

ANÁLISIS CIENTÍFICO

Por Carlos Alberto Londoño. Jefe de Planta de tratamiento de Agua Potable Empocabal ESP EICE

ARSÉNICO.

RESUMEN

El origen natural del arsénico en el agua subterránea está ligado a la litología de los materiales geológicos que conforman el acuífero y a los procesos de oxidación-reducción que afectan a este elemento. Otros orígenes están ligados a factores antropogénicos como son los lixiviados de residuos de minas o el uso de plaguicidas que afectan principalmente a las aguas subterráneas. La exposición crónica a arsénico, aún en bajas concentraciones, puede ocasionar diversos problemas a la salud de la población. La mayor amenaza del arsénico para la salud pública, proviene del agua potable para el consumo humano, generalmente como resultado de la ingestión prolongada de agua con bajas concentraciones de arsénico inorgánico. (1)

La organización mundial de la salud (OMS) establece que el límite máximo permisible es de 0,010 mg/l (2), este mismo valor está estipulado en la resolución 2115 de 2007 por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano establecida por el ministerio de la protección social ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, de la república de Colombia. (3)

En diferentes países de América han reportado la existencia de población expuesta crónicamente a concentraciones de arsénico en agua para el consumo humano, superiores a las previstas por la normatividad de los países. Es el caso de Canadá, Estados Unidos, Chile, Perú, Bolivia, México, Colombia, El Salvador y Nicaragua. Algunos de estos países han resuelto total o parcialmente el problema utilizando diferentes tecnologías, dependiendo del tipo de población afectada: rural o urbana. Existen alrededor de 14 tecnologías para remover arsénico del agua con eficiencias de 70 a 99%, La población más afectada se encuentra

dispersa en el área rural; ya que esta consume agua sin ningún tipo de tratamiento y desconoce el riesgo al que se encuentra expuesto tras su consumo.

Los métodos de coagulación-floculación y ablandamiento con cal, son los más usados en grandes sistemas y no se usan exclusivamente para remover el arsénico. En pequeños sistemas puede aplicarse el intercambio iónico, alúmina activada, ósmosis inversa, nano-filtración y electrodiálisis inversa. Las tecnologías emergentes son: arena recubierta con óxidos de hierro, hidróxido férrico granular, empaques de hierro, hierro modificado con azufre, filtración con zeolita, adición de hierro con filtración directa y remoción convencional de hierro y manganeso. En América Latina, los estudios han estado orientados al uso de la coagulación química: con sulfato de aluminio, cal hidratada y polielectrolito de sodio, y han logrado reducir notablemente las concentraciones de arsénico en el agua para el consumo humano. Con coagulación directa sobre filtro y con coagulación-floculación han logrado alcanzar mayor rendimiento de remoción, obteniendo valores cerca del límite máximo permitido por la organización mundial de la salud (OMS). En la remoción mediante adsorción han empleado hematitas y materiales con alto contenido de hierro y superficies de carga positiva (arcilla verde natural, arcillas activadas, zeolita natural y activada y carbón de hueso). (4)

El objetivo de este documento es establecer un referente teórico de apoyo que brinda información necesaria sobre el metal arsénico como una fuente de contaminación en las aguas naturales que implica una adecuada remoción en los sistemas de potabilización de agua, debido a su alto impacto frente a la salud pública. Se evidencian diferentes técnicas de remoción de arsénico que pueden ser aplicadas con el fin de cumplir con los requerimientos establecidos de acuerdo a los límites máximos permisibles que estipula la resolución 2115 de 2007 en Colombia.(3) Este documento es una herramienta de trabajo para la empresa de obras sanitarias EMPOCABAL E.S.P-E.I.C.E en la remoción de arsénico para el tratamiento de agua potable en el municipio de Santa Rosa de Cabal, Risaralda, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es el líquido más abundante en la Tierra, representa el recurso natural más importante y la base de toda forma de vida. Constituye más del 80% del cuerpo de la mayoría de los organismos e interviene en la mayor parte de los procesos metabólicos que se realizan en los seres vivos.

Desempeña un importante papel en la fotosíntesis de las plantas y sirve de hábitat a una gran parte de los organismos. En el planeta Tierra, el agua ocupa el 75% del volumen total del planeta, de estos aproximadamente el 97% del agua del planeta es agua salina, apenas 3% del agua total es agua dulce (apta para consumo humano) y de esa cantidad un poco más de dos terceras partes se encuentra congelada en los glaciares y casquetes helados en los polos y altas montañas. (5)

Como se observa en la Figura 1, el agua de consumo humano puede extraerse del subsuelo u obtenerse de la superficie de la tierra, ya sea de ríos, lagos, lagunas etc. Es en estas fuentes donde el agua puede contaminarse, siendo uno de los contaminantes el arsénico (As).

