

HOJA TÉCNICA

“Remoción de aluminio en agua para consumo humano”



Área Funcional Investigación Aplicada

UEN Investigación y Desarrollo

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS



**Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo**



**AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS,
ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN
EL REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI**

Yo, Annette Henchoz Castro

N° Cédula: 1-0725-0409

Dependencia: Gerencia General

Autorizo como Sub Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital, Catálogo en línea (OPAC) y la intranet institucional de la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: centrodoc@aya.go.cr **N° Teléfono:** 2242-5487

Annette
Henchoz Castro

Firmado digitalmente por
Annette Henchoz Castro
Fecha: 2019.11.25 16:07:20
-06'00'

Firma: _____



REMOCIÓN DE ALUMINIO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO

1. Estado de la situación

En primera instancia, es importante anotar que el aluminio es solamente uno de los diversos elementos inorgánicos que se presentan como trazas en el agua. Igualmente, se debe tomar en cuenta que este elemento forma parte de muchos agentes coagulantes o bien floculantes que se emplean en potabilización de agua. No obstante, cuando se presentan niveles altos de este elemento, siempre se recomienda determinar si la fuente del mismo es de origen natural o antropogénico.

Si el caso fuera de origen natural, se debe tomar en cuenta que usualmente se puede encontrar el aluminio en la forma de silicatos, tales como Feldespato ($KAlSi_3O_8$), los cuales son minerales muy comunes en la corteza terrestre (WQA, 2014). De hecho, el óxido de aluminio, conocido como bauxita ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), es la principal mena del aluminio utilizada por la industria. Adicionalmente, el aluminio puede ser extraído selectivamente de rocas y estratos del suelo, para que luego se incorpore a fuentes naturales de agua. Constituye aproximadamente el 8% de la corteza terrestre (WHO, 2017).

En la naturaleza el aluminio existe en estado de oxidación trivalente ($3+$), y sus características de carga y radio iónico lo convierten en un elemento altamente reactivo. Es decir, no se encontrará fácilmente como elemento libre en la naturaleza.

Comúnmente, según el tipo de agua, el aluminio en el agua para consumo humano está presente en forma mononuclear (libre Al^{3+}), o bien, puede estar formando complejos con otras sustancias inorgánicas disueltas tales como lo son iones hidróxido, ion fluoruro, o ion sulfato. También es posible indicar que el aluminio puede estar químicamente enlazado a ligandos orgánicos o a coloides inorgánicos. Lo que más cambia de un tipo de agua a otra, es la distribución de las fracciones de estos componentes.

Para el caso del agua cruda, Srinivasan (1999) indica que la mayoría del aluminio está asociado con coloides inorgánicos (carga global positiva) o enlazado a moléculas orgánicas de gran tamaño (carga global negativa). Asimismo, este autor indica que la sustancia en cuestión es altamente insoluble en intervalos de pH de 6.5 a 8.5. No obstante, su solubilidad en agua se ve favorecida bajo condiciones ácidas ($pH < 6$) o básicas ($pH > 8.5$), aunque también con la presencia de ligandos formadores de complejos.

Según Srinivasan (1999), niveles altos de aluminio en agua para consumo humano (3.6 a 6 mg/l) podrían provocar:

- Alteración en los niveles de turbiedad.
- Reducción de la eficiencia de algunos procesos de desinfección.



- Precipitación en la forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (hidróxido de aluminio) en las redes de distribución.

Todas estas características del aluminio son empleadas por diversas tecnologías para reducir la concentración de este componente en el agua para consumo humano. Es decir, la remoción del elemento simplemente se basa en sus propiedades físicas y químicas. En secciones subsiguientes se amplía la temática según las alternativas disponibles en el mercado.

Desde el punto de vista de salud pública, WHO (2017) establece que el mayor consumo de aluminio en el ser humano se da por la vía de los alimentos, especialmente por aquellos que tienen compuestos de aluminio empleados como aditivos. Típicamente, la contribución al consumo de aluminio por medio del agua potable (exposición oral) es menor al 5% del total para el ser humano. Esto da una impresión global del impacto de los hábitos alimenticios sobre el organismo.

WHO (2017) también indica que no existe un valor guía debidamente respaldado por medio de estudios técnicos. Se tiene referencia de valores cercanos a 0.9 mg/l si se considera sólo consumo del elemento, asignando un 20% del aporte por consumo de 2 l/d de agua en un adulto de 60 kg. Sin embargo, este valor no es adecuado desde el punto de vista de optimización de los procesos de coagulación empleados en potabilización de agua. Usualmente, se establecen valores entre 0.1 mg/l y 0.2 mg/l.

No existe evidencia de que el consumo oral de aluminio genere algún tipo de toxicidad aguda. Además, existen hipótesis de que el aluminio podría ser uno de los agentes de riesgo para la enfermedad de Alzheimer. No obstante, la misma WHO (2017) indica claramente que los estudios realizados no hicieron una diferenciación entre las procedencias del aluminio consumido (alimentos, agua, etc) y las metodologías empleadas en los estudios no permitieron un seguimiento de los resultados con suficiente rigor científico. En Costa Rica, el Reglamento para la Calidad del Agua Potable establece un valor máximo admisible de 0.2 mg/l.

