

REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS CON BAJAS CONCENTRACIONES DE HIERRO MEDIANTE MICROFILTROS COMERCIALES

ARSENIC REMOVAL IN GROUNDWATERS CONTAINING LOW IRON CONCENTRATIONS BY COMMERCIAL MICROFILTRERS

Ramiro Escalera Vásquez

*Centro de Investigaciones en Procesos Industriales (CIPI)
Universidad Privada Boliviana*

rescalera@upb.edu

(Recibido el 13 mayo 2016, aceptado para publicación el 11 de junio 2016)

RESUMEN

Se ha monitoreado el desempeño de un sistema de filtración para la remoción simultánea de As y Fe durante 40 días, en aguas de pozo con bajas concentraciones de Fe total. El sistema está compuesto por un tanque de aireación provisto de un aspersor comercial y dos microfiltros comerciales de polipropileno (5 μm de tamaño de poro) dispuestos en serie. También se ha estudiado la remoción simultánea de hierro total y arsénico total en la trayectoria del sistema de aducción de agua hacia el sistema de aireación-filtración. Existen significativos porcentajes de remoción de Fe total (hasta un 42 %) y As total (hasta un 75%) en la trayectoria de la aducción de agua que va hacia el sistema de aireación – filtración.

Las características del agua del pozo del establecimiento educativo son apropiadas para la remoción simultánea de Fe y As, por su moderada concentración de Ca^{2+} , pH neutro y bajas concentraciones de nitratos y sulfatos que podrían competir con los arseniatos por los sitios de adsorción de los hidróxidos de hierro retenidos en los medios filtrantes. Aun cuando la concentración de Fe en las aguas sin tratar son relativamente bajas (< 0,3 mg/l), existe una significativa acumulación de ferrihidrita, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sobre la superficie de los microporos de los medios filtrantes, llegando hasta concentraciones entre 53 y 70%, medidas como Fe_2O_3 , de la masa total de sólidos retenidos.

Las eficacias de remoción de As total y Fe total en el sistema fueron significativas (33-41% y 46-78%, respectivamente), aprovechando solo la presencia de Fe total filtrable en las aguas subterráneas, por lo que se puede considerar que el sistema de filtración es apropiado para tasa de consumo hasta de 160 l/d, bajo las condiciones descritas. La eficacia de remoción de As total es menor que la lograda en el sistema piloto de tratamiento basada en colectores solares, debido principalmente a la adición de altas concentraciones de sales de hierro.

ABSTRACT

Monitoring of the performance of a filtration system for the simultaneous removal of As and Fe was carried out during 40 days, treating groundwater containing low total iron concentrations. The system comprises an aeration tank with a commercial spray and two commercial polypropylene microfilters (5 μm) arranged in series. The simultaneous removal of both ions within the adduction path of the groundwater has also been studied. There is a significant removal of iron (up to 42%) and arsenic (up to 75%) in the path between the wellhead to the entrance to the aeration tank.

The groundwater physical and chemical characteristics are suitable for the simultaneous removal of arsenic and iron, due to its moderate concentrations of Ca^{2+} , neutral pH and low nitrate and sulfate concentrations, which may compete with arsenate species for the adsorption sites on the surface of the iron oxide retained by the porous media.

Even though the total iron content in the groundwater is relatively low (< 0.3 mg/l), there exists a significant accumulation of iron hydroxide on the surface of the porous media, reaching contents of 53-70% (as Fe_2O_3) of the total mass of retained solids.

Removal efficiencies for total arsenic and total iron were significant (33-41% y 46-78%, respectively), providing that only the natural occurrence of iron in groundwater is used. Consequently, the filtration system can be considered appropriate for a consumption rate of 160 l/d, under the described conditions. The arsenic removal efficiency is lower than that obtained using the pilot plant based on solar collectors, mainly due to the high doses of iron salts added.

Palabras Clave: Remoción Simultanea de Arsénico y Hierro, Aireación, Micro-filtración

Keywords: Simultaneous Removal of Arsenic and Iron, Aeration, Microfiltration.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de arsénico en el agua proveniente de fuentes naturales representa una amenaza a nivel mundial que afecta actualmente a los cinco continentes. Las zonas más conocidas donde existen aguas subterráneas con elevados contenidos de arsénico son Bangladesh (< 1670)[1], Bengala del Oeste, India (< 3200)[2], Argentina (< 5300 ppb) en la provincia de La Pampa [3] y < 15 000 ppb en la Provincia de Santiago del Estero [4], Chile (< 1300 ppb) [5], entre otros. Se estima que cerca de 150 millones de personas en el mundo están afectadas, con la perspectiva de que tal población siga incrementándose debido a que constantemente se descubren nuevas áreas contaminadas [6].

El consumo permanente y prolongado de aguas con alto contenido de arsénico daña el sistema nervioso central, el hígado y la piel, resultando en la aparición de diversos tipos de cáncer, tales como el cáncer de la piel, de los pulmones y la hiperqueratosis [7], [8].

En Bolivia, en la cuenca del lago Poopó, Ramos *et al.* [9] han estudiado aguas de pozos poco profundos (hasta 30 m), usadas para consumo humano, que poseen concentraciones de arsénico cercanas a 250 µg/l (25 veces la norma boliviana de agua potable y la recomendación de la OMS, 10 µg/L). Ormachea *et al.* [10] evaluaron la calidad de agua, también proveniente de pozos poco profundos, en la zona cercana a la orilla sud del mismo lago, durante periodos lluvioso y seco. Se encontraron concentraciones de arsénico en el intervalo <5,2 y 207 µg/L, promediando 72 µg/l. Por otra parte, en el Distrito de Oruro se encontraron más del 50% de 67 muestras de agua de pozo con concentraciones de As mayores a 10 µg/L, llegando hasta 964 µg/L[11].

