

REPARACIÓN DE UN GEL A PARTIR DE DESECHOS DE ALUMINIO Y SU USO EN LA ELIMINACIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO

Susana SILVA MARTÍNEZ¹, Susana FLORES VILLANUEVA¹ y Georgina BLASS AMADOR²

¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad 1001. Col. Chamilpa, Cuernavaca 62210 Morelos. ssilva@uaem.mx

² Instituto de Investigaciones Eléctricas. Av. Reforma No. 113. Col. Palmira, Temixco, Morelos.

(Recibido octubre 2004, aceptado octubre 2005)

Palabras clave: gel de hidróxido de aluminio, remoción de arsénico, tratamiento de agua para consumo humano

RESUMEN

Se preparó un gel de hidróxido de aluminio a partir de aluminio de desecho proveniente de latas empleadas para envasar bebidas. El gel preparado presentó pureza del $99\% \pm 1\%$. Posteriormente el gel se empleó para remover el arsénico presente en muestras de agua preparadas de la red de agua potable, libre de arsénico, en el intervalo de concentraciones de arsénico de 0 a $600\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$. Las muestras contenían arsénico trivalente, arsénico pentavalente o la mezcla de ambos en relación 1:1. El gel removió el arsénico del agua a valores menores de los establecidos como límite permitidos por la Organización Mundial de la Salud ($10\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$). La metodología descrita en este trabajo es económica, fácil de realizar y podría ser empleada en zonas en donde la población consume agua contaminada con arsénico debido a la falta de la infraestructura sanitaria.

Key words: aluminum hydroxide gel, arsenic remove, treatment of water for human consume

ABSTRACT

An aluminum hydroxide gel was prepared employing aluminum coming from empty can wastes of soft drink. Its purity was about $99\% \pm 1\%$. This gel was employed to remove arsenic from samples of drinking water, spiked with arsenic, coming from arsenic free tap drinking water. The arsenic concentration tested was in the range of 0 to $600\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$. The samples prepared contained arsenic as trivalent, pentavalent or a mix of both arsenic forms in a volumetric ratio of 1:1. The arsenic removal was below the Health Organization World regulatory guidelines ($10\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$). The methodology reported here is cheap, easy and it could be used to treat drinking water in places where the population consumes arsenic contaminated drinking water because of the lack of sanitary infrastructure.

INTRODUCCIÓN

El arsénico está presente en atmósfera, suelo, rocas, agua natural y organismos. Es transportado en el ambiente a través de una combinación de procesos naturales que involucran reacciones debidas a la acción atmosférica, actividad biológica, emisiones volcánicas y a la gran variedad de actividades antropogénicas (Kinniburgh y Smedley 2001). Los problemas ambientales debidos a la contaminación de arsénico son en su mayoría originados en condiciones naturales, sin embargo, el hombre ha impactado de manera importante mediante actividades mineras, combustión de combustibles fósiles y a través del uso de compuestos de arsénico principalmente en la agricultura y silvicultura (como en herbicidas y silvicidas). En pequeñas cantidades, los compuestos de arsénico son usados en la industria del vidrio y la cerámica y como aditivo en alimento para animales (Viraraghavan *et al.* 1992).

El arsénico, transportado por el aire, se transfiere a los cuerpos de agua por medio de la precipitación húmeda o seca y puede, por consiguiente, aumentar ligeramente la concentración de arsénico en el agua; sin embargo, existe poca evidencia que sugiera que el arsénico atmosférico represente una amenaza a la salud por ingestión de agua de consumo (Kinniburgh y Smedley 2001). El arsénico también se encuentra en el carbón mineral, siendo liberado a la atmósfera durante su combustión; situación considerada como la principal causa de cáncer de pulmón en algunas partes de China debido a la directa inhalación del humo procedente de la combustión del carbón de uso doméstico y al consumo de chiles asados sobre las brasas del carbón más que debido al agua de consumo humano contaminada por el arsénico atmosférico (Finkelman *et al.* 1999).

El arsénico no se extrae directamente de yacimientos minerales, sino que se obtiene como producto secundario en las explotaciones mineras de plomo, cinc y otros elementos metálicos. En las zonas mineras el arsénico puede liberarse al ambiente y contaminar las aguas (Finkelman *et al.* 1999, Sánchez y Rodríguez 2000, Howell 2004).

En la industria, el arsénico es utilizado en forma de arsina y de trióxido de arsénico para la fabricación de "chips" y en la tecnología de siliconas. El arseniuro de galio se usa en la producción de semiconductores compuestos que se utilizan para la fabricación de diodos emisores de luz, láseres y células solares (Sánchez y Rodríguez 2000).

Entre la gran variedad de fuentes del arsénico en el ambiente, probablemente el agua de consumo re-

presenta la mayor amenaza a la salud del ser humano. El agua de consumo humano puede ser superficial, subterránea (acuíferos) y de lluvia. En función del origen del agua, la concentración de arsénico varía considerablemente encontrándose altas concentraciones de arsénico (Kinniburgh y Smedley 2001), principalmente en agua subterránea.

Los lineamientos propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) con respecto al contenido de arsénico en agua de consumo humano fueron provisionalmente reducidos en 1993 de 50 $\mu\text{g L}^{-1}$ a 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Swistock 2001, WHO 2001, Sinclair y Light-body 2003). La Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos de América propuso un nivel máximo de arsénico de 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ en los abastecimientos públicos de agua de ese país e incluso sugiere bajar el límite a 2 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Jingtai y Fyfe 2000, Swistock 2001). El límite permitido de contaminación por arsénico en agua de consumo humano en Japón también es de 10 $\mu\text{g L}^{-1}$. Muchas naciones están tratando de reducir el límite permitido de arsénico en el agua de consumo humano al propuesto por la OMS. Diversos países, incluyendo a los que están en vías de desarrollo que son afectados por la contaminación de arsénico, están operando en la actualidad todavía con el límite de 50 $\mu\text{g L}^{-1}$. Lo anterior se debe en parte a la falta de disponibilidad de instalaciones adecuadas para monitorear y disminuir el contenido de arsénico del agua.

Recientemente, el arsénico ha sido considerado, por varios países, como un parámetro adicional a la lista de constituyentes contaminantes del agua de consumo humano que se analizan en forma rutinaria debido a que el arsénico, junto con el fluoruro, ha sido reconocido mundialmente como uno de los contaminantes inorgánicos presente en el agua de consumo humano más peligrosos (Finkelman *et al.* 1999). En áreas de alta concentración de arsénico, el agua de consumo humano es la fuente principal de arsénico en la dieta por lo que su detección temprana es de gran importancia.

