

CAPÍTULO VIII - 5. REMOCIÓN DE FLUOR

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. EFECTOS, IMPORTANCIA SANITARIA.....	3
2.1. ABSORCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y EXCRECIÓN.....	3
2.2. MANIFESTACIONES AGUDAS Y CRÓNICAS	4
2.3. EFECTOS DENTALES	5
3. FLUORACIÓN Y DEFLUORACIÓN DE LAS AGUAS DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO EN EL PAÍS – LEY N° 21.172	6
4. LÍMITES VIGENTES DE FLÚOR EN AGUA DE BEBIDA SEGÚN DISTINTOS ORGANISMOS NACIONALES E INTERNACIONALES	7
4.1. ESTIMACIÓN DEL NIVEL GUÍA EN ESTADOS UNIDOS (SEGÚN USEPA).....	7
4.2. ESTIMACIÓN DEL NIVEL GUÍA EN CANADÁ	8
4.3. NIVEL GUÍA PARA OTROS ORGANISMOS INTERNACIONALES	8
4.3.1. <i>Comunidad Económica Europea (CEE)</i>	8
4.3.2. <i>Organización Mundial de la Salud (OMS)</i>	8
4.4. NIVEL GUÍA PARA ORGANISMOS NACIONALES	9
4.4.1. <i>Código Alimentario Argentino (CAA)</i>	9
4.4.2. <i>COFES (Consejo Federal de Entidades de Servicios Sanitarios)</i>	9
5. ZONIFICACIÓN DEL PROBLEMA EN ARGENTINA.....	10
6. TECNOLOGIAS DE REMOCIÓN.....	11
6.1. ABLANDAMIENTO CON CAL	11
6.2. COAGULACIÓN CON SULFATO DE ALUMINIO Y OTROS COAGULANTES	11
6.3. ALÚMINA ACTIVADA	12
6.3.1. <i>Nuevas Experiencias en China</i>	15

6.4. INTERCAMBIO IÓNICO	16
6.5. MANTOS DE HUESO MOLIDO	16
6.5.1. <i>Tratamientos Previos del Hueso</i>	<i>17</i>
6.5.2. <i>Experiencias en Plantas de Tratamiento en Nuestro País</i>	<i>18</i>
6.6. UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS	19
6.7. OTRAS TECNOLOGÍAS	20
6.7.1. <i>Técnica Nalgonda</i>	<i>20</i>
6.7.2. <i>Precipitación por Contacto.....</i>	<i>21</i>
7. CRITERIOS DE SELECCIÓN	23
8. BIBLIOGRAFÍA.....	25

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Comparación de distintas tecnologías de reducción de flúor	24
--	-----------

FIGURAS

Figura 1. Efectos del pH en la eficiencia de remoción de flúor en: agua destilada desionizada (ADD), en agua de mar diluida (DAM) y en agua geotérmica simulada (AGS).....	13
Figura 2. Sistemas de alúmina activada: flujos esquemáticos de modos de operación.....	14
Figura 3. Planta de precipitación por contacto diseñada y operada en Tanzania	22

1. INTRODUCCIÓN

En diversas regiones del país las aguas subterráneas presentan elevadas concentraciones de flúor.

En su estado libre, el flúor es un gas diatómico amarillo pálido. El flúor nunca se encuentra en esta forma en la naturaleza, debido a que es muy reactivo químicamente y se combina con todos los otros elementos excepto los gases inertes; además es el 13^{er} elemento mas abundante.

El flúor está contenido en estas rocas como la Fluorita, Apatita, Criolita y otros minerales abundantemente distribuidos en el suelo.

El agua al ponerse en contacto con dichas rocas las va disolviendo en mayor o menor grado encontrándose por dicha razón en algunos casos aguas con concentraciones de flúor que sobrepasan los límites máximos admisibles para aguas de consumo.

Por medio de investigaciones científicas se ha podido comprobar que el flúor es un elemento muy eficaz para disminuir el ataque de la caries dental.

Existen distintos métodos para suministrar el flúor a los individuos: en las aguas de consumo, aplicaciones tópicas, comprimidos, sal de cocina, harina, leche, pastas dentífricas, etc.; cada uno de los cuales varía en su “fuerza” o protección obtenida y su aplicabilidad desde el punto de vista de salud pública. En algunos países de Centroamérica se utiliza sal fluorada. Debe tenerse en cuenta al respecto que este sistema de fluoración requiere un riguroso control en la distribución regional de la sal, a fin de evitar que llegue a ser utilizada por poblaciones donde naturalmente las aguas de consumo poseen altas concentraciones de flúor.

Está perfectamente documentado a nivel mundial que las aguas empleadas para la bebida humana y la preparación de alimentos, que contienen una proporción no mayor de 1 a 1,5 mg/l de flúor, protegen las dentaduras de los niños que hagan uso de las mismas desde los primeros años de sus vidas hasta los 12, 13 ó 14 años de edad; esas criaturas presentan menos caries dentales que las poblaciones que utilizan para la bebida aguas que no contengan prácticamente flúor.

Se ha demostrado asimismo que las mismas dosis de flúor son necesarias para reducir la posibilidad de caries en personas adultas, durante toda la vida.

Se ha demostrado, por otra parte, que concentraciones de flúor superiores a los 2 mg/l en aguas destinadas a consumo humano generan con el tiempo fluorosis dental o manchado de los dientes que consiste en una insuficiencia cálcica del esmalte y la dentina de los mismos (recién en 1925 McKay relacionó la fluorosis dental con el agua de bebida).

La fluorosis endémica es una enfermedad con antecedentes desde la antigüedad; en China (Yan-gao, Shanxi) se han descubiertos fósiles de ancianos con dientes manchados que muestran que la fluorosis endémica se remonta a 100.000 años atrás. En la región autónoma de Mongolia (Aohan), se ha descubierto fluorosis en un esqueleto de la dinastía Xia (cerca de 4.000 años atrás).

En concentraciones superiores a los 3 a 4 mg/l y con una ingesta prolongada se produce una afección a los huesos conocida como osteopetrosis, que consiste en una modificación en la composición externa de la estructura del hueso, tornándolos frágiles y quebradizos.

El exceso de flúor en el agua de bebida se puede corregir con relativa facilidad, en algunos casos cambiando la ubicación o profundidad de la fuente, y si esto no fuera posible sometiendo la misma a un tratamiento correctivo. El procedimiento o tratamiento a emplear no debe intentar remover todo el flúor del agua sino solo una parte de manera de adecuarlo a las exigencias higiénico-sanitarias.

2. EFECTOS, IMPORTANCIA SANITARIA

Como se indicó anteriormente el exceso de flúor en aguas de bebida puede dar lugar a las siguientes afecciones: Fluorosis dental y Osteopetrosis; sin embargo, la ingesta de dosis moderadas de flúor refuerza la resistencia del esmalte dental a las caries.

El Dr. Trelles publicó, en 1938 (Boletín de OSN N° 16) las siguientes conclusiones sobre los efectos de fluorosis dentaria en función de la concentración de flúor en el agua de bebida:

- 0,6 mg/l No origina alteraciones del esmalte dentario
- 1,2 mg/l Se produce especialmente veteado blanco y menor cantidad de veteado pardo en grado moderado
- 2,4 mg/l Mayor proporción de veteado blanco que pardo pero en grado severo

Diversos autores informan lo siguiente:

- 1,0 mg/l Reducción del 66% en caries dentales
- 2,0 mg/l Fluorosis dental
- 6,0 mg/l Lesiones en el sistema óseo
- 50 mg/l Alteraciones en tiroideas
- 100 mg/l Retraso en el crecimiento
- 125 mg/l Alteraciones renales
- 32 a 64 mg/Kg Dosis letal de NaF

La ingesta vía agua depende del consumo diario, mientras que la influencia del consumo diario sobre el límite tolerable de flúor se establece a través de las temperaturas medias y máximas de la zona geográfica considerada, ya que este factor condiciona las cantidades de agua que el ser humano podría llegar a consumir.

2.1. ABSORCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y EXCRECIÓN

Una vez que se ingiere, el NaF (es la forma más común de encontrar el flúor combinado en pastas dentales, tabletas y aguas fluoradas artificialmente) es rápidamente absorbido por el tracto intestinal. Hasta el 75% del flúor absorbido puede ser depositado en tejidos calcificados, con una alta deposición encontrada especialmente en niños en período activo de crecimiento de huesos.