Adicionalmente, se ha realizado un estudio sobre la calidad físico-química y presencia de arsénico en aguas de 18 pozos con profundidad mayor a 50 m, ubicados en la zona periurbana oeste de la ciudad de Cochabamba, mediante muestreos llevados a cabo durante dos periodos diferentes (húmedo y seco) [12]. Los contenidos de arsénico disuelto variaron entre < 3 µg/L y 153 µg/L (prom = 54 µg/L) al final del periodo de lluvias, mientras que al final del periodo seco estas concentraciones variaron entre < 3 µg/L y 581,7 µg/L (prom = 168,3 µg/L), lo que muestra un incremento de las concentraciones en el periodo seco respecto del periodo húmedo. Las aguas subterráneas son del tipo calcio-bicarbonato (Ca-HCO₃⁻), son ligeramente alcalinas (pH 7,4 – 8,3) y sus concentraciones de Fe total y Mn total disueltos son relativamente altas, variando entre <0,1 y 2,1 mg/L y <0,1 y 1,2 mg/L, respectivamente. Son moderadamente reductoras, con potencial óxido-reducción (ORP) entre -12,5 y -69 mV.

Para prevenir la aparición de las enfermedades mencionadas, varios grupos de científicos han focalizado su atención en la remoción de arsénico mediante la aplicación de la radiación solar ultravioleta y se han desarrollado sistemas caseros simples de tratamiento de aplicación inmediata, utilizando botellas PET. La técnica de Remoción de Arsénico Asistida por Oxidación Solar (RAOS), desarrollada por Hug *et al.* [13], ha sido aplicada con éxito relativo en Bangladesh, donde las concentraciones varían entre 100 y 150 µg/L, logrando remover el As(III) con una eficacia del 50-70%. Esta técnica utiliza el Fe(III) contenido en las aguas y gotas de jugo de limón, en presencia de la luz solar para remover arsénico por adsorción con los óxidos de hierro que se generan en el proceso. Lara *et al.* [14] modificaron el método con la adición de una sal de Fe(II), obteniendo remociones mayores al 95% en aguas de alta concentración de As(V) contenido en las aguas del río Camarones (1250 µg/L), al norte de Chile.

Sin embargo, estos procesos son largos (duran entre 3 y 6 horas), su capacidad es limitada y se los ha utilizado, preferentemente para el consumo humano a nivel casero, en poblaciones rurales dispersas, sin tomar en cuenta los requerimientos de agua potable para bregaje de animales domésticos, agua para riego y/o la mayor demanda proveniente de postas sanitarias y escuelas rurales. Con el propósito de atender tales requerimientos, Escalera y Ormachea [15] desarrollaron un foto-reactor de flujo continuo de buena capacidad (130 Lm⁻²d⁻¹), para el tratamiento de aguas subterráneas con alto contenido de arsénico natural. Los autores utilizaron el método RAOS, según el proceso modificado por Lara *et al.* [14], logrando remociones mayores al 98%. El foto-reactor fue construido con materiales reciclados, fácilmente accesibles (tubos de neón usados, canaletas de desagüe de PVC y papel de aluminio), logrando concentrar la radiación UVA integral hasta 2,8 veces la radiación solar incidente. Posteriormente, Escalera *et al.* [16] obtuvieron relaciones empíricas sobre la cinética del crecimiento de flóculos de Fe(OH)₃, en función de las intensidades de radiación UVA efectiva, utilizando concentradores solares de mayor capacidad y reduciendo tiempos de exposición para la obtención de altas remociones de arsénico. Finalmente, se ejecutó un estudio de desempeño de una planta piloto de tratamiento, basado en la aplicación de los colectores solares de bajo costo [12] anteriormente citados [15], ubicado en un establecimiento educativo. El sistema consiste de un tanque de aireación con aspersores comerciales, 4 fotoreactores, un sedimentador de placas y 1 microfiltro comercial (5 µm de porosidad). El desempeño fue satisfactorio incluso en días nublados con remociones mayores al 80%, logrando reducir la concentración de As hasta valores muy por debajo de lo requerido en la Norma Boliviana de agua potable (< 2 ppb). El agua sin tratar proviene de una aducción que la traslada desde la boca de pozo hasta un tanque de almacenamiento (tubería de acero de 50 m), para luego ser conducida mediante red al sistema de tratamiento (trayectoria de aproximadamente de 100 m).

Este estudio demostró que existe una remoción muy significativa de As (cerca del 75%) en la trayectoria que va desde la boca de pozo hasta la entrada al sistema de tratamiento. Una posible causa de la remoción puede explicarse por la formación de incrustaciones de óxidos de hierro (III) sobre la superficie de las tuberías y tanques de almacenamiento, que pueden adsorber los arsenitos y arseniatos presentes en el trayecto (en boca de pozo, la distribución de las concentraciones de As(III) y As(V) fue de 9/1, por las condiciones reductoras y poco contacto con el aire, ORP entre -15 y -18 mV).

Sobre la base de estas observaciones y con el propósito de ampliar la versatilidad de la planta piloto, en el presente estudio se analiza el desempeño del sistema de tratamiento, sin la utilización de los colectores solares y sin la adición de sales de hierro y citrato. Es decir, se observa el efecto de la aireación seguida de micro filtración en la remoción

simultánea de arsénico y hierro contenidos en aguas subterráneas con bajo contenido de hierro. Por otra parte, se estudia la variación de las concentraciones de hierro en la trayectoria que va desde la boca de pozo hasta la entrada al sistema de tratamiento para determinar las posibles causas de la remoción de As en dicha trayectoria.