Un número importante de grandes acuíferos en varias partes del mundo presentan problemas de contaminación por arsénico con concentraciones mayores que 50 $\mu\text{g L}^{-1}$. Se han reportado casos en el Oeste de Bengala y Bangladesh, Taiwán, al Norte de China, Hungría, México, Chile, Argentina y en muchas partes de los Estados Unidos de América particularmente en el suroeste. En países como Tailandia, Ghana, Grecia, Austria y algunas regiones de Estados Unidos de América también se han registrado problemas de arsénico relacionados con actividades mineras. Asimismo, se ha registrado contaminación

de arsénico en zonas geotérmicas con aguas térmicas en algunas partes de Estados Unidos de América, Japón, Chile, Argentina, Francia, República Dominicana y Nueva Zelanda (Kinniburgh y Smedley 2001). Muchos problemas por contaminación de arsénico en agua subterránea están siendo reportados actualmente por varios países (cuyo número va en aumento) y sin duda, existen nuevos casos por descubrir debido principalmente a que el arsénico no era, hasta recientemente, un elemento de análisis rutinario en los laboratorios de calidad del agua a nivel mundial.

Los diversos efectos cancerígenos y mutagénicos del arsénico en los seres humanos reportados en varios países obligaron a la OMS a llevar a cabo la revisión de la norma que establece el contenido de arsénico en el agua de consumo humano, alertando a muchos países de la necesidad de reconsiderar el límite establecido de $50 \mu\text{g L}^{-1}$ de arsénico en el agua de consumo humano. El arsénico es considerado como uno de los elementos más tóxicos para los seres humanos cuya asimilación es principalmente a través de la ingesta de alimentos y agua, inhalación y a través de la piel. El arsénico se acumula en los huesos, la piel y en menor proporción en hígado y riñones. A ciertas concentraciones, el arsénico ocasiona alteraciones de la piel (pigmentaciones de la piel y callosidades en las palmas de las manos y plantas de los pies), afecta al sistema nervioso e irrita los órganos del aparato respiratorio y gastrointestinal (Viraraghavan *et al.* 1992, Sánchez y Rodríguez 2000, Adeel y Ali 2002). Una exposición al arsénico en forma prolongada puede causar serios problemas de salud incluyendo gangrena, enfermedades cardiovasculares, pulmonares y neurológicas, hipertensión, diabetes mellitus, y cáncer de la piel, hígado, pulmones y riñones. Altas concentraciones de arsénico conllevan al desarrollo de una enfermedad conocida como arsenicosis (Wasiuddin *et al.* 2002) que, eventualmente, puede causar la muerte (Adeel y Ali 2002).

El arsénico existe en dos formas primarias: orgánica e inorgánica. En aguas naturales se encuentra generalmente la forma inorgánica. Se presenta en varios estados de oxidación, como semimetálico, As(O) o en forma de iones como arseniato As^{5+} , arsenito As^{3+} y arsina As^{3-} . La toxicidad del arsénico se incrementa considerablemente con la reducción de su estado de oxidación de As (V) a As (III) (Viraraghavan *et al.* 1992, Swistock 2001).

El arseniato es encontrado frecuentemente en aguas superficiales, en condiciones aerobias, mientras que el arsenito ocurre con más frecuencia en aguas subterráneas o de pozo, en condiciones

anaerobias. Dentro del intervalo de pH natural de la mayor parte de suelos y aguas naturales, la especie predominante del As (III) es H_3AsO_3 y del As (V) es H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} como se muestra en las figuras 1 y 2, respectivamente (Flores 2004).

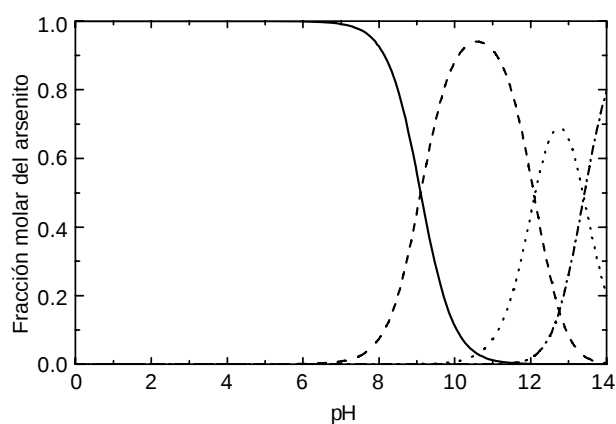


Fig. 1. Especies predominantes del arsenito (As (III)) en función del pH del agua

— H_3AsO_3 , --- H_2AsO_3^- , ··· HAsO_3^{2-} , ---- AsO_3^{3-}

Se han reportado numerosos estudios en donde se proponen diversos métodos de tratamiento para remover el arsénico del agua de consumo humano y del agua residual. Estos métodos involucran la precipitación química con sulfato de aluminio y hierro (Viraraghavan *et al.* 1992, Hering *et al.* 1997), ablandamiento con cal (Jones *et al.* 1977, McNeil y

