



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

LABORATORIO NACIONAL DE AGUAS

Informe sobre la eficiencia de las plantas de remoción de arsénico en Cañas, Bagaces y Los Chiles Periodo 2014-2016

Preparado por:

Azucena Urbina Campos
Betzabel Arias Barrantes

Febrero de 2017





**Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo**



**AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS,
ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN
EL REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI**

Yo, Annette Henchoz Castro

N° Cédula: 1-0725-0409

Dependencia: Gerencia General

Autorizo como Sub Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital, Catálogo en línea (OPAC) y la intranet institucional de la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: centrodoc@aya.go.cr **N° Teléfono:** 2242-5487

Annette
Henchoz Castro

Firmado digitalmente por
Annette Henchoz Castro
Fecha: 2019.11.25 16:07:20
-06'00'

Firma: _____

Contenido

1. ANTECEDENTES.....	2
2. OBJETIVO.....	3
3. METODOLOGÍA.....	3
3.1 MÉTODO DE ANÁLISIS.....	3
3.2 MUESTREO.....	3
3.3 FRECUENCIA DE MUESTREO	3
3.4 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	3
3.5 CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y MANGANESO	4
4. RESULTADOS.....	4
5. CONCLUSIONES	21
6. RECOMENDACIONES.....	22

1. Antecedentes.

En julio del 2014 el AyA realizó la contratación directa para el diseño, construcción y puesta en marcha de seis plantas de remoción de arsénico localizadas en: Bebedero de Cañas, Montenegro y Agua Caliente, Falconiana y Quintas Don Miguel ubicadas en Bagaces y Santa Cecilia de El Amparo y Cristo Rey, ambas del cantón de Los Chiles.

La licitación fue otorgada a la empresa Turbina S.A. e iniciaron operación en el mes de setiembre del 2014. Entre junio y julio del 2015 las plantas pasaron a manos de AyA.

La tecnología de remoción del arsénico en las seis plantas es adsorción- filtración empleando un medio adsorbente a base de dióxido de titanio (TiO_2) el cuál es selectivo para oxianiones como el arseniato.

Las seis plantas cuentan con: caseta de cloración localizada antes de los filtros presurizados, sedimentadores y lechos de secado de los lodos generados, medidores electromagnéticos de caudal tanto en la entrada como en la salida de la planta, duchas de emergencia y bodega.

Cada planta cuenta con equipo “arsenator” para la medición de arsénico *in situ* y dicha medición la realiza el operador de la planta una vez al día tanto en el agua cruda como en la tratada con el fin de controlar el correcto funcionamiento de los filtros. Además, los operadores cuentan con equipo multiparámetros para la medición de cloro de cloro residual libre, temperatura y pH. Estos datos son registrados en las bitácoras del operador para su respectivo control.

Las plantas de Santa Cecilia de El Amparo y Cristo Rey de Los Chiles cuentan con una filtración adicional debido a la presencia de altas concentraciones de manganeso, en el caso de Santa Cecilia (el promedio es de $400 \mu\text{g/L}$). Para Cristo Rey, se instalaron filtros para remoción de hierro, sin embargo, en los resultados de los muestreos efectuados en el agua cruda no hay presencia de altas concentraciones de este metal en el agua subterránea.

Estos filtros adicionales son a base de dióxido de manganeso el cuál actúa como un catalizador de la reacción redox del hierro, manganeso y arsénico, haciendo que estos metales precipiten en el medio donde son adsorbidos estos elementos.

2. Objetivo.

Determinar la eficiencia de la remoción de arsénico de las seis plantas ubicadas en las zonas de Cañas y Bagaces de Guanacaste y en Los Chiles de Alajuela, así como la eficiencia de remoción de manganeso de la planta de Santa Cecilia de El Amparo.

3. Metodología.

3.1 Método de análisis

La medición del arsénico y manganeso se realizó mediante el espectrómetro de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS por sus siglas en inglés) de acuerdo a los requisitos del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

El límite de detección y cuantificación de este método es de 0,2 µg/L y 0,3 µg/L, respectivamente, con una incertidumbre de $\pm 0,1$ µg/L. Para el caso del manganeso el límite de detección es 2,0 µg/L y el de cuantificación es 3,0 µg/L, la incertidumbre del método de hierro es de $\pm 1,0$ µg/L.

3.2 Muestreo

Las muestras de agua, para la determinación de metales pesados, son recolectadas en recipientes de plástico, de 1 litro de capacidad y preservadas con ácido nítrico grado traza metal al 70%, a un pH menor o igual a 2. Se transportan en frío hasta el laboratorio de acuerdo al PT-019-5.

3.3 Frecuencia de muestreo

El monitoreo de las plantas se realiza mensualmente desde setiembre del 2014 a la fecha de este informe.

3.4 Evaluación de la Calidad del Agua

La evaluación de calidad del agua se realiza contra los requisitos establecidos por el “Reglamento para la Calidad del Agua Potable”, aprobado mediante Decreto Ejecutivo N° 38924-S, que establece como Valor Máximo Admisible (V.M.A) 10 µg/L para arsénico y 500 µg/L para la concentración de manganeso.

3.5 Cálculo del porcentaje de remoción de arsénico y manganeso

Para el cálculo del porcentaje de remoción de arsénico se empleó la siguiente fórmula matemática:

$$\% \text{ Eficiencia} = ((\text{Concentración a la entrada} - \text{Concentración a la salida}) / \text{Concentración a la entrada}) * 100$$

4. Resultados.

Cuadro I. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Bebedero de Cañas de setiembre del 2014 a diciembre del 2016

