

EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO

María Cristina D'Ambrosio. 2005. II° Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea y IV° Congreso Hidrogeológico Argentino. Río Cuarto, 25-28 de octubre de 2005.

www.produccion-animal.com.ar

Volver a: [Aguas de bebida](#)

RESUMEN

En el presente artículo se revisan las tecnologías disponibles en la actualidad y los factores a considerar en el momento de la evaluación y selección de un proceso de tratamiento de agua para remoción de arsénico. Estas tecnologías son oxidación, precipitación/filtración, adsorción, intercambio iónico, membranas (ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración y microfiltración), electrodiálisis reversible, tecnologías biológicas y nuevos desarrollos. Se exponen las ventajas y desventajas de cada tecnología y su factibilidad desde el punto de vista tecnológico, ambiental y económico.

Palabras claves: arsénico, tecnologías de remoción, factores para costo

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Las aguas subterráneas en Argentina presentan altos valores de arsénico que hacen necesaria su remoción para hacerlas aptas para consumo humano. Las regulaciones internacionales tienden a ser cada vez más exigentes en cuanto al límite máximo admisible en agua potable (10 µg/l). A lo largo de los años se han utilizado distintos procesos y se estudian nuevas tecnologías para esta aplicación. La elección de la más adecuada dependerá de diversos factores económicos, ambientales y técnicos.

El presente estudio tiene como objetivo enumerar las tecnologías disponibles y brindar criterios que ayuden a la selección del proceso más adecuado en cada caso.

TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

Los procesos disponibles para la remoción de arsénico son numerosos y están siendo estudiados y probados internacionalmente (USEPA, 2000, 2001, 2002a, 2002b, 2003, 2004a, 2004b) en los últimos años. Entre ellos encontramos:

Oxidación

Los procesos más eficientes remueven el arsénico en la forma de arsenato (As (V)) y no arsenito (As (III)) ya que éste típicamente no presenta carga por debajo de pH 9.2. Por lo tanto el tratamiento de remoción de arsénico debe incluir una etapa de oxidación para convertir el arsenito en arsenato. La oxidación puede llevarse a cabo mediante:

- ◆ Aireación simple: éste es el método más simple y más comúnmente usado para incorporar oxígeno pero tiene limitada efectividad en la oxidación del arsénico. Durante este proceso se produce simultáneamente la oxidación del hierro, en caso de estar presente.. Existen reportes de hasta un 25% de remoción de arsénico con un contenido rico en hierro disuelto (Ahmed, 2001).
- ◆ Otros agentes oxidantes: cloro, hipoclorito, ozono, permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno, oxígeno puro, etc. Debe tenerse en cuenta la disponibilidad y costo de estos químicos en el momento de evaluar este tipo de solución.
- ◆ Radiación: La oxidación fotoquímica puede realizarse con generadores de UV en conjunto con los productos químicos antes mencionados. Se han reportado remociones de entre un 50% y 80% en estudios pilotos y a pequeñas escalas.

Es importante tener en cuenta otros subproductos que se generan durante la oxidación, por ejemplo por reacción del agente oxidante con materia orgánica.

El equipamiento involucrado en estas instalaciones consiste básicamente en un sistema de dosificación con un mecanismo adecuado de mezclado con el agua a tratar (mezcladores en línea, etc.).

Tecnologías de precipitación/filtración (incluye procesos de coagulación, filtración, ablandamiento con cal)

El proceso de coagulación y filtración es aquel mediante el cual material disuelto, suspendido o en forma coloidal se transforma resultando en partículas sedimentables por gravedad o pasibles de ser filtradas (Degremont, 1979). En la coagulación intervienen productos químicos que cambian las propiedades de cargas superficiales permitiendo que las partículas se aglomeren en un floc o partículas de mayor tamaño. Dado que la remoción del As III es menor que la lograda en As V, se recomienda evaluar la previa oxidación del primero. Varias tecnologías se basan en la afinidad de hierro con el arsénico. Por esta razón se utilizan sales como coagulante y medios filtrantes que retengan el arsénico.

Coagulación / precipitación

La coagulación es el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales que pueden formar los "flocs" capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento. Cuando los iones que se encuentran en solución pasan a forma insoluble por medio de una reacción química se produce una precipitación química. La co-precipitación ocurre cuando un contaminante inorgánico forma un complejo insoluble con el coagulante. Es fundamental en este tipo de reacción el pH y la valencia de los elementos presentes ya que influyen en la eficiencia de remoción del sistema.

Los mecanismos involucrados son: formación de compuestos insolubles, incorporación de especies solubles en el floc metálico y enlace electrostático del arsénico soluble en la superficie externa de los hidróxidos metálicos insolubles.