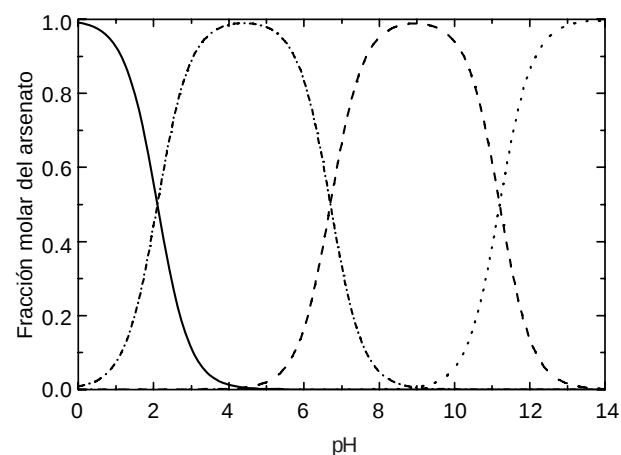


Fig. 2. Especies predominantes del arseniato, As (V), en función del pH del agua

— H_3AsO_4 , --- H_2AsO_4^- , --- HAsO_4^{2-} , ··· AsO_4^{3-}

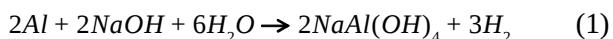
Edwards 1997), membranas/ósmosis inversa (Kartinen y Martín 1995), adsorción con hidróxido de aluminio (García y Gómez 2000, Luján 2001), adsorción con minerales de sulfuro de hierro (Jingtai y FyFe 2000), adsorción con hierro y alúmina activada (Viraraghavan *et al.* 1992), resinas de intercambio iónico (Kartinen y Martín 1995), tratamientos biológicos (Tamaki y Frankenberger 1992, OID 2004), uso de la radiación solar (Anwar 2003) y el uso del cabello humano (Wasiuddin *et al.* 2002). La mayoría de estos métodos son efectivos en la remoción de arsénico del agua de abastecimiento; sin embargo, muchos de estos métodos son caros debido a que requieren de equipo sofisticado o bien presentan dificultades para ser usados en áreas marginadas. Lo novedoso del presente estudio, es el uso de latas de aluminio de desecho para la preparación de un gel de hidróxido de aluminio y su empleo en el tratamiento de agua natural para la remoción de arsénico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis químicos. La determinación de aluminio, hierro y sulfatos se evaluó por fotometría, empleando un espectrofotómetro marca HACH DR/4000 U (Hach 1997). La concentración de sodio, magnesio, calcio, potasio y cobre se determinó por espectroscopia de absorción atómica (NMX 2001, ASTM 2002). El contenido de cloruros y la alcalinidad se determinaron por volumetría (Hach 1997, ASTM 1999). Para analizar el contenido de sulfatos y fosfatos, las muestras fueron sometidas al proceso de digestión ácida con persulfato (Hach 1997) y posteriormente se determinó su concentración usando un espectrofotómetro DR/4000 U (marca HACH). El pH se midió con un pH-metro (ORION) previamente calibrado. La concentración de arsénico se determinó por colorimetría usando un estuche de medición de arsénico (marca HACH) en el intervalo de detección de 0 a 500 ppb como arsénico total.

Preparación del gel de hidróxido de aluminio. El aluminio provino de latas de desecho previamente empleadas para almacenar bebidas refrescantes. Las latas se sometieron a un tratamiento con H_2SO_4 para remover tanto la pintura como la película de plástico que recubría el interior y el exterior de la lata. Posteriormente, el cuerpo de las latas se cortó en pequeños trozos para aumentar la superficie de contacto y se pusieron 8 gramos de éstos en contacto con 100 ml de una solución 4 mol L^{-1} de NaOH a temperatura ambiente por espacio de 120 minutos. En la reacción química del Al con NaOH los produc-

tos de reacción generados, ecuación (1), son una sal metálica de hidróxido de aluminio sódico, $NaAl(OH)_4$ y gas hidrógeno (Peavey 2003).



El hidrógeno, generado de esta manera, es empleado en una celda de combustible (Silva *et al.* 2005) y la sal metálica de sodio es aprovechada para la preparación del gel. Al final de la reacción, la solución alcalina de la sal metálica se filtró a través de un papel filtro (Watman). El filtrado se neutralizó con una solución diluida de ácido sulfúrico, formándose así el gel de hidróxido de aluminio que tiene una apariencia lechosa y de consistencia viscosa. Una vez obtenido el gel se procedió a lavarlo con agua destilada para obtener un gel de alta pureza. El lavado del gel se interrumpió cuando ya no se detectaron los iones sodio y sulfato en el agua de lavado. La pureza del gel se obtuvo por el análisis de cinco muestras de gel de hidróxido de aluminio preparadas por separado. Se analizó el contenido de aluminio, sodio, sulfatos y cloruros.

Remoción de arsénico. Se prepararon muestras de 1L de agua (en un vaso de precipitados de 1.2 L de capacidad) con diferentes concentraciones iniciales de arsénico (**Cuadro I**) en ambos estados de oxidación (As(III), As(V) y la mezcla de ambos en la relación 1:1) en el intervalo de concentraciones de 0 a 600 $\mu g L^{-1}$. En todas las muestras que contenían As(III), este se oxidó a As(V) con permanganato de potasio o con el reactivo Fenton (peróxido de hidrógeno y Fe^{2+}) a un pH de 3 previo al tratamiento de remoción de arsénico. El pH de las muestras tratadas con el reactivo Fenton se neutralizó con HCl ó NaOH antes

CUADRO I. CONCENTRACIÓN INICIAL DE ARSÉNICO EN LAS MUESTRAS DE AGUA A SER TRATADA

As(III) (ppb)	As(V) (ppb)	Mezcla As(III) y As(V) (ppb) Relación Molar (1:1)
10	10	10
25	25	30
50	50	50
100	100	70
200	200	90
400	400	110
600	600	130
		150
		600

de agregar el gel. Una vez neutralizada la solución, se le agregó de 5 a 15 mL de gel y se colocó en una parrilla de agitación (se estudiaron tiempos de agitación en el intervalo de 15 a 60 minutos). Posteriormente, la muestra de agua tratada se transfirió a un reactor con base cónica de 1.5 L de capacidad (**Fig. 3**) y permaneció en reposo durante la noche para permitir que el gel usado sedimentara en la base cónica y no interfiriera en el análisis del agua sobrenadante. El arsénico provino de sales de arseniato de sodio (Na_2HAsO_4), y arsenito de sodio (NaAsO_2). El agua provino de la red de agua potable (**Cuadro II**), libre de arsénico, que abastece al laboratorio de Procesos Ambientales del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. El agua de la red es de pozo y al momento de ser extraída, las autoridades responsables de su extracción y distribución le proporcionan un tratamiento con cloro. Es importante señalar que el empleo de agua de la red, en este estudio, permite que el arsénico se remueva del agua en condiciones reales, es decir, en presencia de los iones comúnmente existentes en aguas naturales. Todos los reactivos fueron grado analítico (Aldrich) y la experimentación se llevó a cabo a temperatura ambiente. Cada experimento se repitió de dos a tres veces y los análisis se realizaron por triplicado. Los resultados reportados son el promedio de las muestras analizadas.

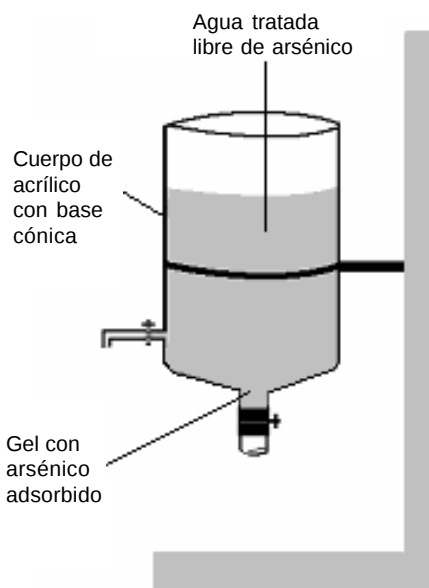


Fig. 3. Reactor con base cónica de 1.5L de capacidad empleado para eliminar el paso de filtración en el proceso de remoción de arsénico

CUADRO II. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON GEL PARA REMOVER ARSÉNICO

Parámetros	Agua de la red de agua potable (mg L^{-1})*	Agua de la red después del tratamiento (mg L^{-1})*
Sodio	130 $\pm$ 2	7.3 $\pm$ 0.1
Magnesio	5.5 $\pm$ 0.1	5.3 $\pm$ 0.1
Calcio	3.20 $\pm$ 0.08	2.8 $\pm$ 0.08
Potasio	2.60 $\pm$ 0.05	2.60 $\pm$ 0.05
Cobre	< 0.02	< 0.02
Hierro	< 0.013	< 0.013
Cloruros	188 $\pm$ 3	6.7 $\pm$ 0.2
Sulfatos	2.16 $\pm$ 0.05	0.020 $\pm$ 0.001
Fosfatos (determinado como fósforo total)	< 0.001	< 0.001
Alcalinidad total	65 mg/L CaCO_3	65 mg/L CaCO_3
pH a 25°C	7.53 $\pm$ 0.02	7.00 $\pm$ 0.02