Fecha de muestreo	N° Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción As	Conductividad (µS/cm)	pH
22/09/2014	07328-14	Antes	17,0	99,4	282	6,55
22/09/2014	07329-14	Después	0,1		279	6,87
22/09/2014	07330-14	Red	0,1		283	7,00
24/11/2014	09112-14	Antes	17,9	64,8	304	6,13
24/11/2014	09113-14	Después	6,3		306	6,20
24/11/2014	09114-14	Red	6,3		310	6,04
16/12/2014	09861-14	Antes	15,9	52,2	283	6,42
16/12/2014	09862-14	Después	7,6		281	6,48
21/01/2015	00458-15	Antes	17,0	52,4	277	6,43
21/01/2015	00459-15	Después	8,1		277	6,58
20/02/2015	01098-15	Antes	15,8	55,1	300	6,12
20/02/2015	01099-15	Después	7,1		300	6,13
24/03/2015	02292-15	Antes	15,9	59,8	287	8,01
24/03/2015	02293-15	Después	6,4		288	7,83
27/04/2015	03196-15	Antes	15,4	63,6	293	6,18
27/04/2015	03197-15	Después	5,6		296	6,35
20/05/2015	03788-15	Antes	14,2	57,8	282	6,43
20/05/2015	03799-15	Después	6,0		282	6,43
01/07/2015	05168-15	Antes	14,1	82,3	268	6,42
01/07/2015	05169-15	Después	2,5		291	6,48
05/08/2015	06039-15	Antes	13,9	45,3	280	6,22
05/08/2015	06040-15	Después	7,6		280	6,49
10/09/2015	07178-15	Antes	13,9	12,9	281	6,57
10/09/2015	07179-15	Después	12,1		286	6,61

Cuadro I. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Bebadero de Cañas de setiembre del 2014 a diciembre del 2016 (continuación)

Fecha de muestreo	N° Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción As	Conductividad (µS/cm)	pH
13/10/2015	09551-15	Antes	12,4	83,9	223	6,56
13/10/2015	09552-15	Después	2,0		228	6,95
13/10/2015	09553-15	Red	2,8		230	6,54
24/11/2015	11482-15	Antes	15,0	85,3	284	6,48
24/11/2015	11483-15	Después	2,2		284	6,50
24/11/2015	11484-15	Red	3,0		292	6,52
28/04/2016	03902-16	Antes	13,1	92,6	272	6,49
28/04/2016	03903-16	Después	6,8		265	6,59
28/04/2016	03904-16	Red	6,8		261	6,43
28/04/2016	03902-16	Antes	13,1	92,6	272	6,49
28/04/2016	03903-16	Después	6,8		265	6,59
28/04/2016	03904-16	Red	6,8		261	6,43
27/06/2016	06633-16	Antes	15,7	39,1	272	6,78
27/06/2016	06634-16	Después	9,6		279	6,72
27/06/2016	06635-16	Red	9,9		271	7,00
29/07/2016	07430-16	Antes	14,2	93,0	261	6,54
29/07/2016	07431-16	Después	1,0		252	6,65
29/07/2016	07432-16	Red	1,4		252	6,55
23/08/2016	08306-16	Después	4,8	-	273	6,86
23/08/2016	08307-16	Red	11,0		273	6,97
29/09/2016	09910-16	Antes	14,1	98,6	273	6,00
29/09/2016	09911-16	Después	N.D.		274	6,69
29/09/2016	09912-16	Red	6,9		272	7,12
11/11/2016	11568-16	Después	6,2	-	187	6,21
11/11/2016	11569-16	Red	6,2		185	6,23
07/12/2016	12833-16	Antes	14,5	42,8	270	6,71
07/12/2016	12834-16	Después	8,3		270	6,93
07/12/2016	12835-16	Red	8,3		269	6,73

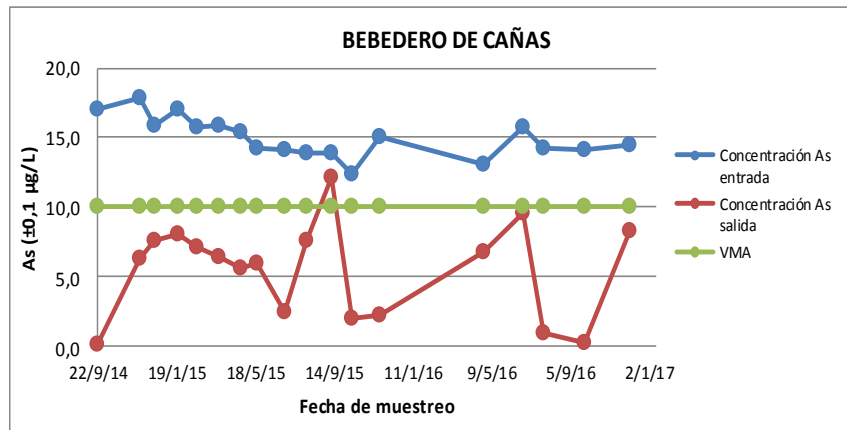


Figura 1. Gráfico de la concentración de arsénico en la entrada y en la salida de la planta de remoción de Bebedero de Cañas.

Esta planta operó correctamente 12 meses. En el mes de setiembre del 2015 el medio adsorbente de esta planta se saturó impidiendo la correcta remoción del arsénico (agua tratada: 12,1 µg/L de As). Debido a la disminución en la eficiencia del medio, AyA optó por enviar camiones cisterna a la población mientras se ejecutaban las acciones correctivas.

En octubre del 2015 la concentración de arsénico del agua de salida disminuyó a 2,0 µg/L, esto se logró removiendo las capas superiores de dióxido de titanio que se encontraban más saturadas y visualmente deterioradas, así como retrolavando los tanques con mayor frecuencia para distribuir de mejor manera el dióxido de titanio dentro de los tanques.

En junio del 2016 el porcentaje de remoción en dicha planta fue de tan solo 39,1 % y la concentración de arsénico a la salida de esta planta se incrementó a casi los 10 µg/L (VMA), indicando que el medio adsorbente estaba saturado.

En agosto del mismo año pero en la red de distribución, se cuantificó 11,0 µg/L de arsénico. Es probable que con los equipos arsenator no se detectara a tiempo la ineficiente remoción de los filtros, lo cual conllevó a que el agua se almacenara en el tanque y llegara a la red de distribución posteriormente. El problema fue corregido ya que en ese mismo muestreo se cuantificó a la salida de la planta 4,8 µg/L.