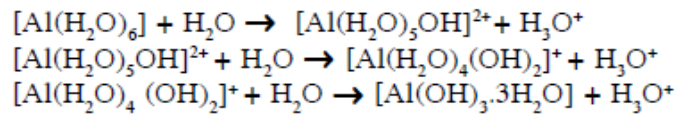
2. Estrategias para tratamiento

Las estrategias de tratamiento para el caso en cuestión muestran procesos que pueden ser incorporados dentro de toda una alternativa tecnológica, que posteriormente se debe adecuar a cada caso particular. Es decir, se muestran conceptos específicos para la química del aluminio en el agua, que se deben complementar según corresponda para atender otras condiciones de calidad de agua que se pudieran presentar. Se mantiene la premisa de que cada caso es único, y de ser posible, se recomienda el uso de sistemas piloto o la recopilación de experiencia operativa para generar eventuales propuestas de tratamiento.



2.1 Modificación de pH, floculación y filtración rápida

La transformación de los iones aluminio (Al) en hidróxido de aluminio (Al(OH)₃) es uno de los mecanismos para remoción más utilizados. A pesar de lo complejo que pueden llegar a ser los pasos involucrados en este proceso, es posible sintetizar las reacciones que ocurren de la siguiente manera:



Según las reacciones químicas expuestas, los iones hidronio (H₃O⁺) formados durante el proceso de hidrólisis de los iones metálicos, deben ser removidos del sistema con el fin de facilitar la formación de hidróxido de aluminio tri-hidratado. Esto usualmente se logra por la presencia del anión bicarbonato en el mismo medio acuoso; es decir, se requiere suficiente alcalinidad para el fenómeno. De esta manera, se inicia la formación de una fase (hidróxido de aluminio) ligeramente insoluble en el agua, la cual se rige por el valor de pH y la concentración del anión bicarbonato.

Típicamente, se recomienda la adición de una base fuerte para procurar lograr condiciones para la formación de hidróxido de aluminio. Posteriormente, estos compuestos insolubles formados se estabilizan por medio de una operación unitaria intermedia, para ser luego eliminados por medio de filtración. Finalmente, el pH del agua se debe estabilizar para lograr la calidad de agua establecida en la reglamentación nacional.

Este tipo de solución se puede configurar de dos maneras: a) equipo compacto presurizado para lograr la velocidad de filtración que requiere el proceso; o b) diseño y construcción de un sistema similar al esquema CEPIS para remoción de turbiedad.

2.2 Ajuste de pH, floculación y filtración lenta

El grado de absorción del aluminio es función de varios parámetros, como el tipo de sal de aluminio administrada, el pH (que influye en la especiación y solubilidad del aluminio), la biodisponibilidad y factores nutricionales. Partiendo de la condición ácida del agua, donde se tienen altas concentraciones de aluminio, se trata de precipitar el aluminio en forma de arcillas minerales. Para tal objetivo se requiere ajustar el pH del agua para lograr pasar el aluminio de un estado soluble a insoluble, y así hacerlo precipitar.

Para tal propósito se puede plantear un ajuste de pH con hidróxido de calcio o soda cáustica, hasta llevarlo a un margen insoluble en el agua para un pH entre 6.5 y 8. Una vez realizado el ajuste de pH se podría pensar en un tratamiento previo al filtro lento, para retener el aluminio que ya no sería soluble en el agua. Este pre-tratamiento podría ser un filtro grueso de flujo ascendente con capas de diferentes

granulometrías. Seguidamente se ubica la filtración lenta en arenas.