2. MÉTODOS Y EQUIPO EXPERIMENTAL

▪ Determinación de arsénico total y hierro total en aguas sin tratar y aguas tratadas

Las muestras fueron recolectadas en un periodo de 6 semanas de funcionamiento. Previamente a su análisis, las muestras fueron filtradas en microfiltros de $0,45\mu\text{m}$ y acidificadas con HCl concentrado hasta un pH menor a 2 y conservadas a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las concentraciones de arsénico se determinaron mediante un espectrómetro de absorción atómica con generador de hidruros y sistema de inyección de flujo continuo, según el método ASTM D 2972-03. El hierro total se determinó en un espectrofotómetro Shimadzu 1601 en celdas de cuarzo de 1 cm de paso de luz, según el método 3500 – Fe B del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, SMWW, usando o-fenantrolina como agente cromógeno [17].

▪ El sistema de aireación-filtración

El sistema de aireación-filtración se esquematiza en la Figura 1 y tiene las siguientes partes:

- Un tanque de aireación y alimentación automatizada (1), provisto de una boquilla de aspersion (2), válvula de solenoide y controlador de nivel de agua.
- Una bomba de $\frac{1}{2}$ hp (3), provista de un presostato de señal eléctrica para impulsar el agua hacia el sistema de filtración y al punto de uso.
- Dos filtros comerciales colocados en serie (4), provistos de cartuchos de $5\ \mu\text{m}$ de tamaño de poro.

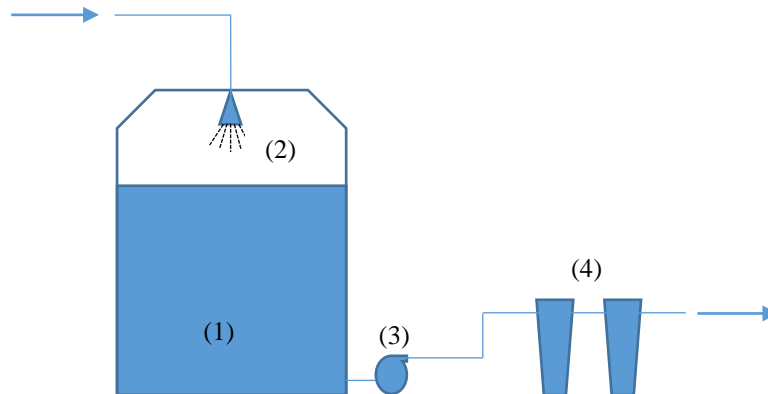


Figura 1- Sistema de aireación-filtración

La Figura 2 presenta la fotografía del sistema, donde se incluye la bomba automática y los dos microfiltros comerciales. Los medios filtrantes fueron cartuchos de tela de polipropileno y de polipropileno fundido (Figura 3).

El sistema se puso en funcionamiento durante 40 días y se tomaron muestras puntuales a la entrada al tanque de aireación y a la salida del grifo de la cocina del establecimiento educativo, a los 4, 12, 18, 25, 28, 33, 35 y 40 días después de iniciado el tratamiento, para determinación de hierro total. La determinación de arsénico total se realizó en las muestras de los días 4, 12, 18, 25 y 40 de iniciado el tratamiento. El día 22 (tres semanas de funcionamiento del sistema) se procedió al cambio de medios filtrantes en los dos filtros, debido a la pérdida de presión por efecto de la acumulación de sólidos en los microfiltros.

Para determinar la concentración de Fe y Fe_2O_3 en los microfiltros, se efectuó la toma de muestras de lodos adheridos a la superficie externa de los mismos. Las muestras de lodos se secaron en estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por dos horas y se procedió a la determinación de Fe, en una alícuota, según el método 3500 Fe B del SMWW [18]. Adicionalmente, se tomaron muestras en la boca de pozo, tanque de almacenamiento y la entrada al sistema aireación-filtración, con el objetivo de determinar las variaciones de concentración de hierro total y su relación con las variaciones de la concentración de arsénico, observadas anteriormente [12].



Figura 2 - Bomba de ½ hp provista de presostato de señal eléctrica y filtros comerciales.



Figura 3 - Cartuchos de medio filtrante de 5 micras de tamaño de poro. Izquierda: tela de polipropileno; derecha polipropileno fundido

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

▪ Características físico-químicas del agua en boca de pozo

La calidad físico-química del agua del establecimiento educativo, en muestras tomadas en boca de pozo se presenta en la Tabla 1 [12].

Las aguas subterráneas son del tipo calcio-bicarbonato (Ca-HCO_3^-) por su predominancia sobre otros cationes y aniones. La concentración de Ca^{2+} varía entre 21 y 149 mg/l y la de bicarbonatos alcanza los 232 mg/l como CaCO_3 . Las aguas son ligeramente alcalinas (pH 8,1 – 8,2) y sus concentraciones de Fe total están debajo del límite permisible de 0,3 mg/l y las de Mn total es relativamente alta. Por otra parte, las concentraciones de cloruros, sulfatos y nitratos son relativamente bajas. El As total varía entre 40 y 144 $\mu\text{g/l}$, superando en 4 a 14 veces el límite permisible de la Norma Boliviana NB 512.