* Valores promedio de todas las muestras analizadas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del gel de hidróxido de aluminio reportó una pureza de $99\% \pm 1\%$. Estudios preliminares de la remoción de arsénico con el gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (**Cuadro III**) reportaron una remoción incompleta de As(III) mientras que el As(V) se eliminó completamente. Esto muestra la necesidad de llevar a cabo la oxidación de As(III) a As(V) para poder remover el contenido de arsénico a nivel de la concentración permitida por la OMS de $10\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ ó menor de arsénico total. Estos resultados coinciden con las observaciones de varios investigadores (Viraraghavan *et al.* 1992, Hering *et al.* 1997, Jingtai y Fyfe 2000, OID 2004).

Es importante mencionar que antes de proceder al análisis del contenido de arsénico por colorimetría del agua bajo estudio, se estudiaron muestras por triplicado preparadas con agua destilada y con agua del grifo (por separado) de soluciones patrón de arsénico de 0, 10, 30, 50, 70, 300 y 500 ppb obteniendo reproducibilidad en la coloración marcada en el estuche de medición sin importar el tipo de agua empleada para la preparación de las soluciones patrón. Asimismo, se empleó este método de análisis debido a que es portátil, de fácil acceso y no se requiere de un entrenamiento especial para su uso, de tal forma que cualquier persona que sepa leer puede realizar dicho análisis. Si bien es cierto que existe incertidumbre en la medición de la concentración de arsénico especialmente cuando la coloración desarrollada

CUADRO III. REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

Oxidante	pH _{inicial}	pH _{final}	[As(III)] _{inicial} µg L ⁻¹	[As(III)] _{final} µg L ⁻¹	[As(V)] _{inicial} µg L ⁻¹	[As(V)] _{final} µg L ⁻¹
Ausencia	7.80	7.20	100	30	100	0
Ausencia	7.80	7.20	-	-	300	0
Reactivo Fenton	2.50	7.20	100	0	-	-
Reactivo Fenton	7.80	7.02	100	30	-	-
KMnO ₄	7.80	7.20	100	0	-	-

La muestra de 1 L de agua contenía As(III) ó As(V). Las muestras de As(III) se dejaron reposar 30 minutos para permitir la oxidación de As(III) a As(V) antes de agregar 5 mL de gel de Al(OH)₃

por la muestra analizada cae entre dos valores numéricos indicados en el estuche de coloración HACH, este método de análisis es muy útil en campo y es indicador de la ausencia o la presencia de arsénico ofreciendo una idea de que tan contaminada está el agua con arsénico. El rigor científico demanda un método de análisis de arsénico en donde la apreciación del ojo humano no intervenga; sin embargo, como se mencionó anteriormente, las comunidades afectadas por contaminación de arsénico generalmente no cuentan con instalaciones adecuadas para monitorear y disminuir el contenido de arsénico del agua, por lo que se considera que el método HACH ofrece una alternativa de análisis del mismo.

Generalmente, los procesos de remoción de arsénico son más eficientes para el arseniato que para el arsenito, debido a que este se encuentra típicamente en el agua como especie neutra (H₃AsO₃) a valores de pH menores que 8.5 (**Fig. 1**). Por lo que un tratamiento de oxidación de arsenito a arseniato se lleva a cabo previo a la remoción del arsénico total (Viraraghavan *et al.* 1992, Hering *et al.* 1997, Jingtai y Fyfe 2000, OID 2004). La oxidación es un proceso que involucra la pérdida de electrones de la especie a ser oxidada. Puede llevarse a cabo simplemente burbujeando oxígeno o aire, o mediante la adición de cloro, hipoclorito, ozono, permanganato, peróxido de hidrógeno, reactivo Fenton (H₂O₂ + Fe²⁺) o por oxidación fotoquímica. La oxidación por sí sola no remueve el arsénico total por lo que debe combinarse con un proceso de remoción de arsénico.

Con base en lo anterior, se procedió a realizar una serie de experimentos usando agua conteniendo arsenito, As(III), el cual fue oxidado empleando dos reactivos: reactivo Fenton y permanganato de potasio. Posteriormente, se procedió a la aplicación de diferentes cantidades de gel de Al(OH)₃. Esto se hizo con la finalidad de tener al arsénico en el estado de oxidación As(V) y establecer la mejor dosificación de gel.

La **figura 4**, muestra la disminución de la concentración de arsenito en función de diferentes cantida-

des de gel Al(OH)₃. La línea discontinua representa el nivel de concentración de arsénico total establecido por la OMS (WHO 2001, Sinclair y Lightbody 2003). Esta figura se obtuvo de datos obtenidos de la preparación de 8 muestras (por duplicado) en un vaso de precipitado de vidrio pyrex, conteniendo 1 L de agua cada una con [As(III)]_{inicial} de 100 µg L⁻¹. Se ajustó el pH de cuatro muestras, en el intervalo de 2.5 a 3.0 y se les adicionó el reactivo Fenton. A las cuatro muestras restantes, se les agregó permanganato de potasio. Se permitió que la oxidación del As(III) a As(V) de las ocho muestras procediera por un tiempo de 30 minutos y posteriormente se agregaron diferentes cantidades de gel a cada muestra. A las muestras que se les aplicó el proceso de oxidación con el reactivo Fenton, se les elevó el pH a 7 antes de agregar el gel. El gel estuvo en contacto (con agitación) con la muestra durante 15 minutos. Posteriormente, se pro-