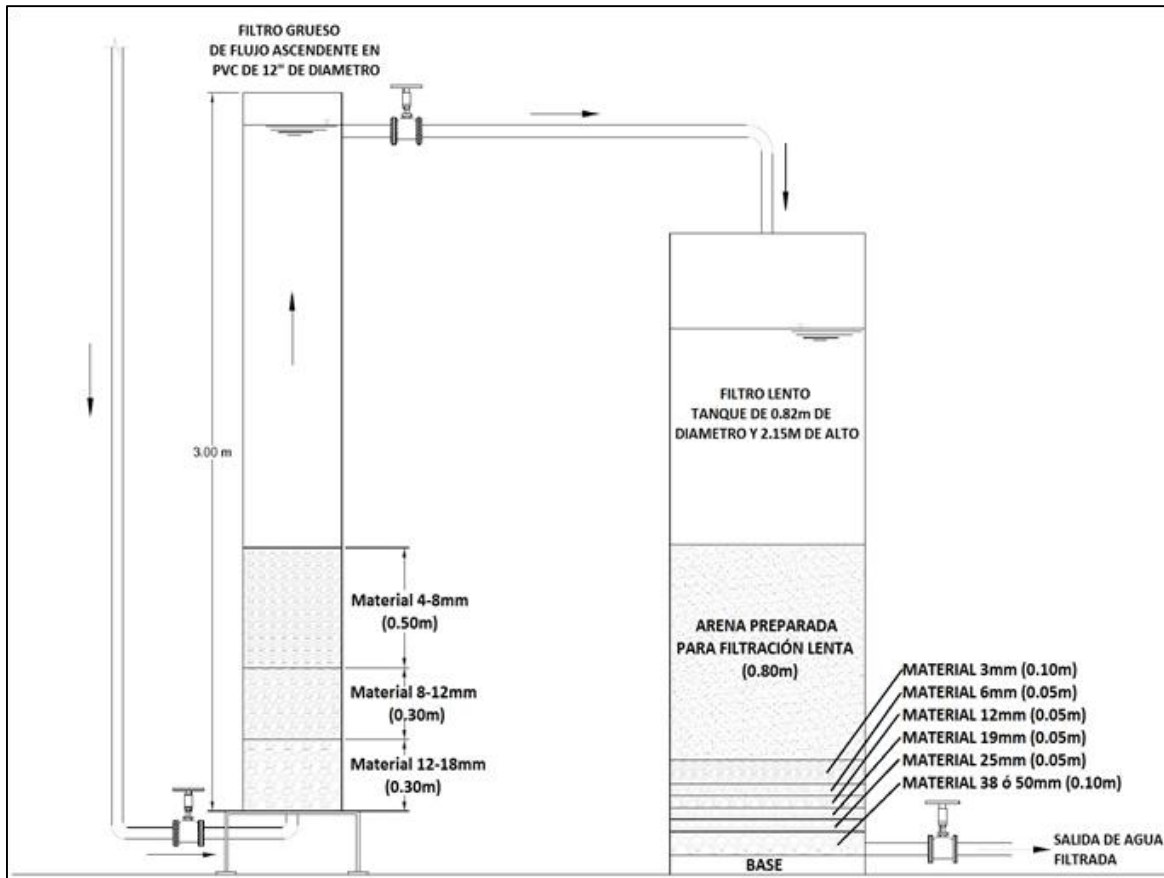


Figura 1 Esquema del filtro grueso y el filtro lento, planteados para el piloto (Elaboración propia)

2.3 Adsorción sobre carbón activado

El proceso de adsorción es aquel en el cual moléculas o partículas se adhieren a una superficie (Hendricks, 2011). Esta superficie puede ser parte de cualquier sólido; sin embargo, hay algunos materiales más efectivos que otros. A diferencia del proceso de intercambio iónico, la adsorción puede llegar a tener varios componentes: a) atracción electrostática, b) fuerzas de Van der Waals, y c) enlaces químicos.

Entre los materiales más utilizados para procesos de adsorción se tiene: carbón activado, goetita, dióxido de titanio, etc. Estos materiales normalmente no son específicos para remover una sola sustancia, sino que pueden llegar a atraer varios componentes distintos al mismo tiempo. Por lo tanto, aunque pudieran llegar a tener una excelente eficiencia para remover aluminio, es posible que puedan tener una vida útil limitada por estas interferencias. Es decir, además del componente objetivo



se removerá cualquier otra sustancia que presente afinidad al medio adsorbente y, por lo tanto, se disminuirán los “espacios disponibles” para adsorción del aluminio.

Uno de los materiales más utilizados para este tipo de procesos es el carbón activado. Únicamente para tener una impresión de los alcances de esta técnica, es posible realizar algunas estimaciones con base en estudios elaborados por Shaheen et al (2008). Este autor indica, que dependiendo de las condiciones de calidad de agua y según las variables propias del proceso, la capacidad de retención de aluminio en algunos tipos de carbón activado varía entre 0.021 mg/g y 0.305 mg/g.

En este punto es importante anotar que, normalmente, las soluciones basadas en adsorción sobre carbón activado dejan de ser prácticas conforme aumenta el caudal de agua a tratar. Asimismo, en cada caso se debe valorar la calidad de agua final, ya que podría presentarse algún grado inesperado de modificación de la calidad del agua. Igualmente, se requiere una gestión operativa muy robusta para tratar y disponer de manera correcta los residuos que genera el proceso de manera periódica.

2.4 Intercambio iónico

En el caso del intercambio iónico, las especies que se eliminan son iones (no moléculas o partículas). Adicionalmente, la resina de intercambio cuenta con sitios cargados en su interior, algo diferentes a los sitios que ofrecen fuerzas moleculares de atracción (Hendricks, 2011). Comercialmente, es conocido que las resinas de intercambio iónico se pueden clasificar según su origen (naturales o sintéticas) o bien según su grupo funcional. En el caso de procesos para bajar la concentración de aluminio en agua, se trabaja con resinas de intercambio catiónico, siempre y cuando el agua a tratar tenga las condiciones para ello (bajo pH).

Según lo establecido por algunos fabricantes, es posible valorar la efectividad de procesos de intercambio iónico para remoción de aluminio empleando resinas catiónicas estándar, similares a las utilizadas en suavizadores de agua. Esto cuenta con el potencial beneficio de que la resina podría también remover algunos iones H^+ del agua, lo cual podría reducir la necesidad final de ajuste de pH. Sin embargo, todo este comportamiento se debe comprobar previamente con un sistema piloto.

Un aspecto que cabe destacar para este tipo de soluciones es el hecho de que normalmente la resina nueva presenta una cubierta con naturaleza básica. Por lo tanto, es importante que se sigan las recomendaciones del fabricante para puesta en marcha de los sistemas. Esto podría generar una impresión temporal de variaciones en la calidad del agua tratada que claramente no se mantienen con el transcurso del tiempo.