TABLA 1 – CALIDAD FISICO-QUIMICA DEL AGUA DE POZO SIN TRATAR [12]

Parámetro	Unidad	Método de Análisis de SMWW	Límite de cuantificación, LD	Resultado, abril 2011	Resultado, septiembre 2011	Norma Boliviana 512	Observaciones
Parámetros físicos							
Temperatura	°C	2550 B.		20,7	21	-	
Conductividad específica	mS/cm	2510 B.		546,3	320	1500	
pH	-	4500 H ⁺ B.		8,1	8,17	6,5-9,0	
Parámetros químicos							
Alcalinidad total	mg-CaCO ₃ /L	2320 B.		231,7	232,0	370	
Fluoruros	mg/L	4500 F ⁻ C.	0,02	0,3	1,1	1,5	
Cloruros	mg/L	4500 Cl ⁻ D.	1,8	3,4	5,2	250	
Nitratos	mg/L	4500 NO ₃ ⁻ D.	0,62	13,1	17,1	45	
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ²⁻	0,5	0,9	0,4	400	
Calcio	mg-Ca ²⁺ /L	3111 B.	0,06	148,7	21,1	200	
Magnesio	mg-Mg ²⁺ /L	3111 B.	0,01	14,1	8,8	150	
Sodio	mg/L	3111 B.	0,1	45,7	41,1	200	
Potasio	mg/L	3111 B.	0,3	1,5	1,1	-	
Hierro total	mg/L	3111 B.	0,1	0,1	< LD	0,3	
Manganeso total	mg/L	3111 B.	0,1	-	0,2	0,05	Sabor no aceptable
Arsénico total	mg/L	3114 C.	0,002	0,040	0,144	0,010	Tiene efecto en salud
Zinc	mg/L	3111 B.	0,03	1,5	0,2	5,0	
Cobre	mg/L	3111 B.	0,07	0,5	< LD	1,0	

SMWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

▪ **Remoción de hierro total y arsénico total filtrables en la trayectoria comprendida entre la boca de pozo al sistema de filtración**

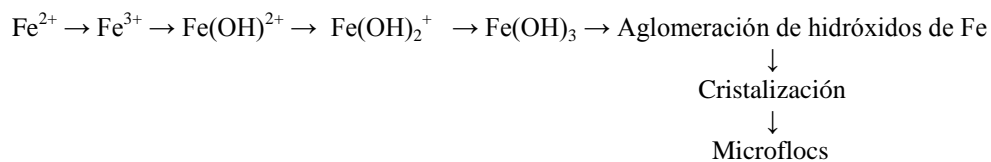
La Tabla 2, permite observar las disminuciones de concentración de arsénico y hierro filtrables en la trayectoria desde la boca de pozo hasta la entrada al tanque de aireación.

TABLA 2 - EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE Fe TOTAL DESDE LA BOCA DE POZO HASTA LA SALIDA AL GRIFO DE USO

Punto de muestreo	Concentración de Fe total, mg/L	Porcentaje de remoción de Fe, %	Concentración de As total, µg/L [12]	Porcentaje de remoción de As, % [12]
Boca de pozo	0,39		95	
Tanque elevado	0,33	15,9	71	24,9
Entrada tanque de aireación	0,22	42,4	25	75,3
Salida – grifo de uso	0,07	81,1		-

Se observa que en ambos iones existen significativos porcentajes de remoción (hasta un 42 % en el caso del hierro y un 75% en el caso del arsénico). Estas remociones pueden deberse a dos mecanismos [18]:

- El mecanismo convencional que comprende la oxidación de Fe(II) a Fe(III) seguida de la hidrólisis del Fe(III) para formar micro-flóculos de Fe(OH)₃, según la siguiente secuencia:



Este proceso es prevalente en condiciones óxicas (valores de ORP positivos). Los microflóculos de Fe(OH)₃ adsorben algo de As(III) y As(V) presentes.

- La adsorción del Fe^{2+} sobre la superficie de las tuberías y el tanque de almacenamiento y su posterior oxidación a Fe^{3+} (todavía adsorbido), seguido de la hidrólisis y formación de una densa capa fuertemente adherida que tiene una capacidad de adsorción de Fe^{2+} aun mayor que las superficies limpias. Este fenómeno de incrustación ocurre muy frecuentemente, en presencia de concentraciones pequeñas de oxígeno y $pH > 5$, en aguas con concentraciones relativamente altas de Fe^{2+} ; por ejemplo, la incrustación de color pardo-rojizo que se observa en la superficie de tanques de inodoros y lavabos. Por su alta capacidad de adsorción estas capas también pueden adsorber el As(III) y el As(V) presentes [19].

En el caso presente, existe una oxigenación del agua en el chorro que alimenta al tanque elevado, en la trayectoria comprendida entre la boca de pozo y la entrada al tanque de aireación, hecho que posibilita la ocurrencia de ambos fenómenos de remoción. En los sistemas de producción y distribución de aguas subterráneas auto-gestionados por las Organizaciones Territoriales de Base de las zonas periurbanas de la ciudad de Cochabamba, es muy frecuente la utilización de tanques elevados de almacenamiento conectados a tuberías de PVC en sus redes de distribución domiciliaria. Por consiguiente, es posible que exista la remoción simultánea de hierro y arsénico en las zonas afectadas por la presencia de ambos iones en sus aguas subterráneas.

▪ **Remoción de hierro total y arsénico total filtrables en el sistema de filtración**

Los resultados del desempeño del sistema de filtración respecto de la eficacia de remoción y las concentraciones del agua tratada, para un periodo de funcionamiento de 40 días, se presentan en la Tabla 3 y las Figuras 4, 5 y 6. Las tasas de consumo de agua en el grifo de la cocina del establecimiento educativo fueron similares a los del anterior estudio [12], entre 80 y 160 L/d

TABLA 3- REMOCIÓN DE HIERRO TOTAL, Fe(II) Y Fe(III), Y ARSENICO TOTAL, As(III) Y As(V), EN EL SISTEMA DE FILTRACIÓN

Día	Fe total			As total		
	Concentración de entrada, mg/L	Concentración de salida, mg/L	% remoción Fe	Concentración de entrada, µg/L	Concentración de salida, µg/L	% remoción As
4				14	9	35,7
12	0,08	0,04	46,4	16	10	37,5
18	0,13	0,06	55,6	13	8	38,5
25	0,15	0,06	60,3	9	6	33,3
28	0,25	0,06	77,7			
33	0,24	0,12	51,4			
35	0,21	0,08	60,7			
40	0,22	0,07	67,3	17	10	41,2