En diciembre de 2016, la eficiencia de remoción fue de 42,8 %, cuya concentración de arsénico en la salida y en la red fue de 8,3 µg/L.

Cuadro II. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Falconiana de Bagaces de setiembre del 2014 a diciembre del 2016.

Fecha	N° Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
22/09/2014	07331-14	Antes	22,0	99,5	160	6,57
22/09/2014	07332-14	Después	N.D.		160	6,42
22/09/2014	07333-14	Red	N.D.		160	6,69
24/11/2014	09115-14	Antes	24,7	61,1	169	5,89
24/11/2014	09116-14	Después	9,6		169	5,97
24/11/2014	09117-14	Red	9,4		172	6,00
25/11/2014	09125-14	Antes	22,3	56,5	159	6,35
25/11/2014	09126-14	Después	9,7		157	6,34
16/12/2014	09868-14	Después	6,2	-	160	6,63
22/01/2015	00467-15	Antes	21,9	52,5	203	6,62
22/01/2015	00468-15	Después	10,4		152	6,29
19/02/2015	01080-15	Antes	21,4	99,5	177	6,33
19/02/2015	01081-15	Después	N.D.		177	6,50
24/03/2015	02294-15	Antes	21,1	63,5	163	6,71
24/03/2015	02295-15	Después	7,7		163	6,40
28/04/2015	03194-15	Antes	22,0	59,1	163	6,11
28/04/2015	03195-15	Después	9,0		169	6,11
21/05/2015	03792-15	Antes	19,0	68,9	158	6,47
21/05/2015	03793-15	Después	5,9		157	6,30
01/07/2015	05170-15	Antes	22,8	31,6	160	6,30
01/07/2015	05171-15	Después	15,6		160	6,27
05/08/2015	06043-15	Antes	21,3	92,9	166	6,22
05/08/2015	06044-15	Después	1,50		163	6,30
10/09/2015	07182-15	Antes	22,0	70,0	145	6,45
10/09/2015	07183-15	Después	6,6		144	6,47
13/10/2015	09557-15	Antes	20,4	59,8	145	6,47
13/10/2015	09558-15	Después	8,2		147	6,58
13/10/2015	09559-15	Red 1	8,6		148	6,56
24/11/2015	11487-15	Antes	18,9	82,0	144	6,51
24/11/2015	11488-15	Después	3,4		143	6,57
24/11/2015	11486-15	Red	2,4		144	6,44

Cuadro II. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Falconiana de Bagaces de setiembre del 2014 a diciembre del 2016 (continuación).

Fecha	N° Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
28/04/2016	03908-16	Antes	20,5	43,4	142	6,67
28/04/2016	03909-16	Después	11,6		140	6,48
28/04/2016	03910-16	Red	10,7		143	6,48
02/06/2016	05373-16	Antes	22,4	71,0	194	6,54
02/06/2016	05374-16	Después	6,5		284	6,92
21/06/2016	06038-16	Antes	20,4	43,6	164	6,76
21/06/2016	06039-16	Después	11,5		165	6,66
21/06/2016	06040-16	Red	11,7		162	6,64
09/08/2016	07713-16	Antes	23,1	92,6	163	6,56
09/08/2016	07714-16	Después	1,7		161	6,51
09/08/2016	07715-16	Red 1	1,6		161	6,68
23/08/2016	08308-16	Antes	23,3	86,3	165	6,84
23/08/2016	08309-16	Después	3,2		164	6,72
23/08/2016	08310-16	Red 1	3,3		164	6,83
29/09/2016	09907-16	Antes	22,0	63,2	163	6,70
29/09/2016	09908-16	Después	8,1		162	6,60
29/09/2016	09909-16	Red 1	8,1		162	6,52
30/11/2016	12431-16	Antes	21,3	100	158	6,57
30/11/2016	12432-16	Después	N.D.		157	6,77
30/11/2016	12433-16	Red 1	N.D.		157	6,74

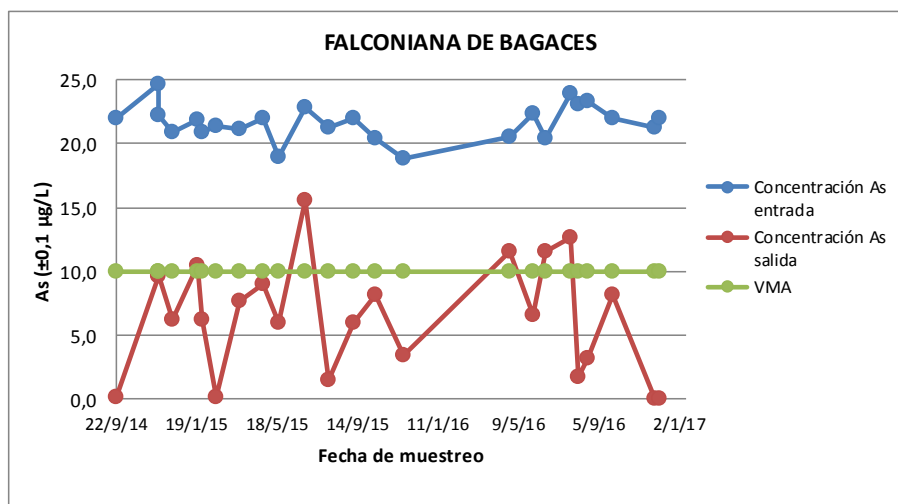


Figura 2. Gráfico de la concentración de arsénico en la entrada y en la salida de la planta de remoción de Falconiana de Bagaces.

La planta de Falconiana operó correctamente los primeros cuatro meses. Para enero del 2015 la concentración de arsénico del agua tratada era 10,4 µg/L. Con los retrolavados realizados en febrero del 2015 se logró disminuir la concentración en el agua de salida. Sin embargo, en los meses posteriores la concentración de arsénico del agua tratada aumentaba a pesar de retrolavar y remover el medio filtrante más deteriorado. En el mes de julio del 2015 sólo se logró remover el 31,6 % de arsénico del agua del pozo y se optó por hacer el cambio completo del dióxido de titanio de los filtros de dicha planta, cuyos resultados se observan en el muestreo del 05/08/2015.