Una resina como la descrita en esta sección requiere de una regeneración, según



sea el caso, con cloruro de sodio o bien con una solución ácida. La mayoría de autores recomiendan soluciones ácidas para el caso del aluminio, por causa del estado de oxidación de esta sustancia. La configuración de un sistema como este es similar al de adsorción, pero con los cambios respectivos en el medio interno.

Similar al caso anterior, se debe observar que las soluciones basadas en intercambio iónico dejan de ser prácticas conforme aumenta el caudal de agua a tratar. Asimismo, en cada caso se debe valorar la calidad de agua final, ya que podría presentarse algún grado desmineralización. Igualmente, se requiere una gestión operativa muy robusta para tratar y disponer de manera correcta los residuos que genera el proceso de manera constante. Es común que los ciclos de intercambio iónico sean cortos, por su naturaleza, por lo que se requiere manejo constante de insumos químicos y residuos que se deben valorar para determinar si se clasifican como residuo peligroso.

2.5 Ósmosis inversa

Según Lenntech (2015), el fenómeno de la Ósmosis está basado en la búsqueda del equilibrio. Cuando se ponen en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de sólidos disueltos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Si estos fluidos están separados por una membrana permeable (la cual permite el paso a su través de uno de los fluidos), el fluido que se moverá a través de la membrana será el de menor concentración de tal forma que pasa al fluido de mayor concentración (Lenntech, 2015).

Al cabo de un tiempo, el contenido en agua será mayor en uno de los lados de la membrana. La diferencia de altura entre ambos fluidos se conoce como Presión Osmótica (Lenntech, 2015). Este concepto es la base para el funcionamiento de la tecnología.

Si se utiliza una presión superior a la presión osmótica, se produce el efecto contrario. Los fluidos se presionan a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos quedan atrás. Para poder purificar el agua se necesita llevar a cabo el proceso contrario al de ósmosis convencional, lo que se conoce como ósmosis inversa. Se trata de forzar el paso del agua que se encuentra en un fluido crudo a otra fase (agua) con baja concentración del material que se desea remover. Por lo tanto, es necesario presurizar el agua a un valor superior al de la presión osmótica.

Para este caso, los fabricantes recomiendan contar con algunas condiciones mínimas para garantizar el buen desempeño del proceso, valorando parámetros tanto de calidad de agua, como de la hidráulica del acueducto. Por ello, la valoración de este tipo de procesos, siempre se debe contar con un estudio de mercado adecuado. Esta es la única manera en que se pueden generar los criterios técnicos y económicos necesarios para una buena valoración.



Se debe mantener en consideración que, al día de hoy ha bajado el costo de inversión de las soluciones basadas en el uso de membranas. Sin embargo, el requerimiento de operación y mantenimiento es el punto que mayor atención requiere al momento de realizar una valoración de alternativas. Aunque no se discute el beneficio de poder obtener una calidad de agua tratada muy constante, es necesario tomar en consideración algunos costos tales como (Voutchkov, 2013):

- Energía eléctrica, que varían según: presión osmótica, tipo de pre-tratamiento, calidad de agua y temperatura.
- Productos químicos, que varían según: ubicación geográfica, calidad de agua, tipo de pre-tratamiento, y la calidad de agua meta.
- Mano de obra, que debe contemplar al menos: operación continua, supervisión especializada, mantenimiento electromecánico especializado, manejo de productos químicos, laboratorio propio, administración, monitoreo remoto.
- Mantenimiento, que debe contemplar labores para mantener adecuadamente: operaciones de rutina (preventivo y correctivo), equipo de emergencia, estructuras, edificios, tubería.
- Reemplazo periódico de membranas y elementos de pre-tratamiento.
- Tratamiento y disposición final del residuo (rechazo) del proceso.
- Monitoreo ambiental y monitoreo de rutina.
- Costos indirectos de operación y mantenimiento: entrenamiento anual del personal, desarrollo, certificaciones, consumibles, equipo de soporte, servicios, seguros, contingencia de eventos, y otros.

Asimismo, en cada caso se debe valorar la calidad de agua final, ya que podría presentarse algún grado desmineralización. Igualmente, se requiere una gestión operativa muy robusta para tratar y disponer de manera correcta los residuos que genera el proceso de manera constante. Es común que se requiera un nivel de especialización elevado para las labores operativas, de mantenimiento y gestión de residuos.

3. Criterios sanitarios

3.1 Modificación de pH, floculación y filtración rápida

En el caso de la propuesta de modificación de pH, floculación y filtración rápida, los principales aspectos sanitarios a considerar se muestran en el cuadro 1. Es importante anotar que la mayoría de criterios presentados para esta alternativa son basados en experiencia operativa de AyA. Asimismo, es fundamental interpretar previamente la calidad del agua, con el fin de que se pueda valorar la necesidad eventual de cambios en algunos valores.



La eficiencia reportada para modificación de pH y filtración es cercana al 60. Ahora bien, si este valor no es suficiente para algún caso particular, es posible considerar algún proceso unitario previo. La floculación ascendente en medio granular ha sido una de las opciones más utilizadas, por su simplicidad. Esta combinación permite complementar la eficiencia para poder obtener un valor global más alto.