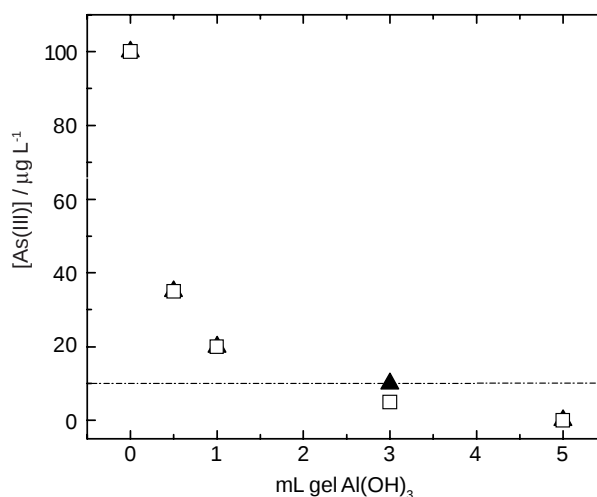


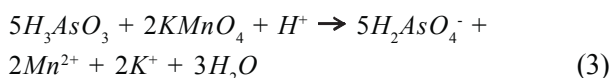
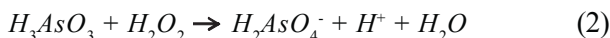
Fig. 4. Variación de la concentración de arsenito en función de mL de gel de Al(OH)₃. El agua se dejó reposar durante 30 minutos para llevar a cabo la oxidación de As (III) a As(V) antes de adicionar el gel, mediante ▲: Reactivo Fenton (H₂O₂ + Fe²⁺) y □: KMnO₄

cedió a filtrar la solución y a analizar el contenido de arsénico. Cabe mencionar que, previamente, se llevaron a cabo experimentos en donde se registraron diferentes tiempos (15, 30 y 60 minutos) de agitación de la muestra de agua en presencia del gel. Observándose que 15 minutos de contacto eran suficientes para tener una buena disminución de arsenito. Esta figura muestra que la concentración de arsénico disminuye a valores de $10 \mu\text{g L}^{-1}$ ó menores, a partir de una dosificación de 3 mL de gel, por lo que se optó por considerar que 5 mL de gel eran suficientes para disminuir el arsénico a los niveles propuestos por la OMS.

A continuación, se procedió a evaluar diferentes tiempos de oxidación adicionando 5 mL de gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$ inmediatamente después del término del tiempo de oxidación (**Fig. 5**). Se siguió el mismo procedimiento descrito para la obtención de los resultados reportados en la **figura 4**. La **figura 5**, muestra que un tiempo de oxidación de 1 minuto es suficiente para que el gel logre disminuir el arsénico por debajo del límite establecido por la OMS (línea discontinua). El arsénico, oxidado con el reactivo Fenton, ha sido eliminado completamente por el gel a tiempos mayores que 3 minutos. Sin embargo, la remoción de arsenito, previa su oxidación con permanganato, oscila en valores de $10 \mu\text{g L}^{-1}$ durante los primeros 15 minutos de oxidación.

Lo concluido con estos experimentos ha mostrado que el uso del reactivo Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$) y del

KMnO_4 como oxidantes son efectivos en la oxidación de $\text{As}(\text{III})$ a $\text{As}(\text{V})$ y que 5 mL de gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$ son suficientes para remover el arsénico posterior a su oxidación. En este estudio se eligió el reactivo Fenton para oxidar el arsenito debido a que durante la reacción de oxidación éste se descompone en agua (ecuación 2) y no contribuye a la adición de otros iones como lo hace el permanganato de potasio (ecuación 3).



En los sucesivos experimentos, se usó un reactor con base cónica (**Fig. 3**) que tiene conectada una válvula en la base con el fin de evitar el proceso de filtración. De esta forma, después de haber estado el agua en contacto con el gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$ por espacio de 15 minutos y con agitación en el vaso de precipitado, las muestras se transfirieron al reactor y reposaron durante la noche para que sedimentara el arsénico adsorbido al gel y poder contar con un agua tratada libre de arsénico y de sedimento, simplificando así el método de remoción de arsénico.

La **figura 6** presenta la concentración de arsénico total después del tratamiento con gel en función de su concentración inicial $[\text{Arsénico Total}]_0$. La con-

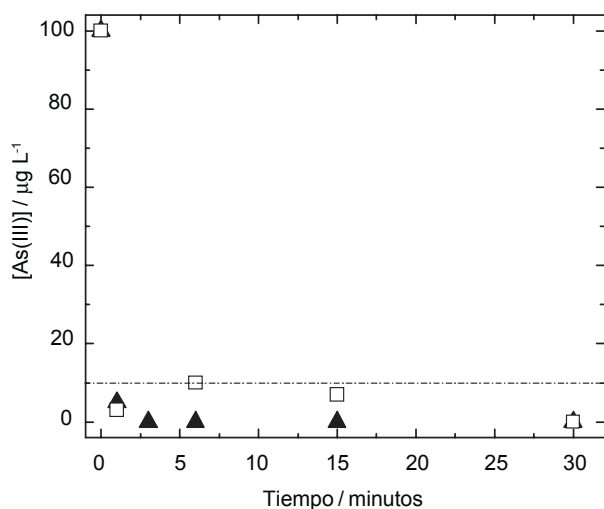


Fig. 5. Variación de la concentración de arsenito en función del tiempo de reposo para llevar a cabo la oxidación de $\text{As}(\text{III})$ a $\text{As}(\text{V})$, antes de adicionar 5 mL de gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$, mediante ▲: Reactivo Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$) y □: KMnO_4 .

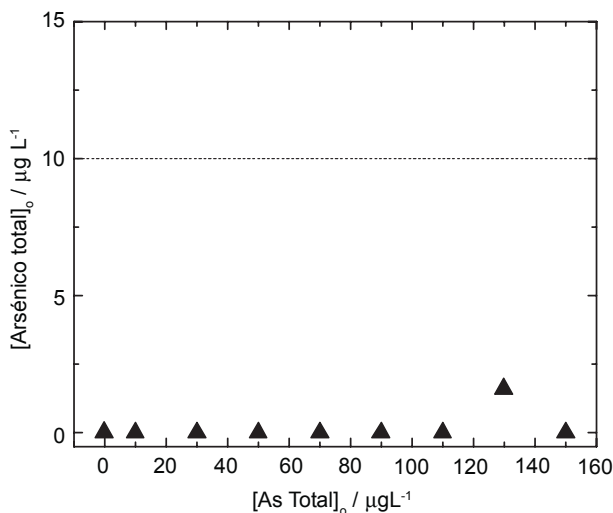


Fig. 6. Variación de la concentración de arsénico total (mezcla de arsenito y arseniato en la relación 1:1) en función de su concentración inicial $[\text{As Total}]_0$. El agua se dejó reposar 5 minutos para llevar a cabo la oxidación de $\text{As}(\text{III})$ a $\text{As}(\text{V})$ con el reactivo Fenton antes de adicionar 5 mL de gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$.

relación 1:1. En estas muestras se llevó a cabo la reacción de oxidación durante 5 minutos con el reactivo Fenton antes de la adición de 5 mL de gel $\text{Al}(\text{OH})_3$. Claramente se aprecia, en esta figura, que la disminución de arsénico total se lleva a cabo de manera efectiva en el intervalo de concentración de arsénico total estudiado y reportado en esta gráfica. Se logra disminuir la concentración de arsenito y arseniato a niveles de concentración de arsénico menores que los establecidos por la OMS.

En los experimentos sucesivos (**Figs. 7 a 9**), la concentración de arsénico total (en forma de $\text{As}(\text{III})$, $\text{As}(\text{V})$ ó la mezcla de ambos en la relación 1:1) se incrementó hasta una concentración de $600 \mu\text{g L}^{-1}$ con el fin de observar el comportamiento del gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$ en la remoción de arsénico a altas concentraciones.

