

# **Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados**

## **Subgerencia de Ambiente, Investigación y Desarrollo**



## **Informe: Arsénico en el Agua Potable**

**Elaborado por:**

**Ing. Hernán Villalobos S.**

**Ing. Jorge Hidalgo M.**

**Enero 2011**



## INDICE

Arsénico.....	2
El Arsénico en el agua.....	3
Enfermedades asociadas al Arsénico en el agua potable.....	3
<i>Arsenicismo</i> .....	4
Límites permisibles.....	4
Casos reportados mundialmente.....	5
<i>Estados Unidos de América</i> .....	5
<i>Taiwán</i> .....	6
<i>México</i> .....	7
<i>Argentina y Chile</i> .....	7
<i>Bangladesh</i> .....	7
Tecnologías Disponibles para la Remoción del Arsénico en el Agua.....	8
<i>Métodos Comunes</i> .....	8
<i>Oxidación</i> .....	9
<i>Precipitación</i> .....	9
<u>Coagulación / floculación</u> .....	9
<u>Filtración</u> .....	10
<i>Adsorción</i> .....	10
<i>Intercambio iónico</i> .....	11
<i>Membrana</i> .....	11
Métodos emergentes.....	12
Comparación de tecnologías.....	13
Factores a tomar en cuenta en la selección de tecnologías.....	15
Referencias.....	17



## Arsénico

El arsénico es el elemento 33 (número atómico) de la tabla periódica de elementos. Pertenece al grupo de los semimetales, ubicándose sobre la línea de la clasificación general que divide los elementos en metales y no metales, como se muestra en la figura 1. Su comportamiento químico, así como sus propiedades físicas se asemejan más a las de un metal que a un no metal.

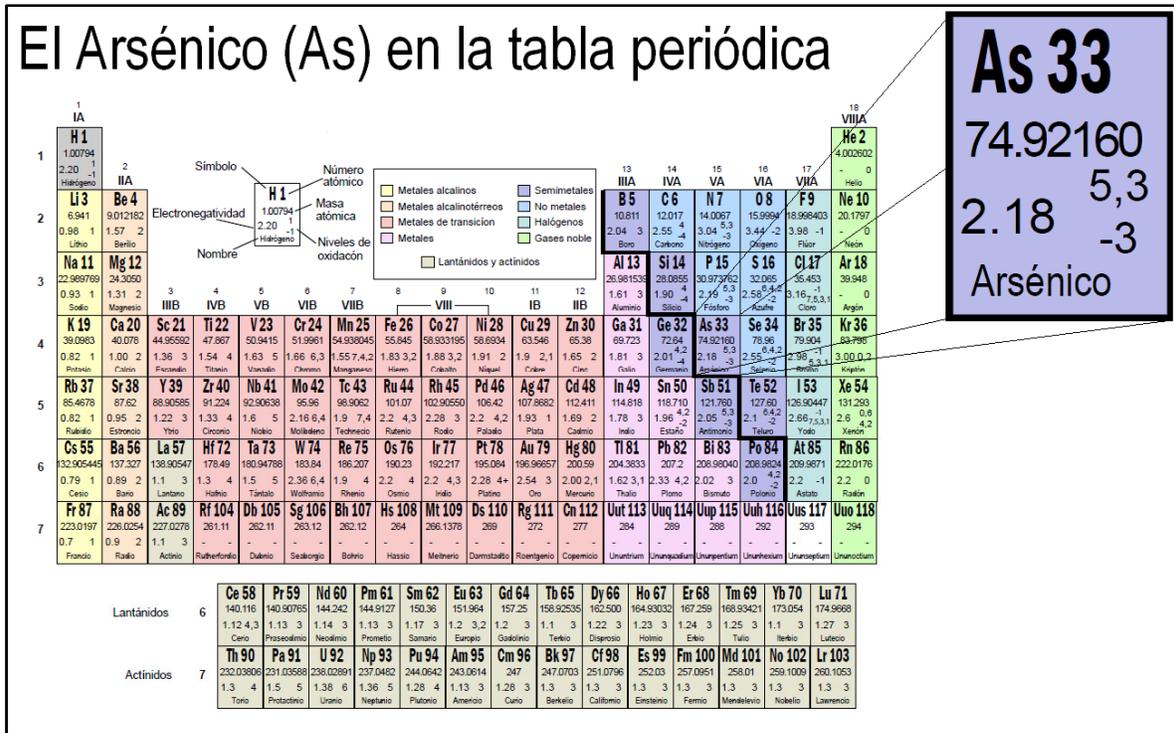


Figura 1 Ubicación del Arsénico en la tabla periódica de elementos.

De forma natural, el arsénico existe en estados de Oxidación -3, 0 y 3, distribuido a través de toda la corteza terrestre. Se encuentra como mineral de cobalto y por lo general en la superficie de rocas combinado con azufre o metales como Manganeso (Mn), Hierro (Fe), Níquel (Ni), Plata (Ag) o Estaño (Sn). La principal forma en que se encuentra el arsénico en la naturaleza es el mineral Arsenopirita (FeAs<sub>2</sub>), en sedimentos de depósitos aluviales. Otros arseniuros metálicos encontrados de forma natural son los minerales FeAs<sub>2</sub> (loellingita), NiAs (nicolita), CoAsS (cobalto brillante) y CoAs<sub>2</sub> (esmaltinga).