Cuadro 1 Criterios sanitarios preliminares para modificación de pH y filtración rápida (Elaboración propia)

Parámetro	Valor
Dosificación de base (mg/l)	Prueba preliminar
Velocidad de filtración (m/h)	< 12
Composición del medio filtrante**	Arena, antracita, zeolita o dual
Intervalo de pH (-)*	6.5 – 8.0
Velocidad en floculación ascendente en medio granular previa (m/h)	≤ 1
Tiempo mínimo para floculación (min)**	≥ 3 @ G = 35 s ⁻¹
Eficiencia reportada, sólo filtración (%)	60

* Puede variar según alcalinidad y otros aspectos de calidad de agua.

** Confirmar con prueba preliminar.

Según pruebas realizadas por el Área Funcional de Investigación Aplicada y por la UEN Administración de Proyectos de la Subgerencia de Sistemas Comunales, algunos requerimientos de base se reportan dentro de las siguientes magnitudes:

- Hidróxido de sodio (empleado en presentación comercial al 50%):

$$6 \times 10^{-5} \text{ hasta } 6 \times 10^{-4} \frac{\text{mol NaOH}}{\text{L agua cruda}}$$

- Hidróxido de calcio (empleado en suspensión al 0.5% y al 1%): 2 hasta 2.5 ml suspensión al 1% /

$$2 \text{ hasta } 2.5 \frac{\text{ml suspensión Ca(OH)}_2 \text{ @ 0.5\%}}{\text{L agua cruda}}$$

$$6.5 \frac{\text{ml suspensión Ca(OH)}_2 \text{ @ 1\%}}{\text{L agua cruda}}$$



Para el caso del floculador ascendente, se recomienda seguir las siguientes recomendaciones sanitarias:

- Unidad para distribución de caudal de ingreso en proporciones iguales al número de compartimentos, regulable.
- Flujo ascendente, con mecanismo para medición de pérdida de carga.
- En caso de emplear una cobertura superior, que sea removible, para evitar formación de algas.
- Sección inferior con fondo falso.
- Velocidad de salida del agua del floculador durante la operación de desagüe: 40 m/h (Wegelin, 1996).
- Velocidad ascensional de 1 m/h.

Un aspecto complementario, pero no menos importante, es la composición vertical del lecho de piedra. AyA ha seguido las recomendaciones emitidas por Wegelin (1996) y ha logrado obtener resultados satisfactorios en sus sistemas. Los valores empleados hasta el día de hoy se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2 Composición recomendada para el lecho de piedra del floculador ascendente (Wegelin, 1996)

Ubicación	Tamaño de piedra bola (mm)	Espesor del lecho (m)
Superior (salida del agua)	4 a 8	0.50
Intermedio	8 a 12	0.30
Inferior (ingreso del agua)	12 a 18	0.30

Coefficiente de uniformidad < 2

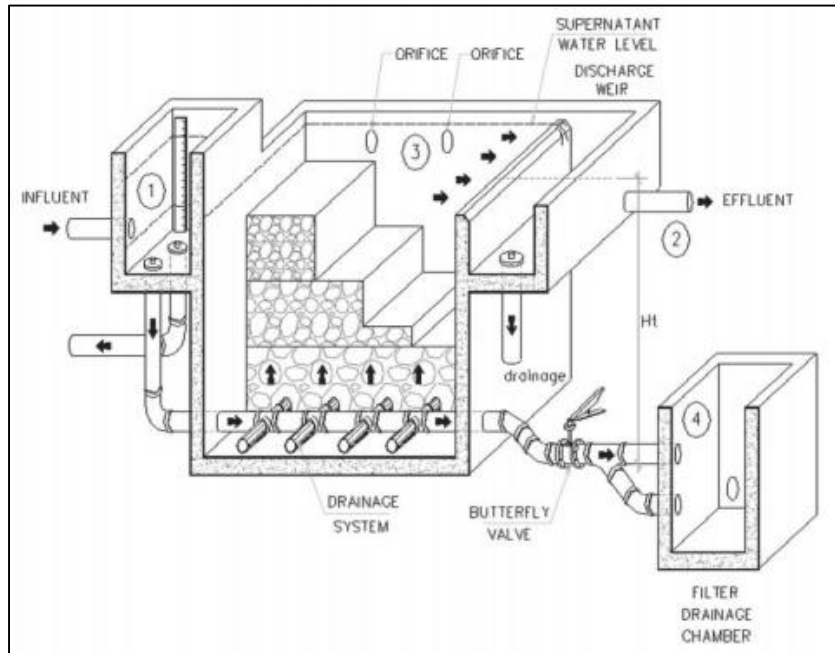


Figura 2 Esquema general del floculador ascendente (Sánchez, 2016)

Esta unidad (ver figura 2) requerirá de una purga periódica para su correcto funcionamiento, la cual se llevará a cabo por medio de una tubería con válvula mariposa ubicada en la dirección que se seleccione para enviar este líquido residual al lecho de secado. Esta tubería con válvula deberá ubicarse en el punto más bajo de cada compartimento.

Algunos parámetros a considerar, además de los reportados por algunos fabricantes de tecnología, como posibles interferentes para la remoción de aluminio por modificación de pH, floculación y filtración son:

- Materia orgánica total y disuelta.
- Otras sustancias consumidoras de alcalinidad.
- Capacidad amortiguadora del agua.
- Balance iónico completo.
- Naturaleza de la materia orgánica en el agua.