La **figura 7** muestra la disminución de arsénico total (mezcla de arsenito y arseniato en la relación 1:1) en función de la cantidad de gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$ con un tiempo de oxidación de 5 y 30 minutos antes de agregar el gel. Claramente se aprecia que las tres cantidades de gel probadas disminuyen la concentración de arsénico total a $10 \mu\text{g L}^{-1}$ con un tiempo de oxidación de 5 minutos, logrando así alcanzar el nivel establecido por la OMS. Asimismo, 10 y 15 mL de gel logran abatir completamente el arsénico cuando éste ha sido oxidado por 30 minutos. Sin embargo, se continuó con la adición de 5 mL de gel en los

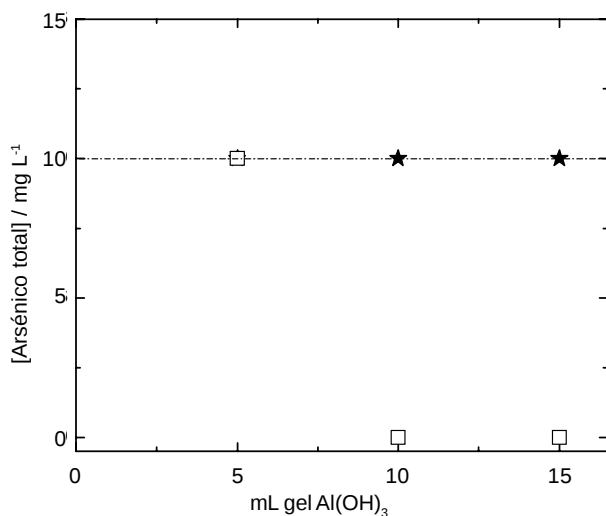


Fig. 7. Disminución de la concentración inicial, 600 mg L^{-1} , de arsénico total (mezcla de arsenito y arseniato en la relación 1:1) en función de mL de gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$. El agua se dejó reposar durante: ★ 5 minutos y □ 30 minutos, para llevar a cabo la oxidación de $\text{As}(\text{III})$ a $\text{As}(\text{V})$ mediante el reactivo Fenton antes de adicionar el gel

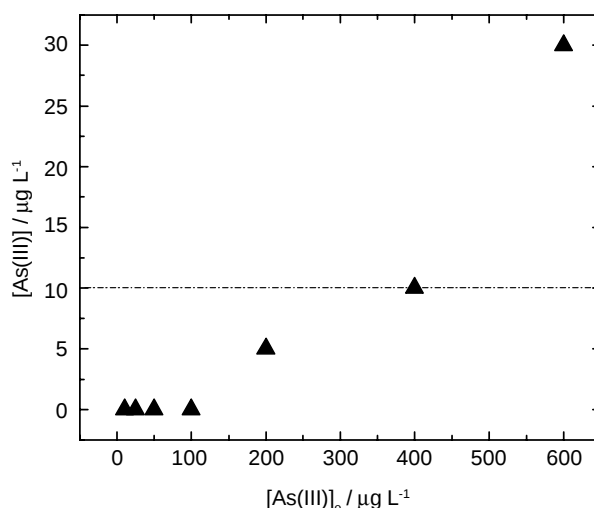


Fig. 8. Concentración final de arsenito en función de su concentración inicial $[\text{As}(\text{III})]_0$. El agua se dejó reposar durante 5 minutos para llevar a cabo la oxidación de $\text{As}(\text{III})$ a $\text{As}(\text{V})$ mediante el reactivo Fenton antes de adicionar 5 mL de gel de $\text{Al}(\text{OH})_3$

subsiguientes experimentos.

Las **figuras 8 y 9**, presentan la concentración de arsenito, previa su oxidación con el reactivo Fenton, y de arseniato, después del tratamiento de remoción, en función de sus concentraciones iniciales respectivamente. Con base en los resultados, se puede concluir que la adición de 5 mL de gel a cada experimento (**Fig. 8**), con concentración inicial de arsénico variable, fue suficiente para disminuir la concentración de arsénico de las muestras, cuya concentración inicial es menor o igual que $400 \mu\text{g L}^{-1}$, a los niveles establecidos por la OMS. Hay que aclarar que, a concentraciones iniciales mayores a $400 \mu\text{g L}^{-1}$ de arsénico, posiblemente será necesario un mayor tiempo de oxidación y un incremento de la cantidad de gel debido a que no se alcanzan concentraciones inferiores a $10 \mu\text{g L}^{-1}$. No obstante, si se considera que el límite máximo permitido por la Norma Oficial Mexicana es de $50 \mu\text{g L}^{-1}$, todas las muestras tratadas se encuentran por debajo de este límite, por lo que se puede considerar como una buena remoción de arsenito aún en concentraciones iniciales mayores que $400 \mu\text{g L}^{-1}$ de $\text{As}(\text{III})$. Respecto a la **figura 9**, la concentración de arseniato después del tratamiento con el gel $\text{Al}(\text{OH})_3$, se mantiene en el nivel establecido (o menor) por la OMS para todas las concentraciones iniciales de arseniato. Confirmando de esta forma, que el arsénico en su forma oxidada, $\text{As}(\text{V})$, es más fácil de ser removido debido a que, a valores de pH natural del agua (5 a 9), éste se encuentra en forma ionizada, predominando las es-

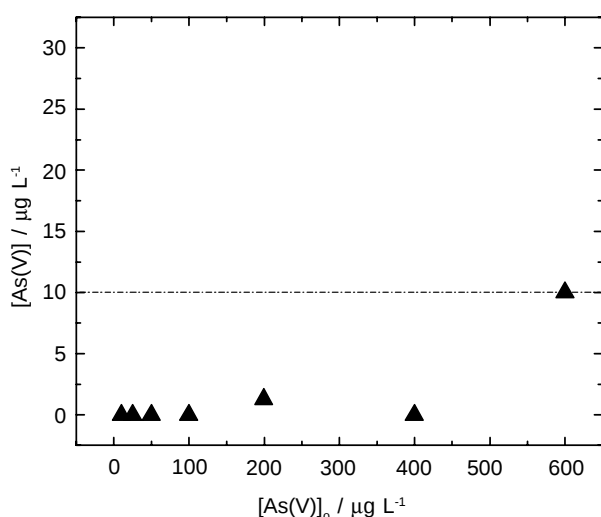


Fig. 9. Concentración final de arseniato en función de su concentración inicial $[As(V)]_0$. Se adicionó 5 mL de gel de $Al(OH)_3$ a cada concentración inicial

pecies $H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{2-}$ (**Fig. 2**). Estos resultados están en concordancia con lo reportado en la literatura (Viraraghavan *et al.* 1992, Hering *et al.* 1997, Jingtai y Fyfe 2000, OID 2004). Es interesante hacer notar que el agua al final del tratamiento de remoción de arsénico de las muestras estudiadas, adquirió características diferentes a las iniciales como se muestra en la **cuadro II**.