El arsénico es uno de los pocos elementos que se puede obtener con un 99.99% de pureza, sin embargo, en su estado elemental tiene pocos usos. En combinación con otros elementos, se utiliza mayormente en procesos de manufactura (vidrio y aleaciones no metálicas), en la industria médica,



fuegos artificiales, curado de maderas y en la elaboración agroquímicos. De estos, los agroquímicos y el curado de maderas representan una fuente potencial directa de contaminación de acuíferos, los demás, tanto en su uso como en su deposición, tienen poca o ninguna conexión con el agua subterránea o mantos acuíferos. Se estima que del total de la producción mundial de Arsénico, 70% se utiliza en el curado de maderas, 22% en la industria agroquímica y el restante 8% en los otros procesos.

### El Arsénico en el agua

En aguas superficiales y subterráneas el Arsénico se encuentra en estado de oxidación +5 (Arsenato,  $As^{+5}$ ) y +3 (Arsenito,  $As^{+3}$ ), siendo el primero de estos el más común en aguas superficiales altamente oxigenadas. El segundo se encuentra en aguas subterráneas bajo condiciones de reducción (ganancia de electrones). La tabla 1 resume la solubilidad de estas tres formas de Arsénico en agua el agua

**Tabla 1** Densidad y solubilidad de las tres formas más comunes de Arsénico en el agua

Compuesto	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Solubilidad en agua (g/L)
As	5.73 (a 14 °C)	Insoluble
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.74	37 a 20 °C
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.32	1500 a 16 °C

### Enfermedades asociadas al Arsénico en el agua potable

El arsénico llega hasta el agua de consumo humano, a través de mecanismos naturales o inducidos. Se encuentra mayormente en agua tomada de fuentes subterráneas. Existen una serie de efectos adversos en la salud, asociados al contacto prolongado con las formas más comunes de Arsénico, los cuales difieren del envenenamiento con Arsénico por una fuente puntual de concentración. Este tipo de efectos se presentan en países en donde se han encontrado efectos altas concentraciones de Arsénico en aguas subterráneas para consumo humano y se le conoce como “arsenicismo”.



### *Arsenicismo*

Los efectos de la Arsenicismo manifiestan normalmente después de periodos prolongados de exposición (5 a 20 años). Entre estos se han identificado problemas de la piel (cambios del color, cayos en las palmas de las manos y los pies), cáncer de piel, vejiga, riñones y pulmones, así como enfermedades de los vasos sanguíneos, las piernas y los pies. Además se especula que podría estar asociado a aumentos en la frecuencia de casos de diabetes, presión alta y problemas de fertilidad.

Se ha determinado que la piel prácticamente no absorbe el Arsénico, por lo que el lavado de manos o baños con agua con altos contenidos de Arsénico no representa un riesgo para la salud, ni es causante de Arsenicismo.

El arsénico se encuentra presente en prácticamente todas las fuentes de agua subterránea del mundo, aunque en concentraciones que no representan un riesgo para la salud. Dado lo prolongado de los efectos de arsénico en la salud y el bajo control que ha existido en todo el mundo, la extensión total de los efectos adversos del Arsénico en la salud es desconocida.

### **Límites permisibles**

Dado el desconocimiento que existe acerca de los males asociados al consumo de Arsénico en el agua y a lo prolongado de este consumo para que se manifiesten síntomas en la población, no existe un consenso global respecto a cuál debe ser el nivel máximo permitido. Empero, un gran número de países establece el límite superior en 50 µg/l. Los países europeos y los Estados Unidos en cambio establecen un máximo de 10 µg/l, mismo valor que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS). La tabla 2 muestra los límites permisibles en algunos de los países mencionados en este informe.

**Tabla 2** Límites permisibles de Arsénico en agua potable

<b>País</b>	<b>Máximo valor permitido (µg/l)</b>
Estados Unidos (EPA)	10
Comunidad Económica Europea (CEE)	10



<b>País</b>	<b>Máximo valor permitido (µg/l)</b>
Argentina	50
México	50
Taiwán	50
Bangladesh	50
Australia	7
Organización mundial de la Salud (OMS)	10