3.2 Modificación de pH, floculación y filtración lenta

La principal diferencia con la alternativa tecnológica de la sección anterior es el uso de filtros lentos. En este punto se resaltan dos elementos fundamentales para el correcto dimensionamiento sanitario: la tasa de filtración y la composición del lecho filtrante. De acuerdo con AWWA (1991), para que la filtración lenta pueda tener efectividad la tasa de filtración debe estar entre 0.12 m/h y 0.47 m/h. El AyA emplea, en algunos sistemas del Gran Área Metropolitana, velocidades cercanas a 0.56 m/h.



La composición del lecho filtrante es un tema que puede variar de un diseñador a otro, e incluso puede ser seleccionada por criterio del operador directo de los sistemas. A nivel de AyA, la configuración más utilizada a nivel de la GAM es la indicada en el cuadro 3. Esta información fue suministrada por el Tec. Luis Fernando Obando Fernández, de la Dirección de Plantas Potabilizadoras.

Cuadro 3 Composición recomendada para el lecho filtrante de filtros lentos en la GAM (Obando, 2018)

Ubicación	Tamaño de partícula (mm)	Espesor del lecho (m)
Estrato 1 (superior) – arena	0.6 – 0.8	0.80
Estrato 2 – piedra bola	3	0.10
Estrato 3 – piedra bola	6	0.05
Estrato 4 – piedra bola	12	0.05
Estrato 5 – piedra bola	19	0.05
Estrato 6 – piedra bola	25	0.05
Estrato 7 (inferior) – piedra bola	38 - 50	0.10
Altura total		1.20

3.3 Adsorción sobre carbón activado

El diseño sanitario de los procesos de adsorción usualmente está basado en la experiencia, ya que es difícil que un fabricante cuente con información documentada del comportamiento sus productos frente a las condiciones tan diversas de calidad de agua que existen. El proceso de adsorción, por su naturaleza, va a depender de una capacidad específica propia del medio, en función de parámetros sanitarios, sin dejar de lado la calidad del agua. Depende del material empleado en el tratamiento, se podría tratar de un proceso selectivo o no.

El carbón activado granular es aquel cuyo tamaño promedio de partícula se ubica entre 0.5 y 3 mm. A diferencia del carbón activado en polvo, el cual se puede agregar directamente a la matriz agua para ser removido en operaciones unitarias posteriores, en este caso se requiere de equipamiento para garantizar parámetros sanitarios específicos. Es común encontrar sistemas cuya velocidad de paso por el adsorbente se ubica entre 5 y 15 minutos, con tiempos de contacto de lecho vacío mayores a los 5 minutos.



Al momento de realizar pruebas preliminares para evaluar el desempeño del carbón activado granular, también es importante considerar los parámetros relacionados con el desempeño del material. Básicamente, se emplea el término “producción específica”, el cual muestra la relación entre el tiempo para agotamiento del medio hasta alcanzar el punto de quiebre de diseño, y la masa de adsorbente empleada. También es posible encontrar la expresión “tasa de uso de carbón”, la cual corresponde al inverso de la expresión anterior.

Por otra parte, Crittenden (2012) indica que el carbón activado en polvo es aquel cuyo tamaño promedio de partícula se ubica entre 20 y 30 μm . Los usos principales para este tipo de producto es la mejora en las condiciones de olor y sabor del agua, aunque también se ha empleado para remover trazas de pesticidas y algunos microcontaminantes orgánicos. Adicionalmente, se reporta que hay una gran variabilidad en cuanto a propiedades físicas y químicas, las cuales típicamente no determinan de manera sencilla el desempeño de los procesos de potabilización (se requieren pruebas previas).

Es común encontrar plantas con tiempos de contacto entre 0.5 y 2 horas, aunque todo depende de los parámetros de diseño que se obtengan en pruebas preliminares. En el cuadro 4 se presenta un ejemplo de resultados obtenidos por Al-Muhtaseb (2008) para adsorción de aluminio sobre carbón activado. Esto tiene como fin ilustrar la necesidad de realizar pruebas de tratabilidad previo al diseño de soluciones de este tipo.

Cuadro 4 Ejemplo de criterios sanitarios preliminares para adsorción sobre carbón activado (Al-Muhtaseb, 2008)

Parámetro	Concentración inicial Al = 5 mg/l		Concentración inicial Al = 50 mg/l	
	Vegetal	Mineral	Vegetal	Mineral
Material base	Vegetal	Mineral	Vegetal	Mineral
Tamaño de partícula (mm)	0.1 – 0.20	0.85 – 1.70	0.1 – 0.20	0.85 – 1.70
Área superficial BET (m^2/g)	690	1220	690	1220
Capacidad de adsorción a equilibrio, 22 °C (mg/g)	0.305 (pH 2)	0.021 (pH 2)	0.420 (pH 2)	1.066 (pH 2)
	0.456 (pH 3)	0.024 (pH 3)	0.676 (pH 3)	4.003 (pH 3)
	1.321 (pH 4)	1.368 (pH 4)	4.426 (pH 4)	4.490 (pH 4)

Según los datos tabulados en el cuadro 4, se debe hacer especial énfasis en el hecho de que el investigador realizó pruebas en condiciones ácidas. Esta condición es coincidente con los intervalos de pH en los cuales típicamente el aluminio se encuentra soluble. Probablemente, se podría enfrentar una condición de ensuciamiento significativa, en caso de contar con otros valores más altos.