En general, la calidad de las aguas filtradas satisface los requerimientos de agua potable, según la Norma Boliviana NB 512, en cuanto a las concentraciones de arsénico, con valores menores e iguales a 10 µg/L (Figura 4). En cuanto se refiere al hierro, tanto las concentraciones de entrada como las de salida son menores al límite permisible de 0,3 mg/L (Figura 5). El sistema de filtración hace posible la remoción de hierro en porcentajes que varían entre el 46 al 78% y la remoción de arsénico entre el 33 al 41%. Es decir existe una remoción simultánea de ambos elementos en aguas filtradas con microfiltros comerciales de 5 micras de tamaño de poro. Se explica este comportamiento, en razón a que el Fe(II) presente en la entrada al tanque de aireación se ha oxidado a Fe(III) con la consiguiente formación de precipitados de ferrihidrita, $Fe(OH)_3$ que a su vez se han acumulado en los medios filtrantes, tal como se evidencia líneas abajo. La ferrihidrita acumulada ha permitido la adsorción de As total, removiéndolo parcialmente de la fase líquida.

En zonas rurales de Bangladesh, Petrusovski *et al.* [19] efectuaron un estudio de campo de 30 meses sobre el desempeño de remoción de arsénico en filtros caseros con arena previamente recubierta de óxido férrico (IOCS, por sus siglas en inglés), proveniente de plantas de remoción de hierro. Los filtros de 100 L/d de capacidad fueron capaces de remover simultáneamente el As y Fe con alta efectividad, obteniendo concentraciones de As menores a 10 µg/L hasta después de 18 meses de funcionamiento. El sistema de filtración propuesto en este estudio se asemeja al IOCS, con la diferencia de que se aprovecha la presencia natural de hierro en las aguas subterráneas en el mismo proceso y se utilizan microfiltros de plástico (polipropileno).

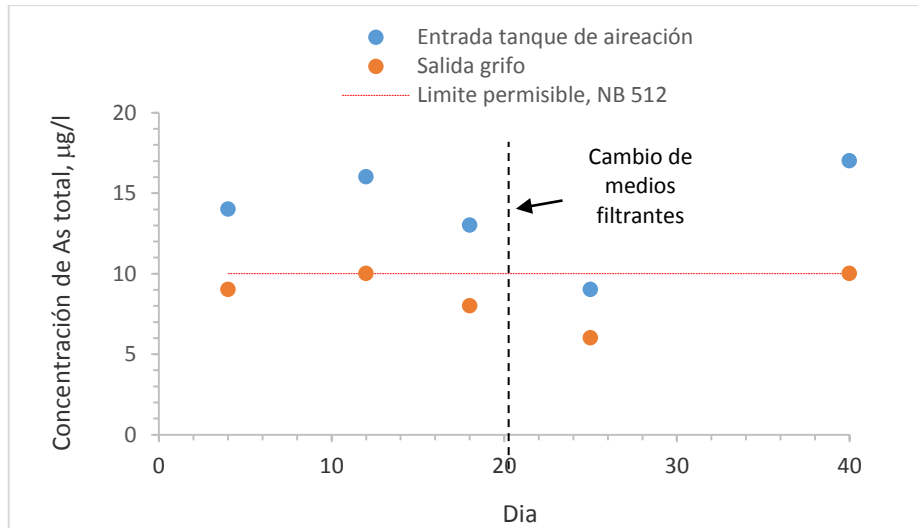


Figura 4 - Concentraciones de As total en la entrada al tanque de aireación y a la salida del grifo de la cocina del establecimiento.

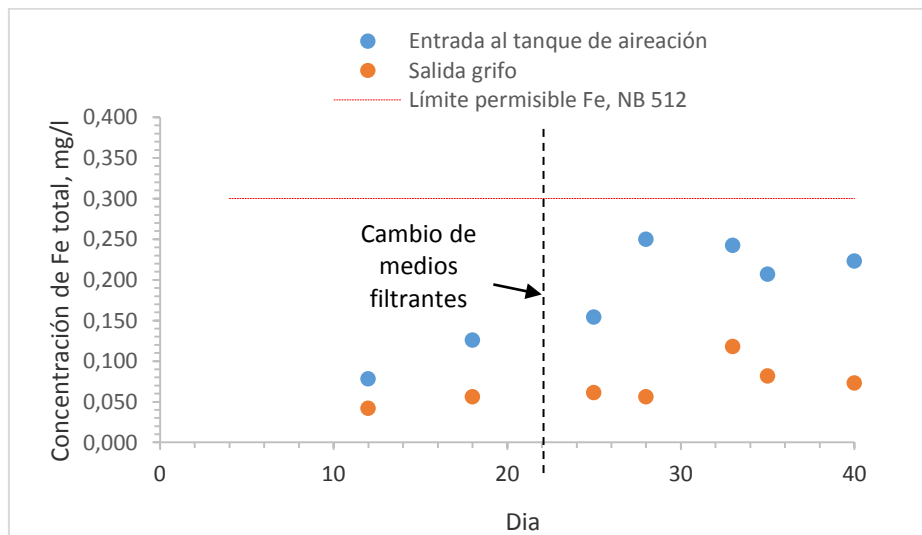


Figura 5 - Concentraciones de Fe total en la entrada al tanque de aireación y a la salida del grifo de la cocina del establecimiento.