### **Casos reportados mundialmente**

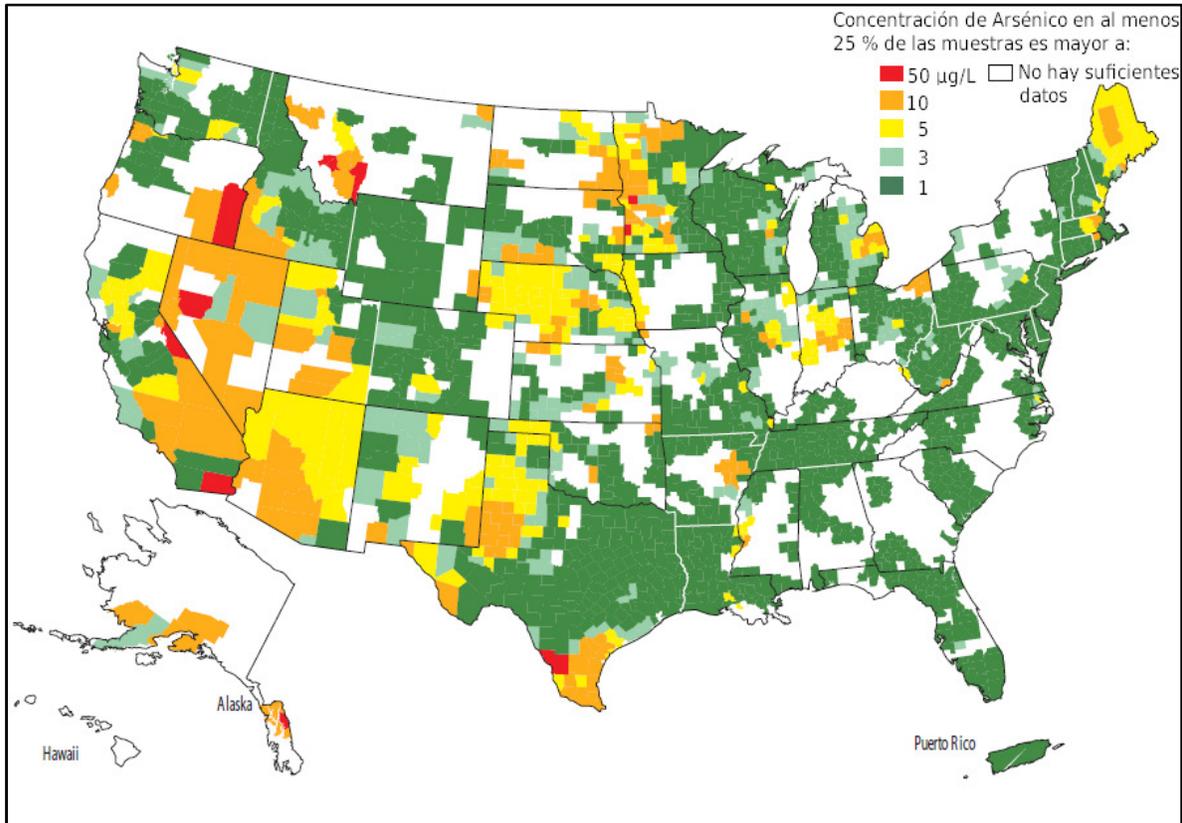
#### *Estados Unidos de América*

En los Estados Unidos de América el problema de la contaminación del agua subterránea con Arsénico se encuentra ampliamente documentado y desde hace casi 70 años existen regulaciones al nivel de Arsénico en el agua para consumo humano. A continuación se resume el historial estos límites:

- **1942:** El Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos (USPHS, por sus siglas en ingles), fija un límite de tolerancia al Arsénico de 50 µg/l.
- **1962:** USPHS mantiene el límite en 50 µg/l y emite una recomendación de un nivel máximo de 10 µg/l. Éste mismo año la Asociación American de Obras Hidráulicas (AWWA, por sus siglas en ingles) adopta este límite como norma mínima para toda agua de suministro público.
- **1970:** Se crea la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en Ingles).
- **1974:** La USEPA promulga los estándares mínimos para agua potable, incluyendo los 50 µg/l para Arsénico y estos aplican para todo el país.
- **1999:** El Consejo Nacional de Investigación determina que 50 µg/l es un valor muy alto de MCL (Nivel máximo de contaminante, por sus siglas en ingles). Se estima que este límite lleva a una probabilidad de cáncer de vejiga de 1 en 1000 en hombres.

- **2001:** Se fija un límite de 10 µg/l y se da un periodo de 5 años para acatar esta normativa en todo el país.

En la parte Media y sur Oeste del país es donde se presentan las mayores concentraciones de Arsénico en el agua, como se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Mapa de los niveles de Arsénico encontrados en aguas subterráneas en los Estados Unidos de América.

*Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).*

Se ha encontrado que la mayoría de los pozos contaminados con Arsénico en los Estados Unidos, encuentran el origen de su contaminación en las formaciones geológicas, siendo los de formación glacial los que más frecuentemente se encuentran contaminados con niveles superiores a los 10 µg/l (30% de los pozos).



En la República de China (Taiwán) la exposición al Arsénico proveniente del agua potable ha demostrado ser la causa de diversas enfermedades de los vasos sanguíneos, las cuales producen gangrenas en las extremidades inferiores. A este padecimiento se le conoce como “la enfermedad de los pies negros”. En otros países del mundo se han observado males similares asociados al arsénico, sin embargo no se han presentado casos tan severos como los encontrados en Taiwán. Se han encontrado altas concentraciones de Arsénico en tres pueblos al Sur de la isla (BuDai, YiZhu, XueYia) y uno al norte (BeiMen). En el caso de BeiMen, el 90% de los pozos muestreados presentan concentraciones superiores al límite de la normativa local (50 µg/l), y 13% presentan concentraciones superiores a los 1000 µg/l.

#### *México*

En México, se han encontrado altas concentraciones de Arsénico en el agua subterránea de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Hidalgo, Nuevo León y Puebla. Destaca entre estos el caso de Zimapán en el estado de Hidalgo, en donde el 84% de las muestras de agua de pozos excede la el límite de 50 µg/l fijado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se han encontrado concentraciones de hasta 1097 µg/l (más de 20 veces del límite permitido). La fuente de la contaminación se ha encontrado como una mezcla factores naturales (estratos de Arsenopirita) y contaminación por residuos de sustancias utilizadas en minería a mediados del siglo XX.