En abril del 2016 el medio adsorbente de esta planta se saturó nuevamente, por lo tanto, se procedió a regenerar nuevamente el medio filtrante. En los resultados del 02 junio del 2016 la concentración de Arsénico fue de 6,5 µg/L después de dicha regeneración. En el muestreo realizado el 21 de junio del 2016, el medio adsorbente se saturó nuevamente cuantificándose 11,7 µg/L en la red de distribución, por lo tanto, no cumple con el VMA.

En setiembre de 2016, la concentración a la salida fue de 8,1 µg/L correspondiente a una eficiencia de 63,2 %, removiendo 13,9 µg/L de los 22,0 µg/L de la entrada.

Cuadro III. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Montenegro y Agua Caliente de Bagaces de setiembre del 2014 a setiembre del 2016.

Fecha	N° Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
22/09/2014	07337-14	Antes	16,0	99,4	*	*
22/09/2014	07338-14	Después	N.D.		*	*
26/11/2014	09108-14	Antes	15,5	88,4	259	6,64
26/11/2014	09109-14	Después	1,8		260	6,23
26/11/2014	09110-14	Red	1,8		259	6,60
21/01/2015	00456-15	Antes	15,5	81,9	232	6,39
21/01/2015	00457-15	Después	2,8		234	6,44
19/02/2015	01078-15	Antes	15,2	72,4	268	6,92
19/02/2015	01079-15	Después	4,2		258	6,58
24/03/2015	02296-15	Antes	14,1	67,4	244	6,84
24/03/2015	02297-15	Después	4,6		247	6,70
28/04/2015	03192-15	Antes	14,8	79,0	252	6,67
28/04/2015	03193-15	Después	3,1		251	6,32
21/05/2015	03790-15	Antes	13,4	67,9	238	6,50
21/05/2015	03791-15	Después	4,3		239	6,40
01/07/2015	05166-15	Antes	15,9	48,4	253	6,30
01/07/2015	05167-15	Después	8,2		241	6,30
05/08/2015	06041-15	Antes	15,2	36,8	256	6,20
05/08/2015	06042-15	Después	9,9		250	6,45
10/09/2015	07180-15	Antes	14,8	12,1	253	6,49
10/09/2015	07181-15	Después	13,2		255	6,52
13/10/2015	09554-15	Antes	14,9	81,9	202	6,64
13/10/2015	09555-15	Después	2,7		199	6,64
13/10/2015	09556-15	Red 1	2,9		200	6,61
24/11/2015	11485-15	Después	3,0	-	263	6,59
24/11/2015	11486-15	Red 1	4,6		259	7,00
28/04/2016	03905-16	Antes	13,3	56,4	193	6,91
28/04/2016	03906-16	Después	5,8		194	6,56
28/04/2016	03907-16	Red	6,9		310	6,71
27/06/2016	06630-16	Antes	15,4	51,3	241	8,07
27/06/2016	06631-16	Después	7,5		244	7,02
27/06/2016	06632-16	Red 1	7,2		245	6,99

Cuadro III. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Montenegro y Agua Caliente de Bagaces de setiembre del 2014 a setiembre del 2016 (continuación).

Fecha	Nº Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
29/07/2016	07433-16	Antes	17,5	75,4	186	7,60
29/07/2016	07434-16	Después	4,3		186	6,50
29/07/2016	07435-16	Red 1	4,3		187	6,69
23/08/2016	08302-16	Antes	15,4	82,5	242	7,20
23/08/2016	08303-16	Después	2,7		242	7,25
23/08/2016	08304-16	Red Mont	2,7		243	7,40
29/09/2016	09913-16	Antes	14,9	76,5	242	6,76
29/09/2016	09914-16	Después	3,5		243	7,20
29/09/2016	09915-16	Red 1	3,5		243	6,82
29/09/2016	09913-16	Antes	14,9	76,5	242	6,76
29/09/2016	09914-16	Después	3,5		243	7,20
29/09/2016	09915-16	Red 1	3,5		243	6,82
11/11/2016	11570-16	Antes	13,6	69,1	169	6,60
11/11/2016	11571-16	Después	4,2		171	6,22
11/11/2016	11572-16	Red 1	4,4		171	6,29
06/12/2016	12718-16	Antes	15,0	68,7	235	6,73
06/12/2016	12719-16	Después	4,7		240	7,02
06/12/2016	12720-16	Red 1	4,8		237	7,13

*Solamente se recolectó la muestra FQ2.

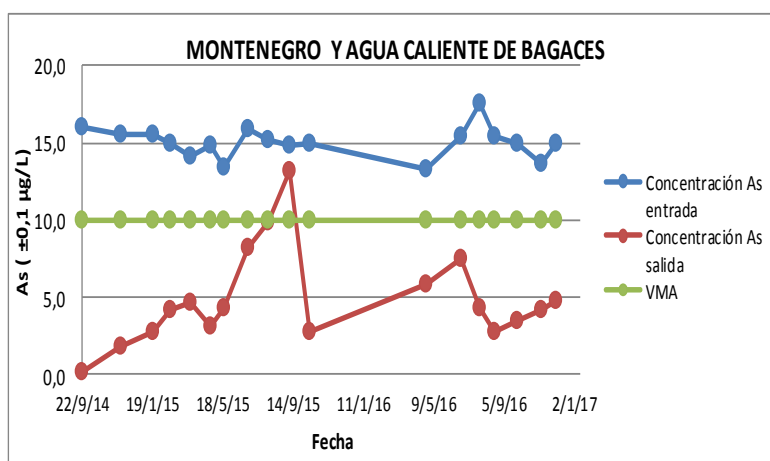


Figura 3. Gráfico de la concentración de arsénico en la entrada y en la salida de la planta de remoción de Montenegro y Agua Caliente de Bagaces.