Wang *et al.* [20] estudiaron los efectos del calcio sobre la capacidad de adsorción de equilibrio del As(III) y As(V) sobre la superficie de partículas de arena de un filtro IOCS e hidróxido férrico granular (GFH, por sus siglas en inglés). Según el estudio, se obtienen altas eficacias de remoción de As(III) y As(V) a valores de pH = 6, cuando la concentración de Ca^{2+} es menor o igual a 20 mg/l. Por el contrario, a pH = 8 y en presencia de ion Ca^{2+} entre 40 y 80 mg/l, se obtienen mayores eficacias de remoción. Las características presentes en el agua sin tratar (Ca^{2+} entre 21 y 149 mg/l y pH entre 8,1 y 8,2), ver Tabla 1, permiten significativas remociones de As(III) y As(V) en microfiltros comerciales que pueden retener significativas cantidades de hidróxido férrico en sus superficies. Por otra parte, los nitratos y sulfatos pueden competir con las especies de arseniatos por los sitios de adsorción sobre la superficie del hidróxido férrico [21]. En el caso de las aguas del establecimiento educativo, estas concentraciones son muy bajas en comparación a otros estudios [5], [22], [23], aspecto que resulta favorable para remoción de arseniatos.

Se puede observar que las concentraciones de As total filtrable a la entrada al tanque aireador son similares a las reportadas por Escalera *et al.* [12], entre 9,3 y 17,9 µg/L, cuando se evaluó el desempeño del sistema piloto provisto de colectores solares. Sin embargo, las concentraciones de arsénico a la salida del grifo son evidentemente mayores a las reportadas, que estuvieron por debajo del límite de cuantificación del instrumento analítico (< 2 ppb). La explicación de esta diferencia entre los dos sistemas es que, en el caso de los colectores solares, se añadieron sales de hierro en concentraciones altas (80 – 90 mg/l), produciendo flóculos de hidróxido de hierro, que luego tuvieron que ser removidos en el sedimentador de placas y en el microfiltro utilizado, el cual retuvo una importante masa de ferrihidrita

con sitios activos libres. En este estudio, se aprovechó sólo la presencia natural de Fe(II), cuya concentración fue mucho menor (0,1 a 0,3 mg/l), con la probabilidad de que los sitios activos disponibles para la adsorción de As(III) y As(V) sea significativamente menor. Esta discusión permite establecer que se podría mejorar la eficacia de remoción de arsénico, con la adición de concentraciones apropiadas de sales de hierro.

La evolución de la eficacia de remoción de As total y Fe total en todo el periodo de funcionamiento del sistema de filtración, se presenta en la Figura 6. Los porcentajes de remoción de hierro total son mayores al 46% llegando casi al 80%, observándose una tendencia creciente. En cambio los correspondientes al As total se mantienen aproximadamente constantes, con valores cercanos al 40%, muy por debajo de los porcentajes de remoción logrados con el uso de los colectores solares (> 80%) [12].

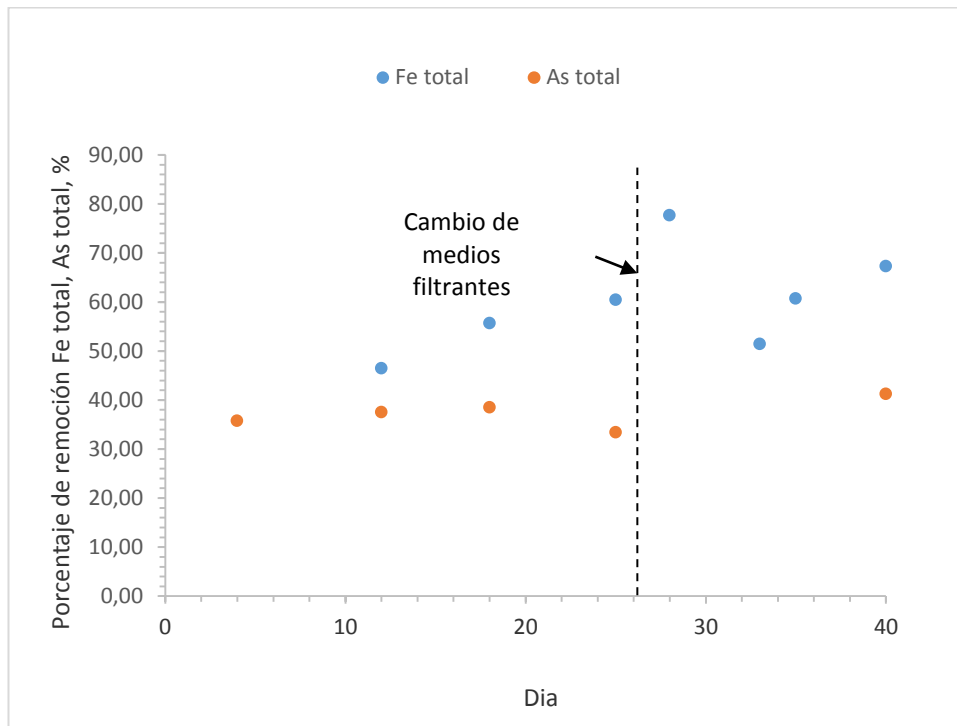


Figura 6 – Evolución de los porcentajes de remoción de As total y Fe total filtrables en el sistema de filtración.

▪ **Acumulación de ferrihidrita, Fe(OH)₃, en los medios filtrantes**

La Tabla 4 presenta la concentración de Fe y Fe₂O₃ en la masa de sólidos secos recuperados de la parte externa de los medios filtrantes de 5 micras de tamaño de poro, en un periodo de funcionamiento de 21 días, al cabo de los cuales se observó un descenso en la presión del fluido en el grifo de la cocina del establecimiento. El primer filtro de polipropileno fundido acumuló un 70 % y el segundo de tela de polipropileno un 53% de óxido férrico en toda la masa de sólidos retenidos. La Figura 7 muestra dichas acumulaciones.