#### *Argentina y Chile*

La planicie del Chaco, las provincias de Jujuy y Salta en Argentina, así como el área de Antofagasta en Chile, son las zonas en las que se han encontrado niveles altos de Arsénico en Sur América (superior a 50 µg/l). Se estima que en un área de cerca 1.7 millones de kilómetros cuadrados, se encuentran niveles altos de Arsénico, en donde habitan cerca de 2 millones de personas que se encuentran en riesgo de padecer de arsenicismo. El origen de la contaminación se ha asociado a depósitos aluviales de limos y arcillas del periodo cuaternario, mezcladas con cenizas volcánicas de origen riolítico.

#### *Bangladesh*



La contaminación con Arsénico en Bangladesh se ha documentado ampliamente, no solo por los altos niveles de concentración encontrados, sino por la gran población que se encuentra expuesta. Se estima que entre 35 y 77 millones de Bangladesíes, se encuentra en riesgo de padecer arsenicismo, lo cual representa casi la mitad de la población del país. De acuerdo con algunas estimaciones, entre 200000 y 270000 personas morirán en los próximos años, por padecimientos asociados al arsenicismo. En Bangladesh, 35% de los pozos presentan niveles de Arsénico superiores a 50  $\mu\text{g/l}$  y un 8% presenta niveles superiores a 300  $\mu\text{g/l}$ , siete de los distritos del Oeste de Bengal han reportado contaminación con Arsénico en el agua subterránea. En Bangladesh al igual que en muchas otras naciones, el nivel permitido es de 50  $\mu\text{g/l}$ .

El origen de la contaminación en Bangladesh es de origen geológico, proviene de depósitos aluviales y deltaicos del Holoceno, en la parte oeste de Bengal.

#### *Arsénico en el mundo*

Adicionalmente a los casos anteriormente mencionados, se han encontrado concentraciones altas de Arsénico de origen geológico en Camboya, China, India, Mongolia, Pakistán, Filipinas, Tailandia, Vietnam, Rumania, Suecia, Hungría. Mientras que en Rusia, Bélgica, Inglaterra, Grecia, Holanda, Canadá, Perú y Australia, la contaminación se asocia mayormente a residuos de minería.

### **Tecnologías Disponibles para la Remoción del Arsénico en el Agua**

Las tecnologías para la remoción de arsénico en el agua se pueden separar en: los métodos comunes utilizados para sistemas medianos y grandes de remoción, y los métodos emergentes utilizados principalmente como soluciones domiciliarias.

#### *Métodos Comunes*

Los procesos para la remoción de arsénico son muy variados y entre los más comunes y ampliamente utilizados tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, se pueden citar varios que se agrupan por los procesos en los cuales se basan para la remoción:

- **Oxidación:**
  - Aireación Simple
  - Agentes oxidantes
  - Radiación



- **Precipitación:**
  - Coagulación/filtración,
  - Filtración directa,
  - Coagulación asistida con Microfiltración
  - Coagulación mejorada
  - Ablandamiento con cal
  - Ablandamiento con cal mejorado
  
- **Adsorción:**
  - Alúmina activa,
  - Carbón activado
  - Fe/Mn
  
- **Intercambio iónico**
  - Intercambio aniónico
  
- **Membrana**
  - Microfiltración
  - Ultrafiltración
  - Nano-filtración
  - Osmosis Inversa
  - Electro diálisis inversa

#### *Oxidación*

Consiste en la conversión de Arsenito ( $As^{+3}$ ) en Arsenato ( $As^{+5}$ ), debido a que las tecnologías de remoción de arsénico son más eficientes para el arsenato, debido a que el arsenito no carga por debajo de un pH de 9.2.

Puede llevarse a cabo mediante:

- Aireación Simple
- Agentes oxidantes
- Radiación

#### *Precipitación*

Los procesos basados en la precipitación son los más comúnmente utilizados alrededor del mundo para la remoción de arsénico en el agua para consumo humano.

#### Coagulación / floculación

El proceso en que la adición de productos químicos (coagulantes) generan que las cargas eléctricas del material disuelto, suspendido o en forma coloidal sean neutralizadas, lo que permite la formación de partículas mayores o aglomerados (flocs) que pueden ser eliminadas por sedimentación o filtración.

El tipo y la dosis del coagulante y el pH influyen en la eficiencia del proceso.

Coagulantes más comunes son las sales metálicas:

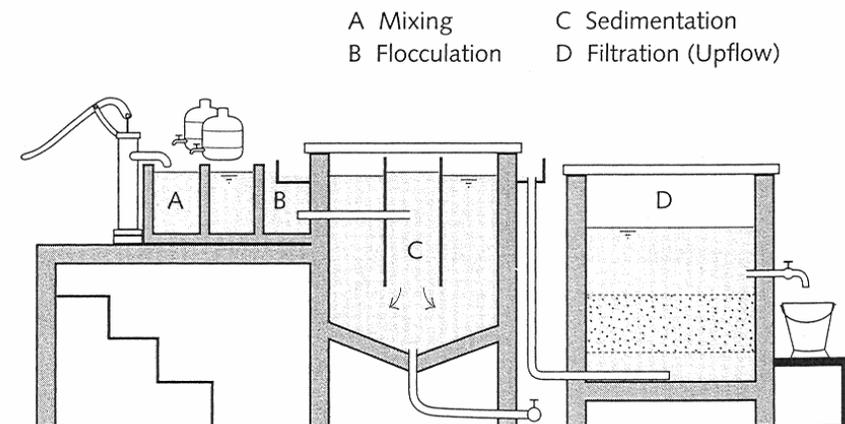
- Sulfato de aluminio, hidróxido de aluminio o de cobre.
- Sales de hierro, cloruro férrico, sulfato férrico, hidróxido férrico.
- Cal o cal hidratada (ablandamiento con cal)

### Filtración

Consiste en la separación de partículas sólidas al atravesar un medio que las retiene.