La planta de Montenegro y Agua Caliente operó correctamente por 11 meses. En el mes de agosto del 2015 el agua tratada alcanzó el V.M.A, en el mes de setiembre lo superó, removiendo sólo un 12 % del arsénico presente. AyA optó por abastecer a la población mediante camiones cisterna. En los meses posteriores se logró disminuir la concentración de arsénico removiendo las capas superiores del medio más deteriorado y realizando retrolavados con mayor frecuencia.

En el muestreo de junio del 2016, la concentración de arsénico en la red de distribución fue de 7,2 µg/L, con una eficiencia de remoción de 51,3 %. De Julio a diciembre de 2016, la eficiencia de remoción estuvo entre 68,7% y 82,5%

Cuadro IV. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Quintas Don Miguel de Bagaces de setiembre del 2014 a setiembre del 2016.

Fecha	N° Identificación	Filtración	Concentración de As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
23/09/14	07334-14	Antes	16,0	99,4	243	6,42
23/09/14	07335-14	Después	N.D.		243	6,45
03/10/2015	07689-14	Antes	16,0	99,4	246	6,60
03/10/2015	07691-14	Después	N.D.		241	6,42
25/11/2014	09118-14	Antes	20,6	92,2	272	6,46
25/11/2014	09119-14	Después	1,6		267	6,11
25/11/2014	09120-14	Red	1,5		275	6,25
22/01/2015	00463-15	Antes	43,6	63,3	274	6,29
22/01/2015	00464-15	Después	16,0		274	6,20
19/02/2015	01082-15	Antes	44,3	65,5	308	6,35
19/02/2015	01083-15	Después	15,3		304	6,42
24/03/2015	02298-15	Antes	41,2	41,5	288	6,80
24/03/2015	02293-15	Después	24,1		284	7,60
28/04/2015	03198-15	Antes	44,9	-	293	6,10
21/05/2015	03794-15	Antes	38,1	-	280	6,50
05/08/2015	06045-15	Antes	45,1	-	298	6,10
10/09/2015	07184-15	Antes	45,0	97,8	299	6,31
10/09/2015	07185-15	Después	1,0		295	6,44
13/10/2015	09560-15	Antes	36,6	95,4	230	6,52
13/10/2015	09561-15	Después	1,7		230	6,37
13/10/2015	09562-15	Red	N.D.		231	6,57

Cuadro IV. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Quintas Don Miguel de Bagaces de setiembre del 2014 a setiembre del 2016 (continuación).

Fecha	N° Identificación	Filtración	Concentración de As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
24/11/2015	11490-15	Antes	18,4	90,2	267	6,40
24/11/2015	11491-15	Después	1,8		264	6,60
24/11/2015	11492-15	Red	1,6		277	6,63
28/04/2016	03911-16	Antes	18,4	15,8	247	6,30
28/04/2016	03912-16	Después	15,5		249	6,39
28/04/2016	03913-16	Red	28,1		280	6,58
26/05/2016	05053-16	Antes	16,8	0	266	6,55
26/05/2016	05054-16	Después	17,0		260	6,60
26/05/2016	05055-16	Red	21,2		258	6,81
21/06/2016	06035-16	Antes	20,6	2,9	252	6,71
21/06/2016	06036-16	Después	20,0		251	6,67
21/06/2016	06037-16	Red	19,9		252	6,88
09/08/2016	07710-16	Antes	24,9	97,2	252	6,59
09/08/2016	07711-16	Después	0,7		252	6,59
09/08/2016	07712-16	Red	0,8		263	6,75
23/08/2016	08299-16	Antes	21,4	97,7	266	6,64
23/08/2016	08300-16	Después	0,5		277	6,89
23/08/2016	08301-16	Red	0,5		263	6,88
29/09/2016	09904-16	Antes	20,1	86,6	248	6,73
29/09/2016	09905-16	Después	2,7		252	6,78
29/09/2016	09906-16	Red	2,8		258	7,31
30/11/2016	12428-16	Antes	16,0	100	248	6,73
30/11/2016	12429-16	Después	N.D.		247	6,98
30/11/2016	12430-16	Red	N.D.		247	6,95
06/12/2016	12721-16	Antes	15,9	100	255	6,70
06/12/2016	12722-16	Después	N.D.		296	7,14
06/12/2016	12723-16	Red	N.D.		261	8,31

*La planta no estaba en operación debido a la saturación del medio filtrante

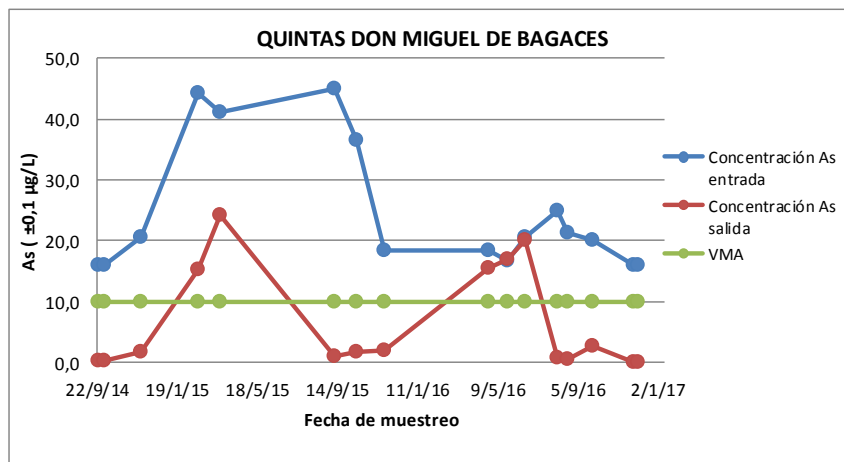


Figura 4. Gráfico de la concentración de arsénico en la entrada y en la salida de la planta de remoción de Quintas Don Miguel de Bagaces.

La planta de Quintas Don Miguel fue la primera en presentar inconvenientes con la remoción de arsénico. En tan sólo 5 meses de operación, el medio filtrante se saturó mucho antes de lo previsto ya que de setiembre del 2014 a enero del 2015 la concentración de arsénico del agua subterránea se incrementó de 20,6 µg/L a 43,6 µg/L.