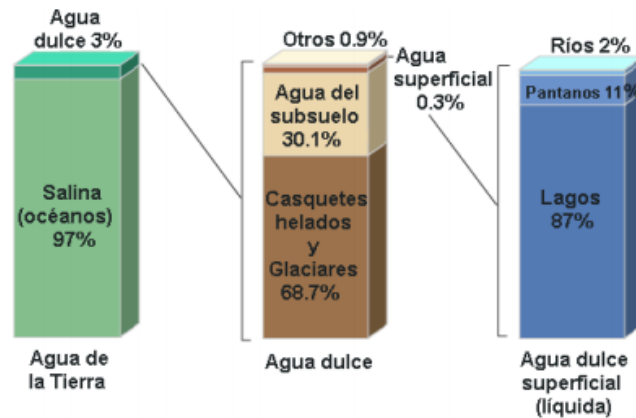


Figura 1. Distribución del agua en el Planeta Tierra.

El porcentaje de agua para el consumo humano se ve afectado por diversas variables, una es el aumento de su consumo en relación con el crecimiento de la población; y la otra, el deterioro de la calidad del líquido y su contaminación. En relación con su calidad, ésta se puede ver afectada tanto por las acciones antropogénicas, es decir, producto de la intervención del hombre o por factores naturales. Una acción natural, por ejemplo, es la contaminación del agua subterránea por ciertos metales como el arsénico. (6)

El Arsénico puede tener dos orígenes: natural o antropogénico. Las fuentes más comunes de arsénico en ambientes naturales son las rocas volcánicas, específicamente los productos de erosión y cenizas, rocas sedimentarias marinas, depósitos minerales hidrotermales tal como se evidencian en el municipio de Santa Rosa de Cabal que cuenta con altas fuentes termales naturales y las aguas geotermales asociadas, así como combustibles fósiles, incluyendo carbón y petróleo. Se encuentra en forma natural como mineral de cobalto, aunque por lo general se encuentra en la superficie de las rocas combinado con azufre o metales como Magnesio, hierro, Cobalto o Níquel. (7)

El Arsénico de origen antropogénico está relacionado en su mayoría a actividades como la explotación minera y refinación de metales por fundición donde el arsénico, este se produce en las emisiones gaseosas o en la escoria, procesos electrolíticos de producción de metales de alta calidad como cadmio o zinc y en menor proporción en la agricultura debido al empleo de plaguicidas o herbicidas arsenicales orgánicos. (1)

Para seleccionar la tecnología y diseñar un proceso que descontamine el arsénico del agua, se debe considerar un factor importante como la química del agua; asimismo, se debe identificar el ión presente. El arsénico se encuentra tanto como As (V) o como As (III), en donde As (V) se descontamina con mayor facilidad que el As (III). Se puede lograr la oxidación del As (III) por medio de aireación, por el uso de cloro u ozono, o por medio del permanganato de potasio.

También las propiedades físico-químicas del agua juegan un rol importante. Por ejemplo, el pH del agua marca una diferencia significativa en la eficiencia para descontaminar el arsénico empleando diferentes tecnologías. Éstas se comportan de distinta manera, considerando la concentración de otros elementos; si ponemos como ejemplo el sulfato, éste tiene mayor afinidad que el arsénico en un filtro sobre otro, altas concentraciones de sulfato determinan qué proceso es más conveniente para descontaminar el agua.(1)

Existen diferentes procesos generadas para la remoción del arsénico, entre las más importantes se tienen:

- Oxidación

- Coagulación
- Ablandamiento con cal
- Adsorción
- Ósmosis inversa
- Intercambio Iónico
- Filtración.

Estos procesos son más efectivos para realizar la eliminación de As^{5+} que del As^{3+} . Sin embargo, el arsenito puede pre-oxidarse. Así, agentes oxidantes como el cloro, el cloruro férrico y el permanganato de potasio se han empleado con este propósito. Sin embargo, la pre-oxidación con cloro puede generar subproductos no deseados (compuestos organoclorados), por lo que se recomienda el uso del ozono y del peróxido de hidrógeno. (4)

Los métodos de eliminación del Arsénico apuntan a entregar el agua en condiciones potables para que pueda ser consumida por las poblaciones, por lo que se ha investigado mucho respecto a mejorar y encontrar nuevos métodos de reducir el arsénico presente en el agua.(10)

MARCO TEÓRICO

1. ARSÉNICO (As)

El arsénico (As) es un elemento químico, perteneciente a la familia de los metaloides (número atómico 33, peso atómico 74,922), muy común en rocas, suelo, hidrósfera y biósfera, calculándose su presencia en cerca de 5×10^{-4} % de la corteza terrestre, siendo un componente de aproximadamente 245 minerales diferentes. (5)

Los niveles de arsénico en el ambiente son variables, ya que éste puede sorberse o desorberse de partículas pudiendo cambiar de estado de oxidación al reaccionar con oxígeno o con otras moléculas del aire, del agua, del suelo o por la acción de microorganismos. El Arsénico aparece en un amplio rango de concentraciones en aire, agua, suelos, vegetales y animales. La exposición del hombre a este tóxico constituye un problema de salud pública en muchas áreas geográficas de nuestro planeta, es por ello que se hace indispensable buscar métodos de remoción del Arsénico, que permitan proveer a la población de agua segura, contribuyendo así con el desarrollo social y económico de los pueblos.(5)