Los medios filtrantes más utilizados son: Arena Antracita Granate Carbón activado Telas filtrantes

La eficiencia depende de: tipo de medio, tasa de filtración, tiempo de contacto y contralavado.



**Figura 3.** Sistema típico de remoción de arsénico basado en la precipitación (Feenstra, van Erkel, & Vasak, 2007)

### *Adsorción*



Proceso de transferencia de masa donde una sustancia en su fase líquida queda atrapada por fuerzas físicas o químicas a la superficie de un sólido. Cuanto mayor sea la superficie del medio, mayor es la capacidad de acumular material.

El arsénico puede ser adsorbido en distintas superficies:

- Medios basados en Alúmina Activada
- Medios basados adsorbentes con hierro
- Otros medios: bauxita, hematita, feldespato, laterita, minerales arcillosos, entre otros.

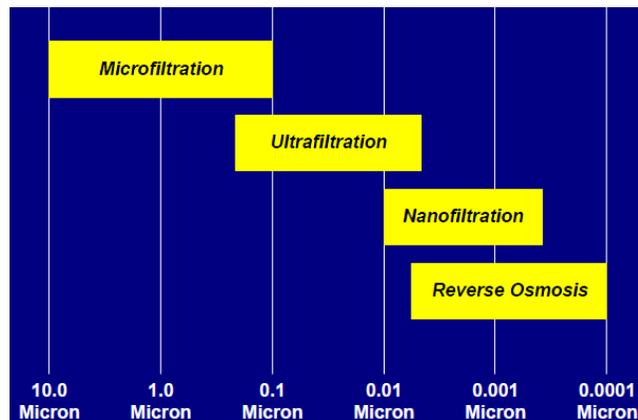
#### *Intercambio iónico*

Es un proceso físico y químico, en el cual los iones de una especie dada son desplazados de un material insoluble de intercambio (resina) por otros iones que se encuentran en solución.

Las resinas de intercambio iónico utilizan una matriz polimérica de enlace cruzado. Las resinas de sulfato selectivas convencionales son las más utilizadas para remoción de arsenatos.

#### *Membrana*

Los procesos basados en utilización de membranas permiten el paso de agua y separan ciertos solutos presentes en ellas. Las membranas se clasifican de acuerdo a tamaño de elementos a separar:



**Figura 4.** Rango de aplicación de las tecnologías de membranas

Una descripción detallada de los métodos para la remoción de arsénico en agua para consumo humano se puede encontrar en Petrushevski et al. (2007).



## **Métodos emergentes**

Debido a la gran problemática existente en muchos países del mundo por el consumo de aguas con arsénico y en especial en países los cuales gran parte de la población tiene bajo poder adquisitivo, se desarrollaron han diseñado tecnologías emergentes de solución domiciliar:

- Oxidación Fe-Mn
- Filtración con arena verde de manganeso
- Coagulación / Microfiltración
- Inmovilización de arsénico in situ (sub-superficial)
- Coagulación mejorada (electrocoagulación, electroflotación)
- Remoción biológica de Arsénico
  - Carbón Biológicamente Activado (BAC - Biological Activated Carbon)
  - Oxidación Solar y Remoción de Arsénico (SORAS - Solar Oxidation and Removal of Arsenic)
- Fitorremediación
- Barrera Reactiva Permeable
- Tratamiento Electro-cinético
- Arena Recubierta de Oxido de Hierro (IOCS - Iron Oxide Coated Sand)
- Memstill®
- Pirámide de Agua
- Colector Solar de Rocío
- Entre otras



**Comparación de tecnologías** (Feenstra, van Erkel, & Vasak, 2007):

En el proceso de evaluación de las tecnologías para la remoción de arsénico se deben tomar en cuenta las diferentes tecnologías disponibles, para poder seleccionar la tecnología que presente la mayor cantidad de beneficios y que se adapte a las necesidades de remoción:

**Tabla 3.** Eficiencia de las diferentes tecnologías para la remoción de Arsénico en el agua potable

Tecnología	Eficiencia de remoción		pH	Habilidades del operador	Costos relativos
	As (III)	As (V)			
<b>Oxidación / Precipitación</b>					
Oxidación con aire	< 30%	< 30%			
Oxidación química	< 30%	30 - 60%			
<b>Coagulación/co-precipitación</b>	< 30%	> 90%			bajo
Coagulación con aluminio	< 30%	> 90%	6.0 - 8.0	mediano	bajo
Coagulación con hierro	60 - 90%	> 90%	< 8.0	mediano	bajo
Ablandamiento con cal	30 - 60%	> 90%	> 11.5	mediano	bajo-mediano
Coagulación mejorada	60 - 90%	> 90%	5.0 - 9.0	mediano	bajo-mediano
<b>Sedimentación</b>	< 30%	< 30%		bajo	bajo
<b>Oxidación / Filtración</b>	< 30%	60 - 90%	5.5 - 8.5	mediano	mediano
<b>Adsorción</b>	30 - 60%	> 90%			
Alúmina activa	60 - 90%	> 90%	5.5 - 6.0	bajo	mediano
Sorbentes a base de hierro (IBS)	30 - 60%	> 90%	6.0 - 8.5	bajo	bajo-mediano
<b>Inercambio iónico</b>					
Resina aniónica	< 30%	> 90%	6.5 - 9.0	alto	mediano
<b>Membrana / Osmosis inversa</b>					alto
Osmosis inversa	< 30% / 60 - 90%	60 - 90%		mediano	alto
Electrodialisis	< 30% / 60 - 90%	30 - 60% / 60 - 90%		mediano	alto
Nanofiltración	< 30% / 60 - 90%	60 - 90%		mediano	alto
CAMP	< 30% / > 90%	> 90%			alto
<b>Otros</b>					
Oxidación In-situ/Inmovilización	60 - 90%	> 90%			mediano



Comparación de ventajas y desventajas entre las distintas tecnologías (D'Ambrosio, 2004)

**Tabla 4** Ventajas y desventajas de las tecnologías para la remoción de Arsénico

Tecnología	Ventajas	Desventajas
<b>Coagulación Filtración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baja inversión de capital</li> <li>Hasta 90% de remoción de As<sup>+5</sup></li> <li>Especial para aguas con alto contenido de Fe-Mn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operación costosa y complicada</li> <li>Requiere operadores entrenados</li> <li>Tipo y dosis de productos químicos afectan la eficiencia</li> <li>Problemas en la disposición de los efluentes</li> <li>Puede necesitar etapa de prueba</li> <li>Remoción limitada de As<sup>+3</sup></li> </ul>
<b>Ablandamiento con Cal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta remoción de As<sup>+5</sup> con pH&gt;10.5</li> <li>Químico fácilmente disponible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operación costosa y complicada</li> <li>Requiere operadores entrenados</li> <li>Ajuste continuo de pH</li> <li>Problemas en la disposición de los efluentes</li> </ul>
<b>Tratamiento Fe- Mn</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Remueve también otros contaminantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Problemas en la disposición de los efluentes por toxicidad del residuo</li> <li>Requiere operadores entrenados para evitar problemas aguas abajo</li> </ul>
<b>Alumina activada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta remoción de As<sup>+5</sup> aún con altos TDS. Eficiencia del 95%</li> <li>Tecnología comercialmente disponible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Competencia con sulfatos y cloruros</li> <li>Ajuste de pH</li> <li>Problemas de regeneración: 5-10% pérdida por carrera</li> <li>Problema con manejo de químicos</li> <li>Ensuciamiento con sólidos suspendidos</li> <li>Problemas de efluentes potencialmente peligrosos</li> </ul>
<b>Intercambio iónico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eficiencia de 95%</li> <li>Tecnología solo apropiada para sistemas con sulfatos &lt; 25 mg/l y TDS &lt; 500 mg/l</li> <li>No se quiere ajuste de pH</li> <li>Bueno para aguas con alto As y pH; bajos sulfatos y bicarbonatos</li> <li>Buena remoción de nitratos y cromatos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alto costo de inversión y operación</li> <li>Problemas de efluentes potencialmente peligrosos</li> <li>Los sulfatos, TDS, selenio, fluoruros y nitratos</li> <li>Sólidos suspendidos y precipitados de hierro tapan el medio</li> <li>No remueve As<sup>+3</sup></li> </ul>
<b>Osmosis inversa / Nanofiltración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puede llegar a remoción &gt; 95%</li> <li>Calidad consistente</li> <li>Equipamiento compacto y automatizado</li> <li>Efectivo si se desean remover otros compuestos y TDS total</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor inversión de capital y cuidado en pre-tratamiento</li> <li>Mayormente no remueve As<sup>+3</sup></li> <li>Baja recuperación de agua lleva a aumentar el caudal de agua cruda</li> <li>Efluente puede ser problema</li> </ul>
<b>Electrodialisis reversible</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puede llegar a remoción &gt; 80%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor inversión de capital y cuidado en pre-tratamiento</li> <li>No competitivo en costo con ósmosis inversa y nanofiltración</li> <li>Baja recuperación de agua lleva a aumentar el caudal de agua cruda</li> </ul>
<b>Medios filtrantes especiales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño compacto</li> <li>Operación con atención mínima</li> <li>Bajo volumen de efluentes</li> <li>Cambios bruscos en la calidad de entrada no afectan rendimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayores costos operativos</li> </ul>



### **Factores a tomar en cuenta en la selección de tecnologías** (D'Ambrosio, 2004)

En la etapa de selección de la tecnología de remoción arsénico se deben tomar en cuenta diversos aspectos, entre los que se encuentran:

#### **Técnicos:**

- i. **Calidad agua cruda y tratada:** caracterización completa del agua a tratar de manera que se identifiquen todos iones o elementos que puedan afectar el funcionamiento o eficiencia para cada tecnología. Ejemplo el hierro; para altas concentraciones se puede usar adsorción, medias puede ser coagulación/filtración y para bajas membranas, medios especiales o intercambio iónico.
- ii. **Caudal de diseño:** caudal horario, diario y pico, así como evaluar la posibilidad de mezcla con agua cruda.
- iii. **Factibilidad de utilización de tecnologías:** aplicabilidad de la tecnología para el caso del agua cruda a tratar. Evaluar posibilidad de combinación de tecnologías. Utilizar estudios piloto o de laboratorio para confirmar factibilidad técnica.