En los meses posteriores no fue posible disminuir la concentración de arsénico inferior al V.M.A., por lo que se optó por suspender el tratamiento del agua y abastecer a la población con camiones cisterna mientras se buscaban alternativas de remediación. En setiembre del 2015 se reemplazó el medio absorbente de los filtros de dicha planta y se logró reducir la concentración de arsénico por debajo del V.M.A.

Para evitar que suceda la saturación del medio adsorbente antes de lo esperado, se trabaja en el diseño y monitoreo de varias pruebas piloto para la remoción de arsénico por coagulación – filtración, con el fin de realizar un pretratamiento del agua antes de que ingrese por los filtros presurizados.

En los meses de abril y mayo del 2016, la concentración de arsénico en la red de distribución es mayor que a la salida de la planta lo cual es indicativo de la acumulación de este metaloide en la tubería.

La EPA (United States Environmental Protection Agency) en su artículo “Arsenic and your distribution system”, (EPA 816-F07-005, abril del 2007), indica que el aumento de la concentración de arsénico puede ocurrir por la posible presencia de óxidos e hidróxidos de otros metales acumulados en la tubería, los cuales pueden desorber el arsénico que estaba adherido a esta.

En estos 2 meses la eficiencia de remoción fue de 15,8 % y 0 % respectivamente y para el mes de junio de 2016 fue de 2,9 %. Esto cambió radicalmente de agosto a diciembre de 2016 ya que las eficiencias en la remoción mejoraron considerablemente (entre 86,6 % a 100 %) y en los últimos 2 muestreos la concentración de arsénico a la salida de la planta y en la red de distribución fue no detectable.

Cuadro V. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Santa Cecilia de El Amparo de Los Chiles de setiembre del 2014 a diciembre del 2016.

Fecha	N° Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
22/09/2014	07354-14	Antes	15,0	99,4	243	6,43
22/09/2014	07355-14	Después	N.D.		243	6,45
22/09/2014	07336-14	Red	N.D.		245	6,54
26/11/2014	09142-14	Antes	15,1	92,1	230	7,18
26/11/2014	09143-14	Después	1,2		219	7,03
26/11/2014	09144-14	Red	1,3		220	7,10
22/01/2015	00616-15	Después	2,6	*	197	7,03
22/01/2015	00617-15	Red	2,4		198	7,18
20/02/2015	01119-15	Antes	15,6	67,3	226	7,93
20/02/2015	01120-15	Después	5,1		222	7,49
25/03/2015	02318-15	Antes	12,7	80,3	220	7,28
25/03/2015	02319-15	Después	2,5		211	7,69
29/04/2015	03202-15	Antes	14,7	-	219	7,28
21/05/2015	03825-15	Antes	15,5	49,0	194	7,40
21/05/2015	03826-15	Después	7,9		209	7,40
02/07/2015	05188-15	Antes	14,9	46,3	208	7,60
02/07/2015	05189-15	Después	8,0		204	7,20
06/08/2015	06052-15	Antes	14,3	93,7	217	7,47
06/08/2015	06053-15	Después	0,9		212	7,25
11/09/2015	7282-15	Antes	14,9	75,1	245	7,82
11/09/2015	7283-15	Después	3,7		246	7,64

*Debido a retrolavados efectuados o por falta de electricidad en el momento del muestreo, no fue posible tomar la muestra de agua.

Cuadro V. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Santa Cecilia de El Amparo de Los Chiles de setiembre del 2014 a diciembre del 2016 (continuación).

Fecha	Nº Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
14/10/2015	09615-15	Antes	13,1	72,5	230	6,52
14/10/2015	09616-15	Después	3,6		230	6,37
14/10/2015	09617-15	Red	3,3		231	7,39
25/11/2015	11507-15	Antes	14,9	91,3	206	7,93
25/11/2015	11508-15	Después	1,3		202	7,60
25/11/2015	11509-15	Red	1,5		202	7,61
28/01/2016	00622-16	Antes	14,7	93,2	198	7,69
28/01/2016	00623-16	Después	1,0		223	7,38
28/01/2016	00624-16	Red	1,2		234	7,67
27/04/2016	03866-16	Antes	13,7	86,9	174	7,69
27/04/2016	03867-16	Después	1,8		168	7,36
27/04/2016	03868-16	Red	1,7		174	7,52
27/07/2016	07348-16	Antes	16	98,1	159	7,43
27/07/2016	07349-16	Después	0,3		155	7,25
27/07/2016	07350-16	Red	0,5		157	7,41
30/08/2016	08578-16	Antes	13,6	99,3	179	7,38
30/08/2016	08579-16	Después	N.D.		173	6,94
30/08/2016	08580-16	Red	N.D.		175	7,12
29/09/2016	09916-16	Antes	16,5	96,4	176	7,23
29/09/2016	09917-16	Después	0,6		169	6,92
29/09/2016	09918-16	Red	0,5		170	7,14
10/11/2016	11473-16	Antes	13,8	83,3	149	7,08
10/11/2016	11474-16	Después	2,3		147	6,94
10/11/2016	11475-16	Red	2,3		168	7,50
15/12/2016	13278-16	Antes	13,0	83,1	175	7,47
15/12/2016	13279-16	Después	2,2		166	7,48
15/12/2016	13280-16	Red	2,3		168	7,50

*Debido a retrolavados efectuados o por falta de electricidad en el momento del muestreo, no fue posible tomar la muestra de agua.