TABLA 4 - ACUMULACIÓN DE OXIDO DE HIERRO EN LOS MEDIOS FILTRANTES AL CABO DE 21 DIAS DE FUNCIONAMIENTO

Filtro	Concentración de Fe en sólidos, %	Concentración de Fe ₂ O ₃ en sólidos, %
Filtro 1: Polipropileno fundido	24,5	70,1
Filtro 2: Tela de polipropileno	18,7	53,3

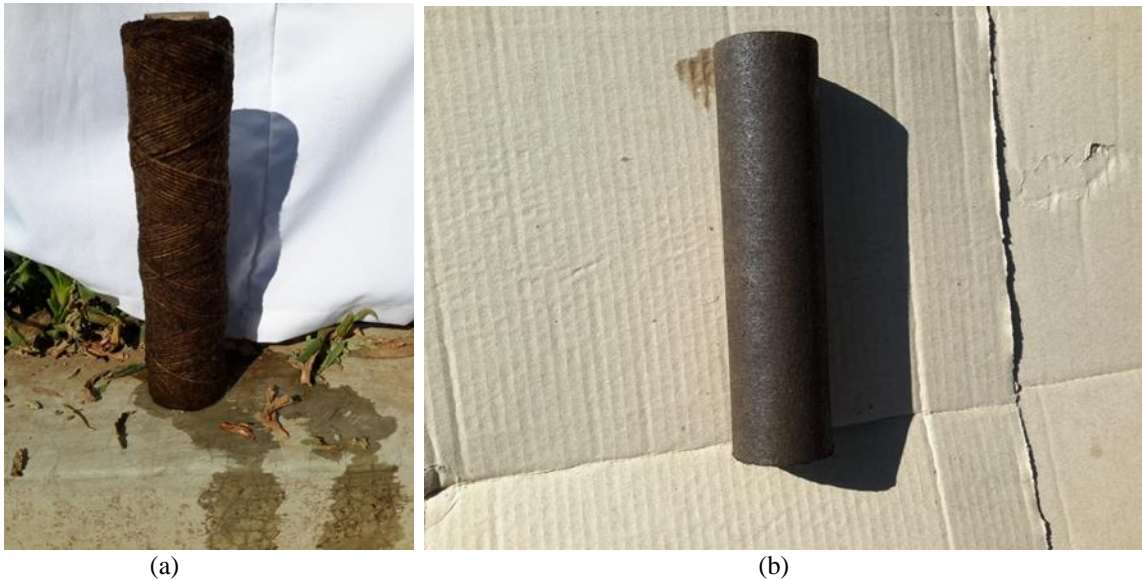


Figura 7 - Medios filtrantes usados después de 21 días. (a) Filtro de tela de polipropileno; (b) filtro de polipropileno fundido

4. CONCLUSIONES

Se ha efectuado un monitoreo de la eficacia de la remoción simultánea de As total y Fe total filtrables en un sistema de 2 filtros comerciales de polipropileno dispuestos en serie, provistos de medios filtrantes de 5 micras de tamaño de poro. El sistema de filtración se puso en funcionamiento durante 40 días, habiendo sido necesario cambiar de medios filtrantes después de tres semanas de operación, periodo en el que se produjo una pérdida de presión en el grifo de salida del sistema. Por otra parte, se estudió la remoción simultánea de hierro total y arsénico total en la trayectoria del sistema de aducción de agua hacia el sistema de aireación-filtración.

Sobre la base de los resultados del estudio se puede concluir lo siguiente:

- Las características del agua del pozo del establecimiento educativo son apropiadas para la remoción simultánea y efectiva de Fe total y As total, por su moderada concentración de Ca^{2+} , pH neutro y bajas concentraciones de nitratos y sulfatos que podrían competir con los arseniatos por los sitios de adsorción de los hidróxidos de hierro retenidos en los medios filtrantes.
- Existen significativos porcentajes de remoción de Fe total (hasta un 42 %) y As total (hasta un 75%) en la trayectoria del sistema de aducción de agua que va hacia el sistema de aireación – filtración. Siendo ésta una configuración típica utilizada en las OTBs de Cochabamba (boca de pozo-tanque de almacenamiento del barrio-sistema de distribución domiciliaria), se puede esperar este comportamiento en dichos sistemas de suministro de agua, que tengan la presencia de hierro y arsénico y características físico-químicas similares.
- Aun cuando la concentración de Fe total en las aguas sin tratar son relativamente bajas (< 0,3 mg/l), existe una significativa acumulación de ferrihidrita, $Fe(OH)_3$, sobre la superficie de los microporos de los medios filtrantes, llegando hasta concentraciones entre 53 y 70% de Fe_2O_3 de la masa total de sólidos retenidos en los medios filtrantes.
- Las eficacias de remoción de As total y Fe total en el sistema fueron significativas (33-41% y 46-78%, respectivamente), aprovechando solo la presencia de Fe total filtrable en las aguas subterráneas, por lo que se puede considerar que el sistema de filtros es apropiado para flujos hasta de 160 l/d, bajo las condiciones descritas.
- La eficacia de remoción de As total es menor a la lograda en el sistema piloto de tratamiento basada en colectores solares, debido fundamentalmente a la adición de altas concentraciones de sales de hierro.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la colaboración de Davinia Gamez, estudiante de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad Privada Boliviana, en la ejecución del monitoreo, toma de muestras y análisis de hierro total

6. REFERENCIAS

- [1] D. Kinniburgh and P. Smedley, “Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh,” British Geological