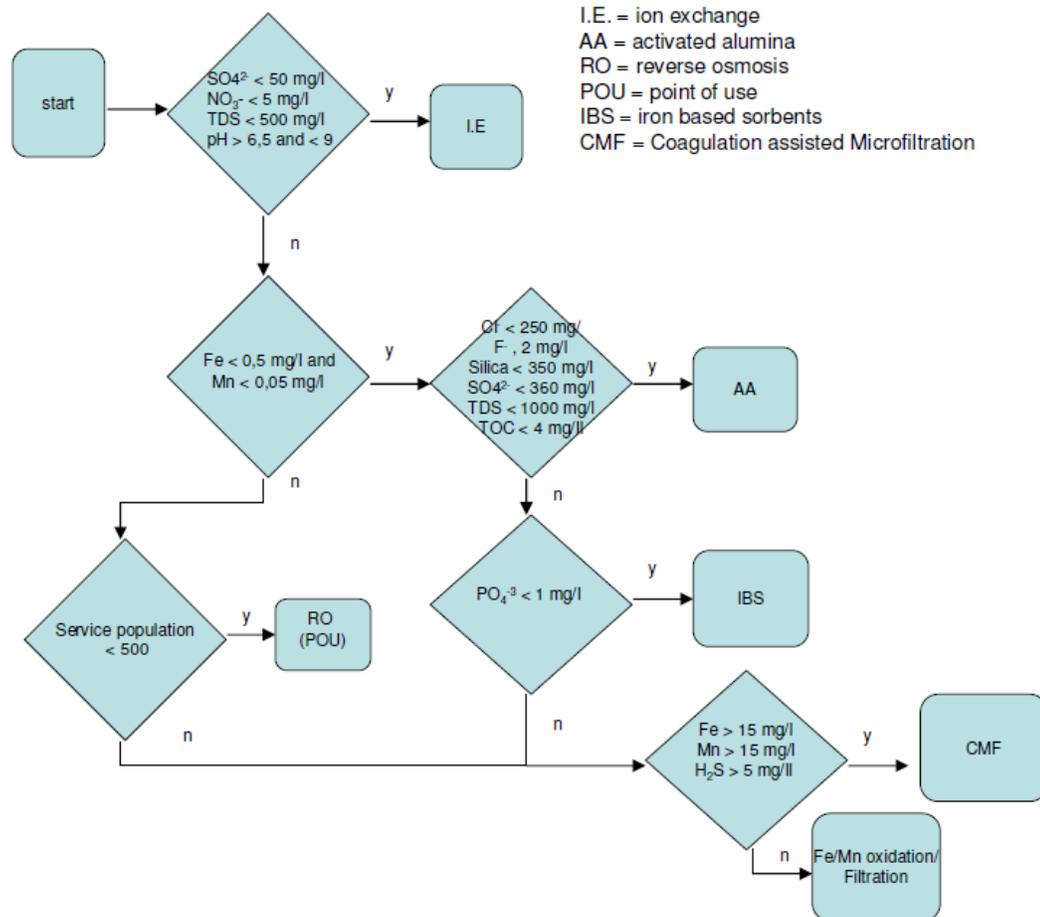
#### **Ambientales:**

- i. **Disposición y generación de efluentes:** considerar tratamientos, transporte, adecuación y disposición final de corrientes líquidas, barros y sólidos
- ii. **Estudio de Impacto Ambiental:** considerar todos los posibles impactos ambientales producto de la tecnología de remoción analizada.
- iii. **Selección de productos químicos:** evaluar las fichas de los productos, así como riesgos de transporte y manipuleo que puedan generar accidentes.

#### **Económicos**

- i. **Inversión de capital:** costos de obras civiles, terreno, montaje, permisos, costo de equipamiento, entre otros. Tomar en cuenta en el costo de equipamiento
- ii. **Costos operativos:**
  - a. **Productos químicos:** evaluar la seguridad en el abastecimiento,
    - *Oxidante:* ejm hipoclorito de sodio.
    - *Coagulante:* realizar estudios de prueba de jarras.
    - *Antiescalantes y reductores:* como los usados en ósmosis inversa.
    - *Regenerantes:* como los usados en intercambio iónico o alúmina activa.
  - b. **Energía:** tomar en cuenta costos de bombeo de las distintas etapas.
  - c. **Mano de obra de operación:** salarios del personal de operación, supervisión e ingeniería que estarán a cargo de los sistemas.
  - d. **Materiales consumibles:** evaluar durabilidad de los materiales como medios filtrantes, membranas de ósmosis inversa, resinas de intercambio iónico, entre otros.
  - e. **Lavado y limpiezas eventuales:** considerar los insumos químicos y mano de obra.
  - f. **Agua cruda:** pérdidas de agua y rendimiento del sistema.
  - g. **Tratamientos de efluentes y disposición final:** Costos de productos, transporte y disposición.