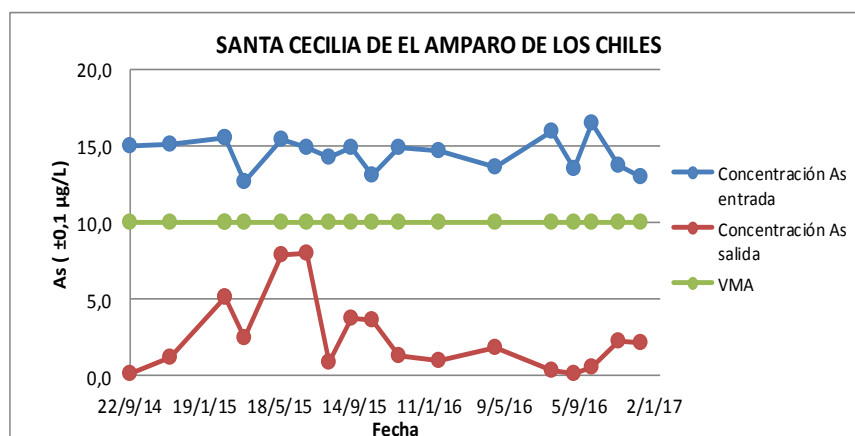


Figura 5. Gráfico de la concentración de arsénico en la entrada y en la salida de la planta de remoción de Santa Cecilia de El Amparo de Los Chiles.

Esta planta no ha presentado inconvenientes con la remoción del arsénico. Las eficiencias de remoción en el año 2016 son superiores a 83,1 %. En el cuadro 6 se muestran los resultados de la concentración de manganeso a la entrada y a la salida ya que adicionalmente esta comunidad presenta problemas por altas concentraciones de este metal.

Cuadro VI. Eficiencia en la remoción de manganeso en la planta de Santa Cecilia de El Amparo de Los Chiles de setiembre del 2014 a diciembre del 2016.

Fecha	N° Identificación	Filtración	Manganeso (µg/L)	Eficiencia de remoción (%)
22/09/2014	07354-14	Antes	441,0	100
22/09/2014	07355-14	Después	D.	
22/09/2014	07336-14	Antes	439,9	100
26/11/2014	09142-14	Red	D.	
20/02/2015	01119-15	Antes	474,4	100
20/02/2015	01120-15	Después	N.D.	
25/03/2015	02318-15	Antes	385,0	98,4
25/03/2015	02319-15	Después	6,0	
21/05/2015	03825-15	Antes	423,4	100
21/05/2015	03826-15	Después	N.D.	

Cuadro VI. Eficiencia en la remoción de Manganeso en la planta de Santa Cecilia de El Amparo de Los Chiles de setiembre del 2014 a diciembre del 2016 (continuación).

Fecha	N° Identificación	Filtración	Manganeso (µg/L)	Eficiencia de remoción (%)
02/07/2015	05188-15	Antes	419,7	100
02/07/2015	05189-15	Después	N.D.	
06/08/2015	06052-15	Antes	417,1	100
06/08/2015	06053-15	Después	N.D.	
11/09/2015	07282-15	Antes	448,8	100
11/09/2015	07283-15	Después	N.D.	
14/10/2015	09615-15	Antes	434,7	99,0
14/10/2015	09616-15	Después	4,3	
25/11/2015	11507-15	Antes	414,9	100
25/11/2015	11508-15	Después	N.D.	
28/01/2016	00622-16	Antes	430,5	99,5
28/01/2016	00623-16	Después	2,0	
28/01/2016	00624-16	Red	3,4	
27/04/2016	03866-16	Antes	386,2	98,3
27/04/2016	03867-16	Después	6,4	
27/04/2016	03868-16	Red	2,0	
27/07/2016	07348-16	Antes	424,9	100
27/07/2016	07349-16	Después	D.	
27/07/2016	07350-16	Red	0,5	
30/08/2016	08578-16	Antes	13,6	100
30/08/2016	08579-16	Después	N.D.	
30/08/2016	08580-16	Red	N.D.	
29/09/2016	09916-16	Antes	449,8	98,7
29/09/2016	09917-16	Después	N.D.	
29/09/2016	09918-16	Red	5,5	
10/11/2016	11473-16	Antes	383,6	100
10/11/2016	11474-16	Después	N.D.	
10/11/2016	11475-16	Red	6,1	
15/12/2016	13278-16	Antes	330,9	100
15/12/2016	13279-16	Después	N.D.	
15/12/2016	13280-16	Red	N.D.	

El prefiltro a base de dióxido de manganeso disminuye la concentración de manganeso con una eficiencia superior al 98,3 % y esto ha sido constante desde que se instaló en esta planta.

Cuadro VII. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Cristo Rey de Los Chiles de setiembre del 2014 a diciembre del 2016.

Fecha	N° Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
22/09/2014	07351-14	Antes	16,0	99,4	-	-
22/09/2014	07352-14	Después	N.D.		176	7,53
22/09/2014	07353-14	Red	N.D.		-	-
26/11/2014	09139-14	Antes	16,8	99,4	172	7,52
26/11/2014	09140-14	Después	N.D.		171	7,21
26/11/2014	09141-14	Red	N.D.		167	7,14
22/01/2015	00614-15	Después	N.D.	-	172	7,16
22/01/2015	00615-15	Red	N.D.		166	7,25
20/02/2015	01121-15	Antes	13,4	97,0	188	7,87
20/02/2015	01122-15	Después	0,4		186	7,49
25/03/2015	02320-15	Antes	16,1	82,6	171	7,88
25/03/2015	02321-15	Después	2,8		174	7,98
29/04/2015	03203-15	Antes	15,7	97,5	171	7,38
29/04/2015	03204-15	Después	0,4		170	6,87
22/05/2015	03827-15	Antes	16,5	90,9	172	8,05
22/05/2015	03828-15	Después	1,5		171	7,44
02/07/2015	670-5190	Antes	17,3	80,9	172	8,07
02/07/2015	722-5191	Después	3,3		167	7,39
11/09/2015	07280-15	Antes	17,8	74,2	147	7,95
11/09/2015	07281-15	Después	4,6		143	7,68
14/10/2015	09618-15	Antes	15,0	68,0	151	7,86
14/10/2015	09619-15	Después	4,8		146	7,54
14/10/2015	09620-15	Red	4,4		148	7,60
25/11/2015	11510-15	Antes	10,7	62,6	171	8,12
25/11/2015	11511-15	Después	4,0		165	7,90
25/11/2015	11512-15	Red	3,9		165	7,93
28/01/2016	00619-16	Antes	16,6	92,8	164	7,66
28/01/2016	00620-16	Después	1,2		174	7,49
28/01/2016	00621-16	Red	2,8		175	7,78

Cuadro VII. Resultados del muestreo y monitoreo de la remoción de arsénico en la planta de Cristo Rey de Los Chiles de setiembre del 2014 a diciembre del 2016 (continuación)

Fecha	N° Identificación	Filtración	Concentración As (µg/L)	% Remoción	Conductividad (µS/cm)	pH
27/04/2016	03869-16	Antes	16,1	96,9	149	8,25
27/04/2016	03870-16	Después	0,3		139	7,68
27/04/2016	03871-16	Red	0,3		144	7,91
27/07/2016	07345-16	Antes	17,7	98,3	154	7,57
27/07/2016	07346-16	Después	0,3		130	7,54
27/07/2016	07347-16	Red	0,5		138	7,84
30/08/2016	08575-16	Antes	14,8	99,3	168	7,55
30/08/2016	08576-16	Después	N.D.		151	7,27
30/08/2016	08577-16	Red	N.D.		153	7,37
09/09/2016	09919-16	Antes	13,9	89,9	146	7,27
09/09/2016	09920-16	Después	1,4		147	7,07
09/09/2016	09921-16	Red	1,4		149	7,18
10/11/2016	11476-16	Antes	13,8	85,5	130	6,89
10/11/2016	11477-16	Después	2,0		124	6,84
10/11/2016	11478-16	Red	2,7		130	7,33
22/12/2016	13384-16	Antes	14,4	93,7	147	7,32
22/12/2016	13385-16	Después	0,9		139	7,23
22/12/2016	13386-16	Red	1,1		140	7,52

*No se recolectó la muestra de agua antes de la filtración.

El muestreo del mes de agosto de 2015 no pudo ser efectuado pues no había bombeo.

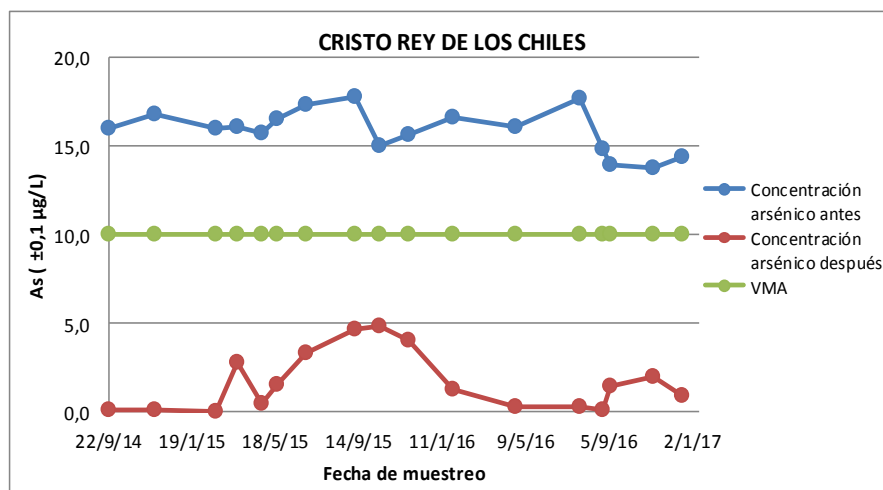


Figura 6. Gráfico de la concentración de arsénico en la entrada y en la salida de la planta de remoción de Cristo Rey de Los Chiles.

A la fecha, esta planta junto con la de Santa Cecilia han sido las más eficaces en la remoción del arsénico. En el último año la eficiencia de remoción estuvo entre 85,5 % y 99,3 %.

5. Conclusiones

- El seguimiento y manejo de las plantas de remoción llevado a cabo durante estos años, ha permitido adquirir experiencia, de forma que en situaciones futuras, se dé una respuesta con mayor facilidad y se acorten los tiempos de solución.
- Es importante recalcar el hecho de que esta experiencia ha permitido mejorar el proceso de retrolavado y activación de los filtros de remoción de arsénico, una vez que estos se saturan y desmejoran su aplicabilidad.
- Se presentaron situaciones donde se alarmó de forma innecesaria a las comunidades de Bebedero, Montenegro y Agua Caliente cuando las plantas no estuvieron removiendo el arsénico y se abasteció mediante camiones cisterna, sin embargo, el problema se solucionó a los pocos días ya que sólo era necesario aumentar las frecuencias de los retrolavados y retirar el material fragmentado.

- El AyA no contaba con mucha experiencia en este tipo de tecnología. La inversión que se efectuó en el diseño y puesta en funcionamiento ha sido muy onerosa. Sin embargo, se requiere de mucho más recurso para su correcto funcionamiento y mantenimiento y así asegurar la entrega de agua a las comunidades con concentraciones de arsénico inferiores al V.M.A.
- Las plantas de remoción de Los Chiles son más eficientes en la remoción del arsénico y la de Santa Cecilia logra remover casi en su totalidad el manganeso del agua. Cabe destacar que estas dos plantas tienen prefiltros a base de MnO_2 , lo cual contribuye a una mayor eficiencia en remoción debido a que el arsénico es removido por adsorción sobre la superficie de hidróxidos Mn, que precipitan en conjunto.

6. Recomendaciones

- Los operadores de estas plantas deben ser capacitados en el uso y verificación de los equipos de campo llamados arsenator. Se recomienda cuantificar la concentración de arsénico a la entrada y salida del tratamiento al menos dos veces al día con estos equipos y comunicar al ingeniero encargado de la zona el resultado de estas mediciones.
- El Ingeniero debe enviar mensualmente al LNA estos resultados. En el caso de que el operador de las plantas indique que alguna medición del agua tratada sea cercana o superior a $10 \mu\text{g/L}$, el profesional debe solicitar oportunamente al LNA un muestreo adicional a la frecuencia establecida por el laboratorio, para verificar si la planta opera correctamente.