2. PRESENCIA DE ARSÉNICO EN LA NATURALEZA

El arsénico está presente en la naturaleza en varias formas químicas que incluyen arsenato [As (V)], arsenito [As (III)], arsenato de plomo [PbHAsO₄], sulfuro de arsénico [As₂S], ácido monometil arsónico [MMA], ácido dimetilarsténico [DMA], trimetil arsina [TMA], arsenocolina [AsC], arsenobetaina [AsB], arsenozúcares, etc. En general, las especies arsenicales inorgánicas son más tóxicas que las orgánicas y los compuestos arsenicales en estado de oxidación trivalente son más tóxicos que los pentavalentes (Fowler B. A 1977), lo cual es avalado por el Bangladesh Center for Advanced Studies (1999), que afirma respecto a la toxicidad del As que la misma depende de su forma química: el arsenito es más tóxico que el arsenato, debido a reacciones enzimáticas (metabolismo humano); el Arsénico orgánico es menos tóxico que cualquiera de los dos anteriores. La especie y movilidad del

Arsénico en los suelos es afectada por el pH y por las condiciones redox (potencial redox Eh) del suelo, ante un alto potencial redox predomina el As (V) y la movilidad del Arsénico es baja, a medida que aumenta el pH y el potencial redox disminuye predomina el As (III). La forma reducida de arsénico está más sujeta a la lixiviación porque tiene mayor movilidad, tal como se indica en la Figura 2.

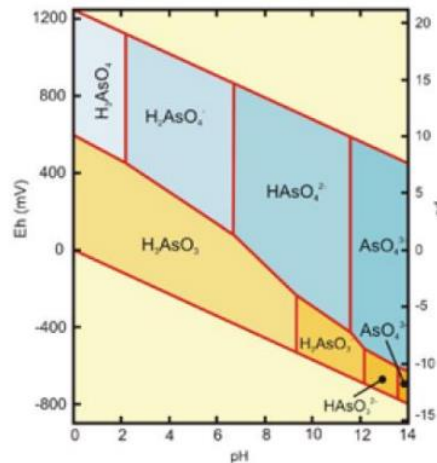


Figura 2. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de As en el sistema As-O₂-H₂O.

El arsénico se transporta a las aguas y alimentos a través de distintos procesos naturales como meteorización, actividad biológica, emisiones volcánicas, así como procesos antropogénicos, actividad minera, uso de combustibles fósiles, uso de pesticidas, herbicidas, desecantes, conservadores de la madera, por lo que en muchas ocasiones es inevitable interactuar con él.(5)

En términos generales, bajo condiciones oxidantes, el estado As(V) predomina sobre el As(III), encontrándose fundamentalmente como H₂AsO₄⁻. A valores de pH menores que 6,9; mientras que, a pH más alto, la especie dominante es HAsO₄²⁻. En condiciones de extrema acidez, la especie dominante será H₃AsO₄, mientras que en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO₄³⁻. En condiciones reductoras, a pH inferior a 9,2, predominará la especie neutra.(4)

En las aguas subterráneas el As que predomina es el inorgánico (arseniato AsO₄⁻³), pero pueden encontrarse el As en ambos estados de oxidación ya que las concentraciones de As

(III) y As (V) dependen de la entrada de As en el sistema, de las condiciones redox y de la actividad biológica. Las formas orgánicas, en las aguas subterráneas, son menos comunes. En tanto que en las aguas superficiales el As presente es el inorgánico unido a las partículas en suspensión, en general el As (V) predomina al As (III). Las formas orgánicas se encuentran en pequeñas proporciones. Las concentraciones en que usualmente se encuentra el As en las aguas superficiales son de menos del 0,01 mg/L, pero se puede encontrar niveles más altos cerca de industrias, minas y depósitos de minerales. En las Figuras 3a y 3b se muestra la especiación del As (III) y As (V) en función del pH.

En el suelo, el As está presente en formas inorgánicas como arseniato (AsO_4^{3-}) y arsenito (AsO_3^{2-}) que frecuentemente se encuentran adheridos al suelo, pero también pueden pasar al agua subterránea. Las concentraciones típicas en la corteza terrestre están en un promedio de 2 mg/Kg, con valores típicos de 1 a 40 mg/Kg, aunque en ciertas zonas pueden encontrarse valores mayores. Los compuestos de As (III) son de 4 a 10 veces más móviles que los compuestos de As.

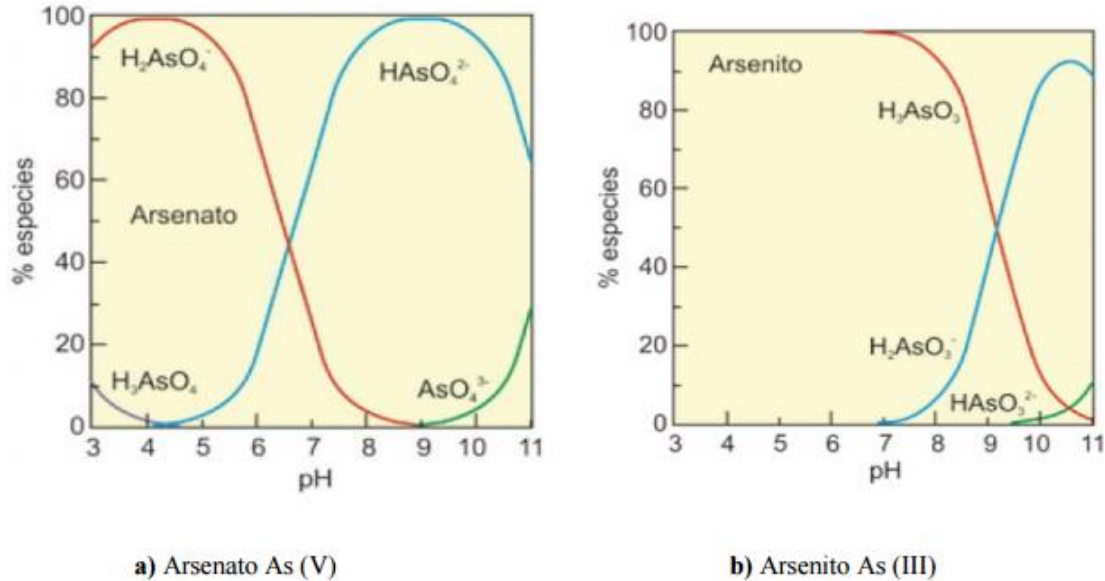


Figura 3. Especies del As en función del pH

3. NORMATIVIDAD

El ministerio de la protección social ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial establece la resolución número 2115 por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.(3)

ARTÍCULO 5º.- CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN RECONOCIDO EFECTO ADVERSO EN LA SALUD HUMANA. Las características químicas del agua para consumo humano de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables que se señalan a continuación:

Cuadro N°. 2 Características Químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN ⁻	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01

4. TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA

Actualmente se conocen alrededor de 14 tecnologías para el abatimiento del As, clasificadas como convencionales y emergentes, las cuales tiene eficiencias que van desde el 70 hasta el 99% y en general, son tecnologías que suelen cubrir a centros urbanos. Se procede a explicar sucintamente las tecnologías convencionales y emergentes más importantes.(4)

4.1 TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

Las tecnologías convencionales de remoción o abatimiento de As se basan en procesos químicos básicos aplicados en forma simultánea, secuencial o independiente. Algunas de estas tecnologías son: óxido-reducción, precipitación, coagulación-adsorción, ablandamiento con cal, procesos de membrana e intercambio iónico.(1)

4.1.1 ÓXIDO-REDUCCIÓN

La mayoría de las tecnologías de remoción de As son eficientes cuando el elemento está presente en el estado pentavalente, porque la forma trivalente no está cargada a pH debajo de 9.2 Por ello, deben oxidarse previamente los componentes arsenicales. Sin embargo, debe notarse que la oxidación sin ayuda de otros tratamientos físicos o químicos no remueve el As del agua, por lo que a la óxido-reducción se la usa como un pretratamiento. El arsenito puede oxidarse directamente por un número de agentes químicos como el cloro gaseoso, el hipoclorito, el ozono, el permanganato, el peróxido de hidrógeno, los óxidos de manganeso y el reactivo de Fenton (H_2O_2/Fe^{2+}). El cloro es un oxidante rápido y efectivo, pero puede conducir a reacciones con la materia orgánica, produciendo trihalometanos tóxicos como subproductos. En Europa y en los EE.UU. se usa crecientemente ozono en reemplazo del cloro. El permanganato de potasio ($KMnO_4$) es un oxidante efectivo del arsenito y es un reactivo comúnmente disponible en los países en desarrollo. El agua oxigenada puede ser un oxidante efectivo si el agua contiene altos niveles de hierro disuelto, lo cual ocurre a menudo conjuntamente con la contaminación arsenical; se producen entonces reacciones de tipo Fenton. La óxido- reducción en general, tiene las siguientes

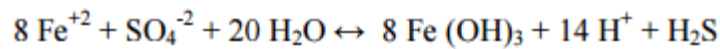
Ventajas: relativamente simple, bajos costos, oxida otras sustancias inorgánicas y constituyentes orgánicos, mata microbios, proceso rápido, mínimos residuos.

Desventajas: principalmente remueve As (V), eficiente control de pH y del proceso de oxidación, necesita procesos complementarios.(5)

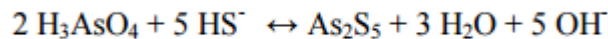
4.1.2 PRECIPITACIÓN

En este método se aprovecha la insolubilidad de ciertos compuestos arsenicales inorgánicos como el sulfuro de As (III), arseniato de calcio y arseniato férrico. La solubilidad de los distintos materiales es muy dependiente de la forma, pH y otras variables. A continuación, se detallan el uso de algunas sustancias para lograr la precipitación de los compuestos de As y las reacciones correspondientes: (5)

- **SULFURO DE ARSÉNICO:** puede ser generado por agregado al agua de soluciones de sulfato ferroso o mediante bacterias reductoras de sulfato, que generan sulfuro de hidrógeno.



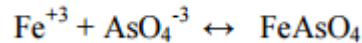
El arsénico precipita luego como sulfuro:



El sulfuro de arsénico es menos soluble por debajo de pH 4, pero el valor remanente en solución es aun significativamente más alto que el de los valores recomendados para agua potable. La precipitación por aplicación directa del gas de sulfuro de hidrógeno no es tan efectiva y requiere rangos de pH de 2,5-3,0.

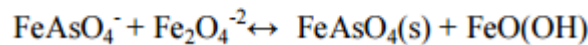
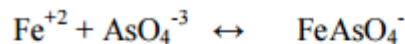
- **COMPUESTOS DE ARSENIATO DE CALCIO:** pueden generarse por adición de CaO ó Ca(OH)₂ a las aguas contaminadas. A valores de pH mayores que 10,5 puede inducirse la precipitación de un alto porcentaje de As usando soluciones de reactivos a concentraciones mayores a 50 mg/L. Sin embargo, es difícil llegar a concentraciones de As finales menores que 1 mg/L, aunque se han reportado en algunos casos valores cercanos a 0,010 mg/L. Dado que el arseniato de calcio sólido reacciona con dióxido de carbono para formar CaCO₃, esto conduce a la removilización del As.
- **SALES DE MAGNESIO:** las adiciones de estas sales producen la formación de Mg₃(AsO₄)₂. En pequeña proporción, este método puede ser aplicado para inducir la inestabilización del arseniato en suelos, sedimentos y residuos.(11)

- **ARSENIATO FÉRRICO:** el As (V) puede ser eliminado también por precipitación como arseniato férrico. Una alternativa es la adición de sales férricas al agua con As.



La precipitación es posible a valores de pH menores a 2 y conduce a la formación de un material amorfo con partículas cercanas a 100 nm. La conversión a un material cristalino (escorodita) exige temperaturas mayores a 90°C.

- **SALES FERROSAS:** otra alternativa es la adición de sales ferrosas, como sulfato ferroso y la subsiguiente oxidación mediante iones ferrato:



La solubilidad disminuye con dosis crecientes de Fe³. El arseniato férrico no es termodinámicamente estable en el rango de pH neutro o mayores. Los materiales tampoco son estables en las mezclas de fundición de cemento alcalino.

Ventajas: relativamente simple, mata microbios, proceso rápido, acelera el proceso de oxidación.

Desventajas: costo de químicos precipitantes, genera residuos, eficiente control de pH, puede existir removilización del As.

4.1.3 COAGULACIÓN- FILTRACIÓN

En esta tecnología el material suspendido o en forma coloidal se transforma, resultando en partículas sedimentables por gravedad o posibles de ser filtradas. El principal propósito de la coagulación es de alterar la carga superficial de los coloides de manera que estos se logren adherir unos con otros. Es el proceso más común para la remoción de As especialmente efectivo para As(V), que se adsorbe sobre los floculos coagulados y puede removerse por filtración. (5)

4.1.4 ABLANDAMIENTO CON CAL.

Es un proceso que consiste en la transformación de piedra caliza en presencia de agua y ácido carbónico para formar carbonato de calcio; éste compuesto adsorbe entonces el As, y el proceso continúa por coagulación. El método se emplea usualmente para tratar aguas muy duras y presenta alta eficiencia. Las desventajas son un pH muy alto en las aguas resultantes (10-12) y que se requieren dosis muy altas de coagulante. Sin embargo, es difícil que se pueda llevar el As a niveles bajos, particularmente por debajo de 1 mg/L y puede necesitarse un tratamiento secundario. El ablandamiento con cal es más efectivo cuando el pH es alto (> 10,5). Se usa cloro para oxidar arsenito a arseniato.

Ventajas: los químicos están comercialmente disponibles.

Desventajas: genera barros tóxicos como residuos

4.1.5 ADSORSIÓN Y PRECIPITACIÓN

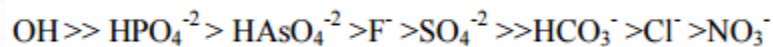
El As puede ser fuertemente atraído a los sitios desorción sobre la superficie de varios materiales sólidos y este mecanismo puede emplearse para remover efectivamente As de la solución. Pueden usarse óxidos de aluminio (alúmina activada), óxidos/hidróxidos de hierro (como hidróxidos de hierro granular GFH), dióxido de titanio, óxido de cerio o metales reducidos

- **REMOCIÓN DE ARSÉNICO USANDO ÓXIDOS/HIDRÓXIDOS ACUOSOS METÁLICOS:** se ha encontrado una muy buena eficiencia con el empleo de materiales de base de óxido e hidróxido de hierro y se han desarrollado varios productos diferentes, entre ellos el óxido de hierro granular y, especialmente, el hidróxido de hierro granular GFH®, con rendimiento superior a cualquier otro material adsorbente. GFH® es un material sintético de akaganeíta, con punto de carga cero a pH 8,2. La Akaganeíta es un mineral de hidróxido de hierro, cloro y níquel, de fórmula $Fe^{3+}O(OH,Cl)$, con estructura de cristal monoclinical, hallado en distintas minas en la Tierra y en rocas traídas de la luna durante el proyecto Apolo. (10)

Ventajas: retiene fuertemente aniones arseniato (inmovilización), remueve efectivamente las especies As (III), productos químicos comercialmente disponibles.

Desventajas: el hierro granular requiere una oxidación previa, los óxidos o hidróxidos no se regeneran y por lo tanto se produce un residuo adicional a tratar que consiste en barros con alto contenido de hidróxidos $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_3]$. En aguas que contienen sílice, ésta interfiere pues compite por los sitios de adsorción.

- **ALÚMINA ACTIVADA:** en la práctica industrial la alúmina activada se fabrica calcinando una alúmina hidratada. Estas alúminas poseen una superficie interna en el rango de 200 a 300 m²/g, bajos grados de cristalización y grandes volúmenes de poro con una distribución de tamaños de poro definida. La alúmina activa típicamente usada en el tratamiento de agua es una mezcla de óxidos de aluminio amorfo y gama ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), preparada por calcinación de hidróxido de aluminio $[\text{Al}(\text{OH})_3]$, a temperaturas entre 300 y 600°C. La alúmina activada muestra su preferencia por los iones de acuerdo con la siguiente serie de selectividad:



Por ello, las especies de arseniato se pueden tratar muy bien y la disminución significativa de la capacidad de adsorción se atribuye solamente a la presencia de fosfato, ya que la adsorción competitiva de iones sulfato es menos eficiente. Se puede regenerar el material mediante el empleo de soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) seguido del lavado con ácido para restablecer la carga superficial positiva. La regeneración es más difícil y menos efectiva comparada con las resinas de intercambio iónico y conduce a la remoción de solamente 50-80% de las especies de As. Además, puede producirse pérdida de material por disolución de la alúmina activada en medios de alcalinidad alta. La alcalinidad es la medida de la capacidad de una disolución acuosa para mantener su pH estable frente a la adición de un ácido o una base. La tecnología de aplicación es simple y los ciclos de servicio se extienden al tratamiento de varios millares de volúmenes de lechos de agua antes de que sea necesaria la regeneración.(5)

Ventajas: trata muy bien las especies de arseniato, se puede regenerar la alúmina, tecnología de operación relativamente simple y conocida, vida útil larga, los insumos están comercialmente disponibles, presenta alta eficiencia de remoción del As (alrededor de 95%).

Desventajas: pérdida de alúmina activada por disolución en medios de alta alcalinidad, rango de pH de trabajo relativamente estrecho (pH 5,5 a 6), el dispositivo puede acumular microorganismos, dificultades para lograr un nivel de regeneración elevado (pérdida de 5 a 10% de la capacidad de adsorción por ciclo), genera residuos líquidos con elevado contenido salino.

4.1.6 PROCESOS DE MEMBRANA

Este tipo de procesos ofrecen posibilidades excelentes para la remoción de As. La eliminación puede darse por: filtrado de las partículas en suspensión conteniendo As por ejemplo microfiltración (MF), exclusión por el tamaño de los iones hidratados 41 por ejemplo nanofiltración (NF), ultrafiltración (UF) y ósmosis inversa (OI); y repulsión eléctrica por las membranas.

- **MICROFILTRACIÓN (MF):** este tratamiento usa membranas de filtración con tamaño de poro entre 103 y 104 Å, con una presión de trabajo promedio de 3 bar. Se aplica primariamente a la remoción de partículas (clarificación) y puede utilizarse en lugar de una filtración convencional con arena. Se utiliza para remover As con un tratamiento previo de coagulación. (12)
- **ULTRAFILTRACIÓN (UF):** este tratamiento se define como una operación de clarificación y desinfección mediante el uso de una membrana. Las membranas empleadas en la UF son porosas, con diámetros de poro entre 30 a 100 Å, y permiten sólo el rechazo de solutos gruesos (macromoléculas) y de todo tipo de microorganismos como virus y bacterias. Debido a que los solutos de bajo peso molecular no son retenidos por la UF, la contrapresión osmótica puede ser despreciada y la presión de trabajo puede mantenerse baja (1 a 10 bares).

- **NANOFILTRACIÓN (NF):** en estos procesos se utiliza membranas semipermeables que permiten el paso de agua y separan ciertos solutos. Las membranas empleadas son porosas con diámetros de poro entre 30 a 100 Å con una presión de trabajo promedio entre 3 y 10 bar. Esta tecnología permite solo el rechazo de solutos gruesos (macromoléculas) y de todo tipo de microorganismos como virus y bacterias. Con esta tecnología se pueden remover As (III) y As (V), ya que estos compuestos se hallan entre los 0,001 y 0,005 micrones. } Ventajas: se pueden remover As (III) y As (V), utiliza presiones menores que la ósmosis inversa, alta eficiencia de remoción del As (> al 95%), menores costos de mantenimiento y operación. } Desventajas: taponamiento de los nanoporos, se debe precondicionar el agua a tratarse, genera un residuo líquido. (1)
- **OSMOSIS INVERSA:** es un proceso que reproduce lo que ocurre cotidianamente en los seres vivos a través de sus membranas biológicas. Si se coloca agua pura en un recipiente y en otro compartimiento del mismo se coloca una solución salina, separándolas mediante una membrana semipermeable adecuada se producirá un pasaje espontáneo del agua pura a través de la membrana debido a la diferencia de potenciales químicos entre ambas soluciones. Este pasaje de agua diluye la solución salina, intentado equilibrar los potenciales químicos de ambas soluciones. Este fenómeno se conoce como ósmosis y la presión generada por el incremento de la columna hidrostática en el compartimiento de la solución concentrada se denomina presión osmótica. Aunque las membranas semipermeables perfectas tienen la característica de permitir que el agua pase por ellas debido a la fuerza creada por la presión osmótica, las mismas constituyen una barrera que impide que las sales disueltas en el segundo compartimiento fluyan a través de las membranas, con el resultado de que el agua pura del otro compartimiento permanece sin contaminarse. Utilizando membranas semipermeables adecuadas es posible invertir el proceso de osmosis natural. Para que esto ocurra, será necesario aplicar en el compartimiento de la solución concentrada, una presión externa mayor que la presión osmótica natural de esa solución concentrada

en sales, de esta forma, se invierte el sentido del flujo a través de la membrana obligando a que el solvente de la solución salina pase al compartimiento de la solución diluida.(6)

Ventajas: alta eficiencia de remoción del As (> al 95%), muy efectiva si se trata de remover otros compuestos y TDS total, el equipamiento es compacto y automatizado, genera residuos sólidos no tóxicos.

Desventajas: altos costos de mantenimiento y operación, alta tecnología, genera descargas de concentrado de agua, necesita un pre-tratamiento, problemas al tratar aguas de alta salinidad, se debe tratar altos volúmenes de agua cruda.

4.2 TECNOLOGÍAS DE COAGULACIÓN

Los procesos de coagulación–floculación–sedimentación–filtración son usados para remover partículas coloidales que producen turbiedad y color en las aguas superficiales. Con estos procesos y en determinadas condiciones puede removerse arsénico, hierro, manganeso, algas, materia orgánica. Existen antecedentes de plantas importantes para remoción de As con esta tecnología. Este método puede utilizarse también para remover As en las aguas subterráneas.(9)

Los minerales adecuados para la remoción del As por adsorción son los que tienen una adecuada afinidad química con el As, así como con sus formas hidrolizadas que propician interacciones electrostáticas con el mismo. En general se usan como agentes coagulantes sales de Al o Fe, que además de materias suspendidas y As, puede remover algunos constituyentes disueltos como hierro, manganeso, fosfatos, fluoruros, etc. En el caso del arsénico, su remoción se basa en que la reacción del coagulante con el agua forma especies metálicas hidrolizadas con carga positiva y que el arsénico pentavalente As (V), en la forma de arseniato, es un anión cargado negativamente. Durante el proceso de coagulación, el As puede ser removido del agua a través de tres mecanismos principales:

- **Adsorción:** sorción del As disuelto en la superficie del hidróxido metálico insoluble.
- **Precipitación:** formación de compuestos arsenicales insolubles de Al o Fe ($AlAsO_4$ o $FeAsO_4$).

- **Oclusión:** atrapamiento del As adsorbido en el interior de los hidróxidos metálicos en formación.

Las especies de arsénico son removidas, principalmente, por mecanismos de adsorción y/u oclusión en los hidróxidos formados. La precipitación de fases sólidas, con el arsénico como un ion constituyente de estas fases sólidas, sólo podría ocurrir si el producto de solubilidad del sólido se excediera, lo cual es poco probable a bajas concentraciones de As. A dosis altas de coagulante, el mecanismo predominante en la remoción de As del agua es la adsorción de este sobre los hidróxidos metálicos amorfos recién precipitados (frescos). Una vez que el As es adsorbido sobre las partículas de oxihidróxidos de Fe (III) o de aluminio, estas partículas se pueden remover por sedimentación y posterior filtración. Se ha demostrado que la coagulación y sedimentación, sin filtración, alcanza eficiencias de remoción de 30%, mientras que 62 después de la filtración alcanza el 90%, por lo que un desempeño eficiente del proceso de filtración es crucial para alcanzar estas eficiencias. Los rangos de pH y las dosis mínimas de coagulante adecuados para el tratamiento de remoción de arsénico están gobernados por la solubilidad del hidróxido sólido amorfo metálico. La eficiencia en la remoción de As (V) puede mejorarse aumentando la dosis de agente coagulante. El proceso puede hacerse pretratando el agua con ácido hasta alcanzar el pH óptimo y después agregar el coagulante o agregando sólo coagulante. En el primer caso, la dosis de coagulante requerida será más baja. En el caso de la remoción de arsénico soluble por procesos de coagulación, las condiciones óptimas para la remoción pueden no corresponder a las óptimas para remover otros constituyentes de la matriz de agua, en particular fosfato y fluoruro. Algunas experiencias muestran que el uso de policloruro de aluminio permite la remoción conjunta de arsénico y flúor.(13)

VENTAJAS:

- Remueve el As (V)
- Con frecuencia permite alcanzar el valor cercano impuesto por la OMS (0,01mg As/L), sin embargo, a veces pueden ser necesarios procesos complementarios.
- Remueve turbiedad, color, Fe, Mn, F-
- Reduce el contenido de materia orgánica natural
- Reduce la cantidad de microorganismos
- Permite tratar grandes volúmenes de agua
- No es restrictivo para volúmenes domésticos
- Produce pocas pérdidas de agua
- Requiere insumos químicos de fácil obtención y disponibilidad
- Funcionamiento relativamente familiar para los operadores
- Efectivo sobre una amplia gama de pH
- Costos de operación y manutención bajos

DESVENTAJAS:

- Requiere ajuste de pH y oxidación del As
- Remoción baja del As III
- Requiere operadores entrenados
- Costos elevados para pequeños sistemas
- Produce barros con As cuyo contenido es necesario conocer antes de decidir cómo disponerlos.

5. RECOMENDACIONES

La revisión más actualizada de la remoción del agua con arsénico en el agua para el consumo humano indica que la transferencia de tecnología relacionada con la adecuación de la calidad del agua en los países en vías de desarrollo tiene un abordaje especial, en el cual se debe considerar:

- Las características de las fuentes, su adecuación, forma de distribución y/o consumo y las variantes de la tecnología que se debe aplicar a situaciones específicas donde se consideren las características propias del lugar.
- Se debe tener en cuenta el costo/beneficio que introduce la tecnología propuesta, la misma que de un modo muy claro debe solucionar un problema social, de salud pública o de desarrollo de la comunidad intervenida.
- Existencia de personal capacitado para apoyar en el desarrollo del proyecto y el posterior mantenimiento y control del mismo.

REFERENCIAS

1. Castro de Esparza ML. Remoción Del Arsénico En El Agua Para Bebida Y Biorremediación De Suelos. Terc Semin Int sobre Evaluación y Manejo las Fuentes Agua Bebida Contam con Arsénico [Internet]. 2004;(June):15. Available from: <http://www.bvsde.paho.org/bvsair/e/hdt/hdt96/hdt96.pdf>
2. (OMS) OMDLS. Guidelines for Drinking-water Quality. Atención Primaria [Internet]. 2006;23(Vdv):7. Available from: http://201.147.150.252:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1262/Investigao_e_evoluo.pdf?sequence=1
3. Ministerio de Protección Social Ambiente Desarrollo y Vivienda. Resolución número 2115. Resoluc 2115. 2007;23.
4. Paredes J. Remoción de arsénico del agua para uso y consumo humano mediante diferentes materiales de adsorción. 2012;1-119.
5. Mara T, Ushirobira A, Yamaguti E, Prado B, Filho D, Carlos J, et al. Chemical and Microbiological Study of Extract from Seeds of Guaraná (Paullinia cupana var . sorbilis). 2007;26(1):5-9.
6. Sepúlveda Saa R. El arsénico en la contaminación de aguas subterráneas. Cienc UANL. 2009;XIII.
7. Quansah R, Armah FA, Essumang DK, Luginaah I, Clarke E, Marfoh K, et al.

- Association of arsenic with adverse pregnancy outcomes/infant mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect.* 2015;123(5):412–21.
8. Trees PP. Drinking Water Standards. *J Arboric.* 1994;17(6):32–3.
 9. Bissen M, Frimmel FH. Arsenic - A review. Part II: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment. *Acta Hydrochim Hydrobiol.* 2003;31(2):97–107.
 10. Silvina Guber R, Tefaha L, Arias N, Sandoval N, Toledo R, Fernandez M, et al. Levels of arsenic in the drinking water in Leales and Graneros (Tucuman-Argentina). *Acta Bioquim Clin Latinoam.* 2009;43(2):201–7.
 11. Vaclavikova M, Gallios GP, Hredzak S, Jakabsky S. Removal of arsenic from water streams: An overview of available techniques. *Clean Technol Environ Policy.* 2008;10(1):89–95.
 12. Tania del Pilar Crisanto Perrazo. Caracterización de los residuos generados en el tratamiento de aguas arsenicales por el método de coagulación - adsorción. universidad tecnológica nacional; 2012.
 13. Ferreccio C, Gonzalez C, Milosavjlevic V, Marshall G, Sancha AM, Smith AH. Lung cancer and arsenic concentrations in drinking water in Chile. *Epidemiology.* 2000;11(6):673–9.