En el caso que nos ocupa, la coagulación convierte el arsénico soluble en un producto insoluble permitiendo su separación por sedimentación y/o filtración. Esta ha sido la tecnología más utilizada históricamente en el mundo. Los coagulantes más comunes son las sales metálicas. Entre ellas podemos mencionar:

- ◆ Sulfato de aluminio, hidróxido de aluminio o de cobre. Por ejemplo el sulfato de aluminio muestra en general mayor eficiencia que el sulfato férrico.
- ◆ Sales de hierro, cloruro férrico, sulfato férrico, hidróxido férrico.
- ◆ Cal o cal hidratada. Opera en un rango de pH mayor a 10,5 y en algunos casos requiere un tratamiento secundario para lograr una calidad de agua consistente. Este proceso se conoce como ablandamiento con cal y depende fuertemente del valor de pH

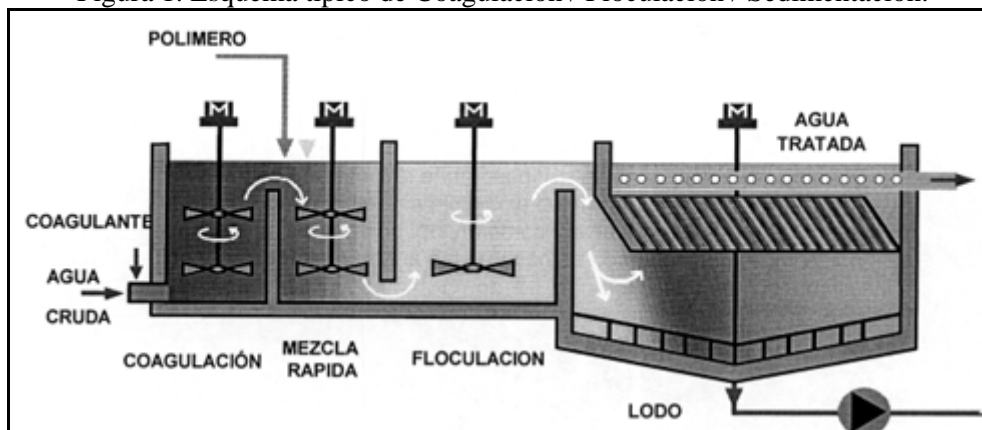
Los factores que afectan la eficiencia del proceso son:

- ◆ Tipo y dosis de coagulante.
- ◆ Tiempo de mezcla.
- ◆ pH (se reduce la eficiencia a valores muy bajos o muy altos).
- ◆ Estado de oxidación y concentración del arsénico y relación de concentración entre As(III) y As(V).
- ◆ Temperatura
- ◆ Presencia de otros solutos inorgánicos (tales como sulfatos, fosfatos, carbonatos y calcio).

En general se conoce como sedimentación o coagulación "mejorada" cuando se realiza control de pH y/o dosis de coagulante. Esta tecnología requiere un operador calificado para el control de las variables que afectan el proceso. En algunos casos la coexistencia de hierro y arsénico en aguas de pozo mejora la eficiencia del tratamiento.

La sedimentación es la separación gravimétrica de los sólidos que se van depositando dentro del líquido y es complementaria del proceso de coagulación/precipitación.

Figura 1. Esquema típico de Coagulación / Floculación / Sedimentación.

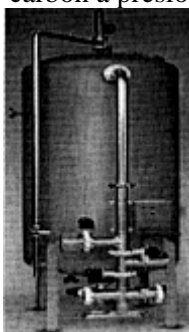


Los equipos (ver figura 1) involucrados son en general sistemas de dosificación con el correspondiente mecanismo de mezclado con el agua a tratar que puede ser o bien un mezclador estático, una cámara de coagulación seguida eventualmente por una de floculación rápida y/o lenta y una batea de sedimentación (con o sin placas paralelas). La dosificación puede automatizarse en función de variables tales como el caudal, pH, potencial de oxidación-reducción, etc. El sistema se completa con el correspondiente post-tratamiento final del agua (ajuste final de pH, desinfección, etc.) y de barros generados.

Filtración

La filtración convencional es la separación de partículas sólidas al atravesar un medio que retiene estas partículas. Este medio puede contener de diversos materiales, siendo los más utilizados: arena, antracita, granate, carbón activado, telas filtrantes, etc. Los filtros pueden ser clasificados de diversas maneras: de acuerdo al tipo de medio, a la hidráulica de los mismos, al lugar de acumulación de los sólidos, abiertos o cerrados (ver Figura 2), etc.

Figura 2. Filtro automático de carbón a presión sanitizable con agua caliente



La eficiencia de filtración dependerá de:

- ◆ Tipo de medio filtrante
- ◆ Tasa de filtración (caudal por unidad de superficie)
- ◆ Tiempo de contacto o volumen por unidad de caudal
- ◆ Sistema de contralavado (puede ser con agua solamente o con agua y aire).

La Tabla 1 muestra a modo de ejemplo (para el mismo porcentaje de remoción) el tamaño de partícula retenido en función de la granulometría del medio filtrante.

Tabla 1. Tamaño de partícula retenido en función de la granulometría del medio filtrante.

| Granulometría medio filtrante | Tamaño de partícula removido (mismo porcentaje de remoción) |
|-------------------------------|---|
| 0,2 mm | 5 micrones y mayores |
| 0,3 mm | 10 micrones y mayores |
| 0,45 mm | 12 micrones y mayores |
| 0,6 mm | 15 micrones y mayores |
| 0,7 mm | 20 micrones y mayores |

Los filtros pueden operarse en forma manual o automatizada con contralavados programados en función del ensuciamiento o tiempo transcurrido. En lugar de una filtración posterior a la sedimentación, se puede mejorar la eficiencia de retención de sólidos con membranas de microfiltración.

Adsorción

La adsorción es un proceso de transferencia de masa donde una sustancia es transformada desde la fase líquida a la superficie de un sólido y queda atrapada por fuerzas físicas o químicas. Este proceso ocurre sobre partículas sólidas en medios fijos. Es un fenómeno superficial y por lo tanto cuanto mayor es la superficie del medio mayor es la capacidad de acumular material.

El arsénico puede ser adsorbido en la superficie de varios adsorbentes. Estos pueden ser:

- ◆ **Medios especiales basados en alúmina activada.** Pueden ser regenerados típicamente con hidróxido de sodio, enjuagado y luego neutralizado típicamente con ácido sulfúrico. En ese caso debe considerarse el tratamiento de este efluente. Existen equipos no regenerables para uso doméstico. Los factores que influyen en el diseño y eficacia de este sistema son;

- Otros iones que compiten en afinidad al medio (sulfatos, cloruros, fluoruros, sílice, hierro, etc.). Algunos aniones actúan en altas concentraciones como inhibidores.
- pH
- Tiempo de contacto de lecho (conocido como Empty Bed Contact Time o EBCT)
- Ensuciamiento del medio con particulado o materia orgánica
- Degradación de la capacidad del medio luego de las regeneraciones
- Estado de oxidación del arsénico.

♦ **Medios especiales basados en adsorbentes con hierro y otros óxidos** (hierro modificado con sulfuro, hidróxido férrico granular, óxido férrico, óxido de titanio, etc.). Se han desarrollado distintos medios con gran éxito en Estados Unidos y Europa. En general no son regenerables y se dispone el sólido agotado. En este grupo también se encuentran los filtros de arena verde (arena cubierta con óxido de hierro o de manganeso). En este caso en particular es necesaria la dosificación continua o intermitente de permanganato de potasio. Otros medios utilizan tierra diatomea con hidróxido férrico, el que también es regenerable.

En el diseño de los volúmenes de medio debe considerarse los siguientes factores:

- Capacidad del medio filtrante (mg As removido/ l de medio)
- Otros elementos adsorbidos por el medio (cromo, plomo, selenio, molibdeno, cobre, vanadio)
- Influencia de la temperatura
- Aunque no tan fuertemente como en el proceso con alúmina activada debe tenerse en cuenta la presencia de otros compuestos (en particular hierro, nitratos, fosfatos, sulfatos y sílice), la cantidad total de sólidos disueltos y el pH. Los límites cambian de acuerdo al medio seleccionado.
- Toxicidad del medio para disposición final (Por ejemplo aprobación TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) y NSF 61 en Estados Unidos).
- Posibilidad de regeneración
- Requerimientos de pre-oxidación
- Tiempo de contacto de lecho (conocido como Empty Bed Contact Time o EBCT)
- Tasa de filtración
- Presencia de otros metales pesados que pueden ser absorbidos (cadmio, molibdeno, selenio, etc.)

En función de estos parámetros se evalúa la vida útil del medio filtrante:

- Capacidad de adsorción (g As / g medio)
- Tasa de filtración
- Ensuciamiento del medio con particulado o materia orgánica
- Degradación de la capacidad del medio luego de las regeneraciones
- Estado de oxidación del arsénico.

♦ **Otros medios:** Bauxita, hematita, feldespato, laterita, minerales arcillosos (bentonita, caolinita, etc.), carbón de hueso, material celulósico, etc.

Los sistemas de filtración incluyen además del correspondiente filtro con cuadro de válvulas de maniobra, los sistemas de pretratamiento (oxidación, ajuste de pH, etc.) y postratamiento (desinfección, ajuste final de pH, etc.). En los casos que sea necesario se agrega el sistema de regeneración y tratamiento de efluentes de contralavado.

Intercambio iónico

El intercambio iónico es el proceso fisicoquímico de intercambio reversible de iones entre fase líquida y sólida donde no hay un cambio permanente en la estructura del sólido. La solución se pasa a través del lecho hasta que se satura y comienza la fuga de contaminantes. En ese momento la resina (fase sólida) se reactiva con una solución de regenerante que lleva los contaminantes retenidos para disposición como efluente líquido. Las resinas de intercambio iónico se basan en la utilización de una matriz polimérica de enlace cruzado. Los grupos funcionales cargados se adhieren a la matriz a través de enlaces covalentes que pueden clasificarse en: ácidos fuertes, ácidos débiles, bases fuertes y bases débiles.

Existen resinas de intercambio iónico básicas fuertes para remoción de arsénico en forma ionizada. Las resinas sulfato selectivas convencionales son las más utilizadas para remoción de arsenatos. Las resinas nitrato selectivas también remueven arsenitos. Las tecnologías más modernas de intercambio iónico son las de lecho empacado con regeneración en contracorriente, que minimizan el exceso de regenerante y aumentan la eficiencia de cada regeneración. Los nuevos desarrollos tienden a buscar resinas cada vez más específicas pero se debe prestar mucha atención a las fugas que puedan ocurrir y la disposición del efluente de regeneración y de la resina.

En el diseño se debe considerar:

- pH
- Otras especies iónicas (sulfatos, cloruros, hierro, etc.)
- Capacidad de intercambio (gr As /lt de resina)
- Tipo, concentración y tipo de inyección de regenerante
- Cantidad de regenerante por ciclo
- Ensuciamiento de resinas por materia orgánica o particulada
- Posibilidad de reuso de regenerante

Un sistema de intercambio iónico involucra el siguiente equipamiento: Columna de intercambio (que contiene la resina y el correspondiente cuadro de válvulas de maniobras), sistema de regeneración con soda cáustica (que debe ser calefaccionado en función de la temperatura de regeneración) y sistema de efluentes. Estos sistemas son generalmente automatizados mediante un Controlador Lógico Programable (PLC) PLC.

Membranas: ósmosis inversa / nanofiltración / ultrafiltración / microfiltración

Estos procesos de separación utilizan membranas semipermeables que permiten el paso de agua y separan ciertos solutos. Existen distintos tipos de membranas tales como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa de acuerdo al tamaño de elementos a separar, como se indica en el gráfico de la Figura 3. Se encuentran distintos tipos de membranas de acuerdo al material (poliamida, polisulfonas, etc.) o configuración física de las mismas (tubulares, fibra hueca, espiraladas). Por lo tanto, el rechazo a las sales y la presión de operación del sistema serán función de la membrana utilizada.

Figura 3. Campos de aplicación de los procesos de separación con membrana.

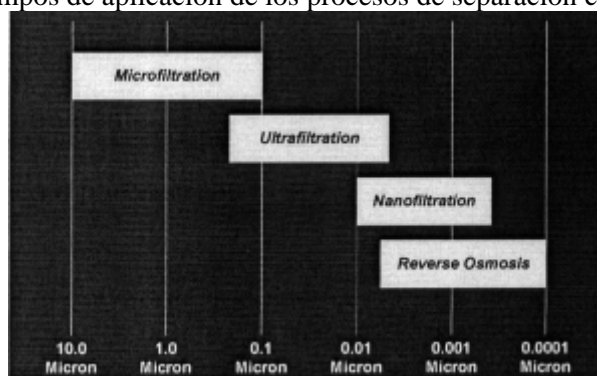


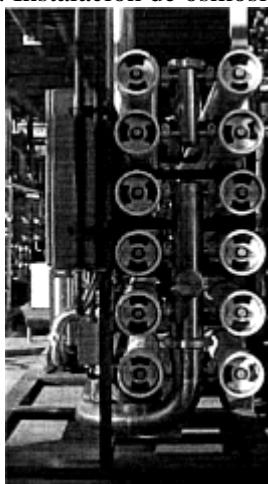
Tabla 2. Tabla comparativa de parámetros característicos de tecnologías con membranas.

| Membrana | Rechaza monovalentes | Rechaza multivalentes | Rechaza orgánicos | Sólidos suspendidos | Presión de operación promedio bars |
|-----------------|----------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|------------------------------------|
| microfiltración | No | No | Parcial | si | 3 bars |
| ultrafiltración | No | No | si | si | 7 bars |
| nanofiltración | Poco | si | si | si | 3 a 10 bars |
| ósmosis inversa | si | si | si | si | 10 a 20 bars |

La tecnología de ósmosis inversa se basa en la utilización de una bomba de alta presión para forzar una porción del agua de alimentación a través de una membrana semipermeable. La cantidad de agua de producto es función directa de la presión del agua de alimentación y la temperatura. Como el volumen de contaminantes del agua de producto queda en el lado de agua de alimentación de la membrana, con el tiempo se dañan las membranas. Por ello, una porción del agua de alimentación se deja drenar o recuperar. Este flujo se denomina agua de rechazo y la cantidad de agua de rechazo varía con la cantidad y es característica de los contaminantes en el flujo de alimentación. Cada fuente de agua de alimentación específica tendrá una recuperación máxima (o sea cantidad de agua de producto dividida por la cantidad de agua de alimentación a la unidad de ósmosis inversa) que será determinada a través de un análisis de laboratorio o en planta. El sistema se completa con una carcasa de cartuchos descartables a la entrada del sistema, tubos de presión que contienen las membranas, tableros de control y potencia, instrumentos de conductividad, caudal y presión necesarios (Figura 4). En la Argentina, es uno de los métodos más utilizados a partir de fines de la década de los 70 (instalándose equipos en la Provincia de La Pampa) ya que en las zonas donde se encuentra arsénico, la salinidad del agua es elevada y deben removerse otros iones. Son numerosas las instalaciones en las provincias de Santa Fe, La Pampa, Buenos Aires y Santiago del

Estero. En todos los casos y aún con valores mayores a 200 µg/l se ha logrado llegar al valor requerido de menos de 50 µg/l.

Figura 4. Instalación de ósmosis inversa.



En el diseño de los sistemas de ósmosis inversa se ha de considerar:

- ◆ **Agentes oxidantes y materia orgánica:** La presencia de agentes oxidantes fuertes como el cloro deterioran irreversiblemente la vida útil de las membranas, por lo tanto es necesaria su eliminación, previo al equipo o bien con carbón activo o con bisulfito de sodio.
- ◆ **Recuperación del sistema:** Dependerá de la naturaleza química del agua a tratar y el máximo dependerá de la solubilidad máxima que se pueda alcanzar. Para ello se utilizan antiescalantes que aumentan el grado de solubilidad. La dosificación de antiescalante se realiza para evitar la precipitación de sales en el concentrado
- ◆ **Potencial de ensuciamiento:** Como se sabe la frecuencia de lavado y la vida útil de las membranas dependerán, entre otros factores, de los sólidos en suspensión, materia orgánica y coloides presentes en el agua cruda de alimentación. El índice de ensuciamiento de las membranas está relacionado directamente con el S.D.I. (Silt Density Index). Este valor debe minimizarse con el pretratamiento adecuado para llegar a valores menores de 3, para minimizar la frecuencia de lavado de las membranas.
- ◆ **Temperatura:** La presión de operación aumenta aproximadamente un 3% por cada grado centígrado que disminuye el agua cruda.
- ◆ **Origen:** agua de pozo o superficial
- ◆ **pH y estado de oxidación del arsénico:** se observa mayor eficiencia de remoción como As(V).

Electrodiálisis reversible

Electrodiálisis es el proceso en el cual los iones son transferidos a través de una membrana selectivamente permeable a cationes o aniones bajo la influencia de corriente continua. Los iones migran de una solución más diluida a una más concentrada. Las membranas están acomodadas entre electrodos opuestos alternando membranas de intercambio iónico catiónicas y aniónicas. De esta manera se restringe la movilidad de cationes y aniones resultando en juegos de compartimientos alternados que contienen agua con baja y alta concentración de iones. La electrodiálisis reversa se basa en este proceso con reversión periódica de la polaridad de los electrodos y por lo tanto la dirección de pasaje de los iones. Se logra así un bajo ensuciamiento y minimiza la necesidad de pretratamiento. El equipo, además de las celdas, incluye sistema de bombeo, de reciclo, válvulas, regulación de presión y sistema de control. Es en general más caros que los equipos de ósmosis o nanofiltración. Los estudios realizados para evaluar la eficiencia en remoción de arsénico con este proceso no son concluyentes.

Tecnologías biológicas y otros nuevos desarrollos

Por medio de un tratamiento con microorganismos se logra la transformación, estabilización y remoción de arsénico. Se necesitan bacterias específicas en etapas de óxido/reducción, mineralización, detoxificación o metilación. Los factores críticos son energía, fuentes carbonáceas, condiciones anóxicas, aeróbicas o anaeróbicas, temperatura, pH, etc. Entre las nuevas tecnologías se encuentran la fitorremediación y el tratamiento electrocinético.

DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE EFLUENTES GENERADOS

Un factor muy importante en la decisión de la tecnología a utilizar es la disposición de los efluentes generados en el tratamiento. Se sintetizan brevemente y sólo con fines comparativos, los distintos métodos de tratamiento de

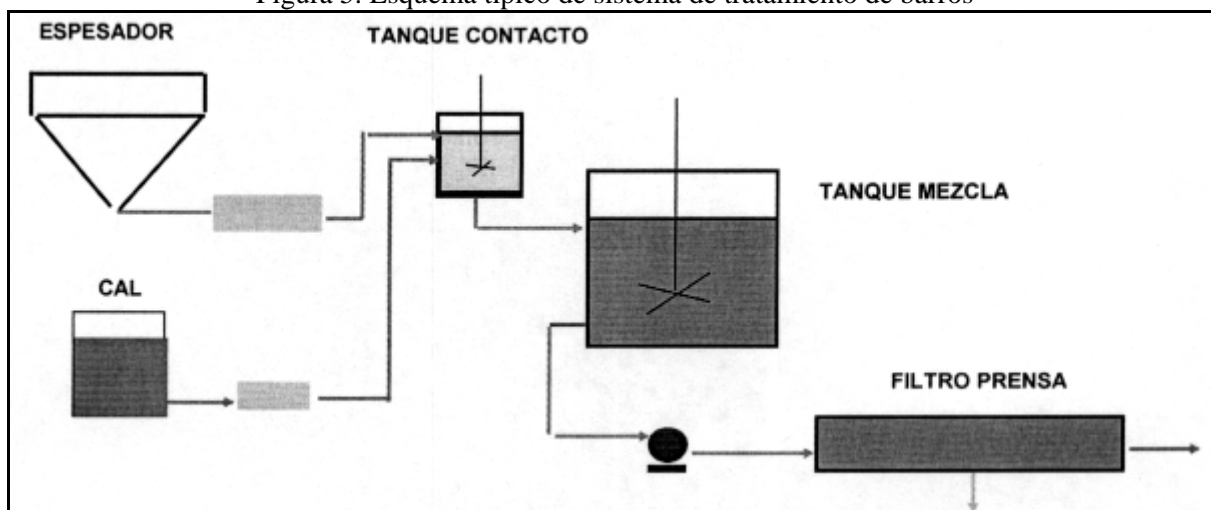
efluentes generados y formas de disposición final. El objetivo buscado es lograr confinar los contaminantes removidos para disponerlos en la forma más segura posible, evitando el lixiviado del mismo.

Tratamiento de efluentes líquidos y barros

Los efluentes generados durante los procesos anteriormente descritos son tratados en:

- ◆ Espesadores por gravedad: Consisten en recipientes donde se incrementa el contenido de sólidos como primera etapa de concentración.
- ◆ Deshidratadores mecánicos: Entre ellos se pueden mencionar centrifugas, filtros prensa, filtros de banda y deshidratadores al vacío. Los filtros prensa son adecuados en grandes plantas para tratar barros de ablandamiento con cal y con sales de aluminio, con el agregado de productos químicos para floculación y/o ajuste de pH. Pueden llegar a lograr un rango del 40% al 70% de sólidos en ablandamiento y 35% en precipitación con sales de aluminio. En la Figura 5 se observa un esquema típico donde se combina espesamiento y deshidratación mecánica con agregado de productos químicos.
- ◆ Lagunas de evaporación y lechos de secado: Son las más utilizadas para las tecnologías de ósmosis inversa e intercambio iónico. Se buscan grandes superficies que favorezcan el proceso natural de evaporación. Se busca normalmente llegar a reducir de 1,25cm hasta 4 cm por año, hasta llegar a un valor de concentración que permita otro tipo de disposición. Es una buena solución para regiones con baja lluvia y humedad, alta temperatura y fuertes vientos.
- ◆ Lagunas de almacenaje de barros: Son la solución más común y en ellas se produce la decantación y/o evaporación del efluente.
- ◆ Los barros obtenidos de los procesos de coagulación / precipitación presentan un problema serio de disposición y son considerados residuos peligrosos.

Figura 5. Esquema típico de sistema de tratamiento de barros



Disposición de efluentes líquidos y barros

En este punto en particular deberán considerarse especialmente las regulaciones nacionales y locales vigentes sobre disposición de residuos y es recomendable tener en cuenta las regulaciones internacionales⁽⁹⁾

- ◆ Descarga directa a curso de agua para dilución en el mismo. Para ello deben tenerse en cuenta los límites permitidos de descarga en distintos tipos de curso.
- ◆ Descarga indirecta: A cloaca, teniendo en cuenta también los límites regulados para este tipo de descarga.
- ◆ Relleno de barros deshidratados en tierra: El barro deshidratado puede ser dispuesto en un relleno donde se lo reparte en la superficie del mismo. Esta solución depende de variables tales como tipo y permeabilidad de suelo, química del sólido a disponer, influencia en napas subterráneas y en el crecimiento o cultivo de especies en el terreno. Existen regulaciones sobre este tipo de opción.
- ◆ Rellenos sanitarios: Con esta solución también deben tenerse en cuenta los permisos necesarios, posibilidad de lixiviación y la disponibilidad de este tipo de rellenos.
- ◆ Relleno sanitario para residuo peligroso: cuando el residuo es tóxico se debe recurrir a esta opción y debe contemplarse un correcto aislamiento del residuo. La EPA cuenta con un procedimiento para identificar la toxicidad del lixiviado (TCLP) y deben considerarse las leyes sobre Tratamiento, Transporte y Disposición de Residuos Peligrosos.

- ◆ Reinyección en napa profunda: Esta solución debe tener en cuenta las características geológicas, normativas vigentes y el costo de energía.

COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Coagulación 1 filtración

Ventajas

- ◆ Hasta 90% de remoción de As (V)
- ◆ Sulfato férrico más eficiente que el de aluminio que necesita pre-oxidación.
- ◆ Especial para aguas con alto contenido de Hierro y Manganeseo.
- ◆ Baja inversión de capital

Desventajas

- ◆ Operación costosa y complicada
- ◆ Requiere operadores entrenados
- ◆ Tipo y dosis de productos químicos afectan la eficiencia
- ◆ Problemas en la disposición de efluentes
- ◆ Puede ser necesaria una etapa de pulido para asegurar calidad consistente.
- ◆ Remoción limitada de As (III)

Ablandamiento con cal

Ventajas

- ◆ Alta remoción de As(V) con $\text{pH} > 10.5$
- ◆ Químico fácilmente disponible

Desventajas

- ◆ Costoso y complicado
- ◆ Operador entrenado
- ◆ Ajuste continuo de pH
- ◆ Problemas en la disposición de efluentes

Tratamiento convencional Fe-Mn

Ventajas

- ◆ Remueve también otros contaminantes

Desventajas

- ◆ Problemas en la disposición de efluentes por toxicidad del residuo
- ◆ Operadores entrenados para evitar problemas aguas abajo

Alúmina activada

Ventajas

- ◆ Alta remoción de As(V) aún con altos TDS. Eficiencia del 95%
- ◆ Tecnología comercialmente disponible

Desventajas

- ◆ Competencia con sulfatos y cloruros
- ◆ Ajuste de pH
- ◆ Problemas de regeneración: 5-10% pérdida por carrera
- ◆ Problema manejo de químicos
- ◆ Ensuciamiento con sólidos suspendidos
- ◆ Problemas de efluentes potencialmente peligrosos

Intercambio iónico

Ventajas

- ◆ Tecnología sólo apropiada para sistemas con sulfatos $< 25 \text{ mg/l}$ y TDS $< 500 \text{ mg/l}$.
- ◆ Eficiencia del 95%
- ◆ No se requiere ajuste de pH
- ◆ Bueno para aguas con alto As y pH y bajos sulfatos y bicarbonatos
- ◆ Buena remoción de nitratos y cromatos

Desventajas

- ◆ Los sulfatos, TDS, selenio, fluoruros y nitratos compiten con el arsénico y afectan la carrera
- ◆ Sólidos suspendidos y precipitados de hierro tapan el medio

- ◆ Corrientes de subproductos en efluentes altamente concentrados pueden ser problemáticos
- ◆ No remueve As (III)
- ◆ Alto costo de inversión y operación
- ◆ Problemas de generación de efluentes potencialmente peligrosos

Osmosis inversa/ nanofiltración

Ventajas

- ◆ Pueden llegar a remoción >95%
- ◆ Efectivo si se desea remover otros compuestos y TDS total.
- ◆ Calidad consistente.
- ◆ Equipamiento compacto y automatizado.

Desventajas

- ◆ Baja recuperación de agua lleva al aumentar el caudal de agua cruda
- ◆ Descarga de concentrado de agua puede ser un problema
- ◆ Mayormente no remueve As (III)
- ◆ Mayor inversión de capital y cuidado en pretratamiento

Electrodiálisis reversible

Ventajas

- ◆ Puede alcanzar una remoción >80%

Desventajas

- ◆ Baja recuperación de agua lleva a aumentar caudal de agua cruda
- ◆ No competitivo en costo con la ósmosis inversa y la nanofiltración
- ◆ Mayor inversión de capital y cuidado en pretratamiento

Medios filtrantes especiales

Ventajas

- ◆ Diseño compacto
- ◆ Operación con atención mínima
- ◆ Bajo volumen de efluentes
- ◆ Cambios bruscos en la calidad de entrada no afectan el rendimiento
- ◆ Aprobado en pruebas de relleno sanitario
- ◆ Sin efluentes líquidos con As

Desventajas

- ◆ Mayores costos operativos

FACTORES A TENER EN CUENTA EN LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

En la etapa de evaluación de la tecnología a utilizar se recomienda tener en cuenta los siguientes factores:

Técnicos

Calidad del agua cruda y tratada

Es necesario contar con una caracterización completa del agua a tratar incluyendo todos los iones o elementos que puedan afectar el funcionamiento o la eficiencia para cada tecnología a evaluar. No basta con los análisis habituales de potabilidad de agua, sino deben agregarse elementos que es imprescindible conocer (por ejemplo sílice, alcalinidad, etc.). A modo de ejemplo de elementos que influyen en la decisión de tecnologías a evaluar, se puede mencionar el caso de contenido de hierro. Tal como se mencionó anteriormente el hierro presenta una alta afinidad con el arsénico. Por lo tanto si el contenido es alto se puede pensar en utilizar un sistema de adsorción como arena verde o similar. En casos de contenido medio se prefiere un sistema de coagulación/filtración mientras que para bajos tenores, se optará por sistemas de membranas, medios especiales o intercambio iónico. Asimismo debe indicarse el objetivo de calidad requerido para evaluar la necesidad de diferentes etapas de tratamiento en el tren completo. Por ejemplo, aunque las normativas nacionales indiquen un valor máximo admisible, algunas industrias buscan cumplir normas más exigentes para poder exportar sus productos a países con requerimientos más exigentes.

Caudal de diseño

Se necesita conocer el caudal horario, diario y pico y evaluar la posibilidad de mezcla con agua cruda a efectos de disminuir la inversión de capital. Relativo a este punto es importante revisar la disponibilidad de agua, variaciones estacionales, picos de consumo, etc.

Factibilidad de utilización de tecnologías

Tal como se indicara anteriormente, algunas tecnologías no son aplicables en determinados casos de calidad de agua cruda. Como ejemplo podemos mencionar el caso de iones que inhiben la afinidad del elemento adsorbente con el arsénico. La tecnología seleccionada debe asegurar confiabilidad permanente en la calidad de agua tratada obtenida. Para ello deberá evaluarse también la combinación de más de una tecnología. En condiciones ideales, se recomienda realizar estudios piloto o de laboratorio que confirmen la factibilidad técnica de las tecnologías preseleccionadas.

Ambientales

Disposición y generación de efluentes

En este rubro se consideran tanto los costos de tratamiento de corrientes líquidas, barros y sólidos como los costos de adecuación, transporte y disposición final. De ellos se deben separar aquellos que contengan el arsénico removido del agua de aquellos que no presenten toxicidad (por ejemplo el caso de contralavado de filtros especiales o resinas de intercambio iónico). Asimismo se debe tener en cuenta el manejo de los químicos involucrados en los distintos procesos.

Estudio de Impacto ambiental

En todo proyecto se debe realizar el correspondiente estudio de impacto ambiental, ya sea en el caso de potabilización de agua para una comunidad, como para el tratamiento de agua industrial.

Selección de productos químicos

Al momento de seleccionar la tecnología debe evaluarse la ficha de cada producto químico (MSDS) y evaluar los riesgos de transporte y manipuleo para minimizar la probabilidad de accidentes en planta.

Económicos

Inversión en capital

En este rubro debe investigarse el costo del equipamiento, obras civiles, terreno, montaje, permisos, etc. El costo del equipamiento dependerá del grado de automatismo especificado, duración y vida útil esperada, materiales seleccionados, redundancia de equipamiento, etc.

Costos Operativos

a) **Costo de productos químicos:** Se deberá evaluar tanto el costo como la seguridad en el abastecimiento continuo en el emplazamiento de tratamiento, disponibilidad para almacenaje y eventual peligrosidad de manipuleo.

Los siguientes productos químicos(en caso de ser necesaria su aplicación) deben evaluarse;

- ◆ **Oxidante:** el producto químico más utilizado es hipoclorito de sodio pero debe evaluarse la formación de productos de desinfección no deseados.
- ◆ **Coagulante:** En el caso de la coagulación y precipitación se debe tener en cuenta la eficiencia de remoción de distintos químicos. Por eso se recomienda realizar estudios de Jar Test para evaluar la dosis y el tipo de coagulante durante la etapa de evaluación primaria del proyecto. Generalmente, los productos químicos más eficientes son aquellos que contienen hierro.
- ◆ **Antiescalantes y reductores:** en el caso de sistemas de ósmosis inversa debe prestarse atención al costo de estos productos químicos.
- ◆ **Regenerantes:** como es el caso de los químicos involucrados en la regeneración (intercambio iónico, alúmina activada, etc.)

b) **Costo de energía.** Debe considerarse el consumo eléctrico de las distintas etapas de bombeo (de pozo, entrada a tratamiento, alta presión en el caso de ósmosis inversa, etc.)

c) Mano de Obra de operación

d) **Reemplazo de medios filtrantes,** membranas de ósmosis inversa, resinas de intercambio iónico y otros consumibles.

En cada tecnología deberá evaluarse la durabilidad de los elementos principales de la planta. Este es uno de los ítems que más influyen en el costo y es el reemplazo de membranas, medios filtrantes, resinas, etc.

e) Operaciones de lavado y limpiezas eventuales

Se debe considerar los insumos de químicos y mano de obra para operaciones de lavado y limpieza de membranas, resinas de intercambio iónico, etc.

f) Costo de agua cruda

En este punto es importante evaluar las pérdidas de agua y rendimiento del sistema.

Los sistemas de ósmosis inversa /nanofiltración son aquellos que mayores pérdidas de agua ocasionan ya que usualmente se trabaja con recuperaciones del orden del 75%.

g) Costos de tratamiento de efluentes y disposición final

En este punto se deben incluir costos de productos químicos de tratamiento, transporte y costos de disposición final de los efluentes generados

CONCLUSIONES

Existen diversas tecnologías disponibles para lograr la exigente remoción de arsénico requerida para el consumo humano de agua. Con la información completa de caudales y calidades del agua cruda y tratada, se buscará identificar dos o más tecnologías para el caso específico, a efectos de profundizar el análisis, si es posible con el soporte de estudios de laboratorio o pilotos. Es importante tener en cuenta el contexto general del proyecto (ubicación, recursos, aspectos legales). Para la decisión final sobre la tecnología a emplear, si bien la variable económica es determinante, no deben olvidarse los factores de cuidado del ambiente y la seguridad del personal. Una vez seleccionada la tecnología, deberá realizarse un cuidadoso diseño con una ingeniería básica y de detalle que aseguren confiabilidad operativa, mínimo mantenimiento y la vida útil especificada. En todo el proceso es recomendable contar con el apoyo de expertos para resolver el proyecto con solvencia técnica.

REFERENCIAS

- Ahmed A., 2001. An overview of arsenic removal technologies in Bangladesh and India. Bangladesh University of Engineering and Technology.
- Degrémont, 1979. Manual Técnico del Agua. Degrémont. Bilbao. 4a Edición.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2000. Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water. Office of Water. EPA-R-00-028.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2001. Treatment of arsenic residuals from drinking water removal processes. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. EPA/600/R-01/033.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2002a. Arsenic treatment technologies for soil, waste, and water. Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA 542-R-02-004.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2002b. Proven alternatives for aboveground treatment of arsenic in groundwater. Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA-542-S-02-002.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2003. Arsenic treatment technology evaluation handbook for small systems. Office of Water. EPA 816-R-03-014.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2004a. Technology selection and system design. USEPA Arsenic Removal Technology Demonstration Program Round 1. Office of Research and Development. EPA/600/R-05/001.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2004b. Capital costs of arsenic removal technologies. USEPA Arsenic Removal Technology Demonstration Program Round 1. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development. EEA/600IR04/201.

[Volver a: Aguas de bebida](#)