Petrusevski y otros proponen la utilización de un diagrama de flujo para la selección del sistema de remoción de arsénico basado en los parámetros de calidad del agua, esta metodología de selección es aplicable solo a sistemas de remoción pequeños.



**Figura 5** Proceso de selección basado en parámetros para sistemas de remoción arsénico (Petrusevski, Sharma, Schippers, & Shordt, 2007)

La gran mayoría de autores coinciden en que:

- 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.
- Cualquier tecnología para la remoción de arsénico que se seleccione debe someterse a pruebas utilizando el agua que va a ser tratada, antes de la implementación de los sistemas remoción en la escala de campo. (Johnston & Heijnen, 2001)
- Una vez seleccionada la tecnología debe realizarse un cuidadoso diseño de ingeniería (básica y de detalle) que asegure confiabilidad operativa, mínimo mantenimiento y vida útil especificada.



## Referencias

1. Armienta, M.A.; Rodríguez, R., Aguayo, A., **Arsenic Contamination of Groundwater at Zimapán, México**. Journal of Hydrogeology, No.5, pp. 39-46, 1997.
2. Brunt, R.; Grifioen, J.; Vasak, L.; **Arsenic in groundwater: Probability of occurrence of excessive concentration on global scale**, Centro Internacional de supervisión de aguas subterráneas, UNESCO, Reporte SP 2004-1, 2004.
3. Chen, Y.-C.; Cheng, H.-H.; Liao, C.-M.; Lin, H.-Y.; Lin, M.-C.; Shao, K.-T, **Risk Assessment of Arsenic Exposure from Consumption of Cultured Milkfish, from the Arsenic-Contaminated Area in Southwestern Taiwan**, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 75 pp. 637-644, 2005.
4. D'Ambrosio, M. C., **Evaluación y Selección de Tecnologías Disponibles para Remoción de Arsénico**. Arsénico en Aguas: origen, movilidad y tratamiento, (págs. 123-136). Río Cuarto, Argentina. 2004
5. Environmental Protection Agency, **Arsenic In drinking Water**, disponible en: <http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/arsenic/index.cfm>, 2010.
6. Erickson, M.; Barnes, R., **Arsenic in Ground Water in the Upper Midwest, USA**, Grounwater 43, No. 6, pp 796–805, 2005.
7. Feenstra, L., van Erkel, J., & Vasak, L.. **Arsenic in groundwater: Overview and evaluation of removal methods**. Utrecht, Holanda: IGRAC. 2007
8. Fernández, J. L.; Galindo, G.; Parada M. A.; Gimeno, D.; García, M.; Saavedra, J., **Estado actual del conocimiento sobre el Arsénico en el agua de Argentina y Chile: origen, movilidad y tratamiento**, Arsénico en Aguas: origen, movilidad y tratamiento, pp. 1-22, 2005.
9. Gomez, A.; Howe, P.; Hughes, M.; Kenyon, E.; Lewis, D.R.; Moore, M.; Ng, J., **Arsenic and Arsenic compounds**, Organización Mundial de la Salud, disponible en: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc224.htm#1.2>, 2001.
10. Johnston, R., & Heijnen, H.. **Safe Water Technology for Arsenic Removal**. Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water , 1-22. 2001



11. Lin, M. Z., **Contaminación por arsénico en comunidades pesqueras en la costa suroeste de Taiwán, Universidad de NanHua (台灣西南沿海養殖環境之砷污染)**, Instituto de Investigaciones en Manejo Ambiental, Centro General de Educación, Publicación del Centro de Investigación Global de la Universidad Nacional de Taiwan, Vol 37 pp 17-21, 2003.
12. Organización Mundial de la Salud, **Arsenic in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality**, World Health Organization, WHO/SDE/WSH/03.04/75, 2003.
13. Organización Mundial de la Salud, **Arsenic in drinking water**, WHO, Fact sheet No. 210, disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs210/en/>, 2010.
14. Organización Mundial de la Salud, **Water Sanitation and Health (WSH)**, WHO, disponible en: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases/arsenicosis/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/arsenicosis/en/), 2010.
15. Petrusovski, B., Sharma, S., Schippers, J. C., & Shordt, K.. **Arsenic in Drinking Water, Thematic Overview Papers of IRC**. Holanda. 2007
16. Ryker, S.J., **Mapping arsenic in groundwater**, Geotimes v.46 no.11, p.34-36, disponible en: [http://www.agiweb.org/geotimes/nov01/feature\\_Asmap.html](http://www.agiweb.org/geotimes/nov01/feature_Asmap.html), 2001.
17. Smith, A.H.; Lingas, E.O.; Rahman, M., **Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency**. Bulletin of the World Health Organization, vol. 78, pp. 1093-1103, 2000.
18. USEPA. **Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems**. Estados Unidos. 2003
19. USEPA. **Technologies and Costs for Removal of Arsenic from Drinking Water**. Estados Unidos. 2000
20. Vazquez, H.; Ortolani, V.; Rizzo, G.; Bachur, J.; Pidustwa, V., **Arsénico en Aguas subterráneas . Criterios para la Adopción de límites tolerables**, Rosario; ENRESS; 1999.