Es importante destacar que, a pesar de las características del carbón activado empleado (granular), conforme el pH se acerca a 4, se encuentra un desempeño

similar de ambos materiales. Asimismo, se tiene una influencia alta de la concentración de aluminio en el agua cruda sobre los resultados que se pueden esperar. A pesar que cada material citado tiene características propias particulares, no es posible generalizar conclusiones más allá de las ya expresadas. Por lo que es recomendable realizar pruebas piloto para verificación del desempeño de soluciones a gran escala.

Los parámetros que se muestran en el cuadro 4 se generan a partir de una prueba que puede ser en escala piloto. Es decir, no se debe partir necesariamente de investigación experimental; sino que se puede proceder a la fase de investigación aplicada. El protocolo necesario para este tipo de prueba es sencillo, y simplemente debe contar con un enfoque de validación. En caso que se requiera algún estudio comparativo, sí se requiere de un trabajo metodológico más detallado y extenso.

Algunos parámetros a considerar, además de los reportados por algunos fabricantes de tecnología, como posibles interferentes para la remoción de aluminio por adsorción sobre carbón activado son:

- Materia orgánica total y disuelta.
- Plaguicidas.
- Compuestos orgánicos persistentes.
- Altos valores de dureza total.
- Equilibrio de cationes según afinidad al adsorbente seleccionado.
- Presencia de oxidantes en el agua.
- Sulfuro de hidrógeno.
- Sílice.
- Metales disueltos.
- Turbiedad y color.
- Naturaleza de la materia orgánica en el agua.

3.4 Intercambio iónico

En las fichas técnicas de resinas de intercambio iónico usualmente se indican los parámetros básicos de operación, pero los valores normalmente vienen como intervalos muy amplios. Esto dificulta significativamente la labor del diseñador del sistema. Es por ello que se recomienda tomar los valores del fabricante como referencia, y valorar dos opciones: a) diseñar un sistema muy flexible en términos operativos, o bien b) realizar una prueba piloto previa.

A modo de ejemplo, la empresa Dow Chemical ® indica que el aluminio se puede remover de medios acuosos ligeramente ácidos, por medio de resinas de intercambio tipo ácido fuerte. Asimismo, se recomiendan cambios de producto (resinas tipo ácido débil) si se tienen intervalos de pH que lleguen a ubicarse entre



3 y 6. En el cuadro 5 se resumen parámetros típicos recomendados por algunos fabricantes, los cuales se deben verificar por medio de pruebas piloto.

Cuadro 5 Criterios sanitarios preliminares para intercambio iónico (Dow Chemical, 2018)

Parámetro	Resina catiónica tipo ácido fuerte	Resina catiónica tipo ácido débil
Grupo funcional	Ácido sulfónico	Ácido carboxílico
Capacidad total de intercambio, mínima (eq/l)*	2	3.8
Tamaño promedio de partícula (μm)*	600 - 700	300 - 1200
Densidad de partícula (g/ml)*	1.2	1.2
Densidad aparente (g/ml)*	0.8	0.8
Intervalo de pH de operación (-)*	0 - 14	5 - 14
Profundidad del lecho, mínimo (m)*	0.45	0.80
Velocidad operación (m/h)*	5 - 150	5 - 50
Velocidad regeneración (m/h)*	1 - 10	1 - 10
Requerimiento de agua para enjuague (bed volume)*	3 - 6	3 - 6
Regenerante	HCl: 4 - 8% H ₂ SO ₄ : 1 - 10%	HCl: 1 - 5% H ₂ SO ₄ : 0.5 - 0.8%
Caída de presión estimada a 50 m/h y 20 °C (bar/m)	0.5	0.9

* Confirmar con prueba preliminar.

Las pruebas piloto para este tipo de alternativas se pueden ajustar satisfactoriamente a caudales de tratamiento bajos, lo cual facilita la obtención de resultados en un plazo muy corto. Esto también representa el hecho de que los módulos de intercambio iónico usualmente alcanzan sus puntos de ruptura muy rápido, lo cual influye directamente en la operación. Se debe mantener presente el hecho de que conforme más extenso sea el tiempo para quiebre, más grande y complicado de operar será el sistema. Aunque hay resinas aptas para potabilizar aguas, este tipo de alternativa usualmente viene del mercado de aguas industriales, donde no se trabaja con las mismas condiciones de un acueducto.

Algunos parámetros a considerar, además de los reportados por algunos fabricantes de tecnología, como posibles interferentes para la remoción de aluminio por intercambio iónico son:

- Materia orgánica total y disuelta.
- Balance de cationes y aniones.
- Altos valores de dureza total.
- Equilibrio de cationes según afinidad a la resina seleccionada.
- Presencia de oxidantes en el agua.



- Sulfuro de hidrógeno.
- Sílice.
- Metales disueltos.
- Turbiedad y color.
- Naturaleza de la materia orgánica en el agua.