Aproximadamente el 99% del flúor total del cuerpo humano está localizado en tejidos calcificados (huesos y dientes), donde es sustituido por hidroxilos (OH⁻) en la hidroxiapatita, formando fluorapatita.

Si bien las concentraciones de flúor en los huesos se incrementan con la edad, la cantidad retenida en la dieta diaria esta inversamente relacionada con la edad; esto es debido a la mayor área superficial para captar flúor en los huesos jóvenes hidratados.

Muchos de los factores que afectan la captación y retención del flúor en los huesos también afectan la concentración en los dientes. Las concentraciones de flúor en el esmalte decrecen con la distancia desde la superficie del diente y también varían con la localización, desgaste superficial, edad y grado de exposición.

Concentraciones promedios de flúor en el hueso ilíaco fueron determinadas en adultos (60 años de edad) que consumían agua de bebida no fluorada ($<0,1$ mg/l) y fluorada (0,97 mg/l), encontrándose respectivamente 351 mg/kg. y 1090 mg/kg. Concentraciones de flúor en el esmalte superficial fueron determinadas en adultos de 20 años de edad o más en poblaciones que consumían agua de bebida con concentraciones de flúor de 0,1 mg/l y 1 mg/l; encontrándose respectivamente 740 a 1400 mg/kg y 1351 a 2100 mg/kg.

La concentración de flúor en la dentina es generalmente de 2 a 3 veces más alta que en el esmalte.

El flúor es excretado principalmente por la orina; la transpiración, la saliva, y la materia fecal realizan pequeñas contribuciones a la evacuación diaria del cuerpo. En humanos adultos aproximadamente del 50 al 75% de una dosis oral de flúor aparece en la orina 24 horas después de su ingestión; bajo condiciones de una exposición relativamente constante, la excreción urinaria correlaciona bien con los niveles de flúor en agua de bebida y es frecuentemente utilizado como un indicador de exposición.

2.2. MANIFESTACIONES AGUDAS Y CRÓNICAS

En los seres humanos, una ingestión aguda de flúor puede resultar en náuseas, vómitos, dolores abdominales, diarrea, fatiga, somnolencia, coma, convulsiones, paro cardíaco y muerte. La dosis letal de flúor en los adultos promedio se ha estimado en 32 a 64 mg por kilo de masa corporal (como NaF).

La mayoría de los estudios de efectos a la salud humana por ingestión crónica de flúor han sido enfocados hacia los efectos adversos en el esqueleto, principalmente fluorosis esquelética y fracturas.

La fluorosis esquelética es una acumulación excesiva de flúor en los huesos asociadas con el aumento de la densidad del hueso y el envejecimiento. El flúor incorporado en el hueso (como fluorapatita) produce una red cristalina que produce menor resorción y tiene un incremento en la resistencia a la compresión, pero es mas quebradizo y tiene una disminución de la resistencia a la tracción.

El IARC (Internacional Agency for Research on Cancer) clasificó al flúor en el Grupo 3: extensos estudios epidemiológicos realizados no han aportado ninguna prueba de que el flúor sea carcinógeno para los seres humanos.

2.3. EFECTOS DENTALES

En la boca se encuentran los dientes que son órganos duros ubicados en el reborde del maxilar y alojados en cavidades óseas llamadas alvéolos dentarios.

En ellos se distinguen fundamentalmente dos partes una que sobresale de la encía denominada corona y otra cubierta por los tejidos que los sostienen, llamada raíz. A la unión de ambas partes se la llama cuello dentario.

Si se establece un corte longitudinal del diente se distinguirá, de afuera hacia adentro: el esmalte que es el tejido más duro y más calcificado del diente y del organismo. Contiene 98% de sales minerales, es transparente y brillante y cubre la corona del diente.

El cemento, que recubre la raíz, es un tejido calcificado (50% de sales minerales), es de superficie irregular porosa, similar al hueso, en el que se insertan las fibras del peridonto (nexo de unión entre el hueso y el diente). La dentina es la segunda capa del diente tanto en la corona como en la raíz, es un poco menos calcificada que el esmalte y tiene un 70% de sales minerales, posee terminaciones nerviosas que lo hacen sensible.

La pulpa, se encuentra en el centro del diente y está formada por tejidos blandos, vasos sanguíneos y fibras nerviosas que le dan nutrición y la hacen sensible, vulgarmente se llama nervio.

La fluorosis dental es una hipomineralización permanente del esmalte de los dientes inducida por el flúor en el desarrollo de los dientes. En las formas mas benignas, solamente es afectada la capa exterior del esmalte, produciendo líneas blancas difusas a través de la superficie del diente.

A medida que la severidad de la fluorosis se incrementa, son afectadas capas mas profundas y la porosidad se incrementa, conduciendo a una apariencia de una tiza blanca. Generalmente, las formas suaves de fluorosis dental no alteran la función de los dientes y se las considera como un efecto antiestético antes que un efecto a la salud.

Estudios epidemiológicos de varias bandas de edades de niños expuestos a diferentes concentraciones de flúor en el agua de bebida han identificado que el período de desarrollo del esmalte mas sensible a la ocurrencia de fluorosis dental es la última etapa de maduración antes que la temprana etapa eruptiva.

Las caries dentales resultan de disoluciones localizadas del esmalte de los dientes por los ácidos producidos por depósitos de bacterias (placa). El período de mayor susceptibilidad a las caries se cree se extiende desde el período que emergen los primeros dientes a la erupción total tanto de la dentición primaria como permanente.

Inicialmente, se pensó que la capacidad del flúor para prevenir la formación de caries detectables clínicamente era debido a una incorporación preeruptiva, produciendo un mejoramiento de la estabilidad cristalina y reduciendo la solubilidad del esmalte. El flúor también demostró inhibir la producción de ácido de la placa bacteriana.

Sin embargo, revisiones de estudios clínicos de fluoración de agua y efectos del flúor indican que el mayor efecto anticaries es posteruptivo, a través de la inhibición de la desmineralización y el aumento de la remineralización de lesiones de caries tempranas; estos efectos se prolongan durante toda la vida de la pieza dentaria.

3. FLUORACIÓN Y DEFLUORACIÓN DE LAS AGUAS DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO EN EL PAÍS – LEY N° 21.172

En la República Argentina la Ley N° 21.172 del 30 de Setiembre de 1975 propicia la fluoración y la defluoración de las aguas de abastecimiento público de todo el país hasta alcanzar el nivel óptimo de ion flúor.

Se transcriben a continuación algunos de los principales Artículos de la Ley 21172:

“Artículo 2°.- El Ministerio de Bienestar Social de la Nación, por intermedio de la Secretaría de Estado de Salud Pública, y a través de la Dirección Nacional de Odontología, formulará un programa nacional de fluoración y defluoración de las aguas de consumo, fijando, de acuerdo a las características del agua analizada, hábitos alimentarios y clima, el contenido óptimo de ion flúor en cada caso.”

“Artículo 3°.- El organismo de aplicación de la presente ley en los aspectos de promoción, normalización y evaluación, será la Secretaría de Estado de Salud Pública, por intermedio de la Dirección Nacional de Odontología.”

“Artículo 4°.- La ejecución del programa nacional de fluoración y defluoración estará a cargo de los organismos responsables de la potabilización del agua de abastecimiento público, cualquiera sea su jurisdicción.”

Es interesante destacar del análisis del texto de la Ley, que quién debe fijar las dosis a aplicar es el Ministerio de Salud Pública y Acción Social de la Nación.

4. LÍMITES VIGENTES DE FLÚOR EN AGUA DE BEBIDA SEGÚN DISTINTOS ORGANISMOS NACIONALES E INTERNACIONALES

Como se citó en el ítem 2.2. el flúor se puede incluir dentro del Grupo 3 (IARC) como no cancerígeno, cuyo límite tolerable puede fijarse en base a niveles guías utilizando el método de la ingesta diaria admisible (IDA).

A partir de los efectos nombrados en el ítem 5.2 derivados de la ingesta de agua con flúor cabe hacer un breve comentario sobre la importancia en fijar una IDA adecuada. Es así que dicho valor debe tener en cuenta no sólo los efectos adversos que altas concentraciones de flúor puedan generar (fluorosis dental y osteopetrosis), sino también las concentraciones mínimas necesarias que puedan derivar en efectos positivos como ser la prevención de caries.