Finalmente, es necesario mencionar que los lodos, generados como sedimentos después del tratamiento para remover el arsénico con el gel de $Al(OH)_3$, representan un problema. Generalmente, los lodos son dispuestos en vertederos especialmente diseñados y construidos para evitar la futura contaminación por los lixiviados producidos durante el almacenamiento de los sedimentos. Concientes de este problema, se procedió a realizar experimentos preliminares para limpiar o lavar los sedimentos (que contienen el arsénico adsorbido al gel) generados después del tratamiento de remoción de arsénico y ver su posible reuso. El método empleado para realizar esta actividad es el ultrasonido, que es una herramienta que está adquiriendo muchas aplicaciones en la actualidad, tales como la degradación de contaminantes orgánicos (Okuno 2000, Hirano *et al.* 2005, Navarrete *et al.* 2005), estudio de la influencia de ultrasonido en procesos electroquímicos (Birkin y Silva-Martínez 1996, Silva-Martínez 1997) y aplicación de ultrasonido en el tratamiento de suelos contaminados (Newman *et al.* 1997, Kyllönen *et al.* 2004). La frecuencia del ultrasonido usado en este trabajo fue de 23 kHz empleando una probeta de inmersión

(Hielscher UP 400 S). La remoción de arsénico de los sedimentos se llevó a cabo de dos formas: (a) con ultrasonido y (b) con agitación (usando una parrilla de agitación) en forma separada. El ultrasonido se aplicó a los sedimentos, previamente lavados con agua destilada, provenientes de las muestras tratadas con gel conteniendo inicialmente $600 \mu g L^{-1}$ de arsenito y arseniato en una relación 1:1. La **figura 10**, presenta la concentración de arsénico removida de los sedimentos en función del tiempo de aplicación de ultrasonido. Claramente se observa, que el arsénico se desadsorbe del sedimento con la aplicación breve (3 minutos) de ultrasonido, esto se corrobora con el incremento en la concentración de arsénico en la fase acuosa que representa aproximadamente 83 % de remoción. Mientras que, la simple agitación de la muestra de sedimento logró una desadsorción de arsénico menor que $10 \mu g L^{-1}$. Estos resultados preliminares obtenidos con la aplicación de ultrasonido son muy alentadores y prometedores, abriendo la posibilidad de explorar un nuevo campo de investigación para el tratamiento integral de los sedimentos generados en la remoción de arsénico usando el gel de $Al(OH)_3$. El $Al(OH)_3$ recuperado del sedimento podría ser utilizado para seguir removiendo arsénico de aguas arsenicales, en la preparación de alúmina (mediante un tratamiento térmico) e incluso en la recuperación del aluminio electroquímicamente.

Por otro lado, un estimado conservador del costo asociado en la preparación del gel, basado en el consumo de 16 gramos de NaOH ($4 mol L^{-1}$), tomando como base que 10 kg de NaOH cuestan \$1,359.20

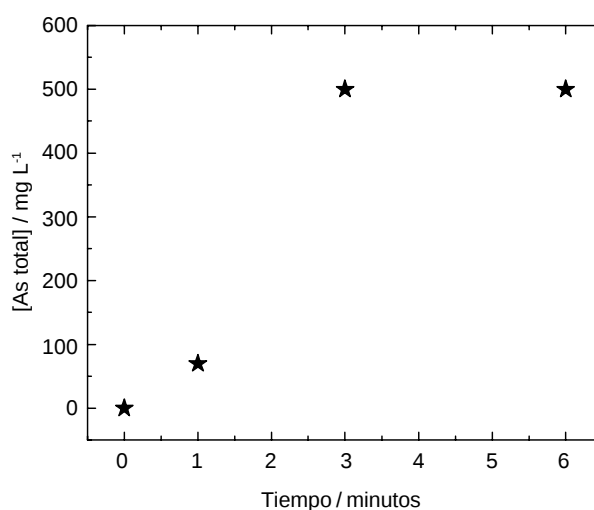


Fig. 10. Concentración de arsénico removida del gel en función del tiempo de aplicación de ultrasonido

pesos M.N. (124 dólares americanos, aproximadamente) y el consumo de 3 a 4 ml de H_2SO_4 (18 L cuestan \$1,177.6 pesos M.N. (107 dólares)), reporta que se requiere invertir de aproximadamente \$2.50 pesos M.N. (23 centavos de dólar), para preparar 250 ml de gel de hidróxido de aluminio, mismos que permiten el tratamiento de 50 litros de agua cuyo contenido de arsénico es menor o igual que $600 \mu\text{g L}^{-1}$. Respecto a la estimación del costo asociado al consumo de los reactivos (ácido clorhídrico, reactivo Fenton e hidróxido de sodio) para la oxidación de As(III) a As(V), previa su remoción con el gel, representa menos del 15 % del costo estimado para la preparación del mismo. Claramente se puede apreciar que el tratamiento propuesto representa un costo estimado, en forma conservadora, menor a \$0.06 pesos M.N. (1 centavo de dólar), por litro de agua tratada.

CONCLUSIONES

La metodología desarrollada para la preparación del gel de hidróxido de aluminio de alta pureza es económica, fácil de llevar a cabo y su aplicación en la remoción de arsénico del agua resultó ser adecuada, como se demostró con los resultados presentados.

La aplicación de la metodología propuesta para la preparación de gel $\text{Al}(\text{OH})_3$ y su uso para tratar aguas arsenicales puede resolver de manera sencilla y económica el problema de la contaminación de arsénico del agua de consumo humano en poblaciones rurales que enfrentan esta situación en su vida cotidiana y que no cuentan con agua para consumo humano e incluso que tengan la infraestructura sanitaria adecuada y electricidad. Asimismo, el gel de hidróxido de aluminio también es capaz de adsorber otros metales disueltos en el agua, como el cromo y el molibdeno entre otros (García y Gómez 2000, Luján 2001) así como otros iones, como se muestra en la **cuadro II**.

El diseño del reactor, con base cónica y su válvula, propuesto para el tratamiento del agua elimina el paso de filtración y facilita la sedimentación del arsénico adsorbido en el gel $\text{Al}(\text{OH})_3$. De esta forma se facilita la colección del agua sobrenadante tratada libre de arsénico y de sedimento. Por otro lado, en caso de ingestión accidental del sedimento, no se esperan efectos adversos mayores que los que pudiera ocasionar el agua sin tratar, ya que el hidróxido de aluminio no es tóxico (Luján 2001). Su inocuidad, al menos en corto plazo, está suficientemente comprobada por su amplia aplicación en la industria farmacéutica en medicamentos antiácidos. Adicional-

mente, el gel no confiere sabor ni olor al agua.