- Survey, Keyworth, 2001.
- [2] D. N. Guha Mazumder, R. Haque, N. Ghosh, B. K. De, A. Santra, D. Chakraborty, and A. H. Smith, "Arsenic levels in drinking water and the prevalence of skin lesions in West Bengal, India.," *Int. J. Epidemiol.*, vol. 27, no. 5, pp. 871–7, Oct. 1998.
 - [3] J. Bundschuh, A. Pérez Carrera, and M. Litter, *IBEROARSEN: distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. [Spain]: CYTED, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 2008.
 - [4] P. Bhattacharya, M. Claesson, J. Bundschuh, O. Sracek, J. Fagerberg, G. Jacks, R. A. Martin, A. del R. Storniolo, and J. M. Thir, "Distribution and mobility of arsenic in the Río Dulce alluvial aquifers in Santiago del Estero Province, Argentina," *Sci. Total Environ.*, vol. 358, no. 1, pp. 97–120, 2006.
 - [5] L. Cornejo, H. Lienqueo, M. Arenas, J. Acarapi, D. Contreras, J. Yáñez, and H. D. Mansilla, "In field arsenic removal from natural water by zero-valent iron assisted by solar radiation," *Environ. Pollut.*, vol. 156, no. 3, pp. 827–831, 2008.
 - [6] P. Ravenscroft, H. Brammer, and K. Richards, *Arsenic Pollution: A Global Synthesis*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2009.
 - [7] A. H. Hall, "Chronic arsenic poisoning," *Toxic. Lett.*, vol. 128, pp. 69–72, 2002.
 - [8] N. M. Hanjani, A. B. Fender, and M. G. Mercurio, "Chronic arsenicism from Chinese herbal medicine.," *Cutis*, vol. 80, no. 4, pp. 305–8, Oct. 2007.
 - [9] O. E. Ramos Ramos, L. F. Cáceres, M. R. Ormachea Muñoz, P. Bhattacharya, I. Quino, J. Quintanilla, O. Sracek, R. Thunvik, J. Bundschuh, and M. E. García, "Sources and behavior of arsenic and trace elements in groundwater and surface water in the Poopó Lake Basin, Bolivian Altiplano," *Environ. Earth Sci.*, vol. 66, no. 3, pp. 793–807, Jun. 2012.
 - [10] M. Ormachea Muñoz, H. Wern, F. Johnsson, P. Bhattacharya, O. Sracek, R. Thunvik, J. Quintanilla, and J. Bundschuh, "Geogenic arsenic and other trace elements in the shallow hydrogeologic system of Southern Poopó Basin, Bolivian Altiplano," *J. Hazard. Mater.*, vol. 262, pp. 924–940, Nov. 2013.
 - [11] K. Van Den Bergh, G. Du Laing, J. C. Montoya, E. De Deckere, and F. M. G. Tack, "Arsenic in drinking water wells on the Bolivian high plain: Field monitoring and effect of salinity on removal efficiency of iron-oxides-containing filters," *J. Environ. Sci. Heal. Part A*, vol. 45, no. 13, pp. 1741–1749, Oct. 2010.
 - [12] R. Escalera, M. Ormachea, O. Ormachea, and M. Heredia, "Presencia Natural de Arsenico en Aguas de Pozos Profundos y su Remoción Usando un Prototipo Piloto Basado en Colectores Solares de Bajo Costo," *Investig. Desarro.*, vol. 2, pp. 85–93, 2014.
 - [13] S. Hugh, M. Wegelin, D. Gechter, and L. Canonica, "Arsenic Contamination of Ground Water: Disastrous Consequences in Bangladesh," *EAWAG, News*, vol. 49, pp. 18–20, 2001.
 - [14] F. Lara, L. Cornejo, J. Yáñez, J. Freer, and H. D. Mansilla, "Solar-light assisted removal of arsenic from natural waters: effect of iron and citrate concentrations," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 81, no. 7, pp. 1282–1287, Jul. 2006.
 - [15] C. R. Escalera and O. A. Ormachea, "Solar Oxidation and Removal of Arsenic from Groundwater Utilizing a Semicircular Section Tubular Photoreactor," *J. Environ. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 9A, pp. 1071–1082, 2012.
 - [16] R. Escalera, O. Ormachea, N. Casanovas, M. Ormachea, and L. Huallpara, "Remoción de Arsénico Asistida por Oxidación UV Solar (RAOS) en Foto-reactores Tubulares de Sección Semicircular -Cinética del Crecimiento de Flóculos de Fe(OH)₃," *Investig. Desarro.*, vol. 11, no. 2011, pp. 37–45, 2011.
 - [17] "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater." American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, p. pp. 541, 1999.
 - [18] R. Buamah, B. Petrusevski, and J. C. Schippers, "Oxidation of adsorbed ferrous iron: kinetics and influence of process conditions.," *Water Sci. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 2353–63, 2009.
 - [19] B. Petrusevski, S. Sharma, W. G. van der Meer, F. Kruis, M. Khan, M. Barua, and J. C. Schippers, "Four years of development and field-testing of IHE arsenic removal family filter in rural Bangladesh.," *Water Sci. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 53–8, 2008.
 - [20] S.-W. Wang, C.-W. Liu, K.-L. Lu, Y.-P. Chang, and T.-W. Chang, "Distribution of Inorganic As Species in Groundwater Samples with the Presence of Fe," *Water Qual. Expo. Heal.*, vol. 2, no. 3–4, pp. 181–192, Feb. 2011.
 - [21] I. Rau, A. Gonzalo, and M. Valiente, "Arsenic(V) adsorption by immobilized iron mediation. Modeling of the adsorption process and influence of interfering anions," *React. Funct. Polym.*, vol. 54, no. 1, pp. 85–94, 2003.
 - [22] M. Gabriela García, J. d'Hiriart, J. Giullitti, H. Lin, G. Custo, M. del V. Hidalgo, M. I. Litter, and M. A. Blesa, "Solar light induced removal of arsenic from contaminated groundwater: the interplay of solar energy and chemical variables," *Sol. Energy*, vol. 77, no. 5, pp. 601–613, 2004.
 - [23] J. O'Reilly, M. J. Watts, R. A. Shaw, A. L. Marcilla, and N. I. Ward, "Arsenic contamination of natural waters in San Juan and La Pampa, Argentina.," *Environ. Geochem. Health*, vol. 32, no. 6, pp. 491–515, Dec. 2010.