Asimismo se considera de importancia, tal cual se fija en distintas normas, que los límites de flúor sean fijados a partir de recomendaciones realizadas por las autoridades de Salud Pública correspondiente.

A continuación se citarán los límites de flúor vigentes a nivel nacional e internacional según distintos organismos.

4.1. ESTIMACIÓN DEL NIVEL GUÍA EN ESTADOS UNIDOS (SEGÚN USEPA)

Para flúor está establecida una IDA de 60 µg/kg.día derivada a partir de un NOAEL de 0,06 mg/kg.día, obtenido en un estudio epidemiológico relacionado con manifestaciones de fluorosis dentaria y un FI (factor de incertidumbre) de 1.

Se asumió una ingesta de flúor vía alimentos de 0,01 mg/kg.día, considerándose que la ingesta de dicha sustancia a través del agua está en el orden del 80% (factor de asignación) de la IDA. Dado que el segmento poblacional más expuesto al efecto mencionado es el integrado por los individuos en los que el proceso de calcificación no ha concluido, es decir niños de hasta 7-8 años, se hace la estimación para este grupo crítico.

En 1986 la U.S.EPA promulga un Nivel Contaminante Máximo (MCL) para flúor en aguas de bebida de 4,0 mg/l (este nivel protege a los humanos de una fluorosis esquelética, un efecto adverso para la salud), y al mismo tiempo fija un Nivel Contaminante Secundario no exigible (SMCLs) de 2,0 mg/l para proteger frente a objeciones sobre fluorosis dental.

Así, mientras los sistemas de distribución de agua no están obligados a reducir el nivel de flúor si exceden los 2 mg/l, sí se requiere que se notifique al público que los niños probablemente desarrollen una fluorosis dental. Para llegar a esta definición de los límites la U.S.EPA se basa en que la fluorosis dental es un efecto cosmético y no un efecto adverso para la salud.

4.2. ESTIMACIÓN DEL NIVEL GUÍA EN CANADÁ

Las guías de calidad de agua de bebida de Canadá fijan una concentración máxima aceptable (MAC) para flúor de 1,5 mg/l, sin embargo se aclara en una nota anexa a dichas guías que se recomienda que la concentración de flúor sea ajustada entre 0,8 a 1,0 mg/l, el cual es el rango óptimo para el control de las caries dentales.

En principio considera: una IDA de 122 µg/kg.día, una masa corporal (MC) de 13 kg que es el peso promedio del cuerpo de un niño de 7 meses hasta 4 años de edad, un factor de asignación de 0,50 que es la proporción promedio de la ingesta total diaria de flúor debida al agua de bebida para niños de 7 meses hasta 4 años de edad y un consumo diario de agua de 0,8 l/día correspondiente al consumo promedio diario de agua para niños comprendidos dentro del mismo grupo anterior.

A partir de los factores definidos en el párrafo anterior se llega a un valor de un MAC de 1,0 mg/l. Al valor de IDA de 122 µg/kg.día se llega luego de relacionar varios estudios y determinar que niños que tengan una ingesta igual o menor a ese valor es improbable que sean afectados por una fluorosis dental moderada a leve en los dientes permanentes anteriores; además se concluye que los niveles de ingesta que producirían una fluorosis esquelética serían de 200 µg/kg.día o mayor.

Después de revisar la posibilidad de reducir el MAC a 1 mg/l se decide mantenerlo en el valor actual de 1,5 mg/l, ya que no se esperaría una significativa disminución del riesgo de efectos sobre la salud debidas al flúor. Aún para comunidades donde la concentración de flúor en agua de bebida sea de 1,5 mg/l, la IDA se estima estaría por debajo de los 200 µg/kg.día, valor límite que podría ocasionar fluorosis esquelética.

4.3. NIVEL GUÍA PARA OTROS ORGANISMOS INTERNACIONALES

4.3.1. Comunidad Económica Europea (CEE)

En sus directivas 80/778/EC el flúor es clasificado como un parámetro indeseable en cantidades excesivas, como comentarios se cita que el MAC deberá ser fijado de acuerdo al rango de temperatura, fijándose los siguientes valores de MAC:

- de 8 a 12°C MAC: 1500 µg/l
- de 25 a 30°C MAC: 700 µg/l

4.3.2. Organización Mundial de la Salud (OMS)

En sus Guías de calidad para agua el flúor es clasificado como un componente químico de significación para salud; como comentario se cita que al fijar las normas nacionales se deben tener en cuenta las condiciones climáticas, el volumen de agua consumido, y la ingestión a partir de otras fuentes, proponiéndose el valor de 1,5 mg/l como valor guía.

4.4. NIVEL GUÍA PARA ORGANISMOS NACIONALES

4.4.1. Código Alimentario Argentino (CAA)

En el CAA las concentraciones máximas para los fluoruros (F-) en el agua potable de suministro público y agua potable de uso domiciliario se dan en función de la temperatura promedio de la zona, teniendo en cuenta el consumo diario del agua de bebida:

• Temperatura media y máxima del año (°C):	10,0 – 12,0	
Contenido límite recomendado de flúor (mg/l):	Límite inferior	0,9
	Límite superior	1,7
• Temperatura media y máxima del año (°C):	12,1 – 14,6	
Contenido límite recomendado de flúor (mg/l):	Límite inferior	0,8
	Límite superior	1,5
• Temperatura media y máxima del año (°C):	14,7 – 17,6	
Contenido límite recomendado de flúor (mg/l):	Límite inferior	0,8
	Límite superior	1,3
• Temperatura media y máxima del año (°C):	17,7 – 21,4	
Contenido límite recomendado de flúor (mg/l):	Límite inferior	0,7
	Límite superior	1,2
• Temperatura media y máxima del año (°C):	21,5 – 26,2	
Contenido límite recomendado de flúor (mg/l):	Límite inferior	0,7
	Límite superior	1,0
• Temperatura media y máxima del año (°C):	26,3 – 32,6	
Contenido límite recomendado de flúor (mg/l):	Límite inferior	0,6
	Límite superior	0,8

4.4.2. COFES (Consejo Federal de Entidades de Servicios Sanitarios)

En la revisión realizada por el COFES de las Normas de calidad para el agua de bebida de suministro público, el flúor es clasificado como un componente que afecta la salud; como comentario se cita que al fijar el límite tolerable se deben tener en cuenta las condiciones climáticas regionales, el volumen de agua consumido, y la ingestión a partir de otras fuentes, proponiéndose el valor de 1,5 mg/l como límite tolerable. Se incluye además la observación de que las excepciones en la aplicación de este límite dependerán de la recomendación de las autoridades sanitarias.

5. ZONIFICACIÓN DEL PROBLEMA EN ARGENTINA

En nuestro país las principales provincias afectadas por la presencia natural de flúor en aguas subterráneas son entre otras: Buenos Aires, Córdoba, La Pampa, Santa Fe, San Luis y La Rioja.

Las altas concentraciones de flúor que se presentan en las aguas subterráneas de algunas zonas de la llanura pampásica se explican por la gran cantidad de sedimentos micáceos y finos presentes en las formaciones Puelche y Pampeana.

Las Sierras Peripampásicas circunscriben a la llanura sedimentaria. Los Sedimentos que integran la llanura configuran la Formación Puelche sobre la que se asientan los sedimentos cuaternarios de la Formación Pampeana; estas formaciones contienen arcillas, limos, arenas micáceas y loess con algunas intercalaciones de cenizas volcánicas.

La presencia de flúor en las aguas subterráneas de la región está relacionada con la presencia de materiales micáceos y finos provenientes de los esquistos cristalinos e intrusivos graníticos que conforman las Sierras Peripampásicas.

La fluorita constituye la fuente de flúor más importante en las rocas ígneas, mientras que las rocas neumatolíticas contienen micas fluoríferas.

Los minerales arcillosos constituyen otra fuente importante de flúor; la bentonita, presente en muchos suelos de la región, puede presentar tenores de flúor del orden de 7 g/kg. Habitualmente el flúor presente en aguas subterráneas se encuentra en forma de fluoruro alcalino soluble y en muchos casos está asociado con la presencia de arsénico.

6. TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN

Varias técnicas de tratamiento para remover Flúor han sido estudiadas entre las cuales se pueden mencionar: ablandamiento con cal, coagulación con aluminio, alúmina activada, resinas de intercambio iónico, ósmosis inversa, hueso molido, etc.