Este trabajo ha mostrado la manera en que es posible llevar a cabo el tratamiento de agua, específicamente la remoción de arsénico, a partir de desechos de aluminio proveniente de latas previamente usadas para enlatar bebidas refrescantes. De esta forma se contribuye a crear una cultura de reciclaje de desechos y su uso en el tratamiento de aguas, específicamente en la remoción de arsénico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento a la Secretaría de Educación Pública a través del PROMEP (Programa de Mejoramiento al Profesorado).

REFERENCIAS

- Adeel Z. y Ali A. (2002). A comparative evaluation and field implementation of treatment technologies for arsenic removal from groundwater. International Symposium on Water Reuse Technology. Kwangju Institute of Science and Technology. Kwangju, South Korea, Marzo 29, pp.1-11.
- Anwar J. (2003). Arsenic Mitigation: a costly delay. SOS-Arsenic.net. p.1-11. <http://www.sos-arsenic.net/english/mitigation/article.html> (Consultado en Mayo 2004).
- ASTM (1999). Standard test methods for chloride ion in water. ASTM D-512-R1999.
- ASTM (2002). Standard practice for measuring elements in water by flame atomic absorption spectrophotometry. ASTM D-4691-02.
- Birkin P.R. y Silva-Martínez S. (1996). A study of the effect of ultrasound on mass transport to a microelectrode. J. Electroanal. Chem. 416, 127-138.
- Bowell R. (2004). Arsenic cycling in the minning environment. U.S. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/ttnrmrl/arsenictech.html> (Consultado en Mayo 2004).
- Finkelman R.B., Belkin H.E. y Zheng B. (1999). Health impacts of domestic coal use in China. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 96, 3427-3431.
- Flores V.S. (2004). Preparación de un gel a partir de latas de aluminio de desecho y su uso en la eliminación de arsénico en aguas naturales. Tesis de Licenciatura. FCQeI, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. pp. 15 y 18.
- García V.J. y Gómez C.M. (2000). Gel de hidróxido de aluminio: análisis comparativo de métodos de separación

- sólido-líquido que se utilizan en su producción. *Rev. Cubana Farm.* 34, 87-92.
- Hach (1997). *Water analysis handbook*. ISO 9001 Certified. 3rd Edition. Hach Company. Loveland, Colorado, EUA.
- Hering J.G., Chen Pen-Yuan, Wilkie J.A., y Elimelech M. (1997). Arsenic removal from drinking water during coagulation. *J. Environ. Engineer.* 123, 800-807.
- Hirano K., Nitta H. y Sawada K. (2005). Effect of sonication on the photo-catalytic mineralization of some chlorinated organic compounds. *Ultrasonics Sonochem.* 12, 271-276.
- Jingtai H. y Fyfe W.S. (2000). Arsenic removal from water by iron-sulphide minerals. *Chinese Sci. Bull.* 45, 1430-1434.
- Jones C.J., Hudson B.C. y McGugan P.J. (1977). The removal of arsenic (V) from acidic solutions. *J. Hazard. Mater.* 2, 333-345.
- Kartinen E.O. y Martín Jr. C.J. (1995). An overview of arsenic removal processes. *Desalination* 103, 79-88.
- Kinniburgh D.G. y Smedley P.L. (Editors) (2001). Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. Government of the People's Republic of Bangladesh. Ministry of Local Government, Rural Development and Co-operatives Department of Public Health Engineering. Department for International Development (UK) and British Geological Survey. BGS Technical Report WC/00/19, Volume 2, pp. 1-16.
- Kyllönen H., Pirkonen P., Hintikka V., Parvinen P., Grönroos A. y Sekki H. (2004). Ultrasonically aided mineral processing technique for remediation of soil contaminated by heavy metals. *Ultrasonics Sonochem.* 11, 211-216.
- Luján J.C. (2001). Un hidrogel de hidróxido de aluminio para eliminar el arsénico del agua. *Rev. Panam Salud Publica/Pan Am J. Public Health* 9, 302-305.
- McNeil L.S. y Edwards M. (1997). Arsenic removal during precipitative softening. *J. Environ. Engineer.* 123, 453-459.
- Navarrete I. C.E., Velasco U.E. y Silva M.S. (2005). Degradación sonoelectroquímica de colorantes empleados en la industria textil. XX Congreso Nacional de la SMEQ-V Congreso Anual de la SMH. Mayo 22-27. Puente de Ixtla Morelos.
- Newman A.P., Lorimer J.P., Mason T.J. y Hutt K.R. (1997). An investigation into the ultrasonic treatment of polluted solids. *Ultrasonics Sonochem.* 4, 153-156.
- NMX (2001). Análisis de agua-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Método de Prueba. NMX-AA-051-SCFI-2001.
- OID (2004). Arsenic remediation technologies: Online Information Database. <http://web.mit.edu/murcott/www/arsenic/details.html>, pp. 1-5 (Consultado en Abril 2004).
- Okuno H., Yim B., Mizukoshi Y., Nagata Y. y Maeda Y. (2000). Sonolytic degradation of hazardous organic compounds in aqueous solution. *Ultrasonics Sonochem.* 7, 261-264.
- Peavey M. A. (2003). Fuel from water: Energy independence with hydrogen. 8 Ed., Merit, Louisville, KY., pp. 16-18.
- Sánchez R. A. y Rodríguez A. M. (2000). Arsenicismo. *Rev. Cent. Dermatol Pascua.* 9, 25-32.
- Silva M.S., López B.W., Álvarez G.A. y Sebastián P.J. (2005). Recycling of aluminum to produce green energy. *Solar Energy Materials Solar Cells*, 88, 237-243.
- Silva-Martínez S. (1997). Applications of ultrasound in electrochemistry. PhD. Thesis. University of Southampton. U.K.
- Sinclair M. y Lightbody P. (2003). Public Health Newsletter of the CRC for water quality and treatment. *Health Stream. Information and analysis for water and health professionals.* 30, pp. 1-20.
- Swistock B.R. (2001). Removal of arsenic from wells in Pennsylvania. The Penn State College of Agricultural Science Publications. Fact Sheet. F133, (1,2), pp. 1-3. (<http://pubs.cas.psu.edu/> Consultado en Enero 2004).
- Tamaki S. y Frankenberger W.T. Jr. (1992). Environmental biochemistry of arsenic. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 124, 79-110.
- Viraraghavan T., Jin Y.C. y Tonita P.M. (1992). Arsenic in water supplies. *Intern. J. Environ. Stud.* 41, 159-167.
- Wasiuddin N.M., Tango M. y Islam M.R. (2002). A novel method for arsenic removal at low concentrations. *Energy Sources*, 24, 1031-1041.
- WHO (2001). Arsenic in drinking water. <http://www.who.int/media/centre/factsheets/fs210/en> (Consultado en Marzo 2004).