto el intercambio iónico y la electrodiálisis son aplicables para concentraciones por arriba de 5000 mg/l de SDT, mientras que la destilación y la ósmosis para valores inferiores

CAPITULO 2.-

PROCESOS APLICABLES PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

2.1 PROCESOS PARA LA REMOCIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.

2.1.1 CARBÓN ACTIVADO.

El carbón activado ha tenido una aceptación mundial como el mejor para el control de olores y colores con un costo relativamente bajo. El carbón activado es un carbón tratado especialmente, el cual tiene la propiedad de adsorción o atracción de sólidos, líquidos y gases finamente divididos.

El carbón activado puede obtenerse de diferentes fuentes de materias primas, tales como: carbón bituminoso, cáscara de coco, lignito, turba, residuos de base petrolífera, madera, cenizas negras de fábricas de papel, pizarra, aserrín y antracita (material de origen mineral).

El primer paso para la conversión de materia prima es someter al carbón a una temperatura de $<500^{\circ}\text{C}$, después se aplica un tratamiento de activado, es decir, una combustión lenta en condiciones estrechamente controladas. Las temperaturas empleadas en esta activación son superiores a los 800°C . La activación del carbón da a su superficie la facultad de atraer y retener las sustancias olorosas que pueden encontrarse en el agua, por lo que tiene la capacidad de adsorción.

La adsorción elimina gases, líquidos y sólidos, el grado de eliminación depende fundamentalmente de la concentración inicial del contaminante, tamaño, peso, estructura molecular, temperatura, y pH del agua.

Para pH bajos, la adsorción es mayor por la carga positiva del carbón debida a la adsorción del ión hidrógeno, conservándose la carga negativa en coloides y en la mayoría de los grupos de ionización polar en moléculas orgánicas.

La adsorción es una reacción exotérmica, observándose que a temperaturas elevadas se desarrolla más rápidamente. La capacidad de adsorción de un carbón consiste en la determinación de su valor de fenol (cantidad de carbón expresada en ppm, necesaria para reducir una concentración fenol estándar de 0.1 ppm a 0.01 ppm de fenol). Los carbones comerciales tienen un valor de 0.015 a 0.03 ppm de fenol.

El carbón activado puede aplicarse al agua ya sea antes o después de la coagulación, pero debe ser anterior a la filtración.

TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO.

Para el tratamiento de aguas se emplean dos tipos de carbón activado: en polvo y granulado. Los carbones pulverizados se emplean predominantemente en el tratamiento de aguas de tipo discontinuo, mientras que los carbones granulados, empleados en forma de lecho de adsorción, no se han empleado extensamente en el tratamiento de aguas en razón de consideraciones económicas

CARBÓN PULVERIZADO

Es un polvo finamente molido, insoluble y negro, por lo que tiene un área-volumen extremadamente alta. Como la adsorción es un fenómeno de superficie, resulta de gran efectividad pero al mismo tiempo significa una baja velocidad de sedimentación y dificultad en su separación una vez añadido. Es aplicado mediante dos procesos:

1. En forma de papilla.

Se emplea cuando en las plantas de tratamiento de aguas se necesitan grandes cantidades de carbón activado. Se suministra por medio de carretillas a los depósitos de almacenamiento, se humedece con agua y se almacena en forma de papilla hasta que se necesite.

2. En máquinas de alimentación en seco.

CARBÓN GRANULAR.

Es el tamaño de la arena para filtros, es decir, de 0.1- a 1.0 mm de diámetro, es empleado en las plantas de tratamiento de agua en la forma de lechas de adsorción y en donde el agua pase a través de él, usualmente en un filtro a presión.

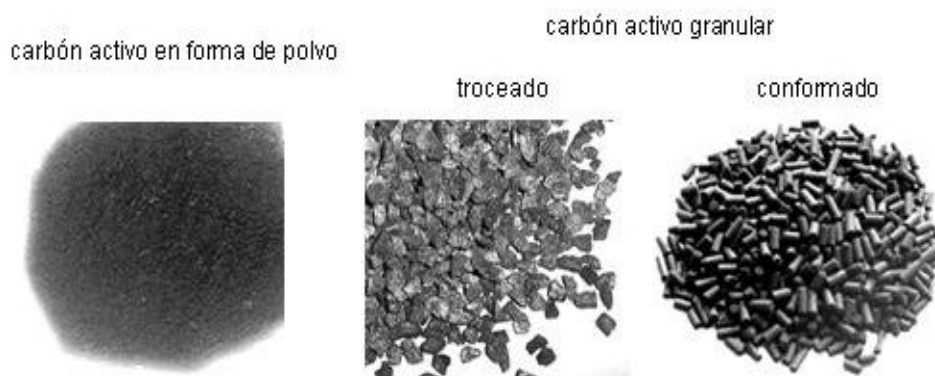


Figura No. 2 Tipos de Carbón Activado.

ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO

La adsorción es un proceso donde un sólido se utiliza para eliminar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activo es el sólido.

El carbón activo se produce específicamente para alcanzar una superficie interna muy grande (entre 500 a 1500 m²/g). Esta superficie interna tan grande hace que el carbón tenga una adsorción ideal. El carbón activo viene en dos variaciones: carbón activado en polvo y carbón activado granular.

La adsorción en carbón activado es el proceso más usado para remover sabor y olor. Se emplea carbón preparado a partir de lignita, desechos orgánicos, etc. Se usa en forma granular o en polvo y por lo regular se añade en tanques pues el empleo de lechos para filtración no es rentable más que para industrias. El carbón que se utiliza en potabilizadoras usualmente es en polvo y de color negro. Se aplica como lechada mediante dosificadores en cualquier etapa del proceso, pero siempre antes de la filtración en un punto donde haya un mezclado suficiente. Se procura tener un tiempo de contacto mínimo de 15 min. antes de la sedimentación o filtración.

2.1.2. AIREACIÓN

La Aireación es el proceso mediante el cual el agua es puesta en contacto íntimo con el aire con el propósito de modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en ella.

Las funciones más importantes de la aireación son:

- Transferir oxígeno al agua para aumentar el oxígeno disuelto.
- Disminuir la concentración de CO₂.
- Disminuir la concentración de H₂S.
- Remover gases como el metano, cloro y amoníaco.
- Oxidar Hierro y Manganeseo.
- Remover compuestos orgánicos volátiles.
- Remover sustancias volátiles productoras de olores y sabores.

La aireación representa una de las operaciones de uso más intensivo de energía en los sistemas de potabilización de agua, mediante equipos de aireación difusa, equipos de turbina y aireadores mecánicos.

En la potabilización de aguas se agrega oxígeno mediante aireación para la remoción de hierro y manganeso principalmente. En plantas de ablandamiento se utiliza la aireación para remover CO₂ antes de ablandar con cal.

La aireación cumple sus objetivos de purificación del agua mediante el arrastre o barrido de las sustancias volátiles causado por la mezcla turbulenta del agua con el aire y por el proceso de oxidación de los metales y los gases.

Los principales aireadores utilizados en purificación de aguas de pozos, son los de cascadas, canales inclinados y aireadores por difusores y aireadores mecánicos superficiales o sumergidos.

AIREADORES DE CAÍDA DEL AGUA.

AIREADORES DE FUENTE O SURTIDORES.

Consisten usualmente en una serie de toberas fijas, sobre una malla de tuberías, las cuales dirigen el agua hacia arriba, verticalmente o en ángulo inclinado, de tal manera que el agua se rompe en gotas pequeñas. Este tipo de aireadores ha sido usado para la remoción de CO₂ y la adición de oxígeno; tiene gran valor estético, pero requieren un área grande.

AIREADORES DE BANDEJAS MÚLTIPLES.

Un aireador de bandeja múltiple consiste en una serie de bandejas equipadas con ranuras, fondos perforados o mallas de alambre, sobre las cuales se distribuye el agua y se deja caer a un tanque receptor en la base. En muchos aireadores de bandeja se coloca medio grueso de 5 - 15 cm de espesor, para mejorar la eficiencia del intercambio de gases y la distribución del agua.

Generalmente se usan de 3 a 9 bandejas. La ventilación es un factor importante en el diseño de estos aireadores y debe estudiarse cuidadosamente para la selección del sitio de localización.

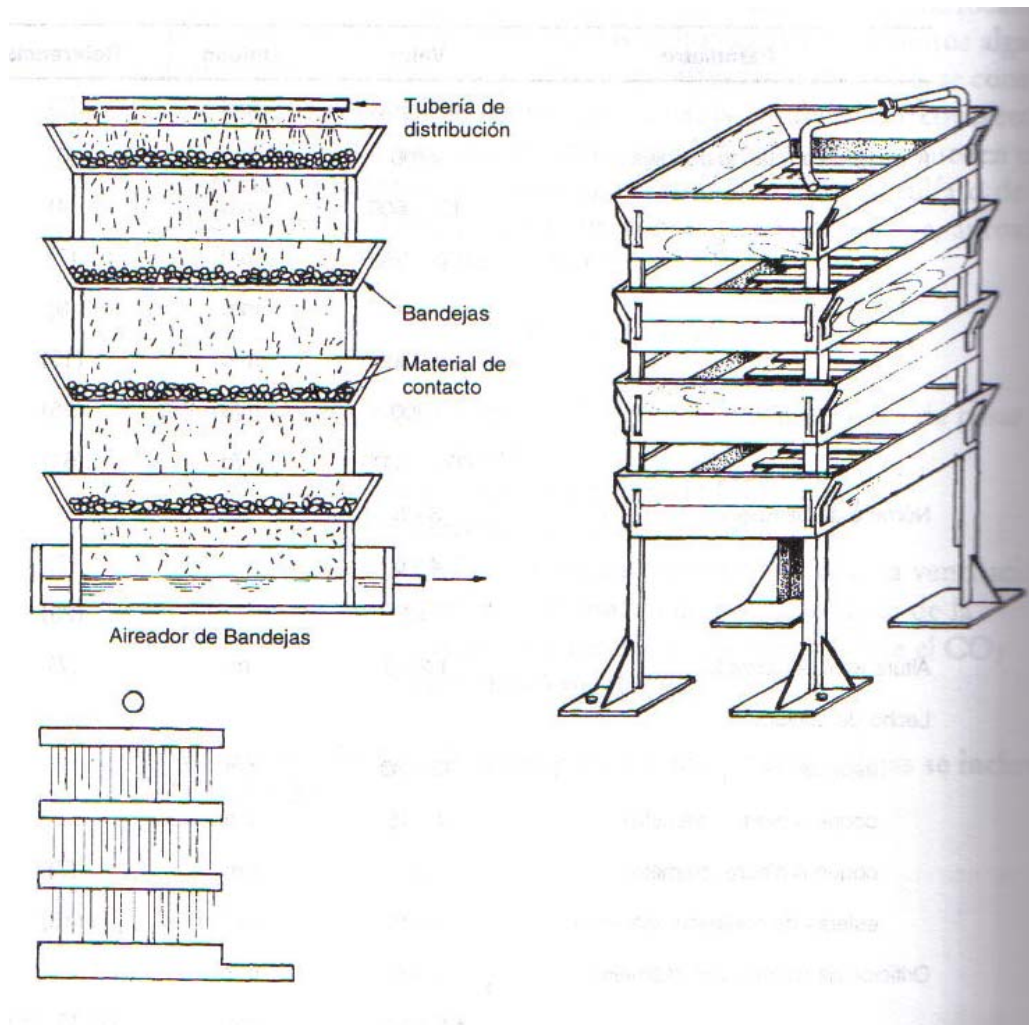


Figura No. 3 Aireadores típicos de bandejas.

AIREADORES DE CASCADAS Y VERTEDORES (agua en aire)

En este tipo de aireadores, el agua se deja caer, en láminas o capas delgadas, sobre uno o más escalones de concreto. El aireador de cascada se diseña como una escalera; entre más grande sea el área horizontal, más completa es la aireación. La aireación ocurre en las áreas de salpicamiento en forma similar a la que ocurre en un río turbulento; por ello se acostumbra colocar salientes, bloques o vertedores en los extremos de los escalones. La aireación en vertedores es factible cuando existe suficiente energía disponible; en ese caso el sistema es económico, no se requiere energía adicional y el mantenimiento es sencillo. Es posible mejorar la aireación creando turbulencia.

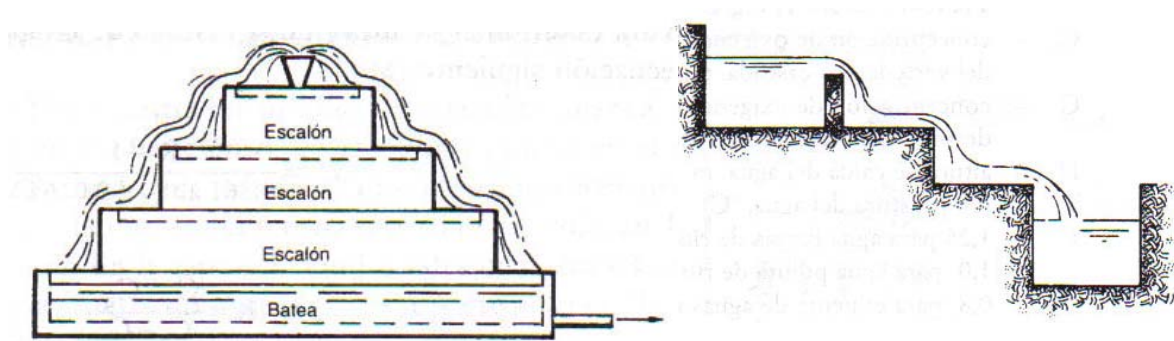


Figura No. 4 Aireador de cascada

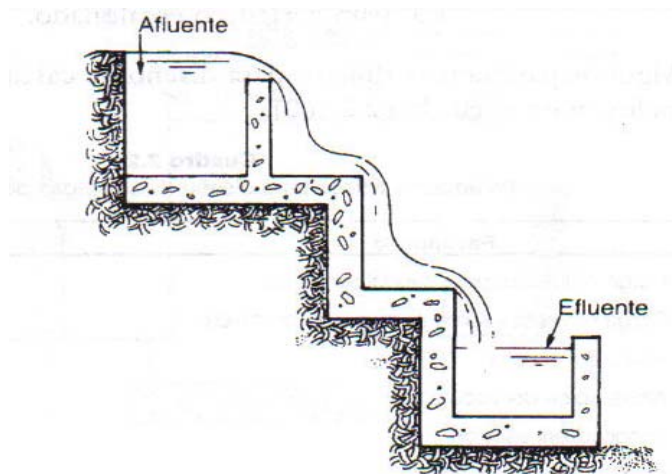


Figura No. 5 Aireador de cascada tipo escalera.

AIREADOR MANUAL PARA REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO.

La *Fig. No 6* muestra un aireador de operación manual para la remoción de Hierro y Manganeso. El aireador consta de tres cilindros colocados uno sobre otro.

En cada uno de los cilindros superiores se colocan 15 cm de piedra. En la capa del cilindro inferior se coloca un espesor de 30 cm de arena gruesa sobre un lecho de soporte de grava de 5 cm de espesor y grava de 1 - 2 cm.

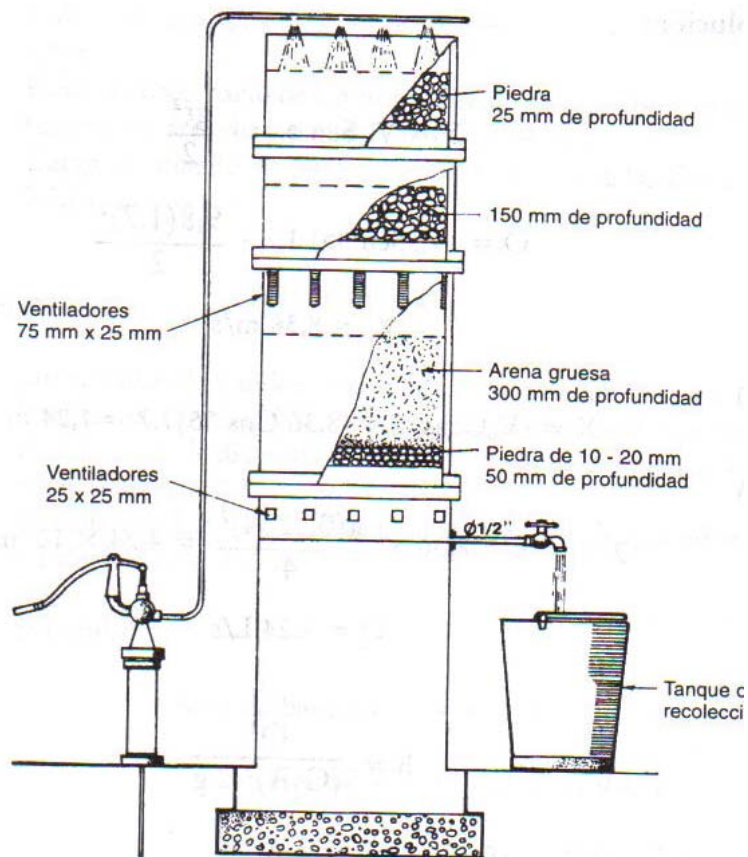


Figura No. 6 Aireador manual para remoción de hierro y manganeso.

2.1.3. COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

La coagulación-floculación es el proceso mediante el cual se añaden compuestos químicos al agua para reducir las fuerzas que separan a los sólidos suspendidos menores a 10 μm (orgánicos e inorgánicos) para que formen aglomerados que sean removidos del agua por sedimentación. El proceso se lleva a cabo en dos etapas. En la primera o coagulación, las fuerzas interpartícula, responsables de la estabilidad de los coloides, son reducidas o anuladas por la adición de reactivos apropiados. En la segunda o floculación, las colisiones entre las partículas favorecen el crecimiento de flóculos que puedan ser eliminados por sedimentación. Por ello, en la práctica la primera etapa se realiza mediante un mezclado rápido para dispersar el coagulante y favorecer su contacto con las partículas en suspensión en tanto que en la segunda, se efectúa una mezcla lenta con el fin de promover la formación y el aumento de tamaño y/o densidad de los flóculos formados. Estos últimos son eliminados finalmente del agua por medios físicos como la sedimentación, flotación o filtración.

Los contaminantes que se eliminan por coagulación son aquellos que poseen un alto peso molecular. De esta forma, se eliminan sólidos suspendidos, color aparente, material coloidal, algunos precursores de trihalometanos, y moléculas grandes que se adsorben poco en carbón activado. La coagulación floculación no sirve para eliminar compuestos orgánicos solubles.

REACTIVOS

Se emplean derivados de aluminio y de hierro, la cal, y diversos polímeros. Los derivados de aluminio y/o de hierro, se hidrolizan rápidamente formando precipitados insolubles. Pero el alumbre (sulfato de aluminio) incrementa los sulfatos en el agua y forma flóculos difíciles de sedimentar, mientras que el hierro aumenta la concentración de cloruros en el agua y causa problemas a pH ácidos. La cal, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, forma un flóculo muy denso y fácilmente sedimentable pero es difícil de manipular.

DERIVADOS DE ALUMINIO

Entre los derivados del aluminio el más utilizado es el sulfato de aluminio, también se puede usar el aluminato de sodio, y están entrando en el mercado los policloruros de aluminio (PACs), cuando compiten en rentabilidad con los otros compuestos por su mayor eficiencia y menor formación de lodos.

SULFATO DE ALUMINIO

El sulfato de aluminio es por mucho el reactivo más usado. Su forma comercial se conoce como alumbre o sulfato de aluminio. Es un sólido cristalino grisáceo que contiene aproximadamente 17 % en masa de alúmina (Al_2O_3), soluble en agua. Se presentan en costales de gránulos o polvo y como solución concentrada.

El aluminio en gránulos es dosificado con equipos gravimétricos a tanques que preparan una solución que es transportada al punto de aplicación. La solución es un líquido translúcido; se recomienda no utilizar disoluciones con concentraciones mayores a 8% de Al_2O_3 en masa a temperaturas cercanas a 0 °C, para evitar la sedimentación; se aplica mediante bombas dosificadoras.

Cuando la cal o el carbonato de sodio reaccionan con el sulfato de aluminio, la alcalinidad del agua no se altera. Los iones sulfatos que se adicionan durante este proceso permanecen en el agua tratada y el pH se mantiene.

ALUMINATO DE SODIO

El aluminato de sodio, $NaAlO_2$, es útil para la coagulación secundaria de aguas con elevado color o como coagulante en el proceso de ablandamiento con cal y carbonato de sodio para incrementar la sedimentabilidad del precipitado que se forma. Se encuentra con una pureza comercial del orden del 88%, en presentaciones sólidas y líquidas. Debido a su alto costo se usa más como ayuda de coagulación que como el coagulante principal.

POLICLORUROS DE ALUMINIO (PACs)

Los policloruros de aluminio son relativamente nuevos en el campo del tratamiento del agua. Son coagulantes de aluminio prepolimerizado, que no deben confundirse con los polímeros ya que no pueden ser descritos con una sola fórmula química debido a que consisten de una serie de compuestos con propiedades diferentes que aseguran su buen rendimiento en diversas aplicaciones y condiciones de operación.

Las características típicas de los PACs que se pueden encontrar comercialmente son:

Cuadro N ° 9 Características típicas de los policloruros de Aluminio

Contenido de Aluminio:	4 a 12,5 %
Basicidad:	17 a 83 % (se recomienda mayor de 35%)
Aditivos:	Sulfato, sílice, calcio, polímeros orgánicos, etc.
Forma de fabricación:	Diferente grado de polimerización

La combinación de las anteriores características crea diferentes policloruros de aluminio que pueden operar en condiciones diferentes y variar los rendimientos. Es conveniente comparar con los otros coagulantes, como el sulfato de aluminio, las mejoras que se podrían obtener en cuanto a:

-
- Eficiencia de remoción de partículas
 - Disminución en la producción de lodos
 - Disminución de aluminio residual
 - Funcionamiento en un amplio intervalo de pH
 - Disminución en el consumo de alcalinidad
 - Rendimiento en agua fría
 - Rendimiento de los filtros

También es preciso evaluar si resultan más económicos

DERIVADOS DE FIERRO

Se puede emplear sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico. El sulfato ferroso, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (conocido también como caparrosa), es un sólido cristalino blanco-verdoso, subproducto de diversos procesos químicos, principalmente lavado del acero, de donde se obtiene en forma disuelta y es procesado para ser vendido en forma granular. El hierro ferroso que se adiciona al agua se precipita como ión férrico, por ello es preciso adicionar cal o cloro para hacer la coagulación efectiva.

La coperaza clorada se prepara adicionando cloro al sulfato ferroso para oxidarlo. En relación con la cal tiene la ventaja de que la coagulación se puede llevar a cabo en un amplio intervalo de pH, de 4.8 a 11. Cada mg/l de sulfato ferroso requiere 0.13 mg/l de Cl_2 , aunque en realidad se adiciona un poco más para que la reacción se lleve a cabo en su totalidad.

El sulfato férrico, es muy útil para remover color a pH extremos. Se presenta comercialmente como gránulos de color café rojizo muy solubles en agua. Reacciona con la alcalinidad natural del agua o los compuestos alcalinos que se adicionen (como la cal o el carbonato de sodio).

El cloruro férrico, se usa como coagulante en aguas industriales y muy poco en potabilizadoras. Se encuentra disponible en el mercado como sólido o líquido. Es muy corrosivo por lo que la presentación líquida debe ser almacenada y manejada con sumo cuidado.

FLOCULANTES

Con frecuencia, la coagulación no resulta un proceso eficiente de separación debido a que los coágulos formados tienen velocidades muy lentas de sedimentación o son muy frágiles y se rompen en los procesos. Para controlar estos problemas se emplean ayudas de coagulación denominados floculantes. Estos compuestos aceleran el proceso y disminuyen la dosis del coagulante. Son materiales usados en concentraciones relativamente pequeñas y generalmente, de mayor costo que el coagulante principal. Se clasifican en: a) oxidantes (cloro y el ozono); b) polielectrolitos; c) sílice activada y d) agentes ponderados (arcilla). De ellos, los importantes en potabilización son los tres últimos, por su costo.

Los polielectrolitos son moléculas de cadena larga que tienen la capacidad de formar puentes y neutralizar los diferentes potenciales entre partículas. Existen varios tipos comerciales, los cargados positiva y negativamente, y los neutros. Están diseñados para ser solubles en agua, adsorber completamente o reaccionar rápidamente con la materia orgánica y no producir flóculos voluminosos para facilitar la filtración. Sus principales ventajas son reducir la demanda del coagulante, producir una menor cantidad de lodos y darle una mayor estabilidad al flóculo. Además, promueven la formación de lodos densos y fáciles de desaguar en lugar de lodos gelatinosos y poco manejables como son los que comúnmente se forman en la potabilizadora.

La sílice activada es silicato de sodio tratado con ácido sulfúrico, sulfato de aluminio, dióxido de carbono o cloro. Una solución diluida de sílice activada es neutralizada con ácido y se deja reposar por 2hrs cuidando que no gelifique. Esta solución posteriormente es diluida antes de ser añadida al agua. Sirve para incrementar la velocidad de la reacción, disminuir la dosis de coagulante, ampliar el pH de operación (de 7 a 11), y producir flóculos más resistentes y pesados. Como desventaja frente a los polímeros tiene la necesidad de controlar su dosificación en forma muy precisa.

Las arcillas bentoníticas se usan para tratar agua con color, baja turbiedad o bajo contenido mineral pues los flóculos formados en estas condiciones con Al o Fe tienen una muy mala sedimentabilidad. Usualmente se emplean entre 10 y 15 mg/l. Otros agentes que se han usado es la sílice en polvo, piedra caliza y carbón activado; este último, con la ventaja de remover otros compuestos por adsorción.

CAL

La cal se vende comercialmente en forma de cal viva, hidratada o apagada. La cal viva es granular, tiene un contenido mínimo de CaO de 90% siendo el óxido de magnesio su principal impureza. Se emplea un tanque para preparar la lechada que usualmente contiene 5% de hidróxido de calcio. La cal hidratada es un polvo que contiene aproximadamente 90% de CaO. La mezcla es descrita como $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La aplicación de la cal requiere una unidad especial que se conoce como calador.

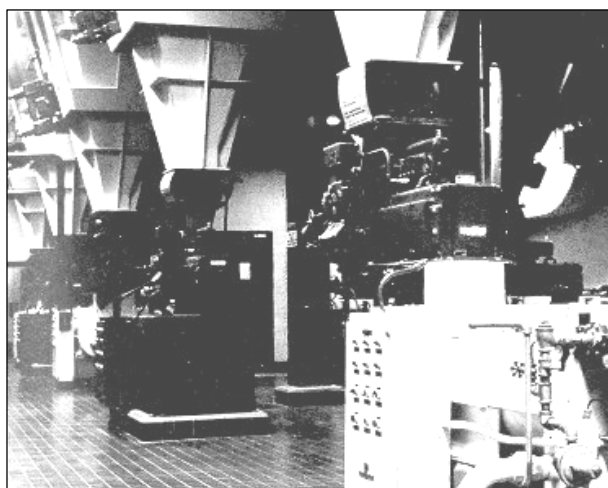


Figura No. 7 Dosificador Vibratorio

CONDICIONES DE OPERACIÓN Y EQUIPO

La coagulación floculación es sensible a muchas variables como la naturaleza de la turbiedad, tipo y dosis del coagulante, pH del agua, composición química de la misma y condiciones de mezclado. De todas, las que se pueden controlar en la práctica son cantidad y tipo tanto de coagulante como del floculante y condiciones de mezclado.

En realidad la selección de los reactivos, las dosis y las condiciones físicas apropiadas deben ser determinadas en laboratorio mediante la prueba de jarras, ensayos piloto y con base en la experiencia dependiendo principalmente del tipo de agua a ser tratada.

Además, el diseño de las unidades debe ser flexible a las variaciones en gastos y características del agua.

El sistema de coagulación-floculación puede llevarse a cabo en una unidad o en unidades separadas. Para la coagulación, la unidad se equipa con mezcladores de alta velocidad. La agitación necesaria para el proceso se induce por medios mecánicos como paletas o difusores de aire.

La selección de un sistema eficiente de mezcla rápida se requiere establecer la potencia impartida al agua, pues la eficiencia del proceso se ve afectada por la forma del tanque, formación de cortocircuitos o volumen muerto, tipo de mezclado, energía de entrada y tiempo de mezclado.

TECNOLOGÍA DE FLOCULACIÓN

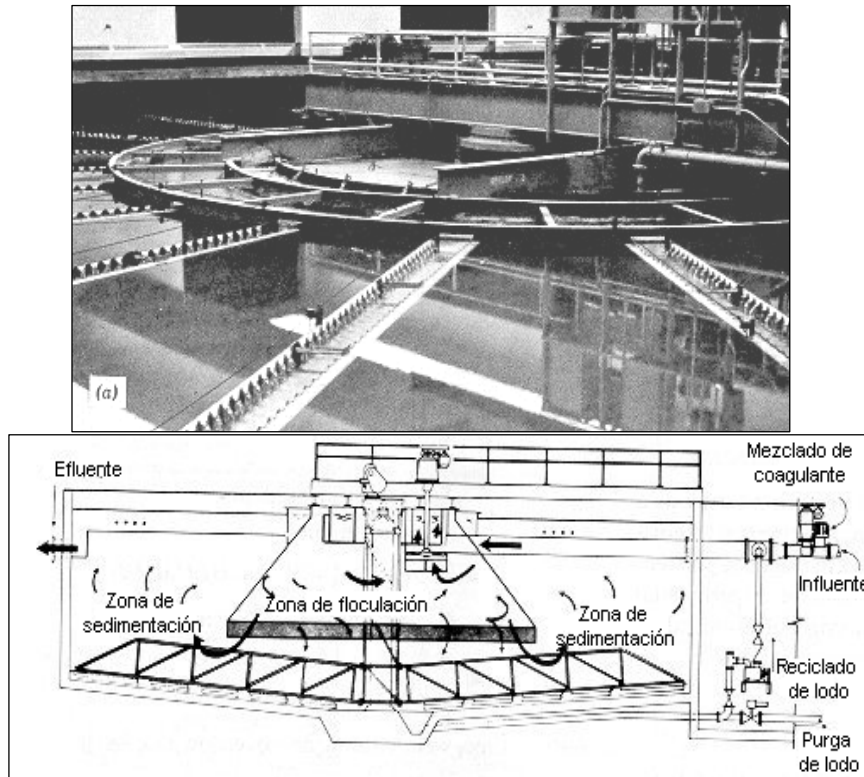


Figura No. 8 Floculador-clarificador que proporciona mezcla rápida, floculación y sedimentación en un solo tanque. a) Fotografía, b) vista transversal de la misma unidad. (Hammer, 1986)

FLOCULADORES - CLARIFICADORES

Los floculadores-clarificadores con frecuencia son denominados unidades de contacto de sólidos, floculadores de lechos de lodos o tanques ascendentes. Combinan el proceso de la floculación con la sedimentación en un solo tanque. Una unidad de ese tipo se muestra en la *Figura No. 8*, y cuenta con equipo para adicionar los reactivos (coagulantes o ablandadores) en la tubería de entrada. La mezcla se realiza en una mampara cónica central donde se mantiene una baja concentración de flóculos. El fluido es de ahí pasado a través de una campana, directo a un lecho de lodos ubicado en la parte baja del tanque, donde se promueve el crecimiento de los flóculos y la sedimentación. Finalmente el agua libre de sólidos fluye hacia arriba en la zona periférica del sedimentador hasta la canaleta de recolección.

Estas unidades son particularmente útiles para el ablandamiento con cal de agua subterránea, puesto que los precipitados formados sirven como semilla para el crecimiento de flóculos, favorecen la precipitación y el espesado de los lodos. Su principal ventaja es el menor empleo de espacio y la reducción de los costos de inversión; sin embargo, hacer varias

operaciones en un solo tanque resta flexibilidad al proceso. Por ello, se emplean más para el ablandamiento que para la coagulación-floculación.

Los criterios usuales para este tipo de unidades son 30 min. como mínimo en las zonas de floculación y mezclado con al menos 2 horas para la sedimentación cuando se trata aguas superficiales y de 1 hora para la precipitación con cal de agua subterránea. El volumen de los lodos extraídos en forma diaria no debe ser mayor del 5% del agua tratada cuando se elimina turbiedad o de 3 % para el ablandamiento.

FLOCULACIÓN HIDRÁULICA

La energía necesaria para generar el gradiente de floculación requerido se puede generar por medios hidráulicos, con aire o mecánicamente.

El método más simple es la disipación de energía con deflectores o canales. En este caso se usan valores altos de gradiente de floculación y tiempos de retención relativamente cortos.

La ventaja de estos floculadores es la disminución de costos, mientras que su principal desventaja es que la energía de mezclado varía con el flujo, la temperatura y características del agua, afectando la eficiencia.

El tiempo de retención en los floculadores varía generalmente entre 20 a 30 min. En las unidades de contacto de sólidos el tiempo de retención se reduce de 10 a 15 min., debido a la gran concentración de partículas. En aguas tratadas con sales metálicas para remover fósforo se obtiene una buena floculación con tiempos de retención menores de 5 min.

FLOCULACIÓN MECÁNICA.

Son aquellos que requieren una fuente de energía externa que mueva un agitador en un tanque o una serie de tanques, en donde el agua permanece un tiempo teórico de recepción. Según el sentido de movimiento del agitador se clasifican en: giratorios y reciprocantes.

Los primeros pueden ser de baja velocidad de rotación (paletas) o de alta velocidad de rotación (turbinas) pueden ser de eje horizontal o de eje vertical.

Los segundos consisten ya sea en parillas de madera que suben y bajan alternativamente o en sistemas oscilantes como cintas que van y vienen dentro del tanque. En ambos casos la energía comunicada a la masa líquida es directamente proporcional a la energía con que se desplace el elemento mecánico dentro de ella.

FLOCULADORES GIRATORIOS.

Los floculadores giratorios constan de un sistema de paletas adheridas a un eje horizontal o vertical, el cual gira impulsado por un motor eléctrico desplazando el agua y produciendo un trabajo.

Los agitadores pueden tener 2, 3 o 4 brazos, en cada brazo puede haber 2, 3 o varias paletas o travesaños unidos por una pieza central al eje. Pueden colocarse perpendicular a la dirección del flujo o paralelo a este, con el objeto de disminuir los cortos circuitos.

Cuando se usan agitadores de eje horizontal, se requiere por lo general un pozo seco al lado del tanque de floculación para acomodar los motores y mecanismos que impulsan el sistema. Puede evitarse el pozo seco utilizando una correa en V y colocando el motor en el borde del tanque.

Con los agitadores de eje vertical no es necesario el pozo seco, pero puede inducirse en el agua más fácilmente un movimiento de rotación que estimule los cortocircuitos.

Los floculadores de turbina son más compactos y pueden generar mayor energía cuando son operados a alta velocidad. Esencialmente consisten en un eje en el cual van colocados una serie de discos giratorios provistos de aletas. La velocidad de rotación es mayor que en los floculadores de paletas y tienen por eso menor tendencia a comunicar un movimiento de rotación a la masa de agua. Son de menor costo y pueden acomodarse en tanques alargados.

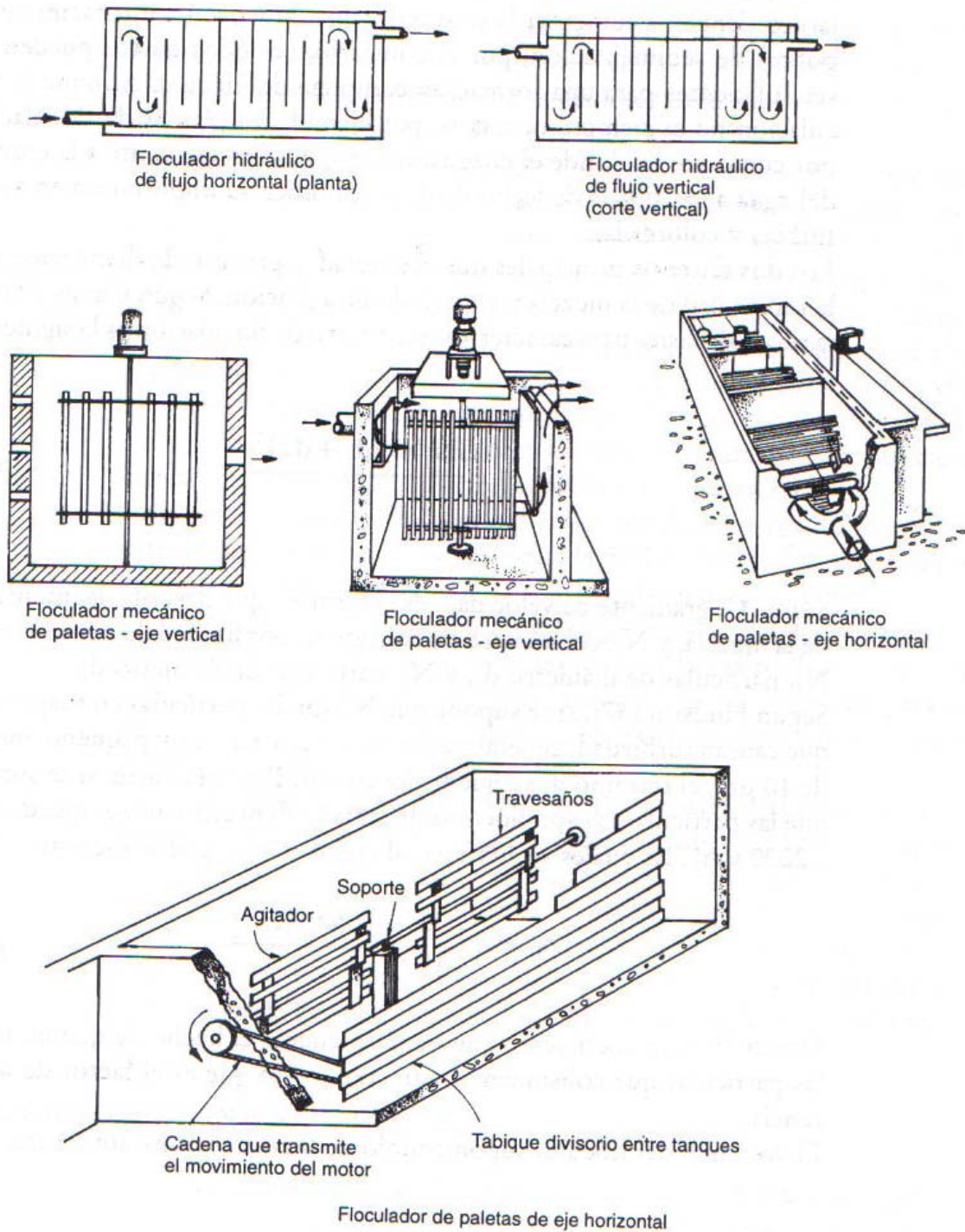


Figura No 9. Tipos de Floculadores

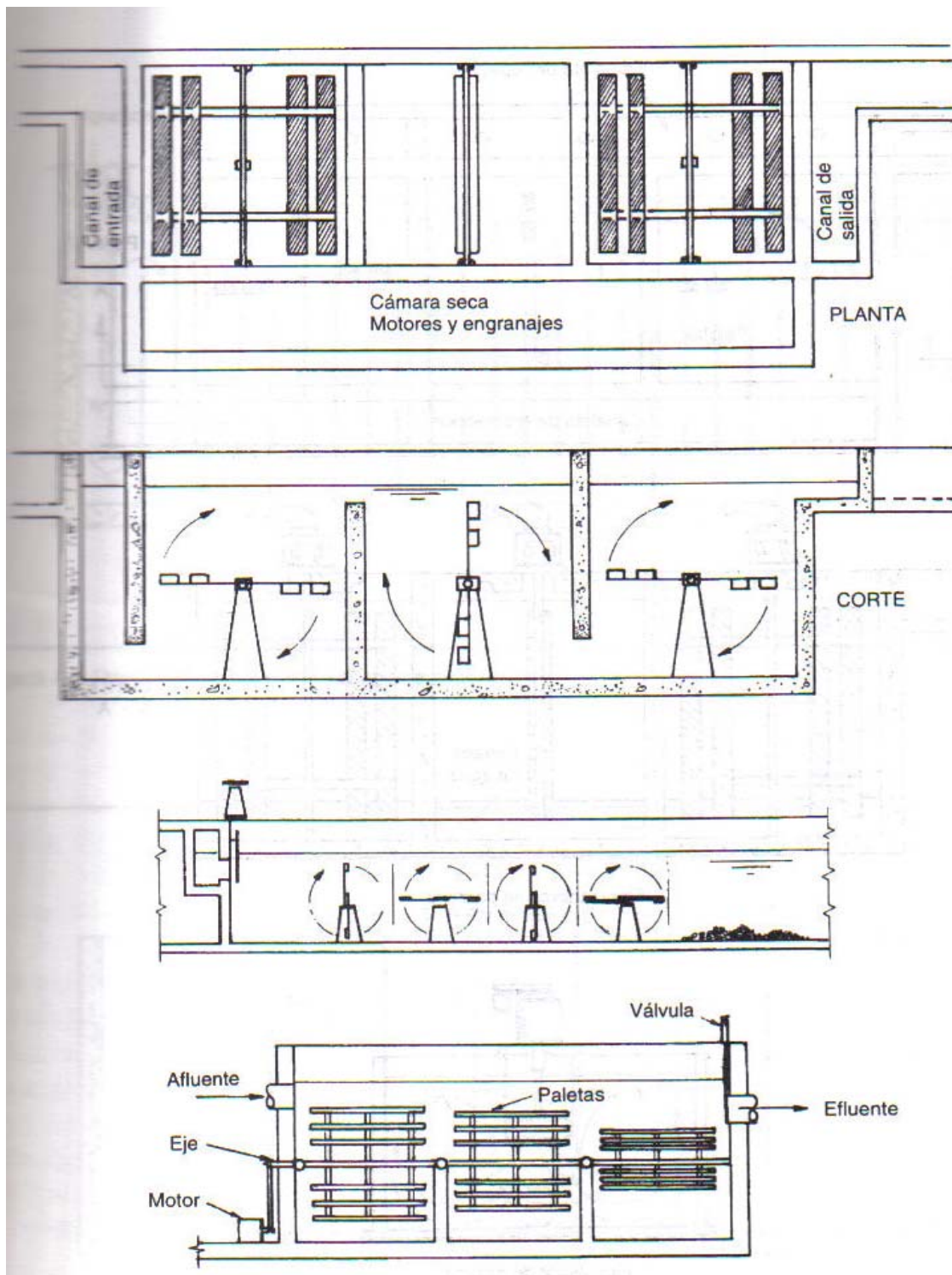
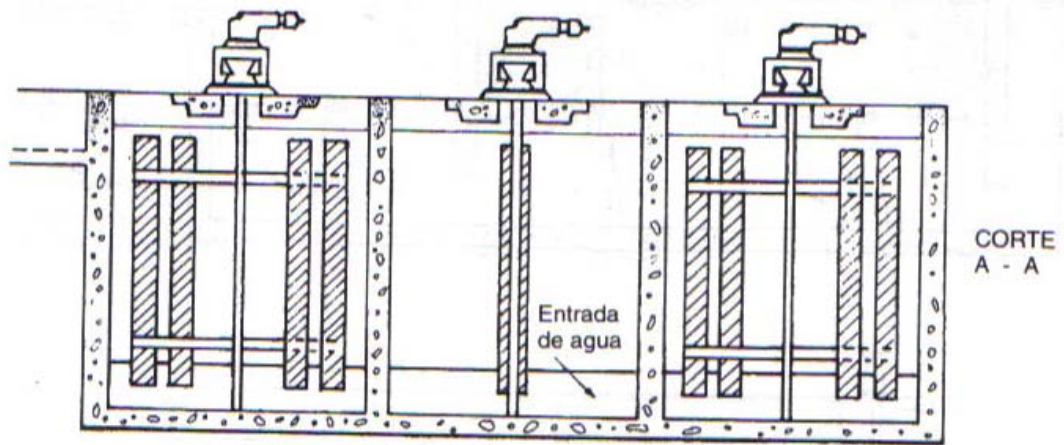
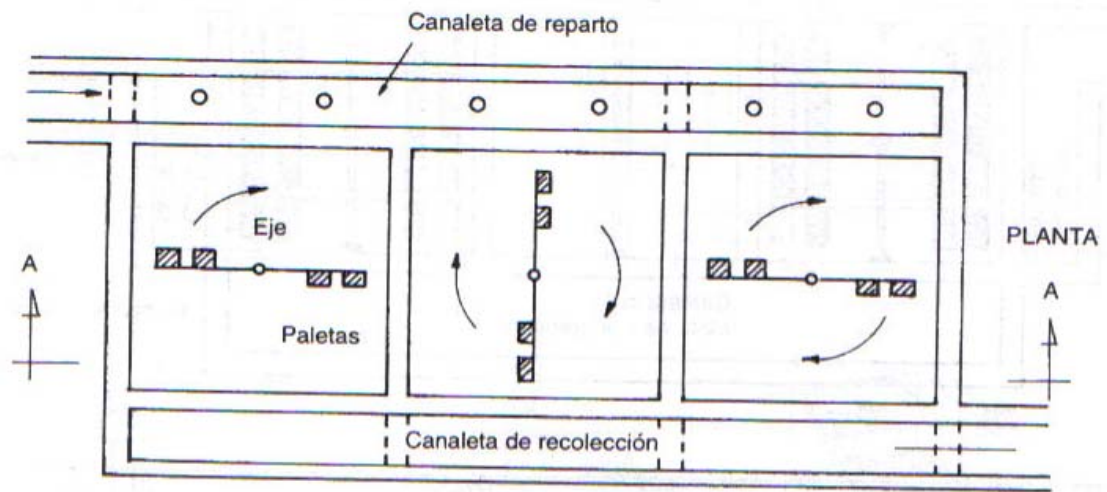
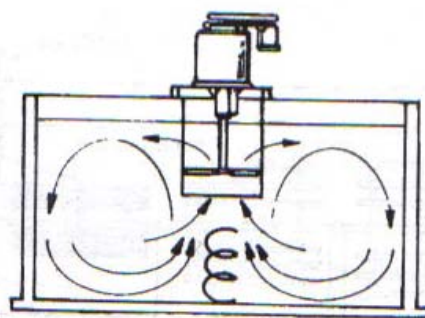


Figura No 10. Floculadores de eje horizontal.



Floculadores en paralelo



Floculador de turbina

Figura No 11 Floculadores de eje vertical.

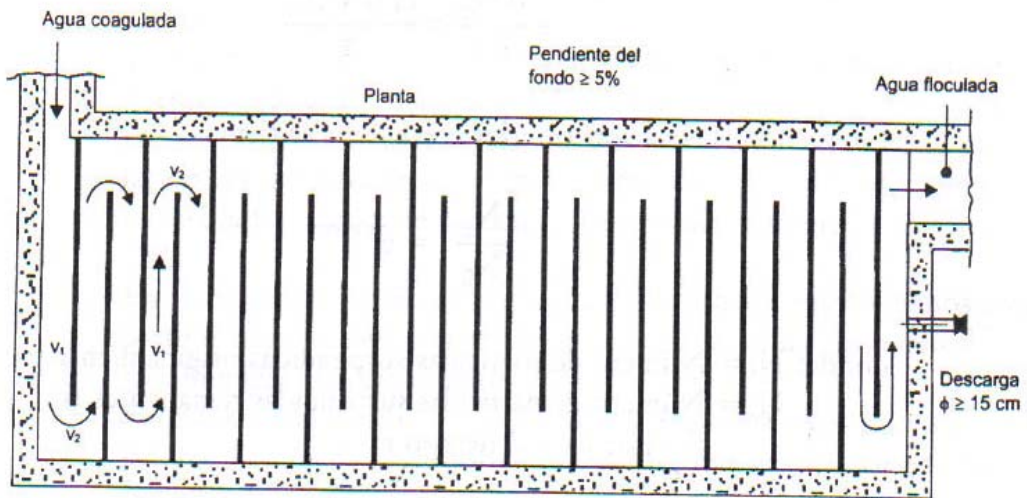


Figura No 12. Floculador hidráulico de flujo horizontal.

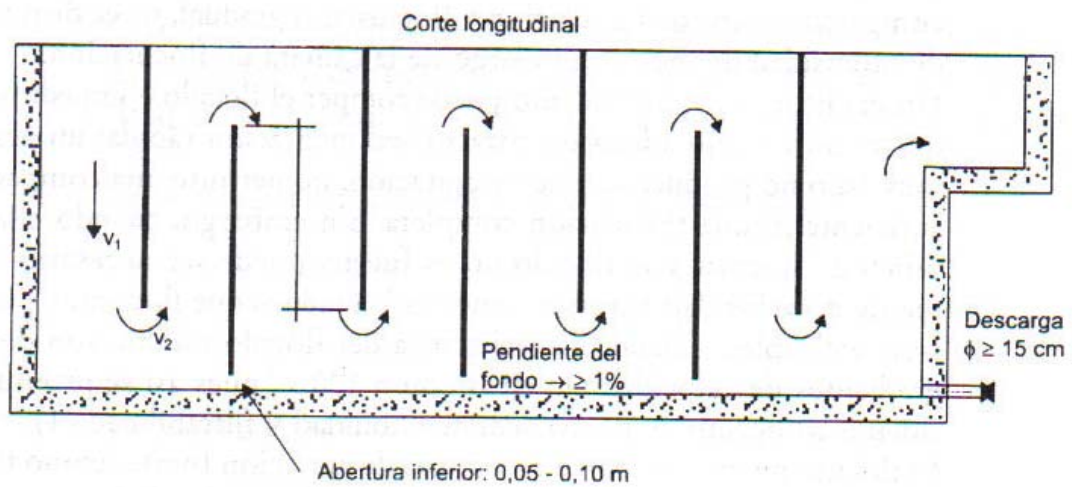


Figura No 13. Floculador hidráulico de flujo vertical.

2.1.4. SEDIMENTACIÓN

La sedimentación o clarificación es la remoción de partículas, flóculos químicos y precipitados de una suspensión en un sedimentador que actúa por gravedad. La sedimentación se emplea para eliminar la fracción de sólidos sedimentables de los sólidos en suspensión (60% de los sólidos que son perceptibles a simple vista en el agua). Se consideran sólidos sedimentables a las partículas que por su tamaño y peso sedimentan en una hora. Estos sólidos pueden ser los originalmente presentes en el agua, o bien, los flóculos o precipitados formados durante algún tipo de proceso químico. Se le da el nombre de sedimentador, a la estructura que sirve para reducir la velocidad del agua para que puedan sedimentar los sólidos.

En general, los sólidos mayores decantan con velocidades rápidas, adelantándose a las partículas más finas durante su descenso. El viento, las perturbaciones hidráulicas, corrientes inducidas por densidad o temperatura producen efectos de corte y turbulencia que aumentan el contacto entre partículas. Si cualquiera de las partículas que interactúan tiene características aglomerantes, se da un crecimiento de flóculos. Cuanto mayor es la profundidad del tanque mayor es la oportunidad de contacto. Por tanto, la eliminación depende de la profundidad del tanque así como de las propiedades del fluido y de las partículas.

La mayor parte de los clarificadores son de flujo ascendente, pues el agua sube desde su entrada hasta los drenes del efluente (*Figura No 14*). En efecto, el agua que entra al tanque de sedimentación es forzada a ir al fondo mediante una mampara hasta un punto a partir del cual asciende, rebosando por los vertedores hasta la canaleta de recolección. Las partículas floculadas sedimentan, en dirección contraria al flujo y son continuamente removidas del fondo del tanque por medio de un mecanismo de rastras. Las partículas con velocidad de sedimentación superior a la carga hidráulica Q/A son retenidas, en tanto que las más ligeras, con velocidades inferiores son sacadas del tanque junto con el efluente.

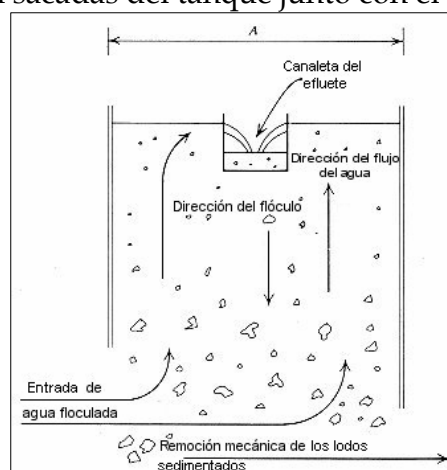


Figura No. 14 Tanque de sedimentación.

La función primaria de los sedimentadores es eliminar materia decantable pero además, deben permitir recoger y descargar los lodos que se crean, así como concentrarlos, de manera que se eliminen con el menor contenido de humedad posible para facilitar su manejo, tratamiento y disposición.

Por otra parte; debido a que en la práctica una fracción de la materia en suspensión del agua está compuesta de sólidos de baja densidad que flotan más que decantar, el sedimentador debe estar provisto de un sistema que permita recogerlos y evacuarlos. A estos sólidos se les asigna el nombre de espumas y contienen también grasas y aceites.

TIPOS DE SEDIMENTADORES

Los tipos de tanques de sedimentación empleados en las plantas de potabilización son rectangulares o circulares con dispositivos mecánicos para la recolección de lodos. La selección del tanque depende del tamaño de la instalación, las condiciones locales del terreno, el sembrado de todas las unidades de tratamiento y de la estimación de los costos, entre otros. Se deberá disponer de dos o más tanques con objeto de que el proceso permanezca en funcionamiento mientras que uno de ellos esté fuera de servicio por reparación o mantenimiento. En plantas grandes, el número de tanques está determinado principalmente por las limitaciones del tamaño.

RECTANGULAR

Los tanques rectangulares se emplean en la sedimentación primaria y la clarificación. Pueden ser implementados como una sola unidad o varias con una pared común entre ellos, lo que implica una menor área y costo.

Los tanques se diseñan para que el agua fluya lentamente con un mínimo de corto circuitos. El tanque de la *Figura N° 15* contiene mamparas para guiar al flujo en forma vertical y coleccionar el sobrenadante en la periferia, y rastras montadas en cadenas sin fin que transportan suavemente los lodos hasta la tolva.

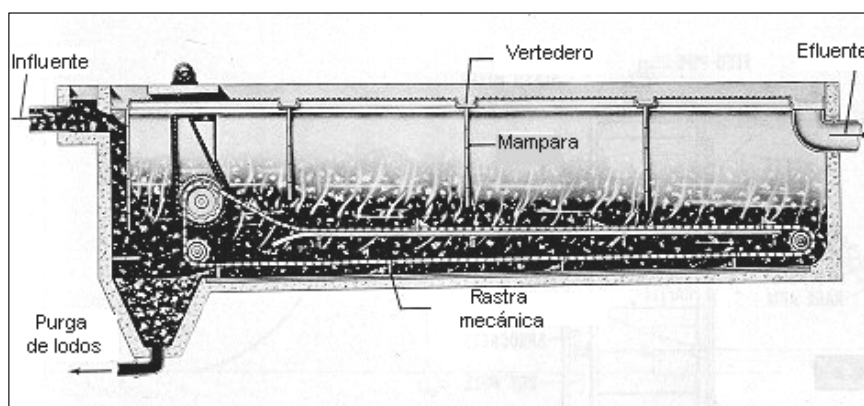


Figura No. 15 Corte de un sedimentador rectangular.

CIRCULAR

La *Figura N° 16* muestra un clarificador circular donde el influente entra y sale mediante canales situados en la periferia. El brazo para remover el lodo, gira lentamente alrededor de un eje y es un tubo con aperturas. Este mecanismo en lugar de actuar por arrastre, succiona los sólidos y los transporta a la parte inferior del tanque. La *Figura No.17* ilustra un mezclador rápido en línea, un floculador con aspas perpendiculares al flujo y a un clarificador de tipo cuadrado. El agua entra al clarificador por el centro y es llevada al fondo por medio de una mampara circular. El flujo se desplaza en forma radial desde el centro y rebosa a través de vertedores periféricos. Los lodos son arrastrados hacia una tolva para ser descargados mediante un rastillo en las esquinas.

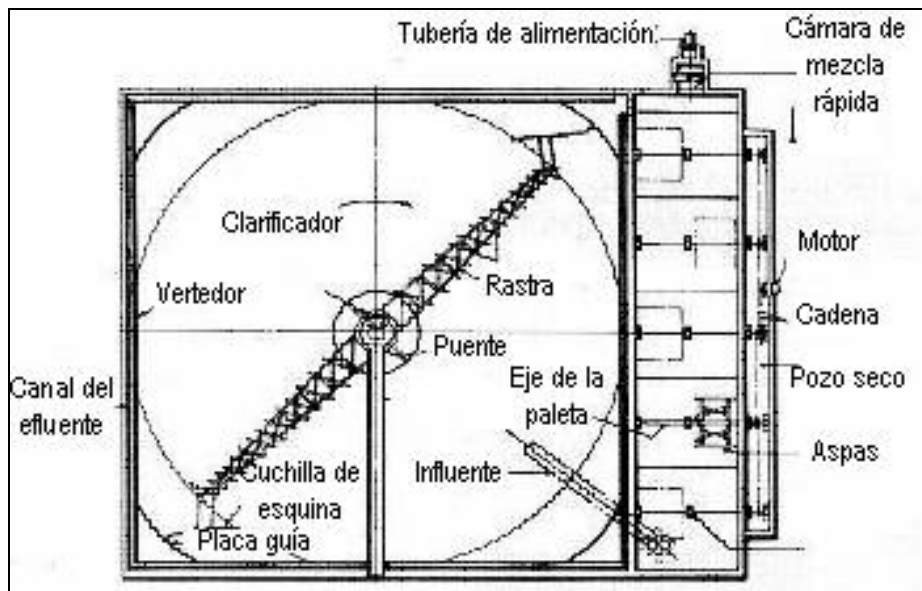
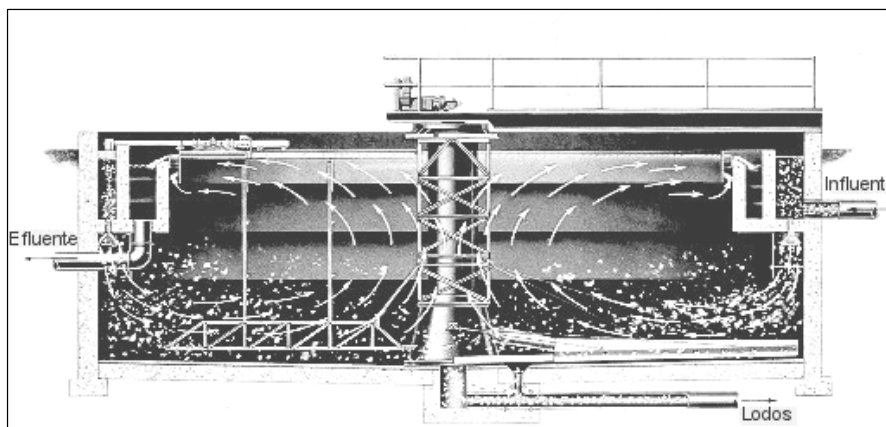


Figura No.16 Corte de un sedimentador circular.

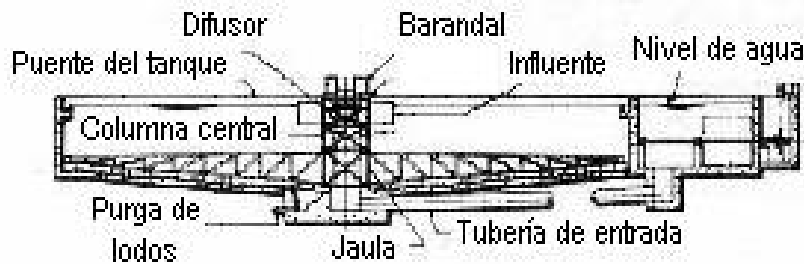


Figura No. 17 Tanque de presedimentación.

MÓDULOS DE ALTA TASA

El término “alta tasa” se refiere a módulos de pequeños tubos o placas paralelas inclinados generalmente a 60 °C, los cuales permiten una sedimentación gravitacional más eficiente. El tiempo de retención en el módulo es de 3 a 20 min., dependiendo del tipo de módulo y la carga superficial. La eficiencia de sedimentación de módulos con elevadas cargas hidráulicas es equivalente a un sedimentador convencional con un tiempo de retención de 3 a 4 h y una carga superficial de 1.3 m/h.

En un módulo de placas, el agua entra en forma ascendente. Bajo condiciones normales, el flóculo sedimentado cae en la pendiente del plano inclinado o en los tubos y resbala hacia el fondo del tanque para una posterior remoción mecánica de lodos. El diseño de módulos de sedimentación de alta tasa debe cubrir los siguientes puntos:

- Velocidad de sedimentación y características de la materia suspendida
- Velocidad del flujo en el módulo de sedimentación
- Carga superficial
- Selección apropiada de la unidad de colección de lodos
- Espaciamiento del lavado cuando este instalado el módulo
- Sistema de soporte

2.1.5. FILTRACIÓN

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Un filtro típico (*Figura N° 18*) tiene un tanque de concreto de profundidad aproximada mayor a 2.7 m. El espesor típico del medio es de 0.6 a 0.75 m y se encuentra colocado sobre grava y un bajo dren o falso fondo. Para la prefiltración, el agua pasa en sentido descendente por el filtro por la fuerza que ejerce la columna de agua sobre el lecho así como la succión del bajo dren. Los filtros son lavados por medio del cambio de la dirección del flujo (en sentido ascendente) en un proceso que se denomina retrolavado. Una canaleta colocada sobre el filtro, a una altura determinada, recoge el agua de lavado.

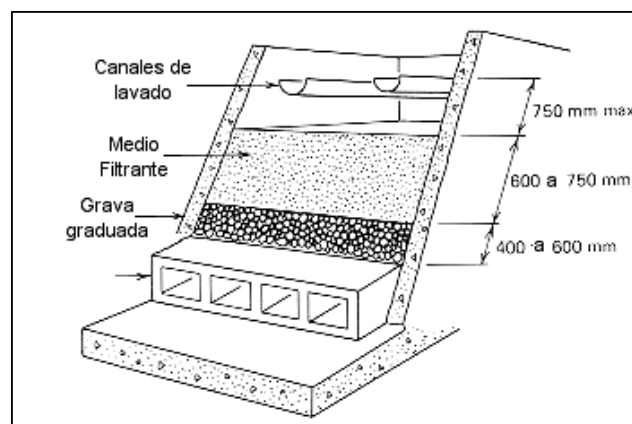


Figura No. 18 Corte de un filtro (Hammer 1986)

Los tipos más comunes para plantas de potabilización de gran tamaño (mayor de 500 l/s) son de flujo descendente (por gravedad) y de medio dual (arena-antracita).

El esquema más frecuente para la potabilización de cuerpos superficiales consiste en combinar la coagulación-floculación con una sedimentación previa a la filtración.

Los filtros granulares profundos son los de uso más generalizado en la potabilización (*Figura N° 19*). Este tipo de filtros operan por acción de la gravedad que es la responsable del flujo del agua en el filtro.

En los filtros granulares profundos de material grueso, la eliminación tiene lugar dentro del lecho del filtro, y se denomina comúnmente filtración a profundidad. La eficiencia de este tipo de filtración depende de varios mecanismos que son extremadamente complejos y que involucran el cribado, la floculación, la sedimentación e intercepción.

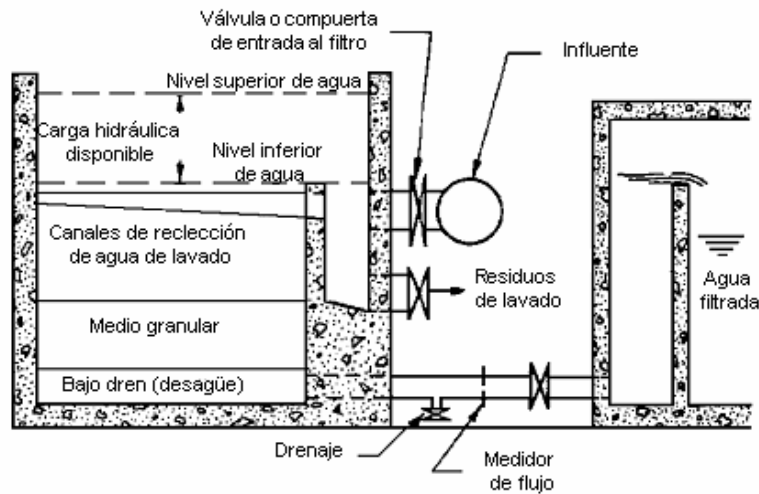


Figura No.19 Filtro granular profundo

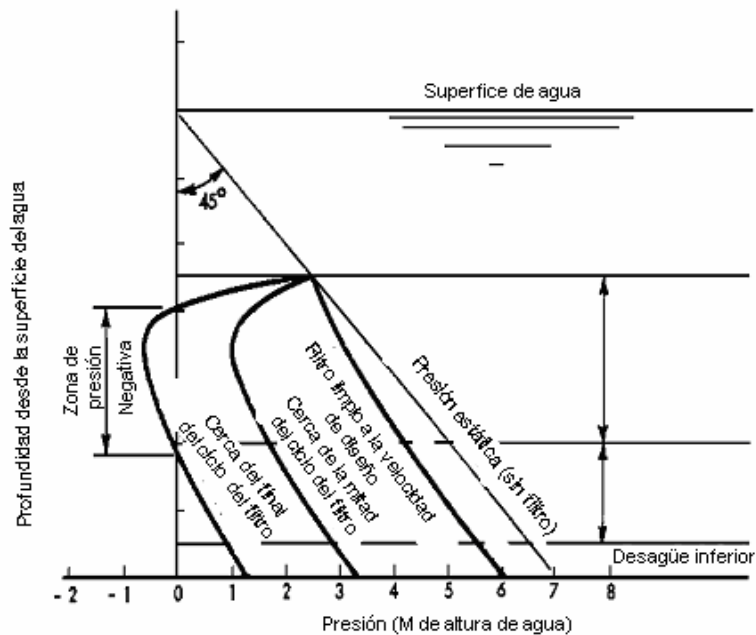


Figura No. 20 Evolución de la pérdida de carga a lo largo del lecho del filtro

Aunque se utilicen velocidades de filtración elevadas, la mayor parte de los sólidos se eliminan en las capas superiores (primeros 0.25 m) del medio filtrante. La *Figura No. 20* ilustra cómo varía la presión en función del tiempo de corrida durante una jornada de filtración.

La presión negativa, menor que la atmosférica, se presenta cuando la pérdida de carga excede a la columna de agua disponible y favorece la formación de bolsas de aire (liberación

de los gases disueltos en el agua), lo cual reduce el área efectiva de filtración. Este fenómeno conocido como “embolia” reduce la corrida de filtración.

MEDIO FILTRANTE.

El medio ideal para la filtración debe poseer las siguientes características:

- Ser lo suficientemente grueso para tener intersticios entre los granos con gran capacidad de almacenamiento.
- Suficientemente fino para retener el paso de los sólidos suspendidos
- Una altura suficiente para proporcionar la duración de corrida deseada
- Una graduación adecuada para permitir un lavado eficiente (poco dispersa)

Como medio se utiliza arena, antracita, tierra de diatomeas, perlita y carbón activado en polvo o granulado. Un filtro se puede rellenar con un sólo tipo de medio o una combinación de éstos.

- a) ARENA: ha sido utilizada universalmente como material filtrante para los diversos tipos de filtros.

Existen tres factores fundamentales que se usan para definir la granulometría de la arena de un filtro:

- *El tamaño efectivo*, es el tamaño del grano expresado en mm para el cual las partículas de diámetro inferior constituyen el 10% de la arena en peso.
- *El coeficiente de uniformidad*, es el termino empleado para definir la razón entre el tamaño del grano expresado en mm para el cual las partículas de diámetro inferior constituyen el 60% de la arena en peso y el tamaño efectivo.
- *El peso específico*, es el peso en gramos que pesa un cm³ de este cuerpo el cual no deberá ser menor a 2.60

- b) ANTRACITA: Es un material de origen mineral cuyo peso específico no debe ser menor de 1.55. Una de las principales características que debe tener es la durabilidad para que pueda resistir la abrasión (desgaste por fricción) producida por el lavado sin presentar erosión.

Su capacidad de retención de material es mayor que la de la arena, se utiliza en tamaños entre 0.6 y 1.4 mm. Los tamaños efectivos menores de 0.6 a 0.8 mm, se prefieren

cuando se emplea como único medio filtrante, y los tamaños 0.8 a 1.4 mm cuando se utiliza en combinación con otros materiales.

- c) GRAVA: Se coloca sobre el sistema de drenaje y tiene un doble propósito: Servir de soporte al lecho de arena durante la operación de filtrado y distribuir uniformemente el agua de lavado.

Tabla N° 3 Profundidad de medios filtrantes.

LECHO	PROFUNDIDAD (cm)	TAMAÑOS	
		pulgadas	pulgadas
Fondo	1.5 - 12	2 - 1	2 ½ - 1 ½
Primero	7.5 - 7.00	1 - 1 ½	1 ½ - ¾
Segundo	7.5	½ - ¼	¾ - ½
Tercero	7.5	¼ - 1/8	½ - 3/16
Gravilla	7.5	1/8 - 1/12	3/16 - 3/32

El medio más común empleado es la arena de sílice y para filtros duales arena con antracita.

Se emplea carbón activado como medio filtrante cuando se pretende no sólo eliminar los sólidos en suspensión, sino también remover los materiales disueltos por adsorción.

También el medio filtrante ideal para los filtros granulares profundos debe ser de un tamaño tal que retenga una gran cantidad de sólidos suspendidos y pueda limpiarse fácilmente por retrolavado. Estos prerrequisitos no son compatibles y debe llegarse a un equilibrio. Una arena muy fina permite obtener un efluente de excelente calidad pero impide la penetración de sólidos en el lecho; con lo cual se desaprovecha la capacidad de almacenaje del medio granular. Las arenas más gruesas dan tiempos más largos de funcionamiento, menor calidad del efluente y mayor facilidad de lavado, aunque para ello se requiere un mayor caudal de agua de lavado para expandir el medio y transportar los sólidos, que se internan a una mayor profundidad en el medio, hasta el sistema de desagüe.

Los filtros duales generalmente combinan antracita (carbón muy duro) con arena. Los espesores en ambos casos son de 0.30 m. En este caso la antracita interesa por que tiene un volumen de poros libres 20% superior al de la arena por lo que actúa como un almacén de flóculos. Los filtros de medio triple se acercan mucho más a un comportamiento ideal pero las complicaciones para su operación hace que sean poco recomendables. Durante el lavado existe una mezcla parcial de los medios en la interfase, que en ocasiones promueven el taponamiento del filtro en esta zona por los propios granos de la arena.

La forma del grano, la redondez, la porosidad y la densidad o gravedad específica de un medio filtrante son importantes ya que afectan los requerimientos del flujo para retrolavado del filtro, la pérdida de carga a través del medio y la eficiencia de filtración. Los granos de alta densidad pero, del mismo diámetro requieren altas tasas de lavado para alcanzar la fluidización. De esta manera, son mayores las fuerzas cortantes durante el retrolavado y el lavado es más eficiente.

La porosidad del lecho es la relación del volumen disponible con el volumen total del lecho, expresado como fracción decimal o un porcentaje. Éste es importante debido a que afecta el flujo requerido para retrolavado, la pérdida de carga del lecho filtrante y la capacidad de agarre de los sólidos en el medio. La porosidad es afectada por la esfericidad de los granos: los granos angulares tiene una baja esfericidad y una mayor porosidad.

Las propiedades típicas de diferentes medios filtrantes se muestran en la *Tabla No. 4* para arreglos sencillos, dobles y mixtos.

Tabla No. 4 Propiedades típicas de medios filtrantes para filtros de lecho granular

	Arena sílice	Antracita	CAG	Granate	Ilmenita
Densidad de grano, ρ_s , g/cm ³	2.65	1.45 a 1.73	1.3 a 1.5*	3.6 a 4.2	4.2 a 4.6
Porosidad de lecho, ϵ_o	0.42 a 0.47	0.56 a 0.60	0.50	0.45 a 0.55	ND
Esfericidad, C_e	0.7 a 0.8	0.46 a 0.60	0.75	0.60	ND

Fuente: AWWA, 1990

LAVADO

Los filtros se lavan para restablecer su capacidad cuando la calidad del efluente se degrada, o cuando la caída de presión a través del filtro alcanza un valor predeterminado. Para los filtros de gravedad, la pérdida de carga terminal seleccionada es generalmente la carga real disponible. En algunos casos, los filtros se lavan en un ciclo regular de tiempo, basado en la experiencia.

El lavado ocurre a contracorriente con un caudal suficiente para expandir los granos del medio formando una suspensión. El material retenido es transportado por el agua a través del lecho expandido hasta ser descargado al desagüe. Está demostrado que la colisión entre partículas (abrasión) y las fuerzas hidráulicas cortantes son las causantes del desprendimiento de los sólidos del medio granular. El suministro de aire, previo o durante el lavado es una práctica común que tiene como propósito el incrementar la colisión entre partículas.

La pérdida de arena durante el lavado, problema muy común, es mayor cuando se emplean arenas finas. Para solventarlo se especifican arenas más gruesas y mayor espesor de la cama filtrante. También es común que se usen arenas con coeficientes de uniformidad bastante elevados, ya que ello reduce la cantidad de finos que pueden ser arrastrados durante el retrolavado; sin embargo, cuanto mayor es el CU mayor será el costo de la arena, ya que se debe cribar una gran cantidad para obtener el producto deseado.

BAJOS DRENES

Existen muchas versiones tecnológicas de lo que puede ser un bajo dren que abarcan placas porosas, bloques y boquillas. Se coloca grava entre el bajo dren y el medio filtrante con un espesor de 0.20 a 0.30 m y graduación entre 3 y 20 mm. Por ejemplo, el de la *Figura No. 21* es de bloques vitrificados con laterales superiores e inferiores perforados. El agua entra por el dren central hacia el alimentador lateral y sube a través de los orificios. Mediante este procedimiento se iguala la presión de entrada del fluido para tener una distribución homogénea del mismo en todo el filtro. En el de la *Figura No. 22* se presenta un sistema de boquillas. Cada una es instalada por separado en una plataforma construida para ello. Los fabricantes proporcionan datos para su instalación y operación, son funcionalmente complejas pues se requiere que distribuyan agua y aire uniformemente.

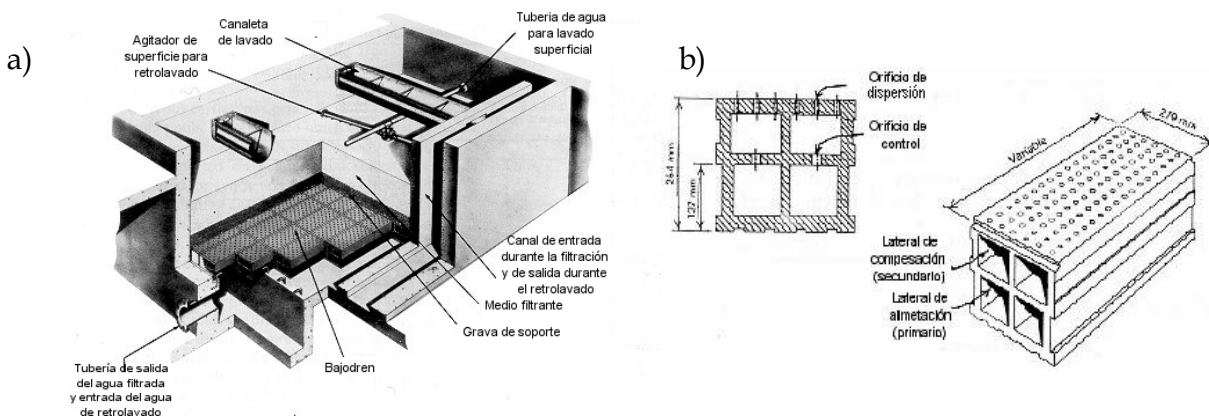


Figura No. 21 Filtro a gravedad de medio dual. a) Corte mostrando el bajo dren, la capa de grava de soporte, el medio filtrante, el agitador de superficie y las canaletas de lavado y b) detalle del bajo dren de arcilla vitrificada.

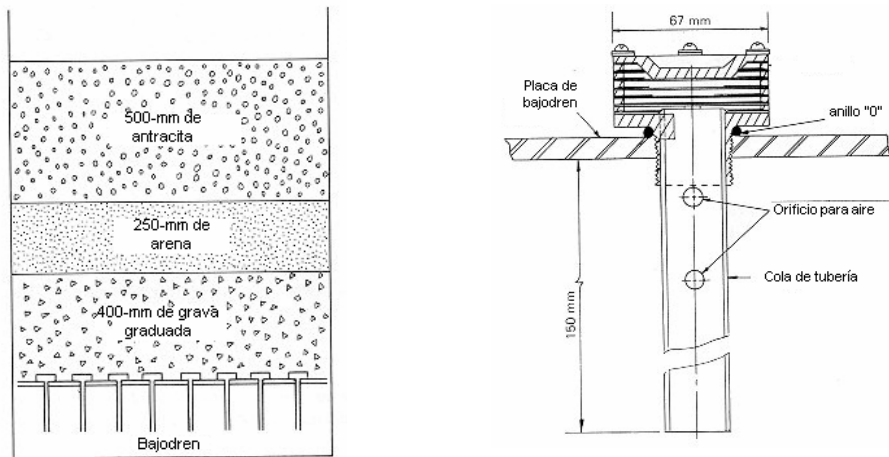


Figura No. 22 Sistema de bajo dren para lavado del medio granular con aire y agua
 a) sección transversal y b) detalle de la boquilla.

2.2. PROCESOS PARA LA REMOCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.

2.2.1. PRECIPITACIÓN QUÍMICA.

Las aguas naturales adquieren sus características químicas dentro del ciclo hidrológico. Algunos de los gases, líquidos y sólidos adquiridos, se disuelven pero conservan su naturaleza; otros reaccionan con el agua o con diversos compuestos existentes en el agua para formar nuevas sustancias químicas.

La remoción de ciertos materiales inorgánicos solubles se puede lograr al agregar reactivos adecuados para convertir las impurezas solubles en precipitados insolubles que pasan así a la fase de floculación y se puedan remover por sedimentación. Factores como el pH y la temperatura normalmente afectan esto.

Para un tratamiento eficiente, es esencial agregar la dosis correcta de reactivos.

Una característica de los procesos de precipitación química es la producción de volúmenes relativamente grandes de lodos. El uso más extendido de la precipitación química es para el ablandamiento de agua. Las aguas duras, esto es, las aguas que contienen calcio y magnesio en cantidades importantes, frecuentemente requieren ablandamiento para mejorar su calidad.

Para abastecimientos potables, el agua con dureza de hasta 75 mg/l, se considera normalmente como blanda, muchas aguas subterráneas pueden tener niveles de dureza de varios cientos de mg/l.

El ablandamiento por precipitación consiste en la inversión del proceso a través del cual la dureza ingresó al agua inicialmente; esto es, la conversión de compuestos solubles en compuestos insolubles que luego se precipitarán y permitirán su remoción por floculación y sedimentación. El método de ablandamiento por precipitación adoptado dependerá de la forma de dureza que se presente.

ABLANDAMIENTO CON CAL.-

Para una dureza debida al calcio y con la forma de carbonato. La adición de cal equivalente a la cantidad de bicarbonato presente formará carbonato de calcio insoluble

La solubilidad del CaCO_3 a temperaturas normales es de 20 mg/l y por el tiempo de contacto tan limitado que es posible en una planta normal, generalmente se obtiene un residual de 40 mg/l de CaCO_3 . El agua ablandada se satura con CaCO_3 y hay probabilidad de que las escamas se depositen en el sistema de distribución.

ABLANDAMIENTO CON SODA CÁLCICA.-

Para todas las formas de dureza debida al calcio. Al agregar ceniza de soda (NaCO_3), la dureza no debida al carbonato se convierte en CaCO_3 el cual entonces se precipitará.

Se agrega tanta ceniza de soda en una proporción igual a la dureza no debida al carbonato y asociada al calcio.

ABLANDAMIENTO POR EXCESO DE CAL.-

Para la dureza de debida al carbonato de magnesio. Los métodos anteriores no son efectivos para la remoción del magnesio por que el carbonato de magnesio es soluble. La solubilidad real del magnesio es alrededor de 10 mg/l.

Como efecto secundario, el alto nivel de pH produce una buena desinfección y la cloración puede ser innecesaria después de tal ablandamiento. La carbonatación es indispensable para quitar el exceso de cal y reducir el pH después del tratamiento.

ABLANDAMIENTO POR EXCESO DE SODA CÁLCICA.-

Para todas las formas de dureza debida al magnesio. Este proceso implica el uso de cal y ceniza de soda y es complicado. Todas las formas de ablandamiento por precipitación producen volúmenes considerables de lodos. La recuperación de cal es posible al calcinar el lodo con CaCO_3 y apagar con agua; de esta manera se produce mas cal de la que se requiere en planta y el excedente se puede vender, resolviéndose al mismo tiempo el problema de la eliminación de lodos.

2.2.2 ABLANDAMIENTO.

ABLANDAMIENTO CON CARBONATO DE SODIO-CAL.

El principal propósito del ablandamiento con carbonato de sodio (Na_2CO_3) y cal (CaO) (o cal-sal) es reducir los niveles de calcio y magnesio para lograr una dureza total de 80 mg/l (como CaCO_3) y una dureza de magnesio de 40 mg/l (como CaCO_3). El proceso tiene la ventaja adicional de ser bactericida, remover Fe, algunos metales pesados (Pb, Mg y Cr) y compuestos orgánicos.

El proceso implica las siguientes unidades: mezcla rápida, floculación, sedimentación, recarbonatación, segunda sedimentación, filtración y cloración. Si el agua ablandada es estabilizada con ácido en lugar de dióxido de carbono, los procesos de recarbonatación y sedimentación secundaria se omiten. Sin embargo, la adición de ácido incrementa la concentración de sulfatos o cloruros, mientras que el uso de dióxido de carbono no lo hace. El empleo de la recarbonatación tiene el objeto de adicionar CO_2 para bajar el pH y convertir el exceso de hidróxido y carbonato a iones de bicarbonatos.

El ablandamiento con cal también mejora la calidad del agua evitando la corrosión de las tuberías y produce agua adecuada para calentadores y sistemas de enfriamiento.

El proceso normal de ablandamiento puede operar con picos de turbiedad de 500 a 1000 UTN debido a que la alta cantidad de cal adicionada actúa como coagulante. Más aún, la remoción de turbiedad y la operación del filtro se pueden mejorar si se adicionan coagulantes metálicos como sulfato de aluminio o hierro junto con la cal. La recirculación de la cal después del tratamiento de lodos es una ventaja del proceso.

El dióxido de carbono es un gas incoloro que se utiliza para recarbonatar y estabilizar el agua ablandada. Se produce al quemar un combustible que puede ser carbón, petróleo, gas, etc. Se cuida la relación del combustible/aire en el generador de CO_2 para lograr una completa combustión. El gas se produce en la cámara a presión y es pasado a través de difusores al tanque de tratamiento. Hay muchos fabricantes de equipos de recarbonatación, tanto para generarlo como para alimentarlo.

La cal adicionada al agua reacciona en primer lugar con cualquier dióxido de carbono libre para formar un precipitado de carbonato de calcio; pero después, reacciona con los bicarbonatos de calcio. En ambos casos un equivalente se combina con otro de CO_2 o de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Puesto que el magnesio precipita como $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (*el MgCO_3 es soluble*), dos equivalentes de cal se requieren para remover el bicarbonato de magnesio.

El ión calcio puede ser efectivamente eliminado mediante la adición de cal en una ecuación que conduce a elevar el pH a 10.3. Pero la precipitación del ión magnesio requiere un pH mayor y por ello se debe añadir un exceso de cal de 35 mg/l (1,25 meq/l). Las

limitaciones prácticas del ablandamiento por precipitación son 30 a 40 mg/l de CaCO_3 y 10 mg/l de Mg(OH)_2 como CaCO_3 , aun cuando la solubilidad de estos compuestos es menor (de un quinto) desde el punto de vista teórico.

La principal ventaja del ablandamiento por precipitación es que la cal añadida es eliminada junto con la dureza de la solución. Así el contenido total de los sólidos disueltos del agua es también reducido. Cuando se añade carbonato de sodio, los iones de sodio permanecen en el agua tratada como sulfatos o cloruros. Afortunadamente, la dureza no carbonatada que es la que requiere la adición de carbonato de sodio generalmente está presente en menor proporción que la dureza total. Las reacciones para ablandar con cal y carbonato de sodio pueden ser usadas también para estimar la producción de lodos.

La recarbonatación se emplea para estabilizar el agua tratada con cal y evitar la formación de depósitos.

ABLANDAMIENTO CON EXCESO DE CAL

Se emplea para remover el Ca y Mg más allá de los límites prácticos de 40 mg/l (Figura N° 23).

Posteriormente, el agua debe ser floculada para remover CaCO_3 y $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y sigue entonces una recarbonatación en dos etapas. En la primera, se añade dióxido de carbono para bajar el pH a 10.3 y convertir el exceso de cal a CaCO_3 que es removido por floculación y sedimentación.

El carbonato de sodio, se emplea sólo si es preciso remover dureza no carbonatada de calcio. En la segunda etapa, el pH es bajado a valores entre 8.5 y 9.5 para convertir el carbonato remanente a bicarbonato, y estabilizar el agua para evitar la formación de depósitos.

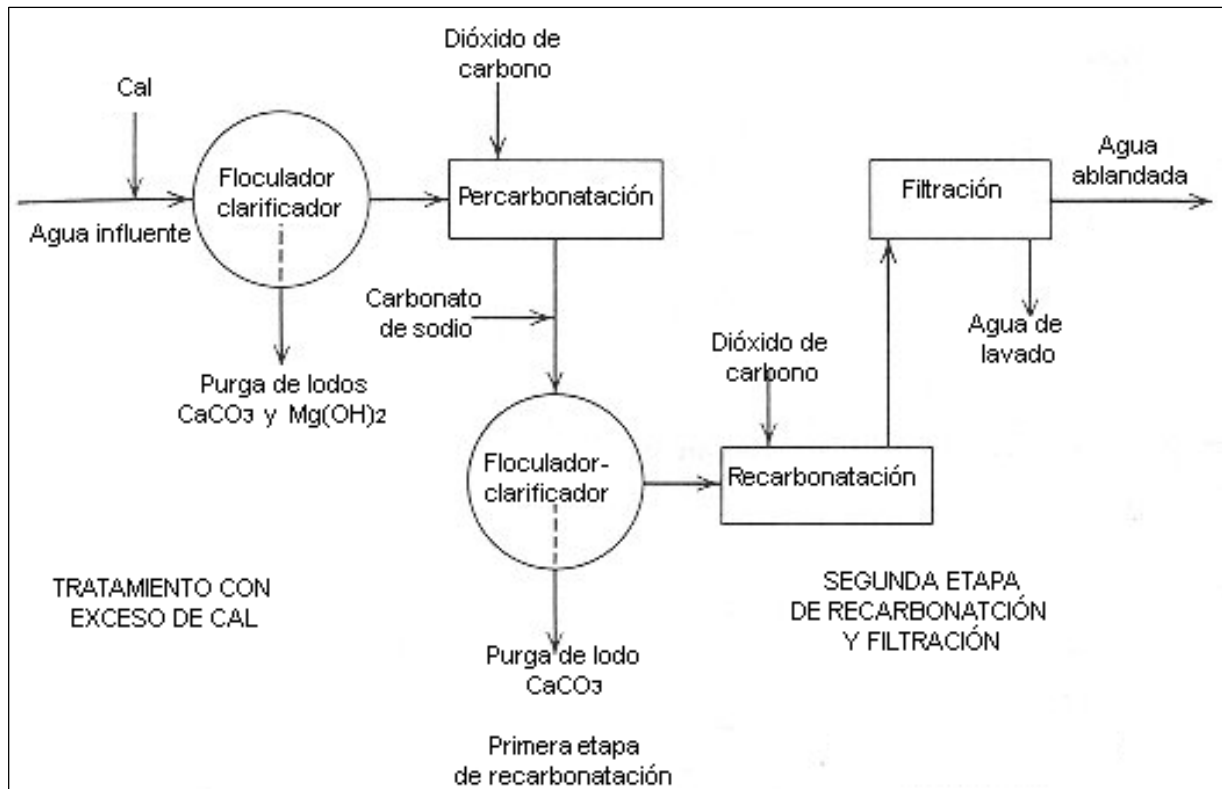


Figura N° 23 Diagrama de flujo de una planta de ablandamiento en dos etapas (Hammer, 1986)

ABLANDAMIENTO MEDIANTE UN TRATAMIENTO POR PARTES

Consiste en dividir el flujo del agua por tratar en dos porciones para un ablandamiento en dos etapas (*Figura No 23*). La porción mayor es tratada con un exceso de cal en una primera etapa en un floculador-clarificador o en un sistema de mezcla en línea con sedimentación. En la segunda etapa, se añade carbonato de sodio, la porción remanente es mezclada con el agua tratada. Se usa así para el exceso de cal forzando la precipitación del magnesio de la primera etapa que reacciona con la dureza del calcio y que pasó por la línea tratada con cal. De esta manera el exceso de cal complementa el ablandamiento en lugar de ser desechado al neutralizar con el CO₂.

Usualmente, esta opción no requiere recarbonatación aunque en algunos casos conviene hacerlo. Este sistema logra niveles de entre 80 y 100 mg/l de dureza y reduce considerablemente los costos de operación. La cantidad de magnesio presente en el agua tratada puede ser calculada multiplicando el flujo puenteado por la concentración de magnesio en el agua sin tratar. En ocasiones este proceso debe ser acompañado por la remoción previa de turbiedad para aguas superficiales.

2.2.3. INTERCAMBIO IÓNICO

El intercambio iónico es un proceso químico que consiste en la remoción de los iones indeseables de un agua cruda transfiriéndolos a un material sólido llamado intercambiador iónico, que los acepta y cede un número equivalente de iones de una especie deseable, que se encuentran almacenados en el esqueleto del intercambiador de iones.

Los intercambiadores iónicos son usados para la separación de sales (cationes y aniones) del agua, las aplicaciones en la potabilización del agua son:

- Ablandamiento - separación de iones de calcio (Ca) y magnesio (Mg)
- Desmineralización - separación de parte de todos los iones del agua
- Separación del NH_4^+ del agua
- Cambiador de ión-cation para la separación de metales pesados

Los intercambiadores iónicos son sustancias granuladas insolubles las cuales tienen en su estructura molecular radicales ácidos o básicos que pueden ser intercambiados. Los iones positivos o negativos fijados en estos radicales serán reemplazados por iones del mismo signo en solución en el líquido en contacto con ellos.

Las sustancias de intercambiadores de iones son casi exclusivamente resinas. Hay dos categorías de resinas: las resinas del tipo gel y las de tipo macroporos. Sus estructuras básicas son prácticamente la misma. La diferencia entre ellas reposa en sus porosidades.

- Resinas tipo gel: tienen una porosidad natural limitada entre las distancias intermoleculares; esta es una estructura tipo microporo.
- Resinas tipo macroporos: tienen una porosidad artificial adicional la cual es obtenida por la adición de sustancias diseñadas para este propósito.

Cuando el agua contiene menos de 0.5 mg/l de hierro y manganeso se usa una unidad catiónica o catión-hidrógeno con la ventaja adicional de que remueve dureza. En este caso no debe haber oxígeno disuelto en el agua ya que daña la resina y tapona el lecho de intercambio.

INCONVENIENTES DEL MÉTODO.

- La imposibilidad de conseguir agua altamente desmineralizada.
Desalinización menor que 10,000 ppm.
- El costo del agua que rápidamente aumenta con la salinidad entrante.
- Antes de la introducción del agua, esta se debe someter a ciertos pretratamientos
 - Eliminación de Turbiedad
 - Reducción del contenido de fierro

2.2.5. OSMOSIS INVERSA.

En este caso, el agua pura atraviesa las membranas bajo la acción de una presión superior a la presión atmosférica.

Forma parte de las tecnologías de membrana junto con la nanofiltración, ultrafiltración y la microfiltración, La membrana funciona como una pared de separación selectiva. Ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella.

La osmosis es un fenómeno físico-químico que tiene lugar cuando dos soluciones acuosas de diferente concentración entran en contacto a través de una membrana semipermeable. Esta membrana permite sólo el paso del agua. Así el agua tiende a atravesar la membrana en el sentido de menor a mayor concentración para igualar ambas. La presión que hace que este fenómeno tenga lugar es la presión osmótica.

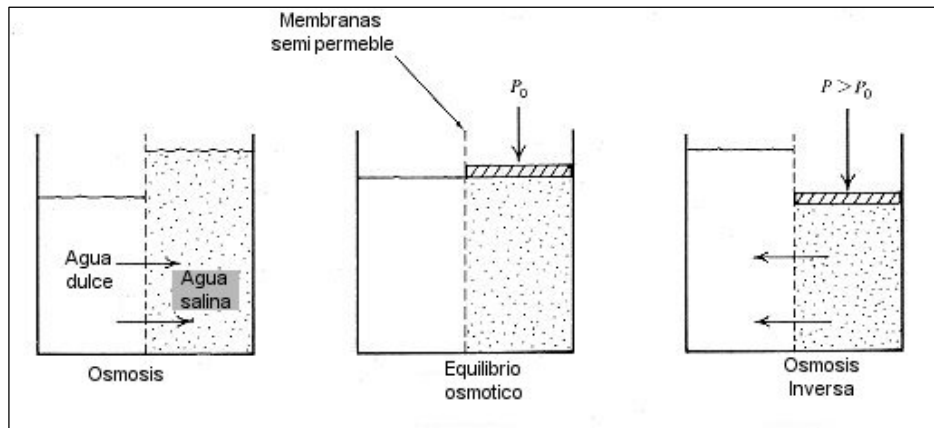


Figura No. 25 Ilustración del principio de ósmosis inversa (Hammer, 1986)

La ósmosis inversa (OI) es el paso forzado de agua a través una membrana en contra de la presión osmótica natural con el objeto de separar iones. Este proceso se ilustra en la *Figura No. 25*, donde una delgada capa de acetato de celulosa (0.1 a 0.15 mm) separa dos soluciones. El agua del lado de la baja concentración de sales fluye a través de la membrana hacia la solución de alta concentración para tratar de igualar el contenido. Si se aplica una presión en el sentido contrario, el agua invierte el sentido natural del flujo (presión osmótica). La tasa de transferencia de agua depende básicamente de la concentración, las características de la membrana y la presión aplicada.

La ósmosis inversa retiene especies tan pequeñas como de 0.0001 μm , que están en el intervalo de tamaños iónicos o moleculares. Aunque las especies orgánicas de bajo peso molecular, tales como, alcoholes, azúcares, ácidos y a veces tintes, son también usadas para catalogar membranas de ósmosis inversa, éstas son evaluadas normalmente contra soluciones de cloruro de sodio y sulfato de magnesio. Dentro de sus ventajas más relevantes destacan:

- La operación continua y el poco espacio para sus instalaciones
- Su diseño modular

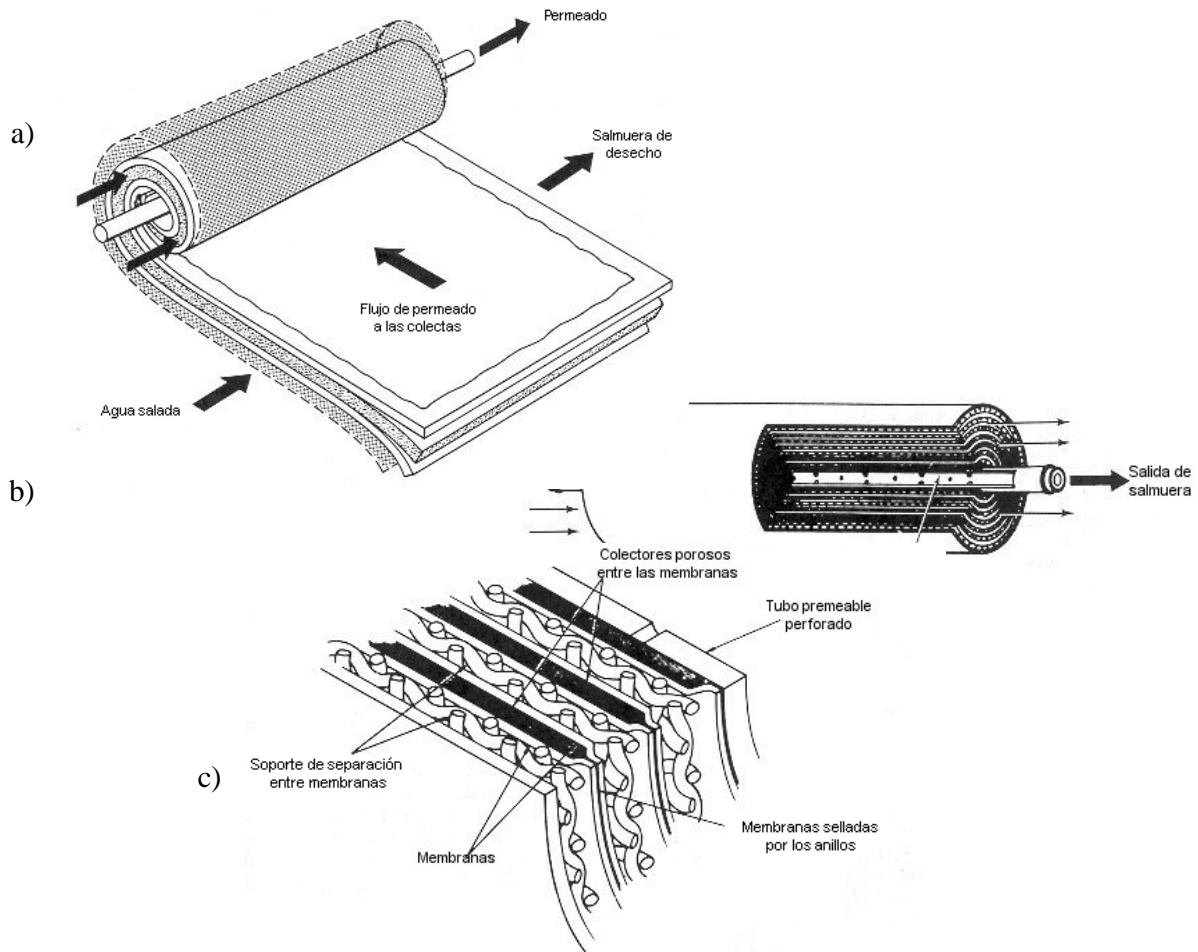


Figura N° 26 Módulos espirales para ósmosis inversa a) módulo desenrollado, b) corte del módulo y c) detalle de las capas (Hammer, 1986)

CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

La calidad de agua de alimentación determina la incrustación, el ensuciamiento, y la degradación de las membranas. Las dos primeras resultan en el decremento de la productividad del sistema, incrementan la caída de presión y disminuyen la pureza del permeado.

Las incrustaciones ocurren cuando se forman especies que exceden la concentración de saturación, incluyen carbonato de calcio, sulfato de bario, sulfato de estroncio y sílica reactiva las cuales a causa de su baja solubilidad son muy difíciles de remover de las membranas. Algunas incrustaciones disminuyen, además, la eficiencia de los antiincrustantes e incrementan la velocidad de formación de depósitos adicionales.

El Índice de Saturación de Langelier (ISL) es usado en aguas con sólidos disueltos totales < 5,000 mg/l para determinar el potencial de formación de incrustaciones de carbonato de calcio. Cuando el ISL es menor a 1 el agua es aceptable y cuando no, se usa un antiincrustante que debe ser evaluado en laboratorio en una prueba de tratabilidad. Conviene que el ISL sea menor a cero.

Cuando el agua contiene más de 5,000 mg/l se utiliza la dureza y el Índice de Saturación Davis (ISD). Se utiliza antiincrustante para ISD menor a 0.5 y éste debe ser menor a cero.

También, hay obstrucciones por el crecimiento de microorganismos. Afortunadamente, las membranas son resistentes al ataque bacteriano. Para evitar este tipo de taponamiento se añade periódicamente cloro para algunos tipos de membranas (las más modernas).



Figura N° 27 Equipo para el proceso de ósmosis inversa.

2.2.6. NANOFILTRACIÓN.

La nanofiltración es un proceso de filtración por membranas operadas bajo presión en la que solutos de bajo peso molecular (1000 u) son retenidos, pero las sales pasan, total o parcialmente, a través de la membrana con el filtrado. Esto provee un rango de selectividad entre las membranas de ultrafiltración y osmosis inversa, permitiendo simultáneamente concentración y desalado de solutos orgánicos. La membrana de nanofiltración retiene solutos que la ultrafiltración pasaría, y deja pasar sales que la osmosis inversa retendría. En algunas aplicaciones, su selectividad entre moléculas de tamaños similares es la clave del éxito del proceso de separación con membrana.

Permitiendo un paso, prácticamente libre, de iones monovalentes, la membrana de nanofiltración reduce el incremento del gradiente de presión osmótica, a la que contribuyen las sales monovalentes. Como resultado, es posible una mayor cantidad de producto (permeado).

Las aplicaciones para los sistemas de nanofiltración son:

- Ablandamiento
- Separación específica de metales pesados por proceso de chorro para la reutilización del agua.
- Reducción de contenidos de sales del agua salobre ligera.

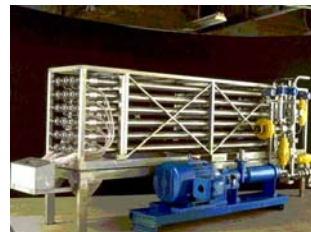


Figura No. 28 Equipos para el proceso de Nanofiltración.

2.2.7. ULTRAFILTRACIÓN.

Una de las principales aplicaciones de la ultrafiltración es como pretratamiento de la ósmosis inversa, tanto para potabilización como para desalación de agua de mar. Las ventajas de la ultrafiltración como pretratamiento son:

- Una buena protección de las membranas de ósmosis inversa.
- No requiere productos químicos.
- Tratamiento de choque químico para una desinfección.
- Es económica.
- El diseño es compacto.
- Es de operación continua y fácilmente automatizable.
- No hay caminos preferenciales, como ocurre en los medios de filtración granulares.

Como tratamiento principal la ultrafiltración aplica para:

- Desalar: tratar agua de mar rica en nutrientes.
- Producir agua potable a bajo costo, dan permeados con valores de índice de densidad de sal de 0.5 a 0.7 y niveles de turbiedad de 0.09 a 0.2 UTN, a partir de agua de mar con turbiedad mayor a 150 UTN con membranas de poliéster sulfona.

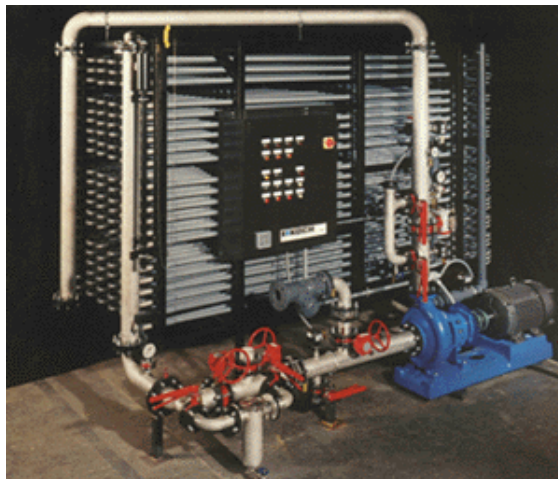


Figura No. 29 Equipos para el proceso de Ultrafiltración.

2.2.8. MICROFILTRACIÓN.

Las membranas usadas para la microfiltración tienen un tamaño de poro de 0.1 - 10 μm . Estas membranas de microfiltración retienen todas las bacterias, parte de la contaminación viral es atrapada en el proceso, a pesar de que los virus son más pequeños que los poros de la membrana de microfiltración. Esto es porque los virus se pueden acoplar a las bacterias.

La microfiltración puede ser aplicada a la potabilización del agua cuando se necesita retirar las partículas de un diámetro superior a 0.1 μm ; como pretratamiento del agua para nanofiltración y ósmosis inversa.



Figura No. 30 Equipos para el proceso de Microfiltración.

2.3. PROCESOS PARA LA REMOCIÓN DE CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS Y BIOLÓGICAS.

2.3.1. CLORACIÓN

La cloración se emplea en la potabilización para destruir patógenos, controlar problemas de olor, remover hierro y manganeso y para eliminar nitrógeno amoniacal.

El cloro tiene una fuerte afinidad por varios compuestos y elementos, particularmente por los agentes reductores, pues tiene una gran tendencia a ganar electrones y formar ión cloruro o compuestos organoclorados.

Las sustancias con las cuales el cloro reacciona frecuentemente son Fe, Mn, NO₂, H₂S, así como con la mayor parte de los compuestos orgánicos presentes. Las reacciones con los compuestos inorgánicos en general son rápidas, mientras que las que se llevan a cabo con los orgánicos son muy lentas y su grado de desarrollo depende de la cantidad de cloro disponible.

La tasa de desinfección depende de la concentración y forma en que se encuentre el cloro disponible, el tiempo de contacto, el pH, temperatura y otros factores. El ácido hipocloroso es más eficiente que el ión hipoclorito, por ello el poder del cloro residual disminuye conforme se incrementa el pH. La acción bactericida del cloro combinado es mucho menor que las del cloro residual libre, particularmente en términos de la velocidad de la reacción.

El cloro es el principal compuesto empleado para la desinfección del agua. Se usa en forma gaseosa, sólida o líquida y en forma pura o combinada.

Los principales factores que afectan la eficiencia de desinfección son:

- Tiempo de contacto. Se refiere al tiempo disponible para que el cloro actúe sobre los microorganismos. Este tiempo debe ser como mínimo de 10 a 15 min. en agua potable, normalmente entre 15 y 30 min.
- Temperatura. La destrucción de microorganismos con cloro es mucho más rápida a mayor temperatura. A pesar de esto, el cloro es más estable en agua fría lo que en la práctica compensa la menor velocidad de desinfección. Así, para lograr la misma acción a 4 °C que a 21°C, la concentración de cloro residual debe ser el doble con los demás factores constantes.

-
- pH. Afecta la acción desinfectante del cloro, particularmente la del cloro residual combinado. De forma general, mientras más alcalina sea el agua se requieren mayores dosis para una misma temperatura y tiempo de contacto.

El cloro como oxidante actúa sobre el manganeso. De hecho lo oxida más fuertemente que el oxígeno disuelto, por lo que se usa con frecuencia para eliminar hierro y manganeso. Otra aplicación del cloro como oxidante es la remoción del ácido sulfhídrico de agua subterránea. Las tecnologías, principios y equipos para el empleo del cloro como desinfectante son las mismas que como oxidante.

PRODUCTOS DE CLORO

CLORO GASEOSO

El cloro gaseoso es considerado generalmente como la forma más rentable para las plantas de gran tamaño.

Es más pesado que el aire, de color amarillo verdoso y tóxico. Un volumen de cloro líquido dentro de un tanque a presión equivale aproximadamente a 450 volúmenes de gas. El cloro es un compuesto muy reactivo, la bruma de cloro es muy corrosiva por lo que los equipos dosificadores deben ser de aleaciones especiales o no metálicas. El vapor inhalado causa serios daños e incluso la muerte.

Se considera que el cloro gaseoso ofrece hasta un 94.5 % de reducción en el costo de construcción debido a que no requiere de lagunas de contacto necesarias para el cloro en solución.

El gas es sacado del contenedor por medio de una válvula conectada en la parte superior. El cloro líquido se evapora dentro de éste antes de salir. El diseño y la instalación de los equipos debe ser tal que se evite al máximo cualquier fuga asociada con las operaciones de conexión, vaciado o desconexión de los tanques.

HIPOCLORITOS

Los hipocloritos son sales del ácido hipocloroso (HOCl). El hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) es la forma más común en estado seco. Se puede presentar en polvo, gránulos o tabletas que se disuelven para producir cloro libre en aproximadamente un 70% del original. El hipoclorito de sodio (NaOCl) se encuentra en estado líquido en concentraciones que contienen aproximadamente entre el 5 a 15% en volumen de cloro. Generalmente, el hipoclorito líquido es más económico que el sólido, que se ha utilizado generalmente en albercas, pequeñas plantas potabilizadoras y en situaciones de emergencia.

El hipoclorito de calcio es relativamente estable en condiciones normales, sin embargo es capaz de reaccionar con otras sustancias. Por lo que debe ser almacenado lejos de otros reactivos o materiales.

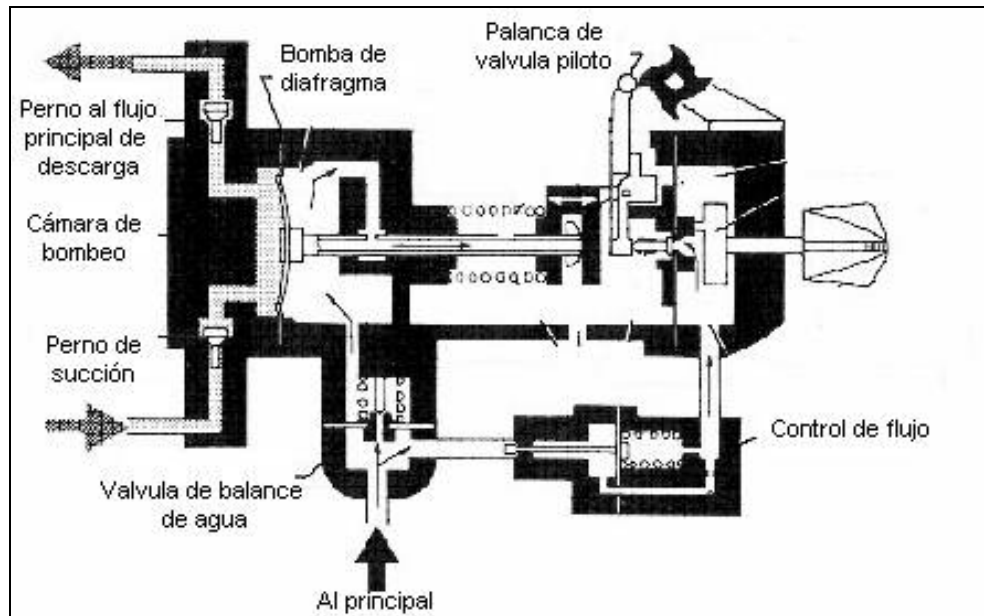


Figura No. 31 Dosificador de hipoclorito de diafragma (Hammer, 1986)

Para medir las soluciones de hipoclorito se usan bombas de diafragma con desplazamiento positivo accionadas en forma mecánica o hidráulica. Una del primer tipo es mostrada en la *Figura No 31* y tiene la ventaja de ser estable, no requerir energía eléctrica y permitir el ajuste del caudal en forma manual.

2.3.2. DESINFECCIÓN

EFFECTOS DEL CLORO EN LOS SERES VIVOS

La respuesta de los diversos organismos vivos al cloro es variable. En particular la de las bacterias es alta y bien conocida en tanto que la de protozoarios y virus es variable y poco conocida. En general los quistes de protozoarios y los virus entéricos son más resistentes al cloro que las bacterias.

No existen tablas o dosificaciones universales de la cantidad de cloro que se deba añadir para potabilizar el agua, pues ello depende de cada agua. Se debe entonces, determinar en laboratorio la demanda de cloro y la cantidad suficiente para mantener un residual que proteja al agua durante su transporte. De hecho, la medición de este residual constituye la prueba esencial de la potabilidad de un agua y es muy útil ya que se correlaciona directamente en el contenido de coliformes totales y fecales, evitando realizar tediosas determinaciones en forma rutinaria.

Para determinar la dosis óptima, se deben realizar pruebas de laboratorio agregando cantidades crecientes de cloro al agua y midiendo su concentración a través del tiempo. La dosis óptima será la que produzca un residual de cloro libre, siendo de 0.2 a 1.5 mg/l para agua potable al final del período de contacto. Por ejemplo, en la *Tabla N° 5* se presentan las dosis típicas de cloro (*en sus diferentes formas*) usadas en plantas potabilizadoras.

Tabla No 5 Dosis de cloro aplicadas en plantas potabilizadoras

Compuesto de cloro	Dosis (mg/l)
Cloro gas	1 a 16
Hipoclorito de sodio	0.2 a 2
Hipoclorito de calcio	0.5 a 5

La dosis de cloro ideal es la necesaria para destruir todos los organismos patógenos presentes en ella. Por tanto, para poder determinarla es indispensable tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Organismos que se intenta destruir u organismos índice (coliformes fecales)
- Tiempo disponible entre el momento en que se aplica el cloro al agua y el momento en que ésta es consumida, usada o descargada (tiempo de contacto)
- Cantidad de cloro que económicamente se puede agregar.
- Clase de desinfectante que se forma en el agua (HClO, ClO⁻, NH₂Cl) según sea el pH y el contenido de nitrógeno y materia orgánica.
- Definir si el agua requiere precloración y poscloración o sólo poscloración, dependiendo de las características de la fuente. Por ejemplo, aguas altamente contaminadas con coliformes superiores a 5x10³ o que presenten una excesiva producción de algas en la planta, deben siempre preclorarse.

En potabilizadoras, la poscloración debe usarse en todos los casos. Las dosis dependen de la demanda de cloro en la red. Las redes de gran longitud, al presentar largos periodos de retención, requieren dosis iniciales mayores que las redes cortas.

EQUIPO

Existen dos formas de aplicar el cloro, como elemento gaseoso o líquido. El primero restringe a instalaciones que cuenten con medidas de seguridad para el manejo del gas, ya que éste se aplica a presión utilizando inyectores de vacío. El líquido (*hipoclorito*) se aplica mediante bombas dosificadoras, su empleo requiere de la existencia de cámaras de mezclado.

Comparando dos tipos de mezcladores uno rápido y el otro de difusión convencional se encontró que el cloro en cualquier presentación es activo durante los primeros 30 s de mezclado, por lo que conviene un mezclado rápido. La eliminación de coliformes se efectúa con 15 min. de contacto como mínimo.

El olor característico del cloro es un primer nivel para llamar la atención sobre posibles fugas; puesto que el cloro es muy reactivo con el amoníaco se emplea este compuesto para detectar fugas pues juntos forman un vapor blanco y denso.

Una unidad básica para dosificar cloro consiste de un orificio insertado en la línea de alimentación para controlar la tasa del flujo al cilindro. La cantidad de agua descargada se regula al abrir la llave, y si se mantiene una presión constante de agua, el flujo permanece estable. Esto se muestra en la *Figura No 32* que consiste de una conexión acanalada que entra a un anillo fijo. La tasa de alimentación es ajustada mediante la variación de la apertura en "V". Puesto que la presión en el cilindro varía en función de la temperatura, la descarga a través de la válvula no es constante y requiere ajustes periódicos.

La alimentación directa de cloro gas a una tubería o canal tiene limitaciones, una de ellas es la seguridad. Por ello se emplean inyectores que suministran una solución rica en cloro a una tasa específica. El agua fluye a través de un eyector que crea un vacío y jala el gas desde el dosificador y lo mezcla con el flujo. Esta solución es relativamente estable y puede ser transportada en forma relativamente segura a varios puntos de la planta donde es introducida en canales abiertos, tuberías cerradas y en descargas de bombas.

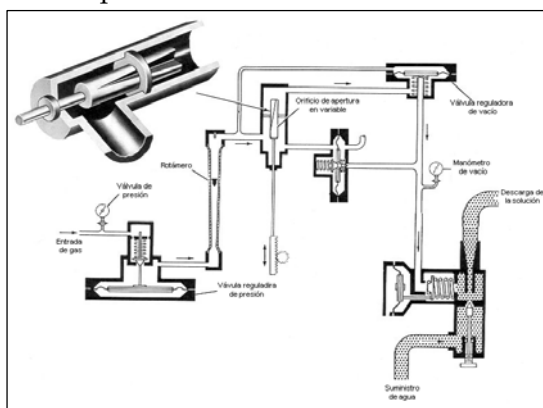


Figura No 32 Diagrama de flujo de un clorador típico.

CLORACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

CLORO RESIDUAL EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN

El consumo de cloro en el agua de una red de distribución se debe por una parte, al consumo del cloro por la propia agua (sustancias presentes en ella y otras condiciones físicas) y por otra, al consumo que se produce en la interfase con las paredes de las conducciones; depende principalmente de la temperatura y del contenido en materias orgánicas disueltas

En la interfase con las paredes, el consumo de cloro se produce por la interacción con los productos de corrosión y por los depósitos y biomasa fijada en las paredes.

Las dos técnicas de cloración generalmente empleadas para la red de distribución son la cloración residual libre y la cloración residual combinada (más la primera que la segunda). Esta cloración debe ser suficiente para mantener la concentración de cloro residual libre de 0.2 a 1.5 estipulada en la normativa.

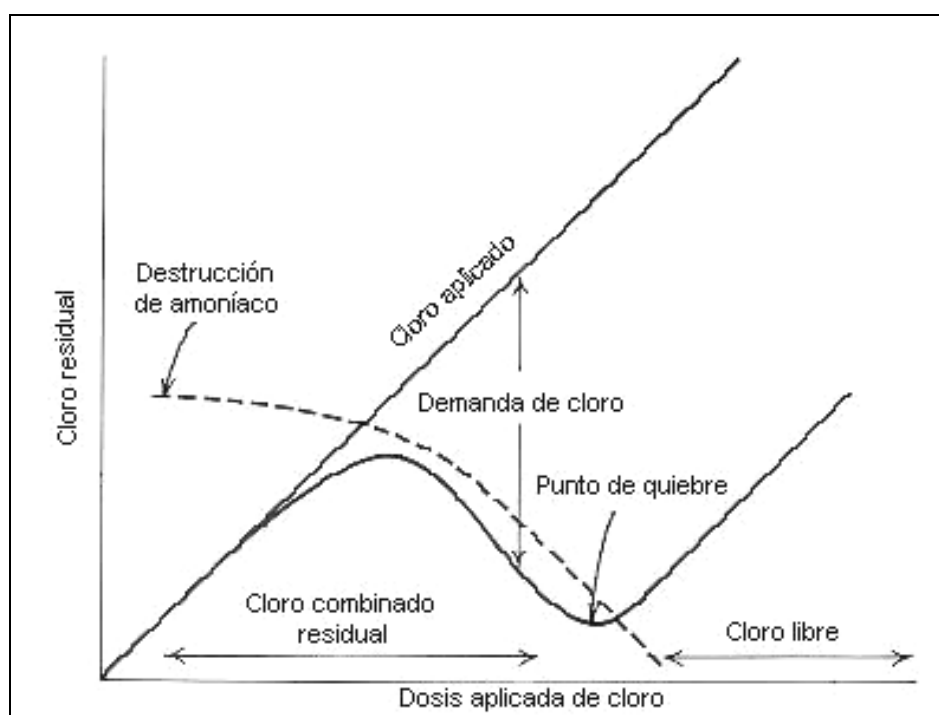


Figura No. 33 Curva de cloración a punto de quiebre (Hammer, 1986)

SISTEMAS NUEVOS

Las tuberías nuevas para conducción de agua potable deben ser probadas para verificar que funcionen a presión y también deben ser lavadas para remover impurezas y desinfectadas antes del inicio de operación. Para ello, existen tres métodos, uno continuo, otro por retardamiento y por último con tabletas. El primero consiste en hacer circular agua con cloro libre a 50 mg/l, por medio de inyección directa del clorador, por lo menos durante 24 horas. El líquido debe circular por todo el sistema, lo que incluye válvulas e hidrantes.

El método por retardamiento consiste en llenar el sistema de distribución con agua con 300 mg/l de cloro libre y dejarla por 3 horas, en diversos tramos de la tubería. Este método es propio para sistemas de distribución de grandes diámetros donde no es posible aplicar la alimentación continua. Pero tiene la desventaja de que al no fluir el agua las impurezas no son arrastradas y purgadas del sistema.

El tercer método emplea tabletas de hipoclorito de calcio que son colocadas en diversos puntos de sistema que son llenados con agua lentamente para disolverlas. La solución resultante debe contener 50 mg/l de cloro y permanecer por 24 horas.

Al final de cualquiera de los métodos se debe enjuagar el sistema y realizar pruebas microbiológicas para verificar la limpieza.

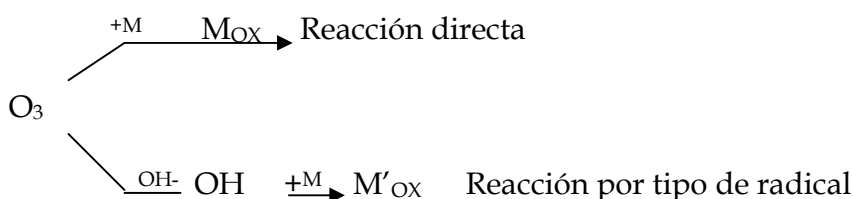
Los tanques y cajas que forman parte del sistema de distribución de agua potable también deben ser desinfectados antes del inicio de su operación.

2.3.3. OZONIZACIÓN

El ozono es un gas fuertemente oxidante que reacciona con la mayoría de las moléculas orgánicas así como con muchas inorgánicas y se produce por la acción de un campo eléctrico sobre el oxígeno. El ozono es más reactivo que el cloro y sus reacciones son rápidas al inactivar microorganismos, oxidar hierro, manganeso, sulfuros y nitritos, mientras que oxida lentamente compuestos orgánicos como sustancias húmicas y fúlvicas, plaguicidas y compuestos orgánicos volátiles. A diferencia del cloro, el ozono no reacciona con el agua para formar especies desinfectantes, sino que se descompone en oxígeno y radicales hidroxilos libres, teniendo una vida media en agua de aproximadamente 10 a 30 minutos

Generalmente el ozono se aplica junto con otro desinfectante debido al alto costo comparado con el cloro y en la mayoría de los casos se aplica con fines adicionales a la desinfección como son el control de olor, color y sabor, la oxidación de precursores de los trihalometanos y la desestabilización de coloides. Los únicos subproductos que se han identificado con la ozonización del agua son los aldehídos.

En solución acuosa, el ozono puede actuar en forma directa con el ozono molecular, con especies de radicales formados cuando el ozono es descompuesto en agua. Estas dos reacciones básicas se ilustran en el siguiente esquema



SISTEMAS DE GENERACIÓN DE OZONO

Un sistema de ozonización consiste en la alimentación del aire u oxígeno, un suministro de electricidad, un generador de ozono, un reactor o contactor, y el destructor de ozono residual. Para controlar la tasa de producción de ozono se puede variar el voltaje o la frecuencia eléctrica. Cuando se emplea aire del ambiente para generar ozono, la concentración que se obtiene del mismo es de 1 a 3.5% en peso; en contraste, cuando se emplea oxígeno puro, la concentración obtenida es prácticamente el doble.

En la mayoría de las instalaciones, el ozono es producido eléctricamente del aire u oxígeno usando tubos ó platos dieléctricos, siendo lo más común el empleo de tubos horizontales.

SISTEMA DE PREPARACIÓN DE GAS DE ALIMENTACIÓN

La preparación del gas de alimentación para la generación de ozono es extremadamente crítica porque es necesario un gas limpio y libre de humedad.

El aire debe ser secado para evitar la formación de ácido nítrico y aumentar la eficiencia del generador.

Para seleccionar el sistema de preparación del gas se debe considerar el método de contacto seleccionado, que normalmente cuenta con un refrigerante para llevar al gas a su punto de rocío y un secador maximizando así la producción de ozono.

Los sistemas de preparación típicos de aire incluyen compresor, enfriamiento de aire, secadores de aire y filtro de partículas.

GENERACIÓN DE OZONO

El ozono puede ser generado por diversos métodos como son:

- *Fotoquímico*: Se basa en el principio de ionización del aire u oxígeno por medio de la luz ultravioleta. Se usa lámpara que emita una radiación con una longitud de onda menor a 200 nm. Este método es muy económico para el tratamiento de pequeñas cantidades de agua que no demanden gran cantidad de ozono. Pero consume gran cantidad de energía, y es severamente afectado en su eficiencia por la humedad y la durabilidad de la lámpara.
- *Electrólisis del ácido sulfúrico*: Es el método más antiguo. Es muy simple y atractivo para usar a pequeña escala. Emplea un bajo voltaje de corriente directa, no requiere gas de alimentación y el equipo es compacto. Sin embargo se desgasta muy rápido y necesita electrolitos especiales ó agua con baja conductividad.
- *Corona de descarga*: En este método se aplica alto voltaje entre dos electrodos utilizando un dieléctrico para distribuir la carga de alto voltaje a través del área de descarga. Es práctico y útil para grandes cantidades, sin embargo consume mucha energía. Este método consiste en hacer pasar una corriente de aire u oxígeno, libre de humedad, a través de una descarga eléctrica. Es el método más utilizado industrialmente para generar ozono.

CARACTERÍSTICAS DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO

El consumo de energía y la capacidad de generación de ozono son directamente proporcionales al voltaje y a la frecuencia (*Tabla N° 6*).

Tabla No 6 Características de los generadores de ozono

Tipo de generador	Frecuencia (hz)	Voltaje (kv)
Baja frecuencia	60	10 a 20
Frecuencia media	700 a 800	8 a 14
Alta frecuencia	2000 a 3000	8 a 10

Fuente: Bryant, 1992

Generalmente el ozono se encuentra en concentraciones bajas en el gas acarreador por lo que para que el proceso resulte rentable se requiere diseñar una unidad que maximice su transferencia al agua. Las unidades de contacto varían en términos del tipo, condiciones de operación y funciones específicas del ozono en el punto de aplicación. Lo primordial es lograr la máxima transferencia en el menor tiempo posible por cuestiones económicas con eficiencia del orden del 90%.

En los procesos de oxidación es imprescindible un contacto inmediato del ozono con la solución por tratar, debido a que este elemento es muy inestable.

El diseño de los sistemas de contacto para ozono es importante, debido a que se desea aumentar lo más posible la eficiencia en la transferencia de ozono para reducir el costo del tratamiento.

NECESIDAD DE UN DESTRUCTOR DE OZONO

Debido a que las eficiencias de transferencia de los difusores de ozono son menores al 100% el ozono remanente no puede ser descargado directamente a la atmósfera, sino que es necesario destruirlo.

Además el personal, equipo y estructuras, deben ser resistentes a la exposición a altas concentraciones de ozono. Es común que el gas de salida tenga de 0.2 a 0.5 g/ m³ de ozono en condiciones normales de presión y temperatura. Esta concentración excede el valor permisible para un período de 8 h por día de trabajo que es de 0.0002g / m³ ó 0.1 ppm (Imeca 100).

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UTILIZAR OZONO

El Ozono cuenta con las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- El ozono es más eficaz que la utilización del cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias.
- El proceso de ozonización utiliza un período corto de contacto (aproximadamente de 10 a 30 minutos).
- No existen residuos peligrosos que necesiten ser removidos después del proceso de ozonización porque el ozono se descompone rápidamente.
- El ozono es generado dentro de la planta, existiendo así muy pocos problemas de seguridad industrial asociados con el envío y el transporte.
- El proceso de ozonización eleva la concentración de oxígeno disuelto (O.D.) del efluente. El incremento de oxígeno disuelto puede eliminar la necesidad de reaireación y también puede incrementar el nivel de oxígeno disuelto en la corriente de agua receptora.

Desventajas:

- La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas o quistes.
- El proceso de ozonización es una tecnología más compleja que la cloración o la desinfección con luz ultravioleta, por lo cual se requieren equipos complicados y sistemas de contacto eficientes.
- El ozono es muy reactivo y corrosivo, requiere de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable.
- El proceso de ozonización no es económico para las aguas con altas concentraciones de sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), o carbono orgánico total.
- El ozono es extremadamente irritante y posiblemente tóxico, así que los gases de escape que salen de la cámara de contacto deben ser destruidos para evitar que los trabajadores estén expuestos a ellos.
- El costo del tratamiento puede ser relativamente alto en cuanto a la inversión de capital y la demanda de energía eléctrica.

2.3.4. LUZ ULTRAVIOLETA

La mayoría de las plantas de potabilización a nivel mundial utilizan cloro como desinfectante por su simplicidad de aplicación y bajo costo. Sin embargo, tiene la desventaja de generar productos secundarios denominados organoclorados que se consideran carcinógenos. Como una alternativa existe la luz ultravioleta (UV), la cual sin generar subproductos es efectiva para inactivar organismos patógenos.

La desinfección con luz UV fue utilizada en agua de suministro a principios de 1900 pero se abandonó por sus altos costos de operación, los problemas de mantenimiento y la falta de disponibilidad de equipo. Sin embargo, la razón más importante fue que la cloración resultó ser más eficiente y rentable. Paradójicamente, hoy en día, la desinfección con luz UV es un proceso que está ganando terreno con respecto a la cloración debido a la estricta reglamentación de los organoclorados que esta última produce.

En los últimos 20 años, el uso de la UV se ha incrementado incluso en plantas de tratamiento de aguas residuales. Comparada con la cloración, la luz UV desinfecta el agua residual sin la necesidad de almacenar o manejar reactivos químicos peligrosos y, por sus cortos tiempos de contacto (del orden de segundos o minutos), reduce el tamaño de los tanques de tratamiento y con ello el costo. Actualmente, se han construido o planeado gran número de sistemas de desinfección con luz UV y que por lo mencionado, han resultado ser económicos y competitivos con respecto a la cloración.

CARACTERÍSTICAS

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética que está presente en el espectro natural de la radiación solar. Tiene una longitud de onda menor a la de la luz visible (400nm) y mayor a la de los rayos X (100nm). Mientras menor es la longitud de onda mayor es la energía contenida, por lo que, la radiación ultravioleta tiene una energía inferior a la de los rayos X pero mayor que la de la luz visible.

De acuerdo a la longitud de onda existen diferentes tipos de luz ultravioleta entre las que están: la radiación de región UV-A (315 a 400 nm) es usada para las lámparas de bronceado. La UV-B (280 a 315 nm) y UV-C (200 a 280 nm) son las que contienen las longitudes de onda más efectivas para la acción germicida y ha sido demostrado que la longitud de onda óptima utilizada como desinfectante es de 254 nm.

REACTIVACIÓN

Bajo algunas condiciones, el daño fotoquímico causado por la luz UV a los microorganismos puede ser reparado, permitiendo que los microorganismos inactivados puedan ser viables después del proceso de desinfección.

Existen dos mecanismos de reparación que tienen gran importancia en la desinfección con luz UV:

- Fotorreactivación
- Reparación en la oscuridad

El proceso más sencillo es la fotorreactivación, la cual se realiza en presencia de luz con longitudes de onda entre 310 y 480 nm. Este proceso no se produce, en consecuencia, en líneas de distribución cerradas o en receptores profundos de agua. La importancia de la fotorreactivación depende de tres factores:

- La dosis inicial de radiación UV para la inactivación
- La dosis de la radiación fotorreactivante
- El tipo de microorganismo

Desde el punto de vista operacional, la existencia de los mecanismos de reparación inducen a aumentar la dosis requerida para que no se lleven a cabo, lo que implica también la introducción de más equipo.

EFFECTO DE LAS SUSTANCIAS QUE ABSORBEN LA LUZ

Debido a que la luz UV debe ser absorbida por los microorganismos para que los inactive, cualquier cosa que evite su contacto afecta el grado de desinfección. La capacidad que tiene el agua para transmitir la luz UV determinará si es conveniente o no la desinfección con luz UV.

TRANSMITANCIA

La transmitancia se define como la capacidad que tiene el agua para dejar pasar la luz, en este caso la UV, a través de ella. Es leída a una longitud de onda de 254 nm y se expresa como un porcentaje de la transmitancia que presenta el agua desionizada (establecida como 100%). Los valores de transmitancia dependen del tipo de proceso de potabilización y del origen del agua. Para el caso del agua potable, los valores más frecuentes son de 75 a 95 %, pudiendo disminuir debido a la presencia de partículas suspendidas y de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos.

Debido a que la dosis es el producto de la intensidad por el tiempo de exposición, una intensidad menor provocada por la falta de transmitancia puede ser compensada extendiendo el tiempo de retención pero en ese caso, se requiere mayor espacio y más equipo de radiación.

SUSTANCIAS DISUELTAS

Las sustancias disueltas tanto orgánicas como inorgánicas afectan también la absorción de la luz UV. Las principales sustancias orgánicas son algunos pigmentos de algas, ácidos fúlvicos y húmicos, compuestos fenólicos y triptona.

Sustancias inorgánicas tal como el hierro, calcio, magnesio y manganeso afectan el equipo de luz UV. Estos compuestos precipitan y se depositan en las camisas de cuarzo de las lámparas, impidiendo de esta manera que la luz UV penetre en el agua.

Así también, los procesos que utilizan altas concentraciones de cloruro férrico para mejorar la remoción de sólidos, producen generalmente bajas transmitancias. Esto es debido a la presencia de hierro disuelto que absorbe la luz.

Otra de las desventajas que presenta el uso del hierro es que su acumulación en los sólidos resulta en una capa protectora para las bacterias que están inmersas en las partículas. Los tratamientos con alumina producen mayores transmitancias y su asociación con las partículas no inhibe la penetración de la luz.

EFFECTO DE LAS PARTÍCULAS

La materia suspendida en el agua puede afectar la desinfección de dos maneras

- La materia coloidal puede absorber la luz
- La materia coloidal puede reflejar la luz

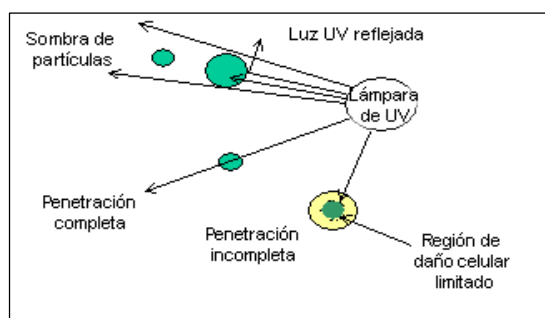


Figura No 34 Efecto de las partículas en la radiación de luz UV

Evitando de esta manera que la luz penetre totalmente los microorganismos (Figura N° 34). Este efecto no es privativo de la desinfección con luz UV, pues también atañe a la desinfección con cloro u ozono. Se reduce al desinfectar agua que ha sido previamente filtrada.

Los microorganismos responden de diferente manera a la luz UV debido a la diferencia en su estructura física. El requerimiento de la dosis parece aumentar con el tamaño de la célula así como con la cantidad de ADN y ARN. La mayoría de las bacterias y virus requieren dosis relativamente bajas para su inactivación. La Tabla N° 7 muestra las diferentes dosis requeridas para una variedad de microorganismos.

Tabla No 7 Comparación de la sensibilidad de diferentes microorganismos a la desinfección con luz UV

Microorganismo	Dosis (mW s/cm ²) para la reducción de un 90% en la cuenta
Bacterias	
Bacillus anthracis Gram +	4.5
Bacillus subtilis (esporas) Gram +	12
Corynebacterium diphtheriae Gram +	3.4
Escherichia coli Gram -	3.2
Mycobacterium tuberculosis Gram +	6.0
Pseudomona aeruginosa Gram -	5.5
Salmonella enteritidis Gram -	4.0
Salmonella typhi Gram -	2.1
Shigella dysenteriae Gram -	2.2
Staphilococcus aureus Gram +	5.0
Streptococcus faecalis Gram +	4.4
Virus	
Bacteriofago F	6.9
Virus de la influenza	3.6
Poliovirus	9.5
Rotavirus	11.3
Protozoarios	
Giardia lamblia	82
Crystosporidium parvum	80

Fuente: Cairns, 1991

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Todas las lámparas germicidas se basan en el mismo principio de funcionamiento: la radiación ultravioleta es generada por el paso de una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio ionizado mezclado con un gas noble. Debido a que los gases a presión atmosférica no son buenos conductores de electricidad se requiere un aparato especial llamado tubo de gas de descarga o lámpara germicida para presurizar. Este tubo es de vidrio y tiene dos electrodos sellados a sus paredes. Generalmente, estos tubos son instalados dentro de camisas de cuarzo para protegerlas de los efectos del agua.

El arco en una lámpara fluorescente comúnmente empleada para iluminación opera con el mismo principio y de hecho, también produce energía UV. La diferencia entre éstas y las de desinfección es que el bulbo de la lámpara fluorescente está cubierto con un compuesto de fósforo el cual convierte la luz UV en luz visible (Figura No 35).

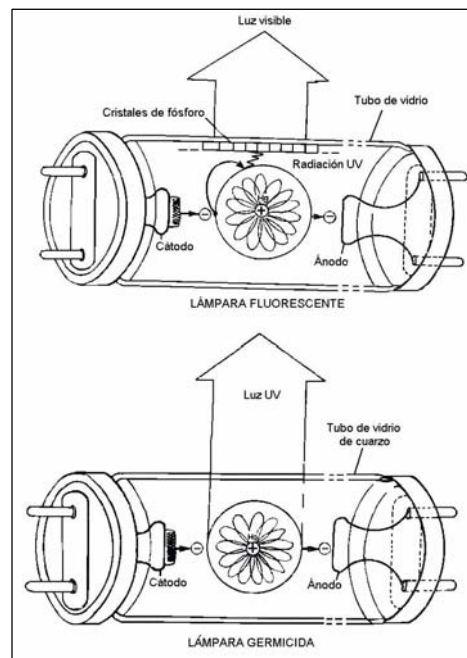


Figura No 35 Comparación entre una lámpara fluorescente y una germicida.

Existen diversas marcas y tecnologías en el mercado de lámparas UV, cuya comparación es difícil, lo que obliga a establecer claramente los requisitos de equipos y procesos dentro de las bases de licitación para permitir que determinado organismo operador pueda compararlos de manera clara y elegir el equipo que le permita lograr los niveles de desinfección requeridos a un precio razonable.

CAPITULO 3.-

SELECCIÓN DEL MÉTODO DE TRATAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE UNIDADES PROPUESTAS

3.1. MUESTREO LLEVADO A CABO EN LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.

El muestreo consiste en la selección de una porción del total del agua que va a ser estudiada, y que represente las características y calidad de la masa de la cual se tomó.

La toma de muestras, su frecuencia y localización, dependerá de los objetivos del estudio. Es necesario el muestreo adecuado del agua para obtener datos de sus características físicas, químicas y biológicas.

REQUISITOS DEL MUESTREO.

- Debe tener una adecuada planeación, efectuando el muestreo con la frecuencia suficiente para detectar variaciones en la calidad del agua, las cuales pueden llevarse a cabo en el transcurso del tiempo.
- Deben ser tomadas, conservadas y enviadas en frascos adecuados perfectamente esterilizados, cuando se requiera realizar el análisis bacteriológico.
- El volumen de agua tomado debe ser el suficiente para poder desarrollar un análisis correcto.
- La toma debe hacerse en los puntos más representativos del sistema.
- Se debe utilizar una metodología que evite la contaminación en el acto de extracción de la muestra.
- Debe ser enviada a laboratorio en forma y en un lapso de tiempo tal que, no se modifiquen sus características originales.
- Los detalles del muestreo deben de ser adecuadamente descritos en etiquetas apropiadas para evitar errores o confusiones.

TIPO DE MUESTRAS

Para el estudio de la calidad del agua se consideran dos tipos de muestras:

MUESTRA SIMPLE: Es aquella muestra individual representativa, tomada en un periodo corto, que únicamente nos da la concentración de constituyentes del agua, en el momento de la obtención.

MUESTRA COMPUESTA: Es el resultado de mezclar varias muestras simples de igual volumen en un intervalo de tiempo y en un mismo sitio, lo cual nos proporciona una indicación mas precisa del promedio de componentes del agua.

CRITERIO PARA LA TOMA DE MUESTRAS.

Para las aguas subterráneas (en pozos o manantiales) se debe bombear antes de tomar la muestra. Con pozos nuevos puede que sea necesario bombear algunas horas o hasta días, antes de poder obtener la primer muestra.

INDICACIONES PARA EL ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO.

PREPARACIÓN DE LOS FRASCOS DE MUESTREO.

Los envases para la muestra deben ser de vidrio, de boca ancha, con tapón o tapa roscada, polipropileno o bolsas estériles con cierre hermético, y capacidad de 125 o 250 ml. Todos los envases se deben esterilizar en estufa a 170 °C por un tiempo mínimo de 60 seg.

EN POZO PROFUNDO.

Para tomar la muestra se abre la válvula de una tubería de desfogue y se deja correr el agua por un mínimo de 3 minutos, se procede a limpiar la salida del agua con una torunda de algodón impregnada con una solución de hipoclorito de sodio, debe dejarse correr el agua hasta que el contenido de la tubería ha sido totalmente vaciado. Se quita simultáneamente el tapón del frasco y el papel de protección cerca del orificio de salida, manejándolos como unidad, evitando que contaminen y con el tapón hacia abajo. Se toma la muestra sin pérdida de tiempo y sin enjuagar el frasco. Se deja un espacio de agitación previa al análisis (aproximadamente 10% del volumen del frasco). Efectuada la toma de muestra, nuevamente se coloca el tapón y el papel de protección al frasco.

INDICACIONES PARA EL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO.

Los envases de plástico o vidrio de 2 lts. deben estar perfectamente lavados y enjuagados con agua destilada o desionizada y contar con tapones de cierre hermético. El volumen de la muestra se establece en la *Tabla No 8*.

EN BOMBA DE MANO, GRIFO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN O POZO PROFUNDO.

Debe dejarse correr el agua por tres minutos o hasta que la tubería ha sido totalmente vaciada. El muestreo se realiza evitando que se contamine el tapón, boca e interior del envase. Se cierra el envase y agita fuertemente para enjuagar, desechando esa agua. Se efectúa esta operación dos o tres veces procediendo después para tomar la muestra.

Tabla No 8.- Apéndice Normativo de la NOM-014-SSA1-1993.

DETERMINACIÓN.	ENVASE	VOLUMEN MÍNIMO(ml)	PRESERVACIÓN	DURACIÓN
Alcalinidad total	P,V	200	4 a 10°C en oscuridad	14 d
Arsénico	P,V	200	4 a 10°C en oscuridad	14 d
Bario	P,V	100	4 a 10°C en oscuridad	28 d
Boro	P	100	No requiere	180 d
Cianuros	P,V	1000	NaOH a Ph>12; 4 a 10°C en oscuridad	14 d
Cloruros	P,V	200	4 a 10°C en oscuridad	48 h
Color	P,V	100	4 a 10°C en oscuridad	48 d
Conductividad	P,V	200	4 a 10°C en oscuridad	28 d
Dureza total	P,V	100	4 a 10°C en oscuridad	14 d
Fenoles	P,V	300	H ₂ SO ₄ a Ph< y refrigerar de 4 a 10°C	28 d
Fluoruros	P,V	300	4 a 10°C	28 d
Fosfatos	V	100	Enjuagar con ácido nítrico 1:1 y de 4 a 13°C	48 h
Magnesio	P,V	100	Refrigerar de 4 a 10°C	28 d
Metales en general	P,V	1000	Enjuagar con HNO ₃ 1+1;adicionar HNO ₃ a Ph<2;para metales disueltos, filtrar inmediatamente y adicionar HNO ₃ a Ph<2	180 d
Nitratos	P,V	100	4 a 10°C en oscuridad	48 h
Nitritos	P,V	100	4 a 10°C en oscuridad	48 h
Nitrógeno amoniacal	P,V	500	H ₂ SO ₄ a Ph<2 y de 4 a 10°C y en oscuridad	28 d
Nitrógeno orgánico	P,V	500	H ₂ SO ₄ a Ph<2 y de 4 a 10°C y en oscuridad	28 d
Oxígeno consumido en medio ácido	P,V	300	4 a 10°C en oscuridad	48 d
Plaguicidas	S	1000	De 4 a 10°C; adicionar 1000mg/l de ácido ascórbico si se detecta cloro residual	7 d; (si se extraen los plaguicidas con los solventes dura hasta 40 días)
Sodio	P,V	100	4 a 10°C en oscuridad	28 d
Sólidos	P,V	1000	4 a 10°C en oscuridad	7 d
Sulfatos	P,V	100	4 a 10°C en oscuridad	28 d
Sustancias activas al azul de metileno	P,V	200	4 a 10°C en oscuridad	48 h
Turbiedad	P,V	100	4 a 10°C en oscuridad	48 h

P: Plástico.

S: Vidrio enjuagado con solventes orgánicos; interior de la tapa del envase recubierta con teflón.

V: Vidrio.

ETIQUETADO Y REGISTRO DE CAMPO.

Se deben tomar las precauciones necesarias para que en cualquier momento sea posible identificar las muestras. Se deben emplear etiquetas pegadas o colgadas o enumerar los frascos anotando toda la información en una hoja de registro.

Las etiquetas deben contener la siguiente información:

- Cuerpo receptor en estudio.
- Número y nombre de la estación.
- Número de la muestra.
- Fecha y Hora de muestreo.
- Nombre y firma de la persona que efectúa el muestreo.
- Análisis por efectuar.

Se debe utilizar papel y tinta indelebles.

Se debe llevar una hoja de registro con la información que permite identificar el origen de la muestra y todos los datos que en un momento dado permiten repetir el muestreo.

La hoja de muestreo debe contener la siguiente información:

- Los datos citados en el etiquetado.
- Resultados de las pruebas de campo practicadas en la zona estudiada sobre diferentes planos de la misma.
- Temperatura ambiente, Temperatura del agua, pH y Gasto.
- Localización de las estaciones de muestreo.
- Descripción detallada de las estaciones de muestreo, de manera que cualquier persona pueda tomar otras muestras en el mismo lugar.
- Descripción cualitativa del olor y el color de las aguas muestreadas.

3.2. CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS CERCANAS AL SITIO EN ESTUDIO.

Tabla N° 9.-Calidad de las aguas subterráneas de pozos cercanos al sitio en estudio.

PARÁMETRO	Unidades	Máximo permisible NOM-127-SSA 1-1994	SANTIAGO TLATELOLCO	COBRE Y CANANEA		CD. DEPORTIVA 1	
			02/06/2003	16/06/2003	18/04/2006	01/08/2002	14/02/2005
<i>COLOR</i>	(U Pt/ Co)	20	25	30	7.5	12.5	500
<i>CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA</i>	(u /cm)	1500	686	505	404	363	414
<i>pH</i>	(U /pH)	6.5 - 8.5	7.9	7.64	8.16	7.8	7.86
<i>SÓLIDOS TOTALES</i>	(mg /l)	1000	472	380	310	272	-
<i>ALCALINIDAD TOTAL</i>	(mg /l)	400	213.9	199.8	185	150.2	155.2
<i>CLORO</i>	(mg /l)	250	49.7	26.1	15	18.7	23.1
<i>NITRÓGENO AMONICAL</i>	(mg /l)	0.5	0.1	0.1	0.1	0.46	0.47
<i>SULFATOS</i>	(mg /l)	400	32.74	8.68	<4.0	4	9.04
<i>CADMIO (Cd)</i>	(mg /l)	30	28.1	20.6	14.3	13	18.75
<i>COBRE (Cu)</i>	(mg /l)	2	0.026	0.026	0.028	0.026	0.04
<i>CROMO total</i>	(mg /l)	0.05	0.056	0.056	0.028	0.056	0.028
<i>HIERRO (Fe)</i>	(mg /l)	0.3	0.055	0.514	0.37	0.213	60.7
<i>MANGANESO (Mn)</i>	(mg /l)	0.15	0.052	0.078	0.141	0.082	0.249
<i>PLOMO (Pb)</i>	(mg /l)	0.025	-	-	0.00117	0.00059	0.00163
<i>COLIFORMES TOTALES</i>	(col /100 ml)	2	100	100	0	1	70
<i>COLIFORMES FECALES</i>	(col /100 ml)	0	1	1	0	1	-
<i>TURBIEDAD</i>	(UNT)	5	1.8	4.4	-	0.57	212
<i>NITRATOS</i>	(mg /l)	10	8.32	0.66	-	0.1	0.13
<i>NITRITOS</i>	(mg /l)	1	0.764	0.011	-	0.011	0.018
<i>ALUMINIO</i>	(mg /l)	0.2	0.255	0.255	-	-	1.75
<i>BARIO (Ba)</i>	(mg /l)	0.7	-	-	-	0.049	0.57

Fuente: Sistema de aguas de la ciudad de México, 2006

De acuerdo a lo visto en la *Tabla N° 9* nos podemos percatar de que los pozos cercanos al sitio en estudio, cuentan con problemas de:

- Color
- Cromo Total
- Hierro
- Manganeso
- Coliformes totales
- Coliformes fecales
- Turbiedad
- Aluminio

Ya que rebasa los límites establecidos por las normas de calidad para agua potable.

3.3. UNIDADES DE POTABILIZACIÓN.

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD
<i>Cianuros totales</i>	0.004	mg/l
<i>Color</i>	<5	U.Pt-Co
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>	0.4	mg/l
<i>Sólidos Disueltos Totales</i>	1993	mg/l
<i>Olor</i>	Inodora	N.U.O.
<i>Turbiedad</i>	17.72	UTN
<i>Sabor</i>	ND	N.U.S.
<i>pH</i>	6.48	U/ pH
<i>Sodio Total</i>	292.2	mg/l
<i>Fierro Total</i>	5.816	mg/l
<i>Cloruros</i>	557.3	mg/l
<i>Dureza total</i>	1031	mg/l
<i>Coliformes Fecales</i>	ND	NMP / 100 ml
<i>Coliformes Totales</i>	1.1	NMP / 100 ml

COMPARACIONES DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA A TRATAR CON LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994.

PARÁMETRO	NOM-127-SSA1-1994	AGUA A TRATAR	OBSERVACIONES
<i>Cianuros totales</i>	0.07	0.004	Si cumple
<i>Color</i>	20	<5	Si cumple
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>	0.5	0.4	Si cumple
<i>Sólidos Disueltos Totales</i>	1000	1993	No cumple
<i>Olor</i>	Inodora	Inodora	Si cumple
<i>Turbiedad</i>	5	17.72	No cumple
<i>Sabor</i>	Insípido	ND	Si cumple
<i>pH</i>	6.5 - 8.5	6.48	Si cumple
<i>Sodio Total</i>	200	292.2	No cumple
<i>Fierro Total</i>	0.30	5.816	No cumple
<i>Cloruros</i>	250	557.3	No cumple
<i>Dureza total</i>	500	1031	No cumple
<i>Coliformes Fecales</i>	No Detectable	ND	Si cumple
<i>Coliformes Totales</i>	No detectable	1.1	No cumple

DETERMINACIÓN DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO.

De acuerdo con la comparación el agua a tratar rebasa los parámetros de Sólidos disueltos Totales, Turbiedad, Sodio, Fierro, Cloruros, Dureza y de Coliformes Totales.

La presencia de dureza y el bajo contenido de color nos define que el agua en cuestión es de tipo subterráneo.

TREN DE TRATAMIENTO "A":

Aireación.-----*Sodio Total, Fierro Total y Cloruros.*
Precipitación Química.-----*Dureza Total.*
Sedimentación.-----*Turbiedad.*
Ósmosis Inversa-----*Sólidos Disueltos Totales.*
Desinfección-----*Coliformes Totales*

TREN DE TRATAMIENTO "B":

Filtración-----*Sodio Total, Fierro Total, Cloruros, Dureza*
Ósmosis Inversa-----*Sólidos disueltos Totales, Turbiedad*
Desinfección-----*Coliformes Totales*

DESCRIPCIÓN DE LOS TRENES DE TRATAMIENTO.

TREN DE TRATAMIENTO "A":

Aireación

Se propone un aireador por gravedad, de varios descensos de escalera o tipo charolas múltiples perforadas con lechos de pirolusita o coque, los cuales nos ayudarán a oxidar el Hierro y Manganeseo, y con ello liberar el dióxido disuelto en el agua e incrementar el oxígeno disuelto.

Precipitación química

Mediante este proceso solo utilizaremos un tanque en el cual agregaremos cal y carbonato sódico NaCO_3 para eliminar la dureza y posteriormente poder pasar a la fase de floculación y poder ser eliminada en la sedimentación.

Sedimentación

Se utilizarán dos tanques rectangulares con mámparas para guiar el flujo en forma vertical y colectar el sobrenadante en la periferia; y rastras montadas en cadenas sin fin que transportarán los lodos hasta una tolva para recolección de lodos y la limpieza será hidráulica. La entrada estará construida por mámparas para generar una velocidad de sedimentación adecuada.

Ósmosis Inversa

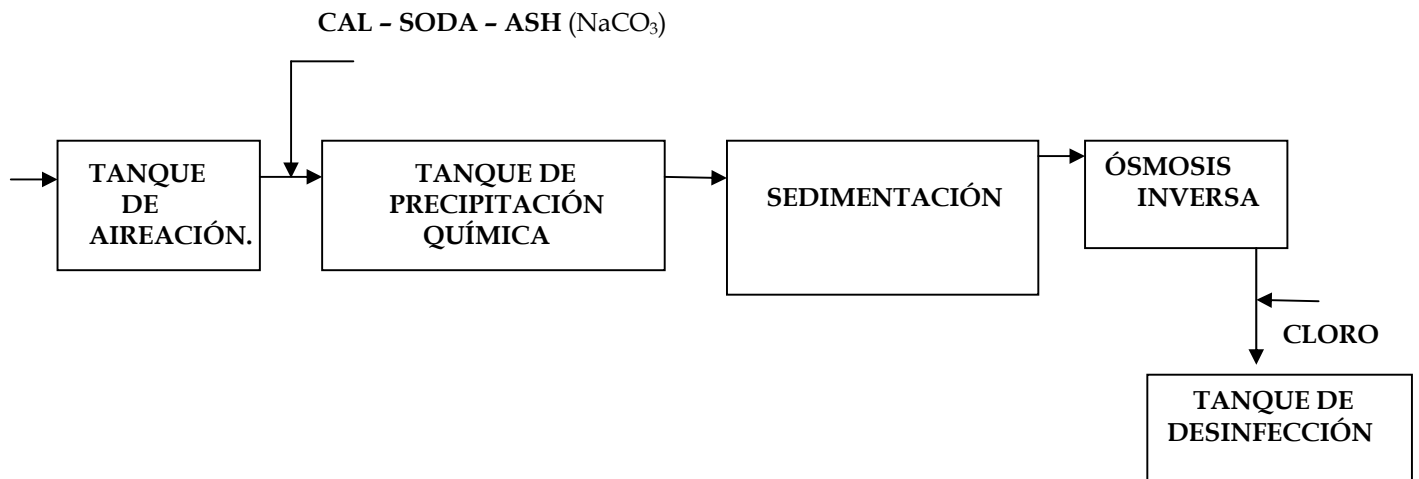
Para el equipo de ósmosis inversa se tiene que por su complejidad se debe adquirir en el extranjero; solo hay que proporcionar algunos datos como son: el gasto, la calidad del agua a tratar y el pretratamiento que se le esta dando; y con ello el proveedor dará resultado del equipo mas conveniente para utilizar

Desinfección

Por economía y operación se utilizará un método químico con el uso del cloro. El principal objetivo es la remoción bacteriológica así como evitar la proliferación de microorganismos. En este caso se adicionará el cloro para garantizar la desinfección del agua con la eliminación de los organismos que estén presentes, también para mantener la calidad del agua potable después de salir de la planta con la adición del cloro residual.

El procedimiento para adicionar el cloro se efectúa mediante un tanque de contacto con mampáras fijas de concreto, donde se le adicionará en forma líquida el cloro durante un tiempo de contacto de mínimo de 20 min.

TREN DE TRATAMIENTO "A".



TREN DE TRATAMIENTO "B"

Filtración

Se empleará un filtro rápido con lecho de arena para retener sólidos. El filtro estará constituido por:

1. Estanque.

Será de concreto armado y sus dimensiones se determinarán de acuerdo al gasto de agua que maneje la planta considerando que la altura del agua sobre el lecho filtrante deberá mantenerse constante durante el proceso de filtración (1.20 m como mínimo). Su función es contener las distintas capas del filtro.

2. Capa d antracita.

Su tamaño es similar al de la arena de los filtros, la andracita es un mineral el cual va atender la función de estabilizar las presiones en el momento en que se inicie el retrolavado y no se pierda la arena durante este.

3. Capa de arena sílica.

Tendrá de 0.60 a 0.65 m de espesor y un tamaño efectivo de 0.40 a 0.50 m y un coeficiente de uniformidad interior de 1.65 m; su función será la de retener partículas en suspensión y algunos microorganismos presentes en el agua.

4. Capa de grava para soporte.

Tendrá una altura de 0.30 a 0.40 m y de granulometría creciente hacia abajo, la cual tiene por objeto distribuir uniformemente el agua de lavado y prevenir que la arena pase a través del sistema de drenaje durante el proceso de filtración.

Ósmosis Inversa

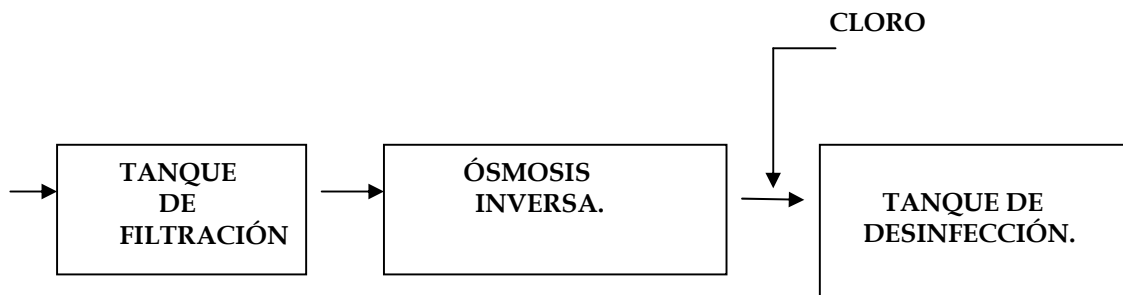
Para el equipo de ósmosis inversa se tiene que por su complejidad se debe adquirir en el extranjero; solo hay que proporcionar algunos datos como son: el gasto, la calidad del agua a tratar y el pretratamiento que se le esta dando; y con ello el proveedor dará resultado del equipo mas conveniente para utilizar

Desinfección

La desinfección será mediante el uso del hipoclorito de sodio, el cual será suministrado por medio de un inyector, utilizaremos un tanque de contacto en forma rectangular dividido por mamparas. El tiempo de contacto considerado para agua potable es de 10 a 15 minutos y la demanda de cloro para desinfección dado por CNA es de 3 - 10 mg/l.

Se considera el uso del cloro, porque este tiene el poder residual, alto grado de eficiencia, fácil manejabilidad y bajo costo comparado con cualquier otro método de desinfección.

TREN DE TRATAMIENTO "B".



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los acuíferos son la principal fuente de abastecimiento de agua en la zona Metropolitana de la Ciudad de México; la lluvia desempeña un papel importante en la recarga de los mantos ya que, al escurrir por la superficie se infiltra directamente en el subsuelo hasta llegar a los acuíferos.

Actualmente el volumen de agua que extraemos de los acuíferos es mayor que el que se recupera naturalmente por la lluvia, cada segundo se extrae del subsuelo 45 metros cúbicos y sólo se reponen 25 metros cúbicos, lo cual genera una sobreexplotación del acuífero y provoca hundimientos anuales de 15 a 25 cm alrededor del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

La sobreexplotación de los mantos acuíferos que abastecen al Valle de México compromete la disponibilidad de agua para la capital del País en el futuro por lo que la profundidad de los pozos de extracción del DF ha aumentado paulatinamente, además entre más profundo sea el pozo más antigua es el agua que se obtiene y esto la encarece ya que tiene que pasar por procesos más sofisticados para su potabilización.

Además de la problemática por la extracción excesiva del agua, también existe la problemática por la contaminación de la misma y esto ha llevado a tomar medidas, como la toma de diversos tipos de muestra en forma constante por parte de organizaciones y dependencias encargadas de la salud en nuestro país, creando a su vez normas de calidad del agua y parámetros permisibles con la finalidad de evitar posibles enfermedades.

Los sistemas de abastecimiento no solo suministran agua para consumo humano; sino también la que se requiere para usos domésticos, industriales y servicios públicos.

La finalidad de la planta potabilizadora es poder abastecer la demanda para la nueva Terminal 2 (Actualmente se encuentra en construcción); así mismo hay otras áreas dentro del aeropuerto que no contaban con red de agua potable como son: la UETAAM (Unidad Especializada de Transporte Aéreo del Alto Mando), Plataforma de Aviación Comercial, Plataforma de Aerounión, Plataforma de Helicópteros, Plataforma de Aeroméxico y Centro AICM, además de proporcionar parte del caudal a las comunidades aledañas que no contaban con el suministro suficiente de este recurso siendo el Sistema de Aguas de la Ciudad de México operador de la misma.

Lo que se busca con el presente trabajo es aprovechar el agua existente que no es posible utilizar sin un tratamiento adecuado.

Para lograr la potabilización del agua del sitio en estudio se plantearon dos posibles trenes de tratamiento; de los cuales el más completo es el tren de tratamiento "A".

Las razones primordiales para elegir este tren de tratamiento son:

- De acuerdo al requerimiento de espacios se limita la extensión de la planta y los procesos aplicables.
- Entre más sofisticado es el proceso mayor es el costo de la obra.

Para obtener agua de buena calidad y libre de ciertos compuestos que se encuentran en la misma, debemos conocer su origen, dependiendo de esto podemos contar con el criterio para el diseño de una planta potabilizadora.

No todas las aguas a tratar tendrán las mismas características, se debe analizar con mucho cuidado cada tipo de agua para la selección del tren de tratamiento adecuado. La operación de una planta potabilizadora debe garantizar en todo momento agua de calidad, y que cumpla con las especificaciones, además se debe mantener en buenas condiciones.

RECOMENDACIONES

El crecimiento poblacional y la actividad económica generan cuantiosas demandas adicionales de agua, por lo que de continuar con ese escenario las fuentes actuales de abastecimiento serían insuficientes, por ello habría que propiciar el equilibrio ecológico a través de lineamientos propuestos, por ejemplo:

1. Manejo eficiente del agua en zonas urbanas: Promover la capacitación y aprovechamiento de las aguas pluviales, mediante apoyos financieros a los municipio, organismos operadores y usuarios.
2. Reducción de fugas: Se estima que actualmente el porcentaje de fugas es del 38%; esto significa que aproximadamente se pierde un volumen anual del 25.5 m³/s, de tal manera de que si se redujeran mínimo en 10% se podrían recuperar 6.5 m³/s, para ello se requiere:
 - Instrumentar programas de sectorización de las redes de agua potable para controlar presiones.
 - Reparar selectivamente las tuberías y conexiones que mas pérdidas tengan.
 - Coordinar los sectores de servicios públicos para no volver a dañar las tuberías.
3. Manejo eficiente del agua subterránea.- Actualizar la información referente a los pozos, estudios geohidrológicos, registros relativos al comportamiento de la calidad y cantidad de agua, mediante un monitoreo continuo.

Continuar con la operación de los sistemas de agua que provienen de fuentes externas y que complementan los requerimientos de agua sin sobreexplotar los acuíferos.

4. Intensificar el rehúso y recarga de mantos acuíferos: intercambiar los caudales que se extraen del subsuelo para uso agrícola e industrial, por agua residual tratada conforme a las normas sanitarias y procedimientos de control y calidad para favorecer la recuperación de los acuíferos. Con ello se lograría liberar volúmenes de agua para el consumo humano.
5. Abastecimiento de agua.- Contar con estudios actuales para apoyar las actividades de planeación de proyectos futuros de importación de cuencas externas.
6. Vigilar el cumplimiento de la normatividad vigente.- Establecer una normatividad referente al uso y calidad del agua, de tal manera que no se permita utilizar agua de menor calidad que la requerida.

-
7. Otra acción, es el tratamiento y el reciclaje del agua residual, mediante el cual se puede reciclar hasta el 60% del agua que se consume en los domicilios y devolverla a los sanitarios o a los jardines, como en otros países.
 8. Promoción de una cultura del agua.- Diseñar y promover campañas de comunicación para mostrar la grave situación del agua y la necesidad de frenar la degradación del medio ambiente

La palabra clave, que refleja la situación actual del agua y sus perspectivas futuras a nivel global, es la escasez, esta escasez es consecuencia de que el crecimiento de la economía mundial se haya multiplicado por siete en los últimos cincuenta años

ANEXO

TABLAS.

TABLA N° 1	Principales Diferencias entre las Aguas Superficiales y las Aguas Subterráneas.
TABLA N° 2	Estándares para fuentes de Aguas Crudas.
TABLA N° 3	Profundidad de medios filtrantes.
TABLA N° 4	Propiedades típicas de medios filtrantes para filtros de lecho granular.
TABLA N° 5	Dosis de cloro aplicada en plantas potabilizadoras.
TABLA N° 6	Características de los generadores de ozono.
TABLA N° 7	Comparación de la sensibilidad de diferentes microorganismos a la desinfección con luz UV.
TABLA N° 8	Apéndice normativo de la NOM-014-SSA1-1994.
TABLA N° 9	Calidad de las Aguas subterráneas de pozos cercanos al sitio en estudio.

CUADROS.

- CUADRO N° 1** Procesos de purificación del agua.
- CUADRO N° 2** Límites permisibles de las características biológicas.
- CUADRO N° 3** Límites permisibles de las características físicas y organolépticas.
- CUADRO N° 4** Límites permisibles de las características químicas.
- CUADRO N° 5** Límites permisibles de las características radioactivas.
- CUADRO N° 6** Cumplimiento gradual para el As.
- CUADRO N° 7** Tratamientos para la potabilización del agua según los contaminantes de acuerdo con la modificación a la NOM-127-SSA1-1994.
- CUADRO N° 8** Resumen de los efectos tóxicos del cromo.
- CUADRO N° 9** Características típicas de los policloruros de Aluminio.

FIGURAS.

- FIGURA N° 1** Acuíferos confinados y no confinados.
FIGURA N° 2 Tipos de carbón activado.
FIGURA N° 3 Aireadores típicos de bandejas.
FIGURA N° 4 Aireador de cascada.
FIGURA N° 5 Aireador tipo escalera
FIGURA N° 6 Aireador manual para remoción de hierro y manganeso.
FIGURA N° 7 Dosificador Vibratorio.
FIGURA N° 8 Floculador-Clarificador que proporciona mezcla rápida, floculación y sedimentación en un solo tanque.
- FIGURA N° 9** Tipos de Floculadores.
FIGURA N° 10 Floculadores de eje horizontal.
FIGURA N° 11 Floculadores de eje vertical.
FIGURA N° 12 Floculador hidráulico de flujo horizontal.
FIGURA N° 13 Floculador hidráulico de flujo vertical.
FIGURA N° 14 Tanque de sedimentación.
FIGURA N° 15 Corte de un sedimentador rectangular.
FIGURA N° 16 Corte de un sedimentador circular.
FIGURA N° 17 Tanque de presedimentación.
FIGURA N° 18 Corte de un filtro.
FIGURA N° 19 Filtro granular profundo.
FIGURA N° 20 Evolución de la pérdida de carga a lo largo del lecho del filtro.
FIGURA N° 21 Filtro a gravedad con medio dual.
FIGURA N° 22 Sistema de bajo dren para lavado del medio granular con aire y agua.
- FIGURA N° 23** Diagrama de flujo de una planta de Ablandamiento en dos Etapas.
- FIGURA N° 24** Esquema del principio de electrodiálisis.
FIGURA N° 25 Ilustración del principio de Ósmosis inversa.
FIGURA N° 26 Módulos espirales para ósmosis inversa.
FIGURA N° 27 Equipos para el proceso de ósmosis inversa.
FIGURA N° 28 Equipo para el proceso de Nanofiltración
FIGURA N° 29 Equipo para el proceso de Ultrafiltración
FIGURA N° 30 Equipo para el proceso de Microfiltración
FIGURA N° 31 Dosificador de hipoclorito de diafragma.
FIGURA N° 32 Diafragma de flujo de un clorador típico.
FIGURA N° 33 Curva de coloración a punto de quiebre.
FIGURA N° 34 Efectos de las partículas en la radiación de la luz UV.
FIGURA N° 35 Comparación entre una lámpara fluorescente y una germicida.

ANEXO A.1

MODIFICACION A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION

JAVIER CASTELLANOS COUTIÑO, Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en los artículos 39 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 4o. y 69-H de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo; 13, apartado A) fracción I, 118, fracción II y 119, fracción II de la Ley General de Salud; 41, 43, 45, 46, fracción II, y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 28 y 34 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 214, fracción IV y 225 del Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios, y 7, fracciones V y XIX y 25, fracción IV del Reglamento Interior de la Secretaría de Salud, y

1 CONSIDERANDO

- Que con fecha 16 de diciembre de 1999, en cumplimiento del acuerdo del Comité y de lo previsto en el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el proyecto de la presente Norma Oficial Mexicana a efecto que dentro de los sesenta días naturales posteriores a dicha publicación, los interesados presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario.
- Que con fecha 20 de junio de 2000, fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación las respuestas a los comentarios recibidos por el mencionado Comité, en términos del artículo 47 fracción III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.
- Que en atención a las anteriores consideraciones, contando con la aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, se expide la siguiente:

MODIFICACION A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION

INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor.

Por tales razones la Secretaría de Salud, propone la modificación a la presente Norma Oficial Mexicana, con la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales.

1. Objetivo y campo de aplicación

1.1 Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.

1.2 Esta Norma Oficial Mexicana es aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados y a cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

Referencias

2.1 NOM-008-SCF1-1993 Sistema General de Unidades de Medida.

2.2 NOM-012-SSA1-1993 Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados.

2.3 NOM-013-SSA1-1993 Requisitos sanitarios que debe cumplir la cisterna de un vehículo para el transporte y distribución de agua para uso y consumo.

2.4 NOM-014-SSA1-1993 Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano, en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.

2.5 NOM-112-SSA1-1994 Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.

2.6 NOM-117-SSA1-1994 Bienes y Servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.

Definiciones

Para los efectos de esta Norma Oficial Mexicana se entiende por:

3.1 Ablandamiento: proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua.

3.2 Adsorción: remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución.

3.3 Agua para uso y consumo humano: agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud. También se denomina como agua potable.

3.4 Características microbiológicas: debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y *Escherichia coli* o coliformes fecales.

3.5 Características físicas y organolépticas: las que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos; el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio.

3.6 Características químicas: las debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.

3.7 Características radiactivas: aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.

3.8 Coagulación química: adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.

3.9 Contingencia: situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa, que ponga en riesgo la salud humana.

3.10 Desinfección: destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

3.11 Evaporación: separación del agua de los sólidos disueltos, utilizando calor como agente de separación, condensando finalmente el agua para su aprovechamiento.

3.12 Filtración: remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.

3.13 Floculación: aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos.

3.14 Intercambio iónico: proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.

3.15 Límite permisible: concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

3.16 Neutralización: adición de sustancias básicas o ácidas al agua para obtener un pH neutro.

3.16.1 Estabilización: obtención de determinada concentración de sales y pH del agua, para evitar la incrustación o corrosión de los materiales con que se fabrican los elementos que la conducen o contienen.

3.17 Osmosis inversa: proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño.

3.18 Oxidación: pérdida de electrones de un elemento, ión o compuesto por la acción del oxígeno u otro agente oxidante.

3.19 Potabilización: conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua en los sistemas de abastecimiento públicos o privados, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano.

3.20 Sedimentación: proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas en el agua, por efecto gravitacional.

3.21 Sistema de abastecimiento de agua: conjunto de elementos integrados por las obras hidráulicas de captación, conducción, potabilización, desinfección, almacenamiento o regulación y distribución.

Límites permisibles de calidad del agua

4.1 Límites permisibles de características microbiológicas.

4.1.1 El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla A.1.1.

Tabla No. A.1.1

Característica	Límite permisible
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Ausencia o no detectables

4.1.2 Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes podrán establecer los agentes biológicos nocivos a la salud que se deban investigar.

4.1.3 Las unidades de medida deberán reportarse de acuerdo a la metodología empleada.

4.1.4 El agua abastecida por el sistema de distribución no debe contener *E. coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes en ninguna muestra de 100 ml. Los organismos coliformes totales no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml; en sistemas de abastecimiento de localidades con una población mayor de 50 000 habitantes; estos organismos deberán estar ausentes en el 95% de las muestras tomadas en un mismo sitio de la red de distribución, durante un periodo de doce meses de un mismo año.

4.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

4.2.1 Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla No. A.1.2.

Tabla No. A.1.2

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

4.3 Límites permisibles de características químicas

4.3.1 El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla A.1.3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

Tabla No. A.1.3

Característica	Límite permisible
Aluminio	0.20
Arsénico (Nota 2)	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3
Fierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:	
Benceno	10
Etilbenceno	300
Tolueno	700
Xileno (tres isómeros)	500
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10
Nitritos (como N)	1.00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.20
DDT (total de isómeros)	1
Gamma-HCH (lindano)	2
Hexaclorobenceno	1
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20
2,4 - D	30

Plomo	0.01
Sodio	200
Sólidos disueltos totales	1000
Sulfatos (como SO ₄ =)	400
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Yodo residual libre	0.2-0.5
Zinc	5

Nota 1. Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

Nota 2. El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente, de conformidad con la siguiente tabla de cumplimiento gradual:

Tabla de cumplimiento gradual

Límite permisible mg/l	Año
0.045	2001
0.040	2002
0.035	2003
0.030	2004
0.025	2005

4.3.2 En caso de que en el sistema de abastecimiento se utilicen para la desinfección del agua, métodos que no incluyan cloro o sus derivados, la autoridad sanitaria determinará los casos en que adicionalmente deberá dosificarse cloro al agua distribuida, para mantener la concentración de cloro residual libre dentro del límite permisible establecido en la Tabla No. A.1.3 de esta Norma.

4.4 Límites permisibles de características radiactivas.

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla A.1. 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

Tabla No. A.1.4

Característica	Límite permisible Bq/L
Radiactividad alfa global	0.56
Radiactividad beta global	1.85

Tratamientos para la potabilización del agua

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe justificarse con estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes microbiológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua listados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4 de esta Norma.

5.1 Contaminación microbiológica.

5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoarios y virus. Deben desinfectarse con cloro, compuestos de cloro, yodo¹, ozono, luz ultravioleta; plata iónica o coloidal; coagulación-sedimentación-filtración; filtración en múltiples etapas.

5.2 Características físicas y organolépticas.

5.2.1 Color, olor, sabor y turbiedad.- Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado.

5.3 Constituyentes químicos.

5.3.1 Arsénico. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.2 Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.3 Cloruros. Intercambio iónico, ósmosis inversa o evaporación.

5.3.4 Dureza. Ablandamiento químico o intercambio iónico.

5.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos. Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.

5.3.6 Fierro y/o manganeso. Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.7 Fluoruros. Alúmina activada, carbón de hueso u ósmosis inversa.

5.3.8 Hidrocarburos aromáticos. Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.

5.3.9 Mercurio. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado granular u ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l. Adsorción en carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 microgramos/l.

5.3.10 Nitratos y nitritos. Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración.

5.3.11 Nitrógeno amoniacal. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.

5.3.12 pH (potencial de hidrógeno). Neutralización.

5.3.13 Plaguicidas. Adsorción en carbón activado granular.

5.3.14 Sodio. Intercambio iónico.

5.3.15 Sólidos disueltos totales. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.

5.3.16 Sulfatos. Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.17 Sustancias activas al azul de metileno. Adsorción en carbón activado.

5.3.18 Trihalometanos. Oxidación con aireación u ozono y adsorción en carbón activado granular.

5.3.19 Zinc. Evaporación o intercambio iónico.

5.4 En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias especificadas o no especificadas en el apartado 4, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas, involucrados en la contingencia, deben coordinarse con la autoridad sanitaria competente, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

Métodos de prueba

La selección de los métodos de prueba para la determinación de los parámetros definidos en esta Norma, es responsabilidad de los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, y serán aprobados por la Secretaría de Salud a través del área correspondiente. Deben establecerse en un Programa de Control de Calidad Analítica del Agua, y estar a disposición de la autoridad competente, cuando ésta lo solicite, para su evaluación correspondiente.

Concordancia con normas internacionales y nacionales

Esta Norma Oficial Mexicana no es equivalente a ninguna norma internacional.

Observancia de la Norma

La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, el Gobierno del Distrito Federal, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

Vigencia

La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor a los noventa días de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F., a 20 de octubre de 2000.- El Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, Javier Castellanos Coutiño.- Rúbrica.

ANEXO A.2

PRUEBAS DE TRATABILIDAD

Concluida la caracterización del agua e incluso durante la parte final de este proceso se pueden realizar las pruebas de tratabilidad. Éstas consisten en someter el agua a los procesos y operaciones que se supone puedan eliminar o reducir los contaminantes que exceden la norma.

Conviene no eliminar procesos y efectuar una amplia comparación en laboratorio para ahorrar durante la construcción y operación de la planta potabilizadora.

Las pruebas de tratabilidad son independientes de la aplicación de una determinada tecnología o marca ya que éstas sirven para definir si un determinado mecanismo de remoción aplica para los fines deseados y no tiene nada que ver con la forma ingenieril en la cual el mecanismo es puesto en práctica.

En la Tabla No. A.2.1 se relacionan los principales procesos de tratamiento empleados para potabilizar con las pruebas de tratabilidad por desarrollar en laboratorio.

Para ayudar en este proceso, se incluye la Tabla No A.2.2 la cual proporciona una idea aproximada del costo y tiempo que toma realizar las pruebas de tratabilidad, así como el nivel técnico del laboratorio que debe realizarlas, se describe con detalle la realización de la prueba de tratabilidad para los procesos físico-químicos, conocida con el nombre de "Prueba de Jarras".

Tabla No. A.2.1 Objetivo del tratamiento y pruebas de tratabilidad.

Objetivo	Proceso/ Tecnología	Mecanismo de Remoción	Prueba de tratabilidad
Remoción de coliformes fecales y totales	Cloración	Oxidación	Determinación de la dosis de cloro y del tiempo de contacto
	Ozonización	Oxidación	Determinación de la dosis de ozono
	Luz Ultravioleta	Recombinación del DNA	Determinación de la dosis de luz en W/s·cm ²
Remoción de color, olor y sabor	Filtración en carbón activado	Adsorción	Determinación de isotermas
	Ozonización	Oxidación	Determinación de dosis y tiempo de contacto
Remoción de sólidos suspendidos y de turbiedad	Filtración ascendente, descendente, en arena, multicapa, etc. Microcribas	Filtración	Pruebas en filtro piloto para determinar la pérdida de carga máxima admitida, la distribución del perfil de pérdida de carga, la profundidad recomendable del lecho, la duración de la corrida y las condiciones de lavado.
	Coaguladores de lecho de lodos, coaguladores convencionales. Flotación con aire disuelto.	Coagulación-floculación	Pruebas de jarras para determinar dosis y tiempos óptimos tanto para el coagulante como el floculante
	Sedimentación convencional Sedimentación de alta tasa.	Aceleración debida a la gravedad	Es poco común realizar pruebas de tratabilidad para este proceso, en caso de hacerlo se usan los estudios en columna de sedimentación para determinar la carga másica aceptable así como la carga hidráulica recomendable en combinación con la altura crítica de sedimentación.
Remoción de dureza	Ablandamiento con cal, sosa y cal. Remoción selectiva de carbonato, tratamiento en partes	Precipitación	Determinación de dosis en pruebas de jarras
	Intercambio iónico Desmineralización	Adsorción	Isotermas

Objetivo	Proceso/ Tecnología	Mecanismo de Remoción	Prueba de tratabilidad
	Filtración con zeolitas	Adsorción	Isotermas
Remoción de Hierro y Manganeseo	Aireación	Oxidación	Determinación de la tasa de aplicación de aire
	Filtración en zeolitas. Intercambio iónico	Adsorción y oxidación	Determinación de las isotermas de Langmuir o de Freundlich para definir la cantidad de zeolitas por emplear
	Ablandamiento	Precipitación	Determinación de dosis para ablandar y remover Fe y Mn
Ajuste de pH	Acidificación o basificación	Neutralización	Curvas de neutralización
Remoción de sólidos disueltos	Osmosis inversa	Filtración en superficie selectiva	Determinar el Índice de filtración en membranas, determinación de la membrana óptima en cuanto a la composición y durabilidad
	Ultra filtración	Filtración en superficies activas	Determinación del índice de filtrabilidad, rechazo y tipo de membrana
	Electrodialisis	Separación iónica	Comportamiento de los iones al pasar una corriente eléctrica, y capacidad eléctrica de la solución.
Remoción de compuestos orgánicos	Coagulación floculación	Coagulación	Pruebas de jarras
	Ozonización	Oxidación	Dosis y tiempo de contacto
	Carbón activado	Adsorción	Isotermas de Freundlich o Langmuir
Remoción de Metales	Precipitación	Precipitación	Prueba de jarras o precipitación
Remoción de Trihalometanos	Carbón activado	Adsorción	Isotermas de Langmuir o de Freundlich
Control de la Corrosión	Ajuste de pH	Neutralización	Pruebas de neutralización
	Adición de CO ₂	Estabilización	Cantidad de CO ₂ transmitido y tasa para estabilizar la solución
	Protección catódica	Estabilización eléctrica	Comportamiento en laboratorio del Fe y su deposición en electrodos

Objetivo	Proceso/ Tecnología	Mecanismo de Remoción	Prueba de tratabilidad
Remoción de gases	Aireación	Desorción	Pruebas de desorción en columnas para determinar la tasa de aireación

Tabla No. A.2.2 Duración de las pruebas de tratabilidad y costo aproximado

Proceso/ Tecnología	Prueba de tratabilidad	Nivel del laboratorio	Duración	Costo *
Cloración	Determinación de la dosis de cloro y del tiempo de contacto	Medio	1 a 2 semanas	\$5,000 a \$10,000
Ozonización	Determinación de la dosis de ozono para desinfectar	Alto	1 a 2 semanas	\$10,000 a \$30,000
	Determinación de dosis de ozono para eliminar color, olor y sabor	Alto	3 a 5 semanas	\$20,000 a \$100,000 según se trate de color, olor o sabor
	Para remoción de compuestos orgánicos	Alto	4 a 10 semanas	\$50,000 a \$250,000, según tipo de compuestos involucrados
Luz ultravioleta	Determinación de la dosis de luz en W/s·cm	Alto	1 a 2 semanas	\$10,000 a \$20,000
Filtración ascendente, descendente, en arena, multicapa, etc.	Pruebas en filtro piloto para determinar pérdida de carga máxima, distribución del perfil de la pérdida de carga, profundidad recomendable del lecho, duración de las corridas y condiciones de lavado	Medio	1 a 2 meses	\$50,000 a \$100,000, según sean el número de medios que se desee probar
Coaguladores de lecho de lodos, coaguladores convencionales	Para remoción de turbiedad y sólidos suspendidos realizar pruebas de jarras para determinar dosis, tiempo y pH óptimos para la	Medio	2 a 4 semanas	\$30,000 a \$100,000 según sea el número de coagulantes y polielectrolitos por analizar

Proceso/ Tecnología	Prueba de tratabilidad	Nivel del laboratorio	Duración	Costo *
	floculación, gradiente y dosis y tipo de polímero óptimo			
Adsorción en carbón activado	Para remoción de compuestos orgánicos como los húmicos realizar pruebas de jarras haciendo un amplio estudio de las dosis y combinaciones coagulante- polímero	Alto	4 a 6 semanas	\$100,000 a \$250,000 según tipo de contaminantes
Sedimentación	Es poco común realizar pruebas de tratabilidad para este proceso, en caso de hacerlo se usan los estudios en columna de sedimentación para determinar la carga másica aceptable así como la carga hidráulica recomendable en combinación con la altura crítica de sedimentación	Medio	1 a 2 semanas	\$10,000 a \$15,000

Proceso/ Tecnología	Prueba de tratabilidad	Nivel del laboratorio	Duración	Costo *
Ablandamiento con cal, sosa cal. remoción selectiva de carbonato, tratamiento por partes	Determinación de la dosis de reactivos y sus combinaciones óptimas. Estudio para definir la conveniencia de combinar la precipitación con la coagulación. Para remoción de hierro y de manganeso. Determinación de dosis de reactivos y conveniencia de combinar con coagulación. Evaluar el efecto de interferencias	Alto	4 a 6 semanas	\$30,000 a \$100,000 según el número de tecnologías por probar así como reactivos y sus combinaciones.
Intercambio iónico	Para remoción de dureza, determinar isotermas, cantidad de resina y tiempo de vida	Alto	2 a 6 semanas	\$20,000 a \$100,000
	Para desmineralización	Alto	2 a 6 semanas	\$40,000 a \$150,000
Filtración con zeolitas	Para ablandamiento Determinación de las isotermas de Langmuir o de Freundlich para definir la cantidad de zeolitas por emplear	Medio	2 a 6 semanas	\$20,000 a \$100,000
	Para remoción de hierro y manganeso			
Aireación	Para remoción de Hierro y manganeso, determinar la tasa de aireación, altura adecuada y tiempo de contacto	Alto	4 a seis semanas	\$100,000 a \$200,000

Proceso/ Tecnología	Prueba de tratabilidad	Nivel del laboratorio	Duración	Costo *
	Para desgasificación, determinar la tasa de desorción y la de aireación	Alto	4 a 6 semanas	\$100,000 a \$200,000
Osmosis Inversa	Determinar el Índice de filtración en membranas, determinación de la membrana óptima en cuanto a la composición y durabilidad	Alto	6 semanas a 6 seis meses como mínimo si se desea conocer la duración de la membrana	\$50,000 (si sólo se determina el índice de filtración en diferentes membranas) hasta \$350,000 para efectuar una prueba en un modelo físico
Ultrafiltración	Determinar el Índice de filtración en membranas, determinación de la membrana óptima en cuanto a la composición y durabilidad	Alto	6 semanas a 6 seis meses como mínimo si se desea conocer la duración de la membrana	\$50,000 (si sólo se determina el índice de filtración en diferentes membranas) hasta \$350,000 para efectuar una prueba en un modelo físico

Electrodialisis	Determinar la magnitud del campo y tiempos alternos de aplicación para la eficiencia requerida	Alto	2 a 4 semanas	\$50,000 a \$100,000
Carbón activado	Para remoción de materia orgánica determinar isotermas y compara costos entre diversos tipos de carbón activado	Alto	4 a seis semanas	\$50,000 a \$150,000
	Para remoción de trihalometanos, determinar isotermas y compara diversos tipos de carbones	Alto	4 a seis semanas	\$150,000 a \$300,000
Precipitación	Para remoción de metales determinar dosis de reactivos y combinaciones optimas	Medio	2 a 4 semanas	\$50,000 a \$100,000

Proceso/ Tecnología	Prueba de tratabilidad	Nivel del laboratorio	Duración	Costo
Ajuste de pH	Determinar curvas de neutralización	Bajo	1 a 2 semanas	\$5,000 a \$10,000
Adición de CO ₂	Determinar tasa de aireación y coeficientes de transferencia	Medio	2 a 4 semanas	\$25,000 a \$100,000
Protección catódica	Determinar en un piloto el comportamiento	Medio	2 a 6 seis semanas	\$25,000 a \$150,000

* Considerando precios del 2004

ANEXO A.3

OPERACIÓN DE RETROLAVADO

DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DE RETROLAVADO DEL FILTRO

El lavado del filtro es la operación por la cual se suspende el proceso de filtración y se inyecta agua por la parte de abajo del filtro (drenes) con una presión adecuada, con el objeto de que el lecho filtrante se expanda, los granos se froten y se desprenda todo el material que se ha quedado retenido entre ellos en la operación de filtrado.

Las unidades filtrantes se lavan desde abajo con agua previamente filtrada, que en ocasiones se reserva en almacenamiento para este propósito. El sistema de drenaje actúa entonces como sistema de distribución del agua de lavado, duplicando su función. La arena se limpia a sí misma cuando el lecho se ha fluidificado por el agua ascendente. La limpieza se intensifica en alguna de las siguientes formas:

- Elevando suficientemente la velocidad, gasto o tasa de retrolavado por área unitaria (lavado a alta velocidad)
- Dirigiendo chorros de agua al interior del lecho fluidificado (lavado superficial)
- Soplando aire hacia arriba a través del lecho, antes o durante la fluidificación (lavado con aire)
- Agitando mecánicamente el lecho fluidificado (lavado mecánico).

Después de que el lecho se limpia por el lavado, se asienta de nuevo en su lugar. Los granos más gruesos o pesados llegan primero al fondo, los más finos o ligeros se depositan al último; lo que estratifica el lecho e impone un límite sobre sus partículas más finas o más ligeras y sobre su no uniformidad.

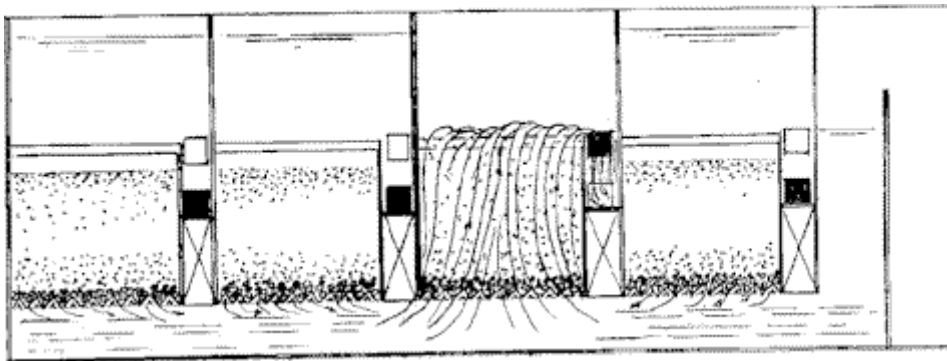


Figura No. 3.1 Lavado de un filtro con el flujo que produce el resto de la batería

DETECCIÓN DE PROBLEMAS

La mayoría de los problemas del filtro se originan de un lavado deficiente incapaz de:

- Desprender la película que recubre los granos del lecho.
- Romper las grietas o cavidades en donde se acumula el material que trae el agua.

En ambos casos, al expandir el lecho durante el lavado y luego dejarlo asentar e iniciar la operación de filtrado, el material no removido queda atrapado entre los granos del medio y al progresar la carrera de filtración se compacta, con lo que la superficie del filtro desciende lentamente y las áreas quedan muy obstruidas, generalmente alrededor de las paredes, se desprenden dejando una grieta entre ellas y la arena. En casos de serio deterioro estas grietas pueden llegar a la grava y todo el medio granular llenarse de “bolas de barro” que disminuyen el área de paso del flujo.

Este fenómeno se presenta paulatinamente: primero se llenan las cavidades, al no ser removido este material se compacta y una cavidad se une a otra, hasta formar bolas relativamente grandes. En estas condiciones, el filtro deja de ser útil como proceso de tratamiento y el lecho filtrante debe ser sustituido totalmente.



Figura No. 3.2 Lecho de arena del filtro y canaleta

APÉNDICE A

TABLA DE SISTEMAS Y UNIDADES DE MEDIDA

UNIDAD	SÍMBOLO	MULTIPLICADO POR	1.1.1.1 SE CONVIERTE A	
			UNIDAD	SÍMBOLO
1.1.1.2 LONGITUD				
metro	m	3.281	pie	pie, ft
pulgada	plg, in	25.40	milímetro	mm
1.1.1.3 ÁREA				
Metro cuadrado	m ²	10,76392	pie cuadrado	pie ² ft ²
Pulgada cuadrada	plg ² , in ²	645.16	milímetro cuadrado	mm ²
1.1.1.4 PRESIÓN				
Pascal (N/m ²)	Pa	0.000 01	bar.	bar.
atmósfera	atm	0.980 665	bar.	bar.
atmósfera	atm	98.066 5	kilo pascal	kPa
metro columna de agua	m H ₂ O (mca)	9.806 65	kilo pascal	kPa
kilogramo fuerza/cm ²	kgf/ cm ²	98.066 5	kilo pascal	kPa
Libra/pulgada ²	lb/ plg ² , PSI	6.8947	kilo pascal	kPa
MASA				
kilogramo	kg	2.204 6	libra	lb
POTENCIA				
Caballo de potencia (fuerza)	HP, cp	0.745 699	kiloWatt	kW
1.1.1.5 VISCOSIDAD DINÁMICA				
1.1.1.6 Pascal segundo	Pa.s	10	Poise	P
1.1.1.7 Pascal segundo	Pa.s	1 000	centiPoise	cP
VISCOSIDAD CINEMÁTICA				
metro cuadrado/segundo	m ² /s	10 000	Stokes	St
metro cuadrado/segundo	m ² /s	1000 000	centiStokes	cSt

APÉNDICE B

TABLA DE FÓRMULAS QUÍMICAS.

FORMULA QUÍMICA.	NOMBRE DEL COMPUESTO.
CaO	Óxido de Calcio.
CaCO ₃	Carbonato de Calcio.
CO ₂	Dióxido de Carbono.
CaSO ₄	(Yeso) Sulfato de Calcio.
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Calcio.
(HOCl)	Ácido Hipocloroso.
NaCl	Cloruro Sódico.
NaCO ₃	Carbonato Sódico.
(NaOCl)	Hipoclorito de Sodio.
Na ₂ CO ₃	Carbonato de Sodio.
Na ₂ SO ₄	Sulfato Sódico.
NaAlO ₂	Aluminato Sódico.
(Al ₂ O ₃)	Óxido de Aluminio.
NH ₂ Cl	Monocloramina.
MgCO ₃	Carbonato de Magnesio.
Mg(OH) ₂	Hidróxido de Magnesio.
Ca (HCO ₃) ₂	Carbonato Ácido de Calcio.
Fe ²⁺	Fierro (Ión Fierro)
Mn ²⁺	Manganeso (Ión Manganeso)
FeSO ₄ 7H ₂ O	Sulfato Ferroso (Caparrosa)

BIBLIOGRAFÍA.

LOPEZ ALEGRÍA Pedro, (2002) “Abastecimiento de Agua Potable y Disposición de Excretas”, Ed. Alfa omega, México D.F., Pág. 17-19, 24-38, 71-95.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, (1999) “Sistemas Rurales”, Proyecto Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, México DF.

COMISIÓN NACIONAL DEL Agua, (1999) “Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento a diciembre de 1999”, 10ª edición, México.

DEGREMONT G., (1979). “Manual Técnico del Agua”, Degremont, 4ª edición en español, España.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, (1993). “Guías para la Calidad del Agua potable”, (Volumen 1, Recomendaciones), Organización Mundial de la Salud, 2ª edición, Ginebra, Suiza.

COMISIÓN NACIONAL DE AGUA, (1994) “Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada”, México D.F., Pág.10, 15, 33, 63, 105.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, (1970) “Manual de Muestreo de la Comisión Nacional del Agua”, México DF., Pág. 14, 25, 80.

DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK, (1981) “Manual de Tratamiento de Agua, EU.”, Pág. 116

SEMINARIO DE TITULACIÓN, (1997) “Procesos de Potabilización del Agua”, México DF., Pág.65, 73,117.

E. JHONSON Edward, (1990) “El agua subterránea y los pozos”, Ed. Jonson División UOP Inc., Saint Paúl, Minnesota, Pág. 77, 177, 361, 399.

CUSTODIO Emilio, LLAMAS Manuel Ramón, (1990) “Hidrología Subterránea”, Ed. OMEGA, México DF., Pág. 180-213.

ROMERO ROJAS Jairo Alberto (1998) “Potabilización del agua”, Ed. Alfa Omega 3ª Edición, Colombia, Pág.15, 30.

SECRETARÍA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OBRAS PÚBLICAS (1997) “Normas Técnicas para el Proyecto de Plantas Potabilizadoras”, México D.F.

THY Tebbutt (1999) “Fundamentos de Control de Calidad del Agua”, Ed. Limusa, Pág. 185-189.

FAIR . GEYER (1999) “Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales”, Ed. Limusa, Pág. 86-90.

GARCÍA CORDOBA Fernando (1999) “La Tesis y el Trabajo de Tesis”, Ed SPANTA S.A. de C.V., México D.F.

NOM-127-SSA1-1994; Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM -127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su Potabilización, Secretaría de Salud, Diario Oficial de la Federación, 22 de Noviembre de 2000.