A la hora de definir la alternativa mas adecuada se debería tener en cuenta también que algunos procesos (resinas de intercambio, ósmosis inversa) pueden ser útiles si al mismo tiempo se necesita desmineralizar el agua o reducir otros elementos, pero podrían ser más costosas que los tratamientos específicos para remoción de flúor solamente (hueso molido).

6.1. ABLANDAMIENTO CON CAL

El ablandamiento con cal removerá el flúor del agua formando un precipitado insoluble y por coprecipitación con hidróxido de Magnesio ($Mg(OH)_2$). La relativamente alta solubilidad del fluoruro de calcio limita la reducción del flúor por ablandamiento solo; pero igualmente puede reducir altos niveles de flúor a niveles más aceptables.

Las aguas con altas concentraciones de Magnesio que deban ser ablandadas de cualquier manera pueden tener sus niveles de flúor reducidos apreciablemente por coprecipitación. Se ha desarrollado una ecuación teórica para predecir la cantidad de magnesio requerida para reducir el nivel de flúor a un nivel dado:

$$F_{residual} = F_{inicial} - (0,07F_{inicial} \times \sqrt{Mg})$$

Esta ecuación sugiere que para reducir el nivel de flúor de 5,0 a 1,5 mg/l se requerirían 100 mg/l de magnesio, que es un alto nivel de magnesio para encontrarlo naturalmente en el agua. La otra opción, que no es utilizada generalmente, es agregar magnesio para el ablandamiento (por ejemplo adicionando sulfato de magnesio); la desventaja de este proceso es la gran cantidad de lodos producidos.

6.2. COAGULACIÓN CON SULFATO DE ALUMINIO Y OTROS COAGULANTES

La coagulación con sulfato de aluminio reducirá los niveles de flúor a valores aceptables para agua de bebida, pero requiere grandes cantidades de sulfato de aluminio para hacerlo.

Estudios conducidos por Culp y Stoltenberg (1958) muestran que el flúor fue reducido de 3,6 a 1,4 mg/l utilizando 250 mg/l de sulfato de aluminio durante un tratamiento convencional (el agua así tratada podría contener una concentración muy alta de aluminio disuelto).

El pH para remoción de flúor por coagulación pareciera tener requerimientos óptimos; para una adecuada floculación con sulfato de aluminio, este valor se encontraría entre 5,5 a 7,0.

Mientras que la coagulación con aluminio puede no ser la única solución para reducir los niveles de flúor, este método podría ser usado como un tratamiento de ajuste. Las limitaciones de este método, como ocurre con el ablandamiento, son las grandes cantidades de barro que podrían generarse.

En el Centro de Ingeniería Sanitaria-FCEIA de la Universidad Nacional de Rosario se realizaron ensayos a escala de laboratorio a fin de tratar el agua subterránea de una localidad de la Provincia de Santa Fe con contenidos de arsénico (0,20 mg/l) y flúor (1,8 mg/l) fuera de la normativa vigente (Anexo A-Ley 11.220).

Para la remoción de flúor en una primera instancia se ensayaron dosis crecientes de trifosfato cálcico, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, con resultados positivos (flúor residual después del tratamiento: 0,8 mg/l) pero debiendo aplicar dosis muy altas (1000 mg/l) lo que resultaría antieconómico.

Por lo tanto se decidió realizar ensayos con el agregado de Policloruro de Aluminio (PAC) que es un coagulante que se está utilizando en forma creciente en el tratamiento de aguas, en especial en los Estados Unidos y que ofrece ventajas respecto al uso del sulfato de aluminio; llegándose a que con una dosis de 50 mg/l de PAC se logran muy buenos resultados en cuanto a los valores residuales de flúor (F_{residual} : 1,3 mg/l) y aluminio ($\text{Al}_{\text{residual}}$: 0,03 mg/l). Estos ensayos continúan desarrollándose a nivel de planta piloto (Junio 1999).

6.3. ALÚMINA ACTIVADA

Desde 1930, se conoce que el contacto de agua que contiene flúor con alúmina activada (óxido de aluminio calcinado) produce una remoción del mismo.

Continuas investigaciones acerca de este fenómeno han permitido incrementar el conocimiento acerca de la remoción de flúor por medio de la utilización de este medio; en otro Capítulo se trata con mayor amplitud el tema de adsorción con alúmina activada.

La alúmina activada es utilizada en la misma forma que las resinas de intercambio iónico; se piensa que la alúmina activada remueve ciertas especies del agua debido a una adsorción hidrolítica. Es una sustancia anfótera y su punto isoelectrónico está asociado a un pH de 9,5; por lo tanto removerá aniones por debajo de este pH y cationes por encima del mismo; la remoción óptima de flúor pareciera ocurrir en un rango de pH entre 5 y 8 (Ver **Figura 1**).

Estudios realizados (Choi, 1979) muestran que la capacidad de la alúmina activada para remover flúor se incrementa con el aumento de la concentración de este último.

Respecto al tamaño de las partículas de alúmina activada, la cinética de remoción es tal que las partículas de menor tamaño proveen la más rápida captación del flúor; aunque deberá tenerse en cuenta que las partículas más pequeñas tendrán una gran tendencia a

eliminarse en la operación de lavado. Se recomienda un tiempo mínimo de contacto de 5 minutos para remoción de flúor.

Uno de los más recientes avances en el desarrollo de las técnicas de remoción de flúor con alúmina activada es la reducción del pH del agua cruda por el agregado de H_2SO_4 , esto trae las siguientes ventajas en el proceso:

- Un incremento de la capacidad de adsorción de la alúmina activada, pudiéndose alcanzar valores de 6 a 7 g de F por kg. de Al_2O_3 , ajustando el pH a un valor cercano a 5,5 y utilizando granulado pequeño de alúmina activada.
- Se eleva la velocidad de filtración a un rango de 7 a 10 m/h.
- La unidad de adsorción puede mantenerse trabajando en forma continua.

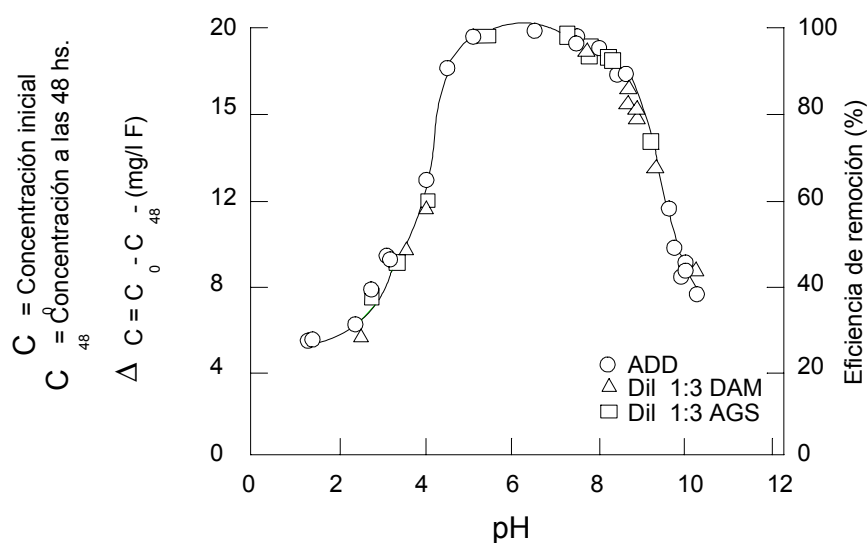


Figura 1. Efectos del pH en la eficiencia de remoción de flúor en: agua destilada desionizada (ADD), en agua de mar diluida (DAM) y en agua geotérmica simulada (AGS)

Pero también trae aparejado algunos problemas, principalmente:

- El valor de pH del efluente es muy bajo.
- El sabor del efluente es desagradable debido al alto contenido de SO_4^{2-} .
- La operación es complicada y poco segura.

La alúmina activada puede ser regenerada con NaOH (también otra alternativa es la regeneración con sulfato de aluminio); los iones de hidróxido son preferidos a los aniones por la alúmina, y rápidamente reemplazarán el flúor de la alúmina. Los pasos involucrados en la extracción del flúor de la alúmina activada son muy importantes en el proceso en general y son descriptos a continuación (ver **Figura 2**):

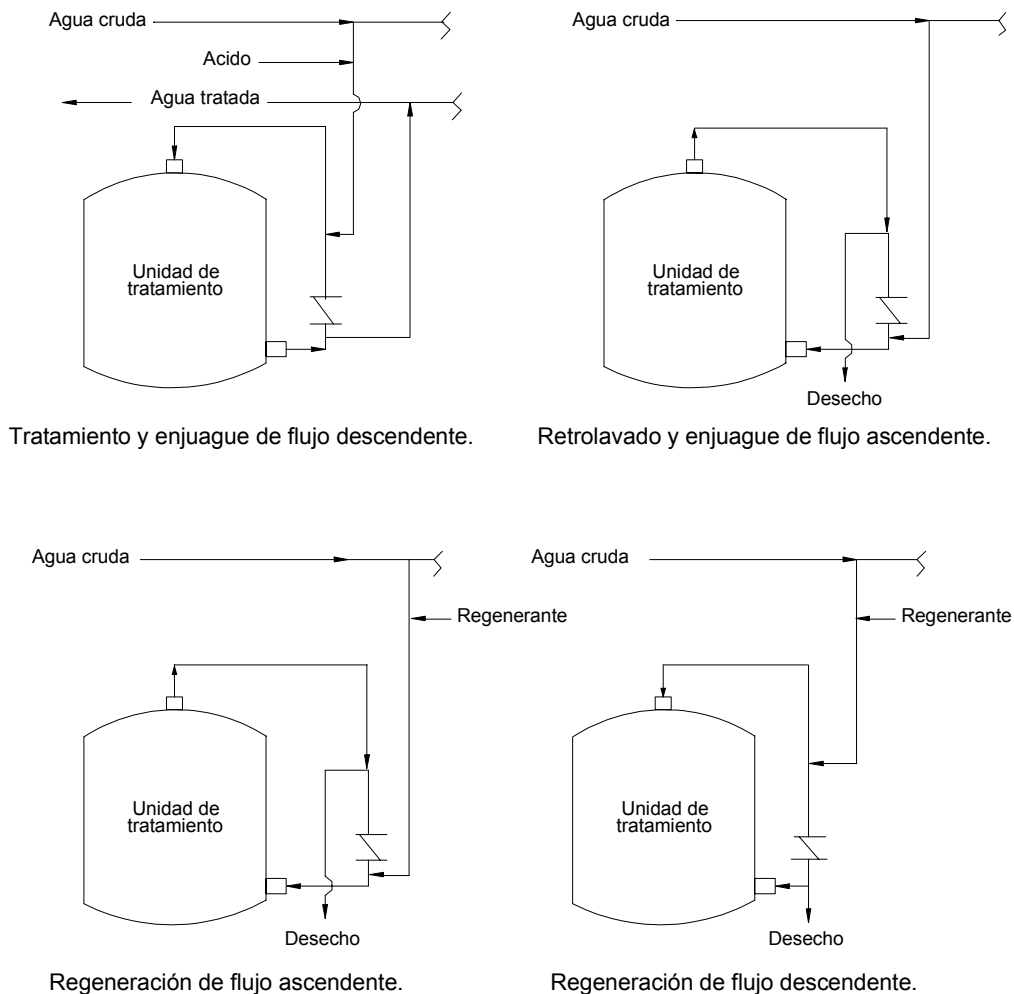


Figura 2. Sistemas de alúmina activada: flujos esquemáticos de modos de operación

- **Lavado a contracorriente:** cerca de la terminación de la carrera el relleno deberá ser lavado a contracorriente con una expansión por encima del 50% durante 10 a 15 minutos para remover el material suspendido atrapado, rompiendo de esta manera el empaquetamiento del relleno y redistribuyendo el medio.
- **Regeneración:** se deberán realizar ensayos para determinar los criterios de diseño específicos para la eliminación del flúor por medio del NaOH. Será entonces necesario definir la concentración de NaOH, la dosis, y el caudal de modo que económicamente quede preparado el relleno para otro ciclo de remoción de flúor. Valores típicos de concentración de NaOH varían en un rango de 0,5 a 2%, y caudales de 0,56 a 6,7 lts/s/m³ para 1 a 1,5 horas. También es importante tener en cuenta que en cada operación de regeneración la alúmina activada es disuelta en algún grado por el NaOH.

- Neutralización: una vez que la alúmina ha sido lavada con NaOH, el relleno debe ser retornado a una condición ácida para permitir la remoción del flúor y otros aniones. Primero el exceso de soda cáustica debe ser enjuagado del relleno; luego el relleno debe enjuagarse con una solución ácida (H_2SO_4 ó HCl). El efluente generado en esta etapa deberá ser dispuesto con el de la etapa de regeneración.

La disposición de los desechos del proceso de regeneración es un problema también inherente a los procesos de intercambio iónico.

Muchas veces cuando no hay cursos superficiales importantes (de modo que haya una adecuada dilución) en los cuales descargar estos desechos, se utiliza una línea de lagunas de evaporación; luego el material deshidratado deberá transportarse y disponerse en un lugar apropiado. Los costos de tratamiento y disposición de los desechos podrían alcanzar a ser una gran parte del costo total de la planta de tratamiento de remoción de flúor.

Cabe aclarar que el proceso de remoción con alúmina activada se utiliza principalmente en Estados Unidos. En nuestro país por razones económicas es una tecnología de muy poco uso. En Argentina se realizaron ensayos a nivel experimental utilizando bauxita activada (Bach, 1939).

La bauxita, mineral de aluminio, está compuesta en su mayor parte por óxido de aluminio hidratado; la activación de la bauxita se realiza por medio de la deshidratación a diversas temperaturas. En los trabajos realizados por Bach, este concluye que: con 1 m^3 (920 kg) de bauxita activada a 400°C con un tamaño de grano entre 1,0/1,5 mm se pueden tratar por filtración 1500 m^3 de agua a pH 5,5 con un contenido inicial de flúor de 3 mg/l, de tal modo que el efluente contenga como máximo 1 mg/l de este elemento.

6.3.1. Nuevas Experiencias en China

Un nuevo proceso para remoción de flúor fue desarrollado después de realizar una serie de ensayos pilotos por Xu Guo-Xun de la República de China, habiéndose instalado plantas de este tipo entre otras en Tianjin, Hebei, Guizhou, Ganzu y Heliongjiang.

Se basa fundamentalmente en utilizar CO_2 para reducir el valor de pH del agua cruda. Los principales parámetros de diseño y operacionales en una de las plantas ensayadas (Tianjin) fueron:

- El reactor para remoción del flúor fue un cilindro con un diámetro de 1 m, con un relleno de 850 kg. de alúmina activada.
- La capacidad de tratamiento de agua fue de $5,5\text{ m}^3/\text{h}$ con un tiempo de retención de 13,3 minutos (velocidad de filtración de 7 m/h).
- La concentración promedio de flúor en el agua tratada fue menor de 1,0 mg/l (en el agua cruda era de 3,0 mg/l).
- El tamaño de las partículas de alúmina activada fue de 0,4 a 1,24 mm de diámetro y la capacidad de adsorción considerada para el diseño fue de 3 a 4 g de F por Kg. de Al_2O_3 .

- La altura del relleno de alúmina activada fue de 1500 mm con un volumen de 1,18 m³.
- Se dejó un 30% de expansión del manto para el primer lavado durante 10 minutos.
- Se utilizó una solución de NaOH al 1% como solución regenerante la cual puede ser reusada, con un tiempo de regeneración de 1 hora. El agua de lavado utilizada es cerca del 3% del agua tratada.
- El pH de ingreso se controló en valores de 6,5 a 7,0.

Las principales diferencias entre la acidificación utilizando CO₂ y H₂SO₄ son:

- La utilización CO₂ se caracteriza por una buena calidad del agua, no existe un incremento en el contenido de iones de cloruros y sulfatos, y se obtiene un agua de buen gusto. La disminución del pH usando H₂SO₄ podría llevar una caída en valores de alcalinidad (una reducción de 1 meq de alcalinidad podría causar un incremento en la concentración de sulfatos de 48 mg/l), por lo tanto este método de acidificación sería poco recomendable para agua cruda con alta alcalinidad y alto contenido de sulfatos; mientras el método del CO₂ es apropiado para distintas calidades de agua.
- En el método del CO₂, se requiere una pequeña cantidad de NaOH para la regeneración. Debido a que el ácido carbónico es débil, utilizando CO₂ no se logra una unión tan cerrada entre los iones de flúor y la alúmina activada como usando H₂SO₄, de modo que los iones de flúor son más fáciles de separar de la alúmina en la etapa de regeneración.
- Se logra un menor costo utilizando CO₂, cerca de un 36% menos que utilizando H₂SO₄.
- El CO₂ tiene la ventaja de una simple operación; además puede ser distribuido y almacenado con seguridad.

6.4. INTERCAMBIO IÓNICO

La tecnología de intercambio iónico es técnicamente adecuada y eficiente para la remoción del flúor. El tema es tratado en un capítulo aparte.

6.5. MANTOS DE HUESO MOLIDO

Desde hace mucho tiempo, se ha advertido la afinidad del flúor con el fosfato tricálcico, ya que se encuentran siempre contenidos apreciables de flúor en los fosfatos naturales, como la apatita, la fosforita, así como en los huesos. Parece que en la apatita, de fórmula $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaCO}_3$, el ion carbonato ha sido reemplazado por el flúor para dar el fluorapatita insoluble; el mismo papel de intercambiador de iones desempeña la hidroxiapatita (en el que el CaCO_3 es reemplazado por $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Para la regeneración del material de intercambio se utiliza hidróxido de sodio, que convierte la fluorapatita nuevamente en hidroxiapatita eliminando el flúor como fluoruro de

sodio soluble. Luego la hidroxiapatita actúa nuevamente de acuerdo al proceso mencionado anteriormente.

En la práctica se utilizan:

- Productos naturales, extraídos de huesos de ganado especialmente: cenizas de huesos o huesos molidos.
- Apatita sintética, que puede obtenerse por una mezcla cuidadosamente controlada, de cal y ácido fosfórico.

En nuestro país existen varias experiencias no sólo a nivel de plantas experimentales, sino también en plantas correctoras de flúor instaladas en diversas localidades, que utilizan como medio al hueso molido desgrasado. El origen del hueso puede ser de ganado vacuno proveniente de frigoríficos.

La técnica aplicada es la filtración del agua a tratar a través de fosfato tricálcico utilizando como material de intercambio hueso molido; el hueso a utilizar necesita de un tratamiento previo indispensable, para adecuarlo a los fines perseguidos, a fin de que rinda al máximo en su capacidad de intercambio y vida útil.

6.5.1. Tratamientos Previos del Hueso

En nuestro país Callegaro et. al. realizaron experiencias a fin de determinar el tratamiento más adecuado al hueso previo a su utilización como manto de relleno.

- Con soda cáustica:

Se aconseja desengrasar de la siguiente manera, cubrir el hueso con soda cáustica en un rango del 20 al 30% calentada a temperatura no mayor de 50°C, remover durante 30 minutos. Volcar la soda dejando escurrir bien, volver a cubrir con solución de soda manteniendo la temperatura en los 50°C, volcar, lavar y neutralizar con ácido clorhídrico diluido. Si aún permanece demasiado alto el contenido de grasa, repetir la operación hasta alcanzar condiciones apropiadas.

Temperaturas y concentraciones mayores originan el ablandamiento del hueso que se deforma y pulveriza. Este tratamiento además de requerir un volumen grande de soda origina una fuerte pérdida de material del orden del 70%. Aún así queda un resto de materia orgánica que puesto en planta origina sobre todo en paradas o funcionamiento intermitente olores y sabores desagradables que se transmiten al agua de consumo.

El hueso así tratado sometido a un ensayo de rendimiento extrajo más de 1,2 g de flúor por kg., en un agua con exceso de flúor a pH no mayor de 7,6.

- Térmico:

Se efectuaron experiencias de incineración del hueso con temperaturas entre 350 y 700°C con diversos tiempos de exposición. A temperaturas más elevadas y prolongado tiempo de quemado el hueso modifica su estructura físicoquímica perdiendo los grupos activos que le dan la capacidad de intercambio, se vuelve totalmente inactivo en forma irreversible, por lo que en ningún caso debe llegarse a estos extremos. Con temperaturas menores se obtuvo un hueso de características adecuadas.

6.5.2. Experiencias en Plantas de Tratamiento en Nuestro País

A partir de los ensayos de laboratorio, en plantas piloto y en plantas defluoradoras instaladas en distintas localidades de la Provincia de Buenos Aires (Guaminí, Tres Arroyos, Bragado, Puan, etc.), Callegaro et. al. proporcionan una serie de recomendaciones para alcanzar el mayor rendimiento en este tipo de plantas:

- Lecho desfluorante:

Los más aconsejados son los de hueso desgrasado por calcinación; los utilizados en su totalidad fueron vacunos aunque también se ensayaron huesos de equinos con igual éxito.

La granulometría aconsejable es de 3 a 0,5 mm de diámetro una vez calcinado; tamaños mayores hacen que cierta parte no sea aprovechada por no llegar el agua a toda su masa; medidas menores pueden rendir más pero está expuesta a mayores pérdidas y además suele originar apelmazamiento.

En las primeras plantas instaladas se utilizó hueso de color blanco, desengrasado con soda y aparentemente sin vestigios de grasa, sin embargo la experiencia demostró que el agua tratada presentaba turbidez, olor y gusto que la inutilizaba, especialmente luego de una detención del servicio.

La cantidad de hueso en el reactor se debe determinar teniendo en cuenta las características medias y el caudal a corregir, como así también el tiempo mínimo deseado entre las regeneraciones. La relación entre el diámetro y la altura debe ser tal que permita una expansión del lecho en el contralavado de 30 a 50%.

- Técnica de desfluoración:

El ingreso al reactor debe proyectarse adecuadamente para evitar canalizaciones. La velocidad del agua a tratar deberá ser de aproximadamente 4 a 5 m³/m².h, dependiendo de la concentración de flúor, el pH y la altura del manto. Otros autores proponen una carga superficial de diseño de 7 m³/m².h (Dameri, A.).

En el caso de altos valores de pH conviene previamente ajustar el mismo para lograr un mayor rendimiento y facilidad de tratamiento. Cuando el agua tratada que sale de la planta contiene 2 mg/l de flúor ó más es necesario regenerar el manto de hueso.

Los valores de intercambio pueden variar entre 790 g de F por m³ de relleno (para F_{residual}=0,60 mg/l) a 1020 g de F por m³ de relleno (para F_{residual}=1,20 mg/l) (Dameri, A.).

- Técnica de regeneración del hueso:

Consiste en reemplazar el flúor combinado a la molécula de hidroxifosfato de calcio donde desplaza al oxhidrilo para fijar el ion flúor. En la regeneración la soda cede su oxhidrilo y capta el ion flúor del agua que se une al sodio formando fluoruro de sodio, por lo que para regenerar el hueso es necesario pasar una solución de hidróxido de sodio en una determinada concentración (se estima como mas conveniente la de 1 a 1,2%).

Generalmente se utiliza el equivalente de tres o cuatros volúmenes de soda al 1% con respecto al volumen de hueso a regenerar.

Se inicia bajando el nivel de agua del reactor hasta la capa de hueso, luego se comienza el lavado a contracorriente con suficiente presión como para fluidificar al lecho, el cual es conveniente que se expanda 30 a 50% de su espesor (esta operación puede realizarse además con aire).

A continuación debe vaciarse bien el equipo a regenerar, luego se agrega un primer volumen de soda al 1% hasta cubrir el hueso, se recircula a baja velocidad (entre 0,80 y 1 m³/m².h) durante unas tres horas, manteniendo el manto siempre cubierto con la solución de soda. Se deja escurrir bien la misma y se cubre el hueso con agua de enjuague, se mantiene a baja presión durante una hora, luego se inyecta aire y se drena.

Esta operación se repite dos o tres veces más, con lo cual queda listo para volver a entrar en servicio.

Pese a los enjuagues que se realizan en el hueso queda un exceso de soda que es necesario neutralizar, para lo cual la mayoría de los autores aconsejan el empleo de dióxido de carbono. Como variante se utilizó ácido clorhídrico, inyectándolo al agua de lavado hasta bajar el pH a valores entre 5 y 6.

Es conveniente pasar el agua de contralavado por un tamiz o por una cámara de sedimentación adecuada para retener el material que pudiera escapar del filtro.

Dameri A., propone las siguientes cargas de diseño para la etapa de regeneración:

Contralavado:	25 a 35 m ³ /m ² h
Regeneración:	0,40 m ³ /m ² h
Enjuague rápido:	7 m ³ /m ² h
Neutralización:	7 m ³ /m ² h

- Efluentes de las plantas:

La regeneración del hueso de las plantas de desfluoración origina un efluente que no siempre puede ser evacuado sin inconvenientes. En todos los casos que sea posible se debe tratar de descargarlos en redes colectoras cloacales o en su defecto se deben enviar a enlagunados, donde se evapore o infiltre, siempre que no afecte la capa de agua freática factible de utilizar.

Una forma de contrarrestar buena parte de sus efectos es precipitando la mayor cantidad posible de flúor. El precipitante más activo resulta ser el sulfato de magnesio, seguido de cal.

En el Proyecto Típico “Planta de Abatimiento de Flúor” se describe los fundamentos y los parámetros de diseño de una planta de desfluoración de hueso molido; asimismo se anexa un ejemplo de aplicación.

6.6. UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS

La tecnología de membranas, dentro de la cual la mas difundida es la ósmosis inversa, es técnicamente adecuada y eficiente para la remoción del flúor. El tema es tratado en un capítulo aparte.

6.7. OTRAS TECNOLOGÍAS

A continuación se citarán las experiencias realizadas aplicando dos tecnologías que utilizan una conjunción de los conceptos volcados en algunos de los tratamientos previamente descritos (ablandamiento con cal, coagulación con aluminio, mantos de hueso molido).

Estas tecnologías fueron estudiadas por la Universidad Técnica de Dinamarca y fueron ensayadas a nivel piloto y de pequeña escala. Aún cuando quedan por realizar nuevos ensayos a escala de planta de mayor tamaño, resulta de interés realizar una breve descripción de los fundamentos y resultados obtenidos aplicando dichas técnicas de tratamiento para eliminación de flúor.

6.7.1. Técnica Nalgonda

La técnica Nalgonda fue desarrollada por el Instituto Nacional de Investigación en Ingeniería Ambiental (NEERI) de la India en 1974, y la primera implementación práctica de esta tecnología fue llevada a cabo por Nawlakhe et al. en 1975. Esta técnica se basa fundamentalmente en el concepto tradicional de reducción de flúor utilizando sales de aluminio, solo se diferencia de la técnica tradicional por ligeras modificaciones realizadas a nivel experimental y que incluyen entre otras: tratamiento en dos etapas y etapa final de ajuste con filtro de hueso molido.

Esta parte de desarrollo de la tecnología todavía no había sido beneficiosa para las muchas poblaciones que sufren el problema de exceso de flúor en sus aguas de bebida, debido principalmente a los altos costos del método. Esta tecnología todavía continua investigándose; se destaca además que en el año 1994 se realizaron algunas modificaciones a la técnica Nalgonda en Tanzania las cuales han resultado ser exitosas.

La técnica Nalgonda ha mostrado ser muy efectiva en la remoción de flúor en agua de bebida. El método es muy simple, pero las reacciones químicas que intervienen en el proceso son complejas y algunas no son totalmente entendidas. La técnica puede ser descrita como un proceso de co-precipitación, donde aluminio (en forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y cal (en forma de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) se agregan al agua cruda que contiene flúor.

De esta mezcla resultan cuatro tipos de procesos: coagulación, floculación, adsorción y sedimentación.

- Coagulación: se refiere a las reacciones químicas entre el aluminio y el agua permitiendo la formación de $\text{Al}(\text{OH})_3$. El agregado de cal tiene por objetivo mantener valores de pH entre 6 a 7.
- Floculación: es la secuencia de reacciones electrostáticas que llevan al aglutinamiento de las partículas coloidales (formadas durante la coagulación) para formar grandes flóculos.
- Adsorción: el flúor se remueve por adsorción del mismo en la fase sólida; la adsorción sucede principalmente durante la coagulación, pero también durante la

floculación y se ha determinado que la remoción de flúor sucede en los primeros segundos del tratamiento.

- Sedimentación: la formación de los flóculos facilita este cuarto proceso que es la sedimentación de partículas.

En los años recientes se continuaron realizando experiencias a fin de mejorar la eficiencia de este método, entre las que se pueden citar: tratamiento en dos etapas iguales con la mitad de productos químicos utilizados en cada etapa, utilización de carbonato de calcio en vez de cal, etc. La técnica Nalgonda es un método efectivo para remoción de flúor, pero es especialmente adecuado cuando el agua a tratar no tiene altas concentraciones de flúor.

6.7.2. Precipitación por Contacto

Este método para remoción de flúor en agua de bebida fue testeado a nivel de una villa escolar en Tanzania.

La planta consiste de una columna de contacto, conteniendo una pequeña cantidad de relleno (hueso molido), sobre el cual se mantiene un gran espacio de sobrenadante de agua cruda y donde se produce el agregado y mezcla de fosfato dihidrógeno de sodio ($\text{NaH}_2\text{PO}_4\text{H}_2\text{O}$) y cloruro de calcio ($\text{CaCl}_2\text{H}_2\text{O}$).

La mezcla fluye lentamente en forma descendente a través del relleno de hueso molido y se dispone en la parte inferior del reactor un falso fondo de grava. El agua defluorada que sale del reactor se envía a un tanque de agua tratada. La velocidad de filtración en el reactor no debe superar 1 m/h.

Se operó esta planta a nivel de pequeña escala durante aproximadamente un año. Las concentraciones de flúor en el agua cruda durante este período oscilaron entre 8,2 y 13 mg/l, mientras que la concentración promedio de flúor en el agua tratada fue de 0,4 mg/l. Otros datos de las características de la planta son (ver **Figura 3**):

- Altura de la columna de contacto: 1,7 m
- Diámetro interior de la columna: 0,32 m
- Altura del sobrenadante del agua cruda: 1,1 m
- Profundidad del relleno de hueso molido: 0,28 m
- Profundidad falso fondo de grava: 0,25 m
- Porosidad del hueso molido: 0,56
- Densidad del hueso molido: 0,83 kg/l
- Tamaño del grano de hueso molido: 1 a 4 mm
- Tiempo de retención en el reactor: 58 a 65 min.
- Caudal de funcionamiento: 100 litros/día

En este estudio se realizó una comparación económica entre el costo de tratamiento por metro cúbico agua; de dicha comparación surgió que el proceso de precipitación por contacto tiene costos 50% menores que la técnica Nalgonda, y un 75% menor que la técnica de hueso molido. Cabe aclarar que los autores le dan una gran incidencia al costo del hueso molido, este análisis económico deberá tomarse con precaución a partir de los costos reales en el mercado local de cada insumo.

Por último se cita que el proceso de precipitación por contacto parece ser uno de los métodos de defluoración mas prometedores ensayados a nivel de pequeñas plantas en países en desarrollo, teniendo en cuenta las desventajas de los altos valores de flúor residual que se obtienen con la técnica Nalgonda y los problemas de monitorear los finales de carrera en el proceso tradicional de hueso molido.

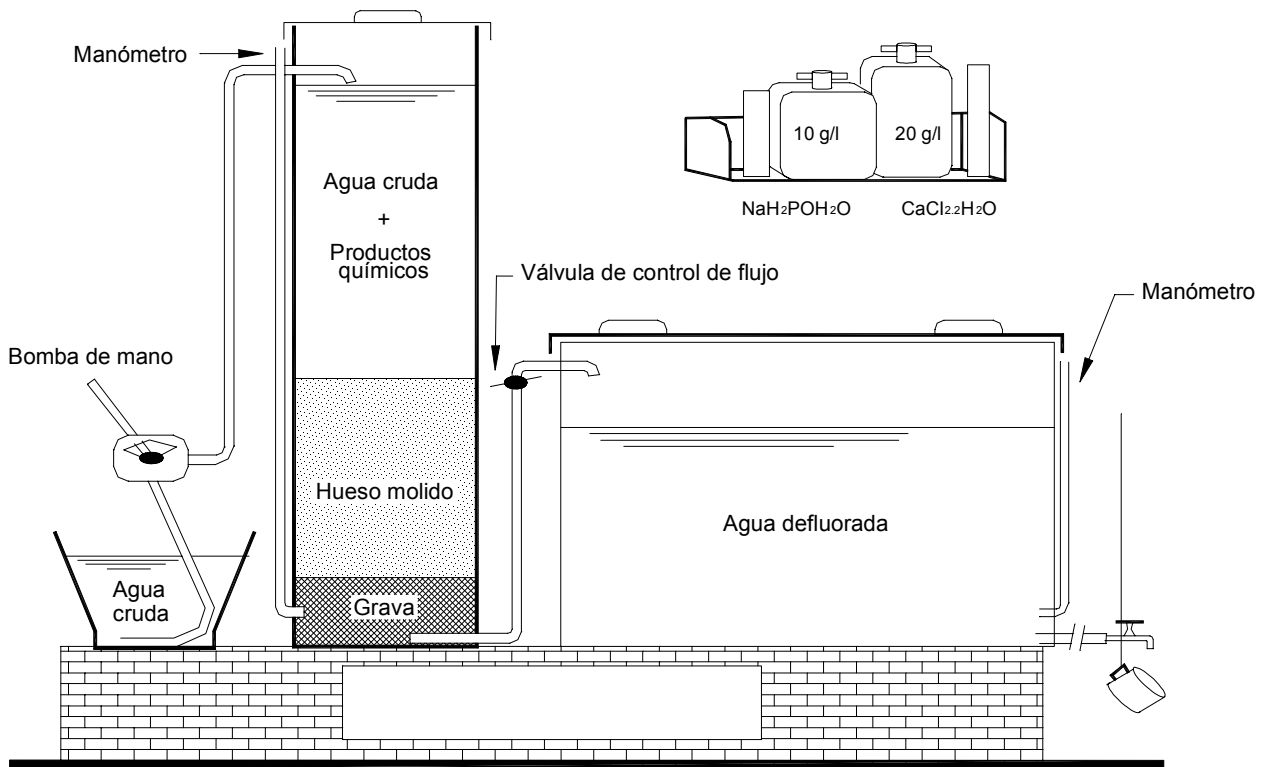


Figura 3. Planta de precipitación por contacto diseñada y operada en Tanzania

7. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Como se citó en el ítem 6. existe una amplia gama de tecnologías para la reducción de flúor, todas las tecnologías nombradas anteriormente han sido aplicadas para el tratamiento de agua y han demostrado funcionar adecuadamente, algunas de ellas no han sido probadas a escala de planta, existiendo sólo algunas experiencias a escala de laboratorio o piloto. En ciertos casos será necesario realizar ensayos previos a nivel de planta piloto que aseguren obtener la eficiencia requerida.

En la **Tabla 1** se indican las principales ventajas y desventajas de las tecnologías mas conocidas y utilizadas para reducción de flúor en agua de bebida. Respecto de los valores de eficiencia de cada tecnología los mismos en algunos casos poseen un rango de variación amplio de acuerdo a las condiciones de operación y ensayo de la tecnología empleada.

Muchas veces las desventajas del método de tratamiento juegan un papel fundamental que hacen inviable su utilización en el lugar, como desventajas generales de los métodos de defluoración podrían ser mencionadas:

- Tecnología de alto costo: es decir, el precio y/o la tecnología es de alto nivel, demandando importar partes de repuestos, productos químicos caros, operación o regeneración que requiere personal especializado. Así, los procesos de ósmosis inversa, intercambio iónico y alúmina activada pueden ser categorizados como tecnologías de alto costo.
- Eficiencia limitada: es decir, el método no alcanza suficiente remoción de flúor, aún cuando se utilice una dosis apropiada como en la Técnica Nalgonda, donde la concentración residual de flúor principalmente es mayor que 1 mg/l.
- Terminación de carrera no perceptible: es decir, la concentración de flúor en el agua tratada puede elevarse gradualmente o súbitamente cuando el medio en la columna de tratamiento está agotado o hasta cuando el flujo esta fuera de control. En el caso de hueso molido y otros medios filtrantes, para evitar que la terminación de la carrera o de la capacidad de remoción no sea percibida, se necesita un monitoreo continuo del flúor residual, o al menos del caudal y del volumen de agua tratada.
- Deterioro de la calidad del agua: algunos métodos podrían elevar el pH a valores muy altos. La calidad del agua también podría deteriorarse debido a una mala preparación del medio (hueso molido) o debido a un escape del medio que contiene el tratamiento, por ejemplo intercambio iónico, alúmina, etc.
- Limitaciones de tabú; especialmente el método de hueso molido no es culturalmente aceptable, por los hindúes como por ejemplo. El hueso molido proveniente de cerdos puede ser cuestionado por los musulmanes. Hasta el chamuscado de huesos ha sido informado ser repulsivo en aldeas del Norte de Tailandia.

Tecnología	Remoción (%)	Ventajas	Desventajas
Ablandamiento con cal	M	Método sencillo. Bajo costo. Productos químicos fáciles de obtener.	Necesidad de subir el pH a valores altos. Disposición del barro.
Coagulación con sulfato de aluminio	B	Método sencillo. Bajo costo. Productos químicos fáciles de obtener.	Poco eficiente para altos valores de flúor en el agua a tratar. Necesidad de bajar el pH a valores bajos. Disposición del barro.
Adsorción Hueso Molido	A	Método sencillo. Bajo costo.	Necesidad de un adecuado desengrasado del hueso para evitar problemas de olor y sabor en el agua tratada.
Adsorción Alúmina Activada	A	Operación de acuerdo a la demanda. Altamente selectiva para flúor y arsénico	Necesidad de bajar el pH Se requiere una base y un ácido para su regeneración El medio tiende a disolverse produciendo partículas finas Disposición del residuo.
Osmosis Inversa	A	Muy buena eficiencia.	Preacondicionamiento del agua a tratar. Alto costo de producción de agua. Cambio de membrana cada 4 años. Disposición final rechazo.
Intercambio Iónico	A	Técnica selectiva de iones. Operación de acuerdo a la demanda.	Alto costo de tratamiento. Regeneración. Disposición final del residuo
A = Alta = mayor a 80%, M = Media = de 20 a 80%, B = Baja = menor a 20%			

Tabla 1. Comparación de distintas tecnologías de reducción de flúor

Finalmente, cabe mencionar que la necesidad de reducción de flúor en el agua para consumo humano estará relacionada con los valores máximos fijados en las normativas correspondientes, y que para la selección de la alternativa más conveniente se deberán considerar las ventajas y desventajas de cada una en sus aspectos técnicos, económicos y ambientales. Asimismo, cualquiera sea el procedimiento utilizado, las plantas de tratamiento deben ser atendidas por personal idóneo y bien entrenado, para asegurar la eficiencia del proceso.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera G., Proserpio D., Sánchez L.; Experiencias de cuatro años de funcionamiento de una planta correctora de flúor en Guaminí, 7° Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente, Mendoza, Noviembre 1991.
- Callegaro R., Cusimano N., Deambrosi N., Albina L.; Reducción de excesos de Flúor en aguas de bebida-Metodología propuesta, 8° Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente, Mar del Plata, Octubre 1993.
- Choi W., Chen K.; The Removal of Fluoride from Waters by Adsorption, Journal AWWA, Vol 71, N°10, pp 562-570, October 1979.
- Dahi E., Contact precipitation; a promising method for defluoridation of water, Department of Environmental Science and Engineering, Technical University of Denmark, 1996.
- Fluoride, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality, August 1996.
- Montgomery J., Water Treatment Principles and Design, John Wiley and Sons, 1985, USA.
- Perez Gattorna E., Planteo del problema a resolver, Seminario sobre potabilización de aguas con arsénico y flúor, AIDIS Argentina, Córdoba, Junio 1996.
- Piñeda H., Reartes N., Sereno S., Frangie S., Bologna C., Sereno L.; Eliminación de fluoruros utilizando hidroxapatita, 10° Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente, Rosario, Mayo 1998.
- Poulsen B., Evaluation and Optimization of the Nalgonda Technique in Ngurdoto, Tanzania, Center for Developing Countries, Technical University of Denmark, December 1995.
- Trelles R., Larghi A., Paéz J., El problema sanitario de las aguas destinadas a la bebida humana, con contenidos elevados de arsénico, vanadio y flúor, Publicación N°4, Instituto de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Año 1970.
- U.S.EPA, Technologies for Upgrading Existing or Designing New Drinking Water Treatment Facilities, EPA/625/4-89/023, March 1990.
- Xu Guo-Xun, Fluoride removal from drinking water by activated alumina with CO₂ gas acidizing method, J. Water SRT, Aqua Vol. 43, N° 2, pp 58-64, 1994.