3.5 Ósmosis inversa

El diseño preliminar y valoración de alternativas para el caso de ósmosis inversa se realiza por medio del uso de software especializado, el cual es ofrecido por los fabricantes de las membranas. Esta herramienta se emplea para determinar la configuración más adecuada para el tratamiento particular, para posteriormente proceder a armar y cotizar un sistema. Sin una simulación previa, no se considera correcto aceptar una cotización de una planta de este tipo. Dado que este tipo de herramientas informáticas ya cuentan con una modalidad estándar de datos necesarios para los cálculos, no se presenta en detalle ese aspecto en el presente documento.

4. Consideraciones adicionales

Algunos aspectos que debe tener en cuenta el diseñador de un proyecto para tratamiento de agua con aluminio son:


- La ejecución de pruebas piloto previas permite tener un diseño con un mayor grado de optimización y certeza de su posible desempeño real. No se requiere de un insumo de tiempo y dinero muy significativo para la ejecución de una prueba a escala.
- Es necesario realizar una correcta interpretación de la calidad del agua cruda antes de pensar en un diseño, considerando incluso variaciones estacionales, protección de fuentes, parámetros adicionales, etc.
- A pesar de que los niveles N1, N2 y N3 ya están establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, es necesario considerar y medir posibles interferencias adicionales para cada proceso de potabilización.
- Es necesario acompañar el diseño de una especificación de labores de operación y mantenimiento, además del respectivo costo unitario de producción de agua potable.
- Se debe incluir necesariamente en el proceso de potabilización, el respectivo manejo de residuos, en virtud de la normativa ambiental costarricense.

5. Referencias

- Al-Muhtaseb et al. *Removal of aluminum from aqueous solutions by adsorption on date-pit and BDH activated carbons*. Journal of Hazardous Materials 158. P.p: 300 – 307 (2008)



- American Water Works Association (AWWA). *Manual of design for slow sand filtration*. 1a edición. Denver: AWWA Research Foundation. (1991)
- Crittenden, R. *MHW's water treatment: principles and design*. 3a edición. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. (2012)
- Dow Chemical Company. *Separation of aluminum from liquid media*. Dow Water & Process Solutions. [En línea] Disponible en: <https://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/resources/periodic-table/aluminum> [Accesado 10 de Setiembre del 2017]
- Escuela de Ingeniería Química (EIQ). *Intercambio Iónico*. Universidad de la República de Uruguay. [En línea] (Actualizado al año 2014). Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/iq/cursos/qica/repart/qica1/Intlonico.pdf> [Accesado 10 de Agosto del 2015]
- Hendricks, D. *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes*. CRC Press, IWA Publishing. Estados Unidos. (2011)
- Lenntech. *¿Qué es ósmosis inversa?* (Actualizado al año 2014). Disponible en: <http://www.lenntech.es/biblioteca/osmosis-inversa/que-es-osmosis-inversa.htm> [Accesado 10 de Agosto del 2015]
- Sánchez, L. *Upflow gravel filtration for multiple uses*. Tesis de posgrado para optar al título de Master en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Colombia: Universidad del Valle. (2016)
- Shaheen, A. et al. *Removal of aluminum from aqueous solutions by adsorption on date-pit and BDH activated carbons*. Journal of Hazardous Materials 158 (2008), pp. 300-307.
- Srinivasan, P. et al. *Aluminium in drinking water: An overview*. Water SA Vol. 25 No. 1, pp. 47-56. (1999)
- Voutchkov, N. *Desalination engineering: planning and design*. Estados Unidos: McGraw-Hill Companies, Inc. (2013)
- Water Quality Association (WQA). *Aluminum Fact Sheet*. [En línea] (Actualizado al año 2014). Disponible en: http://www.wqa.org/Portals/0/Technical/Technical%20Fact%20Sheets/2014_Aluminum.pdf [Accesado 30 de Julio del 2015]

	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados UEN Investigación y Desarrollo Área Funcional Investigación Aplicada	Set. 2018
---	--	--------------

- Wegelin, M. Surface water treatment by roughing filters. 1a edición. Suiza: Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT). (1996)
- World Health Organization (WHO). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: WHO. (2017)

Colaboradores:

Ing. Natasha Rojas Valladares -Área funcional Investigación Aplicada-	Ing. Alejandro Rojas Rodríguez -UEN Administración de proyectos SGSC-
Ing. Rodolfo Araya Álvarez -Área funcional Investigación Aplicada-	Tec. Rafael Orozco Campos -Área funcional Investigación Aplicada-
Lic. David Cambronero Bolaños -Laboratorio Nacional de Aguas-	Tec. Luis Fernando Obando Fernández -Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-
Personal Sede Liberia y Curubandé -Región Chorotega-	Tec. Everardo Gutiérrez Solano -Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-
Tec. Carlos Sanabria Gómez -Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-	Ing. Mario Solís Castro -Región Pacífico Central y UE BCIE-
Ing. Francisco Méndez Solano -Región Pacífico Central-	Ing. Fabián Campos Amuy -Región Pacífico Central-

6. Información adicional

Ing. Andrés Lazo Páez
 alazo@aya.go.cr
 Director Investigación Aplicada
 Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados