

HOJA TÉCNICA

“Remoción de arsénico 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 ARSÉNICO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO

1. Estado de la situación

En primera instancia, es importante anotar que el arsénico es solamente uno de los diversos elementos inorgánicos que se presentan como trazas en el agua. Cuando se presentan niveles altos de este elemento, siempre se recomienda determinar si la fuente del mismo es de origen natural o antropogénico. Se trata de un contaminante común de origen natural (en muchos casos), que se encuentra en suelos y rocas que lo contienen. Se transporta al agua a través de la erosión y disolución de los materiales mencionados y se encuentra principalmente en la forma inorgánica. (EPA, 2006).

La especie y estado de oxidación del arsénico inorgánico, depende de las condiciones de oxidación-reducción y del pH del agua. Generalmente, la forma reducida, trivalente del contaminante [As(III)], llamada arsenito, se encuentra en aguas subterráneas (asumiendo condiciones anaeróbicas). La forma oxidada, pentavalente, arseniato [As(V)], se encuentra en aguas superficiales (asumiendo condiciones aeróbicas). No obstante, para aguas subterráneas, en ocasiones se ha determinado la situación de que sólo se encuentra presente As(III), en otros casos sólo As(V) y también se ha logrado documentar una combinación de ambos As(III) y As(V).

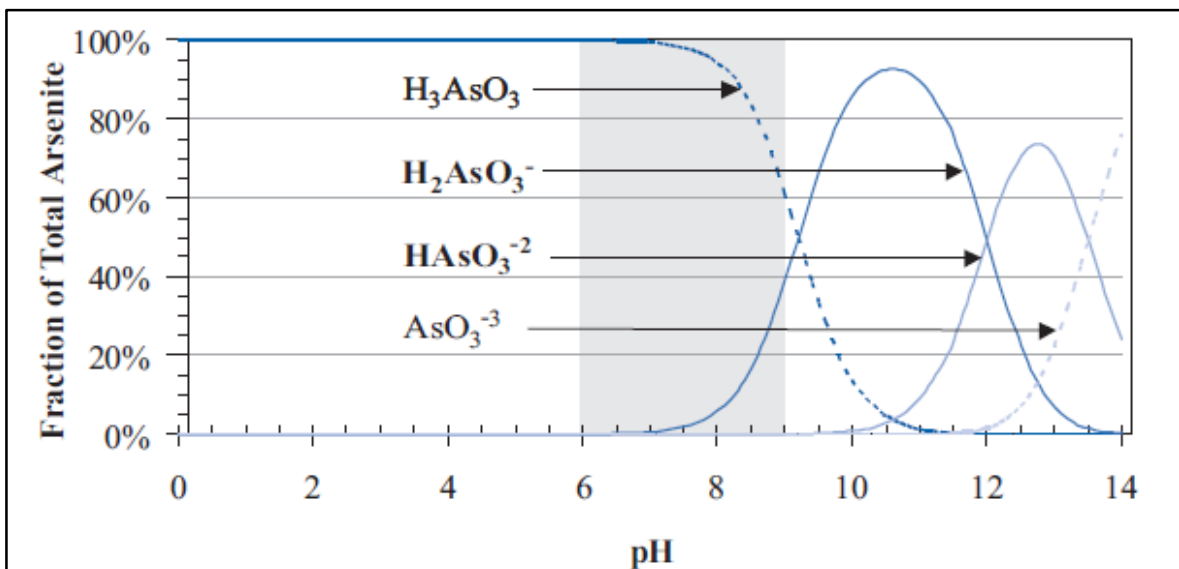


Figura 1 Disociación del arsenito [As(III)]. (EPA, 2003)

El arseniato existe en solución acuosa de cuatro formas, dependiendo del pH: H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} y AsO_4^{3-} . Similarmente, el arsenito, se encuentra o existe de cinco formas: H_4AsO_3^+ , H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} y AsO_3^{3-} (EPA,2006). Como

se mencionó anteriormente, la especiación de las moléculas mencionadas varía por disociación y es dependiente del pH. En las siguientes figuras, se presenta la dependencia del arsenito y arseniato con el pH.

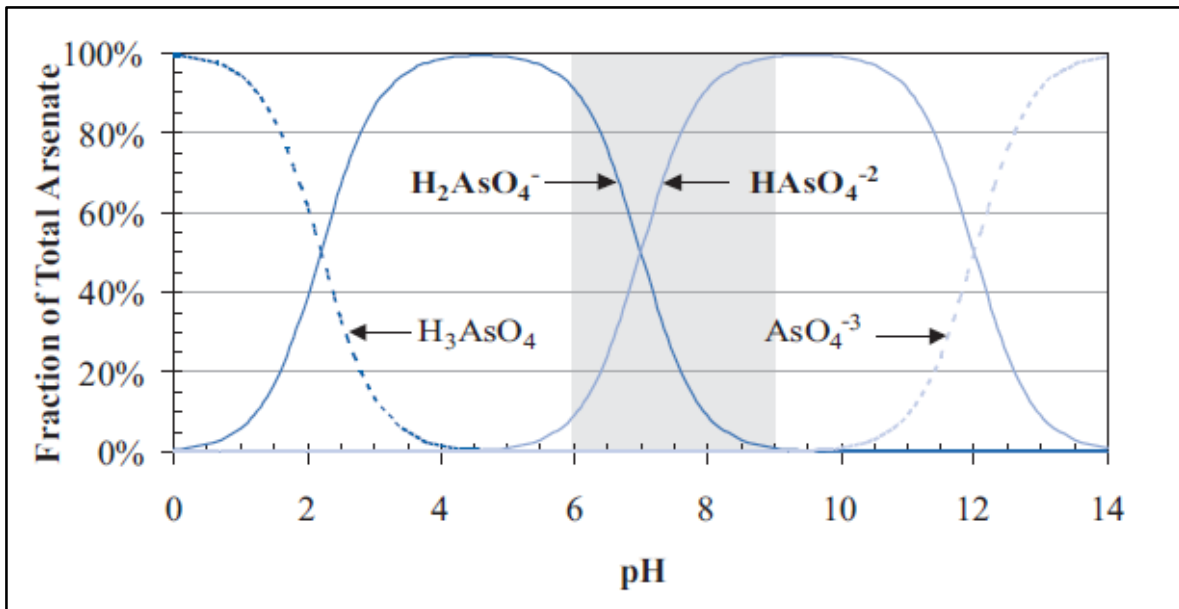


Figura 2 Disociación del arseniato [As(V)]. (EPA, 2003)

La especiación química del arsénico es un factor crítico para el tratamiento de este contaminante. Las cargas negativas superficiales, facilitan la remoción de esta sustancia por adsorción, intercambio iónico (aniónico) y los procesos de co-precipitación. La carga neta del arsenito [As(III)] es neutra a valores naturales de pH (6 – 9), por lo cual, esta forma no es fácilmente removible. Sin embargo, la carga neta del arseniato [As(V)] es negativa (-1 ó -2) a valores naturales de pH, lo cual permite que pueda ser removido con mayores eficiencias. La conversión a As(V) es un factor crítico de muchos de los procesos para remoción de arsénico, lo cual se puede lograr, en caso de requerirse, con la adición de un agente oxidante. La selección de esta tecnología para oxidación del arsénico, debe basarse en varias consideraciones, dentro de las cuales se incluye: el costo, integración con el tratamiento existente, requerimientos de desinfección y efectos secundarios.

Con el fin de representar las condiciones de equilibrio del arsénico bajo varios potenciales redox (reducción-oxidación) y varias condiciones de pH, se desarrollan los diagramas de potencial redox (E_H) contra pH. En la siguiente figura, se presenta el diagrama mencionado para el arsénico, en presencia de oxígeno, azufre y agua a 25°C y 1 atm (Crittenden, 2012).

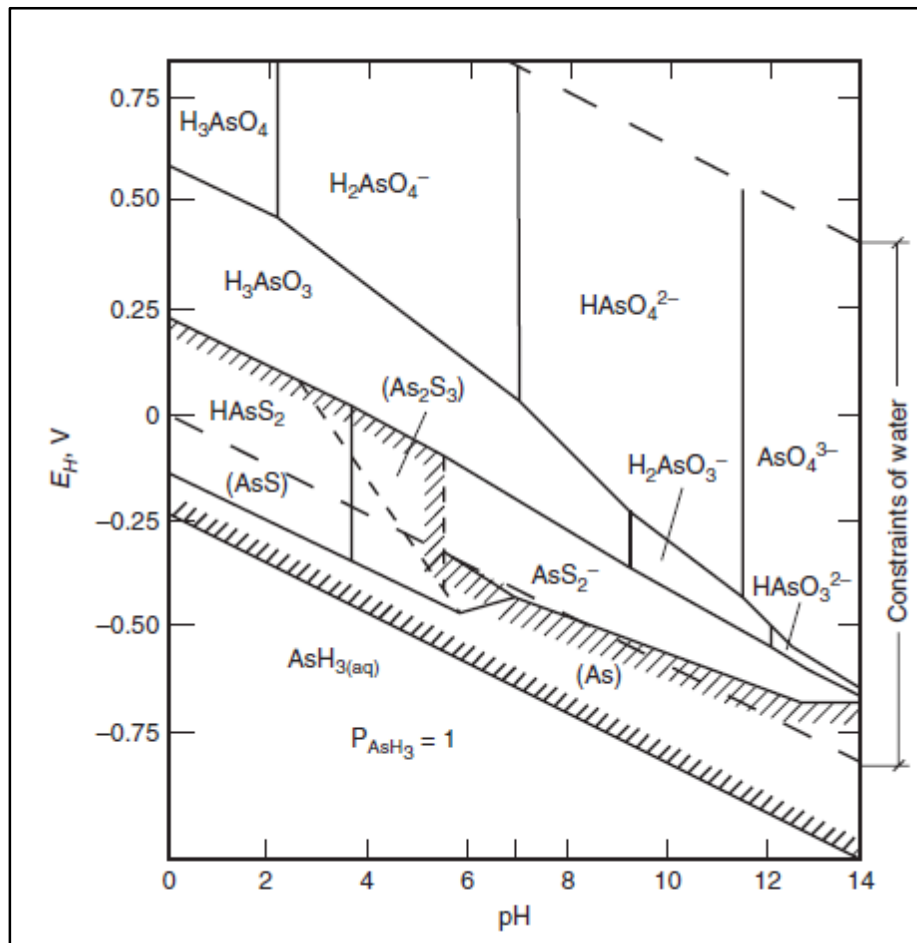


Figura 3 Diagrama de EH – pH para el arsénico (Crittenden, 2012)

En el caso de aguas superficiales, que se encuentran bien aireadas (valores altos de E_H , oxidantes), la especie $H_2AsO_4^-$ se convierte en dominante a valores de pH menores a 6.9. Para valores de pH mayores, la especie dominante es $HAsO_4^{2-}$. Usualmente, bajo condiciones oxidantes, la presencia de As(III) es pequeña o no existe. Para aguas de pozo que contienen poco oxígeno disuelto (bajo valores de E_H , reductoras), la especie dominante a valores de pH menores a 9.2 es H_3AsO_3 (Crittenden, 2012).

Desde el punto de vista de salud pública, WHO (2017), establece que el arsénico se encuentra en la dieta del ser humano, particularmente en el pescado y los mariscos, en los cuales, se encuentra principalmente, en forma orgánica, la cual es menos tóxica. Existe información muy limitada, sobre la proporción de arsénico inorgánico en la comida. Esta indica que aproximadamente un 25% se presenta en su forma inorgánica, dependiendo del tipo de comida. Aparte de la exposición ocupacional, las vías más importantes de exposición son a través de la comida y el agua para consumo, incluyendo el agua embotellada y algunas bebidas comerciales. En caso de encontrar concentraciones de arsénico en el agua para consumo iguales



o superiores a 10 $\mu\text{g/L}$, existe la posibilidad de que ésta sea la fuente dominante de consumo del elemento en cuestión.

El Programa Internacional de Seguridad Química (IPCS) llegó a la conclusión de que la exposición de largo plazo al arsénico en el agua de consumo humano se relaciona causalmente con un mayor riesgo de cáncer en la piel, los pulmones, la vejiga y los riñones, así como cambios en la piel, como la hiperqueratosis y cambios en la pigmentación (WHO, 2017).

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) ha clasificado a los compuestos inorgánicos de arsénico en el Grupo 1 (cancerígeno para los seres humanos) basado en pruebas suficientes de carcinogenicidad en humanos y pruebas limitadas de carcinogenicidad en animales. Aunque hay una importante base de datos sobre la asociación entre los cánceres internos y de la piel y el consumo de arsénico en el agua de consumo humano, continúa la incertidumbre sobre los riesgos reales en concentraciones bajas (WHO, 2017).

El límite práctico de cuantificación del arsénico está en el rango de 1 a 10 $\mu\text{g/l}$. Además, es importante considerar que la eliminación de arsénico en concentraciones por debajo de 10 $\mu\text{g/l}$ es difícil en muchas circunstancias. En vista de las dificultades prácticas para eliminar el arsénico del agua de consumo humano, sobre todo en pequeños sistemas de abastecimiento de agua de consumo humano, y de alcanzar el límite práctico de cuantificación para el arsénico, se mantiene el valor de referencia de 10 $\mu\text{g/l}$ como una meta y se designa como provisional (WHO, 2017).

En Costa Rica, el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (RCAP) establece un valor máximo admisible de 0.01 mg/l para el parámetro de arsénico.

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 arsénico 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.

Entre los tratamientos más comunes para la remoción de arsénico del agua para consumo, se encuentran:

1. Coagulación y filtración
2. Adsorción



3. Intercambio iónico
4. Membranas

Como se mencionó anteriormente, el arsénico reducido As(III) (arsenito) debe ser convertido a As(V) (arseniato), para facilitar su remoción. Este paso es crítico para lograr un desempeño óptimo para la mayoría de procesos unitarios utilizados para remover arsénico. Por la razón expuesta, es de vital importancia contar con la especiación del arsénico en el agua a tratar.

La conversión a As(V) se puede lograr al incorporar un agente oxidante en la cabecera de cualquier proceso para remover arsénico. Algunos oxidantes efectivos para este propósito son el uso de cloro, permanganato y ozono. El dióxido de cloro y las mono-cloraminas no son efectivas para oxidar el As(III). La luz ultravioleta por sí sola, tampoco es efectiva.

2.1 Coagulación y filtración

Los procesos de coagulación y filtración han sido utilizados para la remoción del arsénico. Coagulantes como el sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico y la cal, se han utilizado para la remoción hasta cierto grado de este contaminante. Los procesos de coagulación generalmente requieren que el arsénico se encuentre en su forma pentavalente, As(V); en caso de que se encuentre en como arsenito, As(III), es usualmente oxidado previamente. Los mecanismos para la remoción del As(V) por procesos de coagulación, pueden deberse a una combinación de: precipitación, co-precipitación y adsorción (Crittenden, 2012).

Según Crittenden (2012), los resultados de desempeño de varias pruebas a escala piloto y de estudios en plantas potabilizadoras existentes, generan los datos que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 1 Remoción de arsénico por procesos de coagulación (Crittenden, 2012)

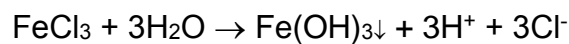
Coagulante	% Remoción	Dosis (mg/l)	pH
Cloruro de hierro	81 – 100	5 – 304	< 8
Sulfato de aluminio	23 - 100	6 - 50	6 - 7

Muchas aguas subterráneas que contienen arsénico, pueden llegar a tener concentraciones significativas de hierro y manganeso, debido a la geoquímica natural. Al igual que el arsénico, el hierro puede aparecer en varios estados de oxidación: hierro ferroso Fe(II) y hierro férrico Fe(III). El manganeso, puede encontrarse en muchos estados de oxidación: Mn(II), Mn(III), Mn(IV), Mn(VI) y Mn(VII). Las formas reducidas de ambos elementos, son solubles; al oxidarse se convierten en sus formas insolubles y pueden ocasionar serios problemas estéticos para el agua de consumo (EPA, 2006).



Cuando el agua a tratar, contiene concentraciones de hierro elevadas, donde la relación de hierro/arsénico es superior a 20:1, es posible evaluar la remoción de ambos contaminantes por el proceso de oxidación – filtración. La presencia de hierro o el uso de coagulantes a base de hierro, son particularmente efectivos para la remoción de arsénico en sistemas acuosos; lo anterior, debido a que las superficies de los óxidos de hierro, tienen una muy fuerte afinidad para adsorber arsénico (EPA, 2006).

Para el caso del uso de una sal metálica como coagulante, en el caso del cloruro de hierro, la reacción estequiométrica es la siguiente:



Es importante tener presente que, por medio de la adición de sales metálicas al agua, al formar precipitados de $\text{Al}(\text{OH})_3$ o $\text{Fe}(\text{OH})_3$, las especies que adicionalmente se forman en la matriz del agua son las mismas como si se hubiese agregado H_2SO_4 o HCl al agua. Por ende, al agregar sulfato de aluminio o cloruro de hierro al agua es como agregar pocas cantidades de un ácido fuerte, el cual consumirá alcalinidad y disminuirá el pH. En el caso de que no se encuentre suficiente alcalinidad en el agua para poder amortiguar los cambios en el pH, puede ser necesario considerar adicionar alcalinidad al agua.

Se recomienda la realización de pruebas de jarras y de ser posible de una planta piloto para evaluar las distintas opciones de remoción de arsénico utilizando coagulantes. Adicionalmente, este tipo de ensayos permitirán minimizar la posible concentración residual del metal adicionado por medio de la sal.

2.2 Adsorción

Es una operación de transferencia de masa, en la cual, sustancias presentes en una fase líquida, son adsorbidas o acumuladas en una fase sólida y por ende removidas de la fase líquida. Este mecanismo es muy utilizado para la remoción de arsénico.

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.

A la sustancia que queda adsorbida sobre una superficie, se le hace referencia como adsorbato; y el sólido en el cual esta sustancia se adsorbe, se le llama adsorbente. Durante este proceso, especies disueltas son transportadas dentro del gránulo del adsorbente sólido poroso por difusión, para luego ser adsorbida dentro



de la extensa área superficial interna del adsorbente. Estas especies sólidas, se concentran en la superficie del sólido por reacciones químicas o por atracción física (adsorción física) (Crittenden, 2012).

Los adsorbentes porosos, pueden llegar a tener un área superficial interna muy grande, desde 200 a 1500 m²/g, y volúmenes de poro desde 0.1 a 0.8 mL/L; por ende, poseen pueden llegar a tener una capacidad de adsorción de hasta 0.2 g de adsorbato por gramo de adsorbente, dependiendo de la calidad de agua a tratar (Crittenden, 2012). El área superficial y el tamaño del poro son factores importantes que determinan el número de sitios de adsorción y la accesibilidad de los mismos para el adsorbato.

Generalmente, existe una relación inversa entre el tamaño del poro y el área superficial: entre más pequeños los poros para un volumen de poro dado, mayor será el área superficial disponible para la adsorción. Adicionalmente, el tamaño del adsorbato que pueda entrar en un poro está limitado por el tamaño de poro del adsorbente.

Para un volumen específico de material adsorbente, bajo las recomendaciones del fabricante del mismo y para una calidad de agua dada, el medio deberá poder remover el contaminante adecuadamente, hasta agotar su capacidad. La capacidad del mismo, estará limitada por la concentración máxima admisible del contaminante en el agua tratada; es decir, el medio se agotará en este caso, cuando la concentración de arsénico en el agua tratada llegue al valor máximo establecido por el diseñador.

La afinidad de un adsorbato hacia un adsorbente, se puede cuantificar a través del uso de isotermas. Estas últimas, se utilizan para describir la cantidad de adsorbato que puede ser adsorbida por un adsorbente, en equilibrio y a una temperatura constante. En muchas aplicaciones para el tratamiento del agua, la cantidad de adsorbato adsorbido, es usualmente una función de la concentración en la fase acuosa y a esta relación se le llama comúnmente como isoterma.

Las pruebas para la determinación de las isotermas de adsorción se desarrollan al exponer una cantidad conocida de adsorbato en un volumen fijo de líquido a varias cantidades de adsorbente. Al finalizar la prueba, se determina la concentración en la fase acuosa del adsorbato y la capacidad en equilibrio de adsorción se calcula para cada una de las pruebas utilizando la siguiente expresión de balance de masas.

$$q_e = \frac{V}{M} \times (C_o - C_e)$$

donde:



q_e = concentración de equilibrio del adsorbato en la fase del adsorbente, mg adsorbato/g de adsorbente

C_o = concentración inicial acuosa del adsorbato, mg/L

C_e = concentración de equilibrio en fase acuosa del adsorbato, mg/L

V = volumen de la fase acuosa utilizada, L

M = masa del adsorbente, g

Existen ecuaciones desarrolladas para describir la capacidad de equilibrio de los adsorbentes, entre ellas, las isothermas de Langmuir, Freundlich y Brunauer, Emmet y Teller (BET). Adicionalmente, la capacidad de remoción de arsénico de un adsorbente, se puede relacionar con la cantidad de agua a tratar, mediante un concepto que se denomina volúmenes de lecho tratados (BV, por sus siglas en inglés, “*Bed Volume*”). Esta relación, se define como la cantidad de metros cúbicos de agua tratada hasta llegar al punto de ruptura dividida entre el volumen de medio utilizado (m^3 de agua tratada/ m^3 de adsorbente).

Generalmente, la capacidad de adsorción de estos materiales, depende de algunos parámetros de calidad de agua, como: concentración de arsénico, pH, temperatura y las concentraciones de iones competencia, entre los que se pueden incluir: fosfatos, sílice, sulfatos, materia orgánica, vanadio y otros. En este aspecto radica la importancia de no llevar a cabo diseños basados únicamente en caudal de producción. Tampoco es recomendable dimensionar sistemas sin información histórica del comportamiento de la calidad del agua.

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 arsénico, 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 contaminante.

En el mercado, existen muchos tipos de adsorbentes para la remoción de arsénico, por ejemplo, hidróxidos de hierro, dióxido de titanio entre otros. Se recomienda la realización de pruebas de laboratorio y a escala piloto para la evaluación de los medios adsorbentes y las condiciones o parámetros de diseño y operacionales.

2.3 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.

Este proceso, puede ser viable para la remoción de arsénico del agua para consumo. Entre las consideraciones de diseño que deben tenerse en cuenta se encuentran las siguientes: estado de oxidación del arsénico, tipo de resina, iones interferentes, concentración del contaminante, tiempo de contacto de lecho vacío (EBCT por sus siglas en inglés, *Empty Bed Contact Time*), nivel de regeneración y tratamiento y disposición del regenerante.

Del diagrama de especiación presentado en la Figura 2, el As(V) se presenta como monovalente H_2AsO_4^- y divalente HAsO_4^{2-} en el rango de pH de las aguas naturales, 6 a 9. Si en el agua se presenta el As(III), usualmente se encuentra como una especie neutra, la cual no puede ser removida por intercambio iónico y debe ser oxidada a As(V) previamente al tratamiento por este proceso.

Para agua con concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) menores a 500 mg/L y concentraciones de sulfatos menores a 120 mg/L, el proceso de intercambio iónico con resinas aniónicas puede ser atractivo económicamente para la remoción de arsénico (Crittenden, 2012). Para bajas concentraciones de STD y de sulfatos, la competencia por los sitios de intercambio de la resina para el arsénico, es baja y se espera se pueda obtener una capacidad razonable de intercambio para la resina.

Como consideraciones generales de diseño, el tiempo de contacto de lecho vacío, EBCT, para la remoción de arsénico, ronda generalmente entre 1.5 a 3 minutos. Las resinas aniónicas de base fuerte que se encuentran agotadas, pueden regenerarse fácilmente con NaCl. Adicionalmente, velocidades superficiales de regeneración superiores a 0.02 m/h se han encontrado funcionan mejor en el caso del arsénico, obteniéndose recuperaciones mayores de este parámetro (Crittenden, 2012).

En el caso de la gestión de la salmuera producto de la regeneración, según Crittenden (2012), existen estudios de campo que han demostrado que resinas agotadas han podido ser regeneradas exitosamente, utilizando la misma salmuera hasta por 20 veces antes de generar una fuga por arsénico en la resina. Cloruro de sodio ha sido adicionado a la salmuera utilizada para mantener una concentración de la solución de 1.0 N NaCl. Este concepto de reutilización de la salmuera, debe ser investigado, pues podría proporcionar ahorros significativos en los requerimientos de sal y de disposición de salmuera. La salmuera que contiene arsénico y que se va a disponer, debe ser tratada antes de ser dispuesta. El arsénico, puede ser precipitado utilizando cloruro de hierro, sulfato de aluminio o cal. En las evaluaciones que se realicen para el tratamiento y disposición de la salmuera, se debe considerar el ajuste del pH.

Se requiere una gestión operativa muy robusta para tratar el agua y disponer de manera correcta los residuos que genera el proceso de intercambio iónico 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 residuos peligrosos.

2.4 Membranas

Según Crittenden (2012), se han realizado algunos estudios, donde se utilizan membranas para la remoción de arsénico. Se evaluó el uso de membranas de ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) para la remoción de arsénico en dos fuentes de agua subterránea en California del Sur. En el siguiente cuadro, se presentan los resultados obtenidos del estudio mencionado.

Cuadro 2 Guías para el uso de membranas para la remoción de arsénico en agua para consumo (Crittenden, 2012)

Característica del agua	Ósmosis inversa	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración	Pre-oxidación
Especiación del Arsénico					
Arsénico III	R	PE	NR	NR	R
Arsénico V	R	R	NR	NR	NR
Distribución de tamaño del arsénico					
Disuelto	R	PE	NR	NR	NR
Particulado	NR	NR	PE	PE	NR
Co-ocurrencia					
Materia orgánica natural	PE	NR	NR	NR	NR
Inorgánica	R	NR	NR	NR	NR

* R: recomendado; NR: no recomendado; PE: posiblemente efectivo

El uso combinado de coagulación y membranas, puede ser utilizado eficazmente para remover arsénico; y si el arsénico se encuentra en su forma particulada, puede evaluarse el uso de membranas de poro grande. El As(III) puede ser removido solamente por la OI; de otra manera, deber ser pre-oxidado para formar As(V) antes del tratamiento por membranas. La OI y NF pueden remover efectivamente la forma soluble de As(V). Aguas con concentraciones altas de Carbono Orgánico Disuelto, pueden ocasionar una remoción pobre de arsénico debido a las incrustaciones a la membrana.

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 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 volumen de 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 de contaminantes o contaminantes 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 de funcionamiento. Por ello, la valoración de este tipo de procesos, siempre 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 uno de los aspectos que mayor atención requieren 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. Se requiere un manejo constante de insumos químicos y residuos que se deben valorar para determinar si se clasifican como residuo peligroso.

3. Criterios sanitarios

3.1 Coagulación y filtración

En el caso de la propuesta de coagulación y filtración, los principales aspectos sanitarios a considerar se muestran en el cuadro 3. 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.

En ensayos realizados por la UEN de Investigación y Desarrollo (UEN ID) con el apoyo de la Dirección de Plantas Potabilizadoras de la Subgerencia de Sistemas GAM y operadores de la planta potabilizadora de Tres Ríos, se determina que se obtienen mejores eficiencias para la remoción de arsénico utilizando cloruro férrico que al utilizar sulfato de aluminio, para el caso específico que se encontraba en ese momento en estudio. Es importante rescatar, que se debe de controlar la concentración de hierro a la salida del sistema de tratamiento y el valor de color (que puede verse afectado por la adición de hierro al agua).

Adicionalmente, en ensayos realizados a escala piloto por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y la UEN ID, se ha determinado que contar con las etapas de floculación y sedimentación, después de la coagulación y previo a la filtración, mejora las eficiencias y la estabilidad de los valores de agua tratada y hace más robusto el sistema. Se trabajó en ese caso, con un filtro de grava ascendente (FGA) como floculador y sedimentador a la vez. En la prueba realizada, el FGA trabajó con una tasa de flujo aproximada de 1 m/h y el filtro rápido con una tasa de filtración aproximada de 8 m/h (ITCR, 2016). Según ITCR (2016) respecto a la configuración de los sistemas de filtración, el FGA contó con 50 cm de lecho de soporte (grava 25mm – 50mm), 1 m de medio filtrante (25mm – 9.5 mm) y 1 m de sobrenadante; el filtro rápido de flujo descendente se construyó con 5 capas de lecho de soporte con granulometrías desde los 25 mm hasta los 0.85 mm y 80 cm de medio filtrante en arena (0.6 mm a 0.85 mm).



En el siguiente cuadro, se presentan algunos datos que pueden servir de base para el dimensionamiento de un sistema para remoción de arsénico mediante el proceso de coagulación y filtración.

Cuadro 3 Coagulación y filtración (ITCR, 2016)

Parámetro	Valor
Dosificación de coagulante (mg/l)*	Prueba preliminar
Intervalo de pH (adim.)	6.5 – 8
Tasa de flujo de FGA (m/h)	≤ 1
Velocidad de filtración (m/h)	< 12
Composición del medio filtrante	Dual (arena y antracita), zeolita, dióxido de manganeso
Eficiencia reportada (%)	90%

* Confirmar con prueba preliminar.

Algunos parámetros a considerar, además de los reportados por algunos fabricantes de tecnología, como posibles interferentes para la remoción de arsénico por coagulación y filtración son:

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

Es importante que el diseñador del sistema de potabilización, tenga presente los estrictos requerimientos de calidad de agua tratada que deben conseguirse; lo anterior para que valore la adición de procesos u operaciones adicionales distintas a la mencionadas o una combinación de alternativas como lo puede ser un proceso de coagulación-filtración con una fase de pulido mediante el uso de adsorbentes.

En este tipo de procesos, el agua tratada tiende a seguir un patrón en el cual después de una limpieza del medio filtrante, la calidad del efluente es muy buena y desmejora con el tiempo y la cantidad de agua tratada. Una vez se alcance un valor, establecido por el diseñador, de alguno de los contaminantes en el agua tratada, se procede con alguna o ambas de las operaciones de purga de FGA y retrolavado o

limpieza del medio filtrante. La purga del FGA suele realizarse mediante la apertura de una válvula que drena de manera rápida, por carga hidráulica, el FGA y los retrolavados corresponden a una operación donde se hace pasar agua tratada a contracorriente, por un determinado tiempo y con una velocidad de flujo recomendados por el fabricante del medio filtrante (ver fichas técnicas de los medios filtrantes) o por experiencia.

Las operaciones antes mencionadas, generan residuos que deben ser tratados según las regulaciones existentes en el país. El diseñador debe valorar el uso de homogenizadores y clarificadores para los retrolavados y de espesadores para la purga del FGA o de los sedimentadores para finalmente pasar el lodo espeso a un sistema de deshidratado de lodos que puede ser mecanizado o no mecanizado. Los residuos deshidratados deben analizarse mediante la prueba de extracción (Decreto N°27000 MINAE-S) para identificar si corresponden a residuos peligrosos o no y para determinar su posterior disposición o tratamiento y disposición. Para el agua clarificada, debe analizarse su calidad para determinar si puede ser dispuesta en un alcantarillado sanitario, cuerpo de agua o ser devuelta a la cabecera del sistema de gestión de residuos.

3.2 Adsorción

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 de sus productos frente a las condiciones tan diversas de calidad de agua que existen en el mundo. El proceso de adsorción, por su naturaleza, va a depender de una capacidad específica propia del medio, en función de parámetros sanitarios y de la calidad del agua. Como se mencionó en apartados anteriores, para la remoción de arsénico, existen sustancias en el agua que compiten por los “espacios” dentro del adsorbente y que disminuyen de manera significativa la vida útil del mismo, es decir, la cantidad de agua a tratar. Depende del material empleado en el tratamiento, se podría tratar de un proceso selectivo o no.

La experiencia que tiene el AyA en la remoción de arsénico a escala de planta potabilizadora, es a través del uso de adsorbentes de dióxido de titanio. En el siguiente cuadro se presentan algunas especificaciones técnicas que pueden ayudar a orientar al diseñador en la selección y especificación de un medio adsorbente para la remoción de arsénico.



Cuadro 4 Especificaciones técnicas preliminares para la remoción de arsénico por adsorción en dióxido de titanio (Elaboración propia)

Parámetro	Valor
Presentación	Dióxido de titanio, granular
Tamaño de partícula (μm)	$250 < T < 1200$
Contenido de humedad (%)	< 10
Área superficial específica (m^2/g)	> 200
Capacidad de adsorción para As (III) en condición de equilibrio, NSF 53 (g/l)	> 3.5
Capacidad de adsorción para As (V) en condición de equilibrio, NSF 53 (g/l)	> 13.5

Adicionalmente, se debe solicitar que el medio adsorbente tenga documentación que certifique de que ha sido aprobado bajo el protocolo de extracción TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) de la agencia de Protección Ambiental de los EEUU y el ensayo WET (*Waste Extractive Test*) para California, indicando que se cumple con los requerimientos para su disposición en un relleno sanitario como residuo no peligroso.

Respecto a criterios sanitarios, para realizar estimaciones preliminares o un pre-diseño de un sistema de remoción de arsénico por adsorción en dióxido de titanio, se presenta el cuadro 5.

Cuadro 5 Especificaciones técnicas preliminares para la remoción de arsénico por adsorción en dióxido de titanio (Elaboración propia)

Parámetro	Valor
Dirección de flujo en operación normal	Dióxido de titanio, granular
Profundidad mínima del lecho (m)	$250 < T < 1200$
Tasa de flujo para retrolavado (m/h)	< 10
Tiempo de contacto mínimo, EBCT (min)	> 200
Expansión del lecho	> 3.5

La evaluación de los parámetros que se muestran en los cuadros 4 y 5, se pueden generar a partir de una prueba que puede ser en escala piloto. Es decir, no se debe partir necesariamente de investigación experimental (laboratorio); 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 de 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 arsénico por adsorción sobre dióxido de titanio son:

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

Adicionalmente, se recomienda, se solicite al fabricante del medio adsorbente, la siguiente información:

1. Marca comercial.
2. Composición química (% componente activo principal).
3. Densidad real (kg/m^3).
4. Densidad aparente (kg/m^3).
5. Interferencias conocidas (nombre y concentración crítica) para el medio ofertado, que podrían afectar el proceso (calidad de agua), en documento emitido por el fabricante, con firma de algún representante oficial para Latinoamérica.
6. Área superficial según método Brunauer-Emmett-Teller -BET- (m^2/g).
7. Copia del Certificado NSF 61 para agua potable.
8. Tamaño de partícula (granulometría al menos expresada como un intervalo en micrómetros).



9. Contenido de humedad (%).
10. Capacidad de adsorción para Arsénico III en condiciones de equilibrio (NSF 53) (g/l).
11. Capacidad de adsorción para Arsénico V en condiciones de equilibrio (NSF 53) (g/l).
12. Indicación directa por parte del fabricante de que el medio está aprobado bajo el protocolo de extracción TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU., así como el ensayo WET (*Waste Extractive Test*) para California, lo que indica que cumple con los criterios para su eliminación en un vertedero de sólidos como residuo no peligroso.
13. Altura mínima del lecho en operación normal (m).
14. Altura máxima del lecho expandido, es decir en operación para retrolavado (m).
15. Tasa de flujo para retrolavado (m/h).
16. Tasa de flujo para servicio normal (m/h).
17. Tiempo de contacto mínimo (EBCT).
18. Temperatura máxima del fluido a tratar (°C).
19. Estimación de la cantidad de agua a tratar para la calidad del agua y los parámetros de diseño de la planta, en BVs (Bed Volume).
20. Caída de presión para servicio normal (psi): indicado directamente en el gráfico del fabricante para “caída de presión versus tasa de flujo para servicio normal”.
21. Expansión del lecho: indicado directamente en el gráfico del fabricante para “% de expansión versus tasa de flujo para servicio normal”.
22. Ficha técnica completa del fabricante que respalde toda la información suministrada.
23. Ficha técnica completa del fabricante que ofrezca las indicaciones para llenado de tanques y puesta en marcha del sistema.
24. Hoja MSDS del fabricante.



25. Documentación por parte del fabricante para la puesta en marcha de un sistema que utiliza el medio filtrante y las recomendaciones de operación y mantenimiento del mismo.
26. Indicación por parte del fabricante de la necesidad de pretratamientos o acondicionamientos del agua antes de pasar por el medio filtrante y especificación de cómo y cuándo se realiza un retrolavado del medio.
27. Indicación para su adecuado almacenamiento, y tiempo máximo que se puede mantener almacenado.
28. Carta de compromiso firmada por la casa matriz del fabricante que brinde atención a Latinoamérica, según la cual se compromete a brindar asesoría directa durante el proceso de instalación y la vida útil del medio adsorbente ofertado. Indicar claramente, nombre, correo electrónico, y teléfono directo del personal a cargo de la asesoría técnica.

Respecto a la experiencia de AyA con el uso de adsorbentes para la remoción de arsénico, se rescata lo siguiente:

1. Contar con un manual de operación y mantenimiento detallado de la planta potabilizadora.
2. Respetar las condiciones, parámetros y recomendaciones de operación del fabricante del medio adsorbente y del diseñador de la planta potabilizadora.
3. Implementar un monitoreo constante de variables de calidad del agua y de operación de la planta potabilizadora.
4. Implementar un control periódico del estado físico del medio adsorbente utilizado.
5. Implementar un control para la revisión, mantenimiento y reemplazo de las crepinas, sistemas de distribución de agua a tratar, recolección de las aguas tratadas, válvulas, mezcladores y cualquier otro equipo o accesorio de la planta potabilizadora.
6. Capacitar a los operadores de la planta potabilizadora para la correcta operación del sistema.
7. Solicitar al LNA un control programado de calidad de agua e interferentes del proceso de remoción de arsénico.



8. Realizar en un laboratorio acreditado, el ensayo de Extracción para Toxicidad, solicitado en el Decreto N°27000 MINAE.
9. Gestionar los residuos generados de acuerdo a la legislación existente.
10. Estudiar e implementar las medidas de salud ocupacional para el uso de los reactivos químicos utilizados en el proceso y control de la planta potabilizadora. Para ello, los reactivos químicos cuentan con una hoja de seguridad (MSDS, *Material Safety Data Sheet*).
11. Se debe implementar una metodología de monitoreo del medio adsorbente para determinar si el material se pulveriza, en caso de que se de esta situación, se deben tomar las medidas del caso para evitarla. Se recomienda evaluar contra las recomendaciones del fabricante del medio, la frecuencia y tasa de retrolavados, presiones de trabajo y en caso de que sea necesario, contactar directamente al fabricante del material.
12. En caso de que se presenten concentraciones de interferentes superiores a las recomendadas por el fabricante del medio adsorbente, se debe valorar el uso de operaciones o procesos unitarios previos a la adsorción que garanticen el correcto funcionamiento del medio o material. Como se ha indicado es un material adsorbente y no debe utilizarse como filtro.
13. Los retrolavados deben realizarse según las recomendaciones del fabricante del medio, en cuanto a frecuencia y tasa de flujo. De la experiencia de AyA, con el dióxido de titanio, cuando el diferencial de presión entre la entrada y salida del medio adsorbente llegue a 8 psi, se debe proceder a realizar un retrolavado o cuando la calidad del agua se deteriore. Los retrolavados no deben ser muy frecuentes, es decir, pueden al menos 1 semana entre retrolavados.
14. Se recomienda monitorear con una frecuencia adecuada (al menos dos o tres veces al año), los parámetros de calidad de agua que interfieren el proceso de adsorción (mencionados anteriormente) y cualquier otro que recomiende el fabricante del adsorbente. Se ha determinado que una vez se alcanzan valores cercanos al VMA para el arsénico (10 µg/l), el material tiende a agotarse rápidamente, por lo que el operador debe establecer un adecuado protocolo de reemplazo del medio adsorbente y contar con el material suficiente para realizar los cambio requeridos.
15. Para el caso de los sistemas adsorbentes operados por el AyA, se ha determinado que la concentración de Sílice en agua afecta de manera significativa el rendimiento del material adsorbente, es decir; al aumentar la concentración de este interferente disminuye la cantidad de agua que puede ser tratada por el material. Concentraciones de sílice superiores a 25 mg/l



como SiO_2 , afectan significativamente el rendimiento del medio. La UEN ID ha monitoreado algunos sitios de estudio y ha identificado pozos con concentraciones de Sílice de hasta 125 mg/l.

16. Se recomienda que la evaluación para la adquisición de un material adsorbente, incluya entre sus rubros el costo del agua tratada; es decir una relación entre el costo del material por unidad de medida (p ej. por litro de medio) y la vida útil del material para las condiciones de calidad de agua y diseño del sistema.
17. Como se mencionó anteriormente, se debe solicitar al fabricante del medio adsorbente, el manual para la instalación y puesta en marcha del mismo. Generalmente incluye las medidas de seguridad requeridas para realizar este proceso (o se encuentran en la MSDS del medio), la configuración que debe tener la columna en cuanto a dimensiones y especificaciones del medio de soporte y de la altura del medio adsorbente, cómo debe introducirse el material, la altura libre que debe tener el material para su expansión en el proceso de retrolavado, la configuración y características de los distribuidores y recolectores de agua y cómo y hasta cuándo se debe lavar el material adsorbente; así como las características del agua tratada que deben monitorearse en la puesta en marcha y en la operación y mantenimiento de la planta potabilizadora.
18. En la operación de los sistemas para remoción de arsénico, se ha determinado que en algunas operaciones como en el reemplazo del medio adsorbente, se generan aguas con una cantidad importante de finos (dióxido de titanio pulverizado). Con el fin de abordar esta situación y proponer alternativas para solucionar este tema, la Ing. Natasha Rojas de la UEN ID, elaboró el documento: "*Conceptualización y diseño preliminar d trampas para finos en sistemas de tratamiento presurizado que emplean reemplazo manual de un medio filtrante o adsorbente*". Se recomienda revisar este documento por parte de los diseñadores e incorporar en sus diseños las recomendaciones que apliquen.
19. El área funcional de Investigación Aplicada de la UEN ID, realizó pruebas piloto para evaluar el desempeño de varios adsorbentes para la remoción de arsénico. Se evaluaron los medios a base de hierro-lantano, piedra pómez y dióxido de titanio. Se recomienda consultar el documento generado denominado: "*Prueba piloto de adsorbentes para remoción de arsénico: Caso Hierro-Lantano y Dióxido de Titanio*", en el mismo se detallan aspectos importantes para conceptualizar un proceso de remoción de arsénico por adsorción y recomendaciones para la realización de pruebas piloto y para el uso de los resultados generados en la misma.



20. A modo de ejemplo y con el fin de proveer una noción general de la capacidad de adsorción (expresado como BV: m³ de agua tratada/m³ de material adsorbente) de materiales adsorbentes para la remoción de arsénico, se presenta el siguiente cuadro; la información contenida en el mismo hace referencia al proceso de licitación del AyA mencionado.

Cuadro 6 Calidad y capacidad de agua a tratar (Elaboración propia)

Sistema	Concentración de arsénico (µg As/l)	Concentración de sílice (mg SiO ₂ /l)	pH (adim.)	BV (m ³ /m ³)	Licitación
1	22.5	90	6.55	47 000	2017LA-000034-PRI
2	22.5	110	6.36	31 000	2017LA-000034-PRI
3	30.9	117	6.60	27 800	2017LA-000034-PRI
4	55.0	106	6.50	17 500	2017LA-000034-PRI
5	18.1	46	7.30	32 000	201CDC-00001-PRC
6	25.0	39	7.30	51 000	2017CDC-00001-PRC

3.3 Resinas de 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.

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 arsénico por intercambio iónico son:

- Materia orgánica total y disuelta.
- Balance de cationes y aniones.
- Altos valores de dureza total.



- Equilibrio de aniones según afinidad a la resina seleccionada.
- Presencia de oxidantes en el agua.
- Sulfuro de hidrógeno.
- Sílice.
- Sulfatos.
- Metales disueltos.
- Turbiedad y color.
- Naturaleza de la materia orgánica en el agua.

3.4 Membranas

El diseño preliminar y valoración de alternativas para el caso de membranas, se realiza por medio del uso de software especializado, el cual es ofrecido por los fabricantes de las mismas. 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.

Es importante realizar una investigación previa de los requerimientos de información respecto a calidad de agua para que los fabricantes, diseñadores o integradores de tecnología pueda realizar las estimaciones adecuadas.

4. Consideraciones adicionales

Algunos aspectos que debe tener en cuenta el diseñador de un proyecto para tratamiento de agua con arsénico 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.
- Se recomienda evaluar operaciones o procesos anteriores al proceso de adsorción con el fin de evitar que el mismo se vea afectado por arenas, sólidos suspendidos, metales pesados, etc.

5. Referencias

- Crittenden, R. *MHW's Water Treatment: Principles and Design*. 3a Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. (2012)
- Escuela de Ingeniería Química (EIQ). *Intercambio Iónico*. Universidad de la República de Uruguay. [Online] (Actualizado al año 2014). Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/ig/cursos/qica/repart/qica1/Intlonico.pdf> [Accesado 10 de Agosto del 2015]
- EPA. *Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems*. Office of Water. EPA. (2003)
- EPA. *Design Manual: Removal of Arsenic from Drinking Water by Adsorptive Media*. Office of Research and Development. USEPA. (2003)
- EPA. *Design Manual: Removal of Arsenic from Drinking Water by Iron Removal Process*. Office of Research and Development. USEPA. (2006)
- Hendricks, D. *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes*. CRC Press, IWA Publishing. Estados Unidos. (2011)
- ITCR. *Informe de Labores IS-2016*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2016.
- Lazo Páez, A; Orozco Campos, R. *Prueba piloto de adsorbentes para remoción de arsénico: Caso Hierro-Lantano y Dióxido de Titanio*. UEN ID. 2018.
- 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]
- Rojas Valladares, N. *Conceptualización y diseño preliminar de trampas para finos en sistemas de tratamiento presurizado que emplean reemplazo manual de un medio filtrante o adsorbente*. Informe Técnico. 2017.
- World Health Organization (WHO). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: WHO. (2017)

- Voutchkov, N. *Desalination engineering: planning and design*. Estados Unidos: McGraw-Hill Companies, Inc. (2013)

Colaboradores:

Ing. Natasha Rojas Valladares -Área funcional Investigación Aplicada-	Ing. Rosa González Palma -Región Chorotega-
Ing. Rodolfo Araya Álvarez -Área funcional Investigación Aplicada-	Tec. Rafael Orozco Campos -Área funcional Investigación Aplicada-
Lic. David Cambronero Bolaños -Laboratorio Nacional de Aguas-	Lic. Carla Gómez Aburto -Región Central Oeste-
Tec. Carlos Sanabria Gómez -Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-	Tec. Everardo Gutiérrez Solano -Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-
Ing. Luis Romero Esquivel -Instituto Tecnológico de Costa Rica-	Ing. José Araya Obando -Instituto Tecnológico de Costa Rica-
Personal Plantas Arsénico -Región Chorotega-	Personal Plantas Arsénico -Región Central Oeste-
Henry Ulate Torres -Región Central Oeste y UE RANC-EE-	Ing. Jorge Merizalde Dobles -UEN Investigación y Desarrollo-
Ing. Oscar Ramírez Sánchez -Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-	Ing. Randall Guzmán Cambronero -UEN Administración de Proyectos-
Lic. Luis Zúñiga Zúñiga -Laboratorio Nacional de Aguas-	Lic. Azucena Urbina Campos -Laboratorio Nacional de Aguas-

6. Información adicional

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