

## **Evaluación Técnico-Económica de un sistema para remoción de arsénico en agua para consumo humano**

Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua  
Subcoordinación de Potabilización

2018

## **Evaluación Técnico-Económica de un sistema para remoción de arsénico en agua para consumo humano**

Subcoordinación de Potabilización

Subcoordinador: Dr. Martín Piña Soberanis

Jefe de proyecto: Dra. Silvia Gelover Santiago

Colaboradores: Ing. Quím. Jesús Linares Ocampo.

Agradecimientos:

Ing. Jesús Vargas Cortés

Sistema de conservación, agua potable y saneamiento de Emiliano Zapata,  
Morelos.

Vianey Vega Ponce

Residencia Profesional. ITS DE LA MONTAÑA. Guerrero.

## Resumen

Se instalaron tres sistemas de lecho fijo para evaluar la capacidad de adsorción del arsénico sobre el material adsorbente NXT®-2. Cada uno de estos se trabajó a un pH previamente seleccionado, de tal manera de poder evaluar el desempeño del medio adsorbente al pH natural del agua tratada pH=7.7, así como a un pH una unidad por debajo de éste, pH= 6.7, y también a pH=6.5, este último valor considerado por la empresa Ep Minerals como el óptimo para el funcionamiento del medio.

Se emplearon columnas de acrílico de 9 cm de diámetro en donde se alojó el medio adsorbente, a través del cual se hizo pasar agua proveniente de un pozo ubicado en el estado de Morelos, que presenta concentraciones de arsénico de aproximadamente 50 µg/L.

Las condiciones establecidas fueron las siguientes: columna 1 (C1) filtro con ajuste de pH a 6.7 unidades (una unidad por debajo del pH natural del agua); columna 2 (C2) filtro que se alimentó con el agua a pH=7.7, su valor natural; columna 3 (C3) filtro que se trabajó a pH=6.5, óptimo para el mejor desempeño del NXT®-2. En todos los sistemas se estableció un tiempo de contacto de 5 minutos.

A solicitud de Ep Minerals, los sistemas se operaron de manera rutinaria durante 21 horas diarias y tres horas de reposo (fuera de operación).

Para el retrolavado de los filtros se aplicaron los siguientes criterios:

- a) incrementos en la concentración de arsénico en el efluente
- b) evidente formación de canales en el medio filtrante, observables a simple vista
- c) incremento en la presión

El filtro denominado C2 (pH de 7.7), fue el primero que se detuvo. Se operó hasta que el efluente rebasó el límite permisible establecido en la Modificación del año 2000 a la NOM-127-SSA1-1994, (en lo sucesivo NOM-127), de 25 µg/L, y su capacidad de adsorción no se

recuperó mediante retrolavado. Este filtro rebasó la concentración de 10 µg/L después de un periodo de 26 días, para un volumen total tratado de 32.76 m<sup>3</sup>, lo que equivale a haber tratado 6,605 volúmenes de lecho vacío.

El filtro C1 fue el segundo en ser detenido (este filtro se operó a pH=6.7). La operación se detuvo cuando rebasó el límite recomendado por las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS), de 10 µg/L, y su capacidad de adsorción no se recuperó mediante retrolavado. El filtro cumplió con el límite durante 158 días, tratando un total de 199 m<sup>3</sup>, que equivalen a 40,137 volúmenes de lecho vacío.

Un tercer filtro, C3 (pH de 6.5), fue instalado con el propósito específico de hacerlo funcionar hasta que el efluente rebasara la concentración de arsénico que establece la NOM-127. El filtro fue instalado un mes después que los sistemas C1y C2, se operó bajo las condiciones específicas que el fabricante recomienda para el mejor desempeño del material NXT®-2, esto es pH= 6.5, con un tiempo de contacto con el medio de 5 minutos. Este filtro trabajó dentro de norma por un periodo de 295 días, para un volumen total tratado de 97.72 m<sup>3</sup>, lo que equivale a 81,430 volúmenes de lecho vacío.

Durante el periodo de trabajo de los filtros se monitorearon diariamente, se midieron: la concentración de arsénico (método semi-cuantitativo, Arsenator®), el pH, la presión de entrada y salida, así como los caudales en cada sistema.

Para validar los valores de las mediciones de arsénico, obtenidos con el Arsenator®, aproximadamente el 10% de las muestras se tomaron por duplicado y una de cada par fue analizada en un laboratorio acreditado ante la entidad mexicana de acreditamiento, ema, mediante espectroscopia de absorción atómica, cuyo límite de cuantificación para arsénico es de 0.001 mg/L.

Una vez alcanzada la saturación del NXT®-2 en la columna 3, se drenó el filtro y un muestreador acreditado por la ema, tomó una muestra del medio adsorbente húmedo. La muestra se envió a un laboratorio acreditado, para realizar el análisis CRIT (prueba de corrosividad, reactividad, inflamabilidad y toxicidad) de acuerdo a la NOM 052 SEMARNAT 2005, con la finalidad de obtener datos para el manejo adecuado del material agotado y los costos asociados al mismo. El resultado del análisis CRIT mostró que no se trata de un residuo peligroso, por lo que, en principio, el medio podrá disponerse en la categoría de no peligroso.

El medio adsorbente mostró un buen desempeño. El tratamiento ofrece ventajas de sencillez en la operación y una baja producción de lodos durante su funcionamiento. Si se cuenta con sistemas automatizados requiere poca supervisión, y sólo requiere la verificación permanente del pH que conviene se mantenga cerca de 6.5 además del control de los periodos de reposo y retrolavados, para poder cumplir con el límite de 10 µg/L en el efluente. La principal desventaja, como con todos los sistemas de adsorción, es que una vez agotado el medio, debe sustituirse totalmente por medio adsorbente nuevo.

## Contenido

Contenido .....	iv
Índice de tablas.....	vi
ANTECEDENTES.....	1
OBJETIVO .....	5
METODOLOGÍA .....	5
Selección de la fuente de abastecimiento.....	5
Instalación de los sistemas piloto.....	6
Operación de los filtros C1 y C2, empleando NXT <sup>®</sup> -2 como medio adsorbente.....	8
Llenado de los filtros. ....	10
Operación de los filtros.....	10
Instalación de filtro C3.....	11
Proceso de filtración.....	12
RESULTADOS. ....	16
Concentraciones de arsénico en el agua cruda. ....	16
Comparativo C1 y C2 .....	17
Discusión de resultados para la columna 2, trabajada a pH natural (pH = 7.7) .....	18
Discusión de resultados para la columna 1, trabajada a pH =6.7 .....	18
Discusión de resultado para la columna 3, trabajada a pH =6.5 .....	23
RESULTADOS DEL ANÁLISIS CRIT PARA LOS RESIDUOS DEL NXT-2 OBTENIDOS DE LA COLUMNA 3. ....	32
CONCLUSIONES .....	36
ANEXO 1 .....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	40
ANEXO 2: RESULTADOS DEL ANÁLISIS CRIT.....	41

## Índice de ilustraciones.

Ilustración 1. Instalación de filtros. ....	8
Ilustración 2. Vista de los filtros C1 y C2 instalados cerca de la fuente de abastecimiento PT. ....	9
Ilustración 3. Operación de filtros cerrados. ....	14
Ilustración 4. Aspecto de la determinación de arsénico empleando el método del Arsenator® ....	15
Ilustración 5. Valores de contenido de arsénico en el agua cruda determinados por Absorción atómica y por el método del Arsenator®.....	16
Ilustración 6. Concentraciones de arsénico de los efluentes de las columnas C1 y C2. Con 78 cm de altura del material filtrante.....	17
Ilustración 7. Resultados para la columna 1 (C1).....	22
Ilustración 8. Resultados obtenidos para el efluente de la columna C3 .....	27
Ilustración 9. Comparativo de concentraciones de arsénico en efluentes de columnas C1, C2 y C3.....	28
Ilustración 10 Toma de muestra de material adsorbente para su análisis CRIT.....	32

## Índice de tablas.

Tabla 1. Acuíferos contaminados con arsénico y flúor. ....	1
Tabla 2. Datos de calidad del agua de fuentes de abastecimiento con arsénico fuera de norma.....	7
Tabla 3. Valores de pH de operación y volúmenes de lecho para las tres columnas. ....	29
Tabla 4. Comparación entre tecnologías para remover arsénico (Calderón et al., 2010) .....	34

## ANTECEDENTES

Según datos de la Comisión Nacional del Agua, los siguientes acuíferos se encuentran contaminados con arsénico (Fuente: Gerencia de Aguas Subterráneas, 2012).

Tabla 1. Acuíferos contaminados con arsénico y flúor.

Estado	Nombre del Acuífero	Situación/Uso
Chihuahua	El Sauz-Encinillas	Arsénico, fluoruros
	Flores Magón-Villa Ahumada	Arsénico, fluoruros
	Chihuahua-Sacramento	Arsénico, fluoruros. Público Urbano
	Meoqui-Delicias	Arsénico, fluoruros, hierro
	Jiménez-Camargo	Arsénico, fluoruros, hierro
	Valle de Juárez	Salinización, arsénico, fluoruros, manganeso. Público Urbano
	Conejos-Médanos	Fluoruros, arsénico, sulfatos. Público Urbano
	Tabalaopa-Aldama	Arsénico, fluoruros. Público Urbano
Coahuila	Principal Región Lagunera (compartido con Durango)	Salinización, arsénico, fluoruros
Durango	Valle del Guadiana	Arsénico, fluoruros, hierro. Público

		Urbano.
	Vicente Guerrero-Poanas	Arsénico, fluoruros. Agua potable
	Nazas	Arsénico. Agua potable
Guanajuato	Río Turbio	Arsénico, fluoruros
	Valle de Acámbaro	Arsénico
	Lago de Cuitzeo	Arsénico
Hidalgo	Huichapan-Tecozautla	Arsénico y fluoruros
	Zimapán	Arsénico. Público Urbano
Jalisco	Toluquilla	Arsénico, fluoruros
	Atemajac	Arsénico, fluoruros, hierro
	Cajitlán	Arsénico
	Chapala	Arsénico, fluoruros
San Luis Potosí	Jaral de Berrios-Villa de Reyes (compartido con Guanajuato)	Arsénico
	Matehuala-Huizache	Arsénico
	Cedral-Matehuala	Arsénico. Público Urbano
	Río Verde	Arsénico
	Vanegas-Catorce	Arsénico, fluoruros. Público Urbano
	Villa de Arista	Fluoruros, arsénico. Público

		Urbano
Sonora	Mesa del Seri-La Victoria	Arsénico, fluoruros
Tlaxcala	Alto Atoyac	Plomo, arsénico. Público Urbano
	Huamantla	Arsénico. Público Urbano
Zacatecas	Jerez	Fluoruros, arsénico
	Jalpa-Juchipila (compartido con Aguascalientes)	Fluoruros, arsénico
	Saín Alto	Fluoruros, arsénico
	El Palmar	Fluoruros, arsénico
	Guadalupe Bañuelos	Fluoruros, arsénico
	Villa Hidalgo	Fluoruros, arsénico
	Pinos	Fluoruros, arsénico

En la Tabla 1 se observa que al menos 9 acuíferos en el país, tienen problemas por la presencia de arsénico solamente.

Actualmente, como tratamiento se aplica la filtración directa en arena utilizando cloruro férrico; método avalado por la EPA como uno de los más efectivos y económicos. Sin embargo, la evaluación de otros sistemas que compitan con la filtración directa es necesaria, para ayudar a los organismos operadores en la selección del tratamiento para eliminar arsénico, ante la cada vez más frecuente aparición de este contaminante en las fuentes de abastecimiento de agua para uso y consumo humano.



La compañía Ep Minerals S de RL de CV solicitó al IMTA una evaluación técnico-económica de su material denominado NXT®-2, elaborado a base de óxidos de hierro y lantano.

## OBJETIVO

El objetivo inicial se planteó como evaluar a escala piloto la eficiencia técnica, así como el costo de inversión y operación, de un sistema de potabilización que utiliza como medio adsorbente el mineral denominado NXT®-2.

Después de un análisis en conjunto con el IMTA y dado que la compañía Ep Minerals consideró que, los costos de tratamiento dependerán de la calidad del agua a tratar (concentración de arsénico, y otros aniones presentes), el objetivo final del trabajo se modificó para realizar una evaluación de la capacidad de adsorción de arsénico en continuo utilizando un agua real contaminada con arsénico.

## METODOLOGÍA

### ***Selección de la fuente de abastecimiento.***

Se buscó en el Estado de Morelos una fuente de abastecimiento cuyo contenido de arsénico estuviese por encima del límite que establece la Modificación del año 2000 a la NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127), por la cercanía con el laboratorio del IMTA y las facilidades que esto implica. De estudios previos realizados por el IMTA, se contaba con información de al menos cuatro fuentes de abastecimiento que podrían ser adecuadas para el estudio (Tabla 2).

Considerando datos disponibles de la presencia de arsénico en agua de estas fuentes, se seleccionó el pozo identificado como “PT”, que ha presentado concentraciones del orden de entre 0.004 y 0.08 mg/L, alcanzando alguna vez valores tan altos como 0.200 mg/L (Vargas 2017).

Se seleccionó esta fuente de abastecimiento para realizar las pruebas piloto, ya que presenta un valor de concentración del contaminante arsénico, del doble de lo que indica la normatividad mexicana vigente, de tal forma que representa una condición adecuada para evaluar el desempeño del NXT®-2. En la Tabla 2, se muestran los datos de calidad del agua para algunos parámetros seleccionados, regulados por la NOM 127, de las cuatro fuentes de

abastecimiento consideradas durante la selección. Estas se identificaron con las siglas: “C”, “PT”, “S” y “UP”.

La concentración de arsénico en las cuatro fuentes consideradas fue similar. Para la selección de la fuente se consideró primeramente aquella con el valor más alto de arsénico, y en segundo lugar aquella en la que se pudieran colocar los sistemas piloto a fin de realizar las pruebas en sitio.

La fuente de abastecimiento PT cumplía ambas condiciones, por lo que fue seleccionada.

Como se observa en la Tabla 2, la fuente de abastecimiento seleccionada prácticamente cumple con la normatividad vigente, excepto en el parámetro de arsénico y coliformes totales.

### ***Instalación de los sistemas piloto***

La instalación se realizó inicialmente al pie del tanque elevado que recibe el agua del pozo PT. Del tanque elevado se derivó una tubería para mantener siempre lleno, mediante control con un flotador, un tanque de 450 L, desde el cuál se suministraba agua a los filtros.

En paralelo se instalaron dos filtros, uno de ellos recibía el agua directamente del tanque de 450 L, es decir, este filtro operaría al pH natural del agua, esto es entre 7.7 y 7.8 unidades. Por acuerdo con Ep Minerals, al segundo filtro se dosificó una disolución de ácido sulfúrico, cuya función sería ajustar el pH a una unidad por debajo del valor que presentara el agua natural o bien 6.5 (el valor que fuese mayor). En este caso, ya que el valor promedio del pH del agua de llegada fue de 7.7, se determinó la cantidad de ácido (a partir de una disolución de 40 ml de ácido concentrado en 20 L de agua), necesaria para mantener a la columna trabajando a un pH de 6.7.

Estos filtros servirían para evaluar la saturación del medio adsorbente (tal que el efluente rebasara el límite de 10 µg/L establecido por la OMS, o 25 µg/L que marca la normatividad mexicana vigente) y para observar el comportamiento de la calidad del agua con respecto a la NOM-127 en cada uno de los filtros. Con este sistema se evaluaron los requerimientos en cuanto a periodicidad de retrolavado, así como el consumo de agua requerido.

Parámetro	C	PT	S	UP
Q, L/s	29.61	4.13	18.99	18.94
Al, mg/L	0.0335	0.0055	<0.005	<0.005
As, mg/L	0.041	0.056	0.042	0.035
Ba, mg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Cd, mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cianuros (como CN) mg/L	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Cloruros (como Cl), mg/L	17.7	9.4	21.7	39.4
Cu, mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Cr total, mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Dureza total, mgCaCO <sub>3</sub> /L	250	369	228	334
Dureza de Ca, mgCaCO <sub>3</sub> /L	191	274	171	250
Dureza de Mg, mgCaCO <sub>3</sub> /L	59	95	57	84
Bicarbonatos, mgCaCO <sub>3</sub> /L	140	282	196	264
Ca, mg/L	58.62	89.2	53.05	77.75
Si, mg/L	23.48	23.57	25.92	29.12
Fenoles o compuestos fenólicos, mg/L	<0.0145	<0.0145	<0.0145	<0.0145
Fe, mg/L	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluoruros (como F), mg/L	0.59	0.5	0.56	0.6
Mn, mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Hg, mg/L	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010
Nitratos (como N), mg/L	1.31	<0.12	2.32	3.36
Nitritos (como N), mg/L	<0.021	<0.021	<0.021	<0.021
Nitrógeno amoniacal (como N), mg/L	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28

Tabla 2. Datos de calidad del agua de fuentes de abastecimiento con arsénico fuera de norma.

pH	7.3	7.23	7.54	7.39
Pb, mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Na, mg/L	13.97	12.96	15.69	20.22
SDT, mg/L	412	594	394	528
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/L	80	150	70	91
SAAM, mg/L	<0.130	0.132	<0.130	<0.130
Zn, mg/L	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Color verdadero, UC PtCo	<2	<2	<2	<2
Turbiedad, UTN	<0.05	0.6	<0.05	<0.05
Coliformes Totales, NMP/100 ml*	ND	4	ND	ND
Coliformes Fecales, NMP/100 ml*	ND	ND	ND	ND



Ilustración 1. Instalación de filtros.

***Operación de los filtros C1 y C2, empleando NXT<sup>®</sup>-2 como medio adsorbente.***

Inicialmente se instalaron dos sistemas dinámicos o de tratamiento en cama fija, que por facilidad serán llamados en este informe filtros C1 y C2, Ilustración 1, con cantidades similares del material adsorbente NXT<sup>®</sup>-2 en cada uno de ellos, aproximadamente 3.52 Kg, con una altura de la cama de medio de 78 cm, cerca del pozo denominado PT, en el estado de Morelos. Los filtros fueron sometidos a un retrolavado inicial para retirar los finos.

Se llamó filtro 1 o Columna 1 (C1), a la columna a la que se estaría adicionando ácido con el fin de ajustar el pH, aproximadamente una unidad por debajo del pH natural del agua. Se llamó Columna 2 (C2) a la columna que serviría de control, ya que esta columna se estaría trabajando todo el tiempo al pH natural del agua, con un valor cercano a 7.7 unidades de pH.

El caudal para ambas columnas se estableció en 1L/min, lo que equivale a una tasa de filtración de  $9.4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ .



Ilustración 2. Vista de los filtros C1 y C2 instalados cerca de la fuente de abastecimiento PT.

El procedimiento descrito a continuación, corresponde a la operación de cada uno de los filtros C1 y C2, excepto cuando se indique lo contrario.

**Llenado de los filtros.** Para el llenado de las columnas se preparó una suspensión con el medio y se vertió poco a poco hasta trasvasar todo el material a utilizar, se eligió este método, ya que el material adsorbente puede sufrir fracturas durante el empacado de la columna, si este se realiza en seco.

### ***Operación de los filtros.***

**Filtro C1.** El pH del influente se ajustó lo más cerca posible de 6.7, para ello se empleó una dilución al 0.2% de ácido sulfúrico (40 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado en 20 L de agua), la cual se dosificó en la corriente de agua de entrada a la columna utilizando una bomba peristáltica a razón de 25 ml/min.

**Filtro C2.** Este filtro se alimentó con el agua proveniente del pozo a su pH natural. El pH del agua del pozo varió entre pH 7.8 y 7.6.

El caudal de operación se ajustó a 1L/min para obtener un tiempo de contacto de 5 minutos, teniendo una tasa de filtración de aproximadamente 9.4 m<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup> h. El flujo del agua de alimentación fue en forma descendente.

Los filtros se instalaron de tal forma que cada uno de ellos era alimentado, mediante una bomba peristáltica, por líneas independientes desde un tinaco que se llenaba con agua proveniente del pozo PT. Datos obtenidos en 2015 por el IMTA indicaban la presencia de arsénico en el agua de este pozo a concentraciones de, al menos, 50 µg/L (ver Tabla 2, que contiene los datos de calidad del agua).

### **Instalación de filtro C3.**

**Filtro C3.** Este filtro se instaló aproximadamente un mes después que los filtros C1 y C2, con una menor cantidad de material adsorbente pero operó con el mismo tiempo de contacto de 5 minutos. Su objetivo fue lograr la saturación al punto en que el efluente rebasara los límites de las guías de la OMS y de la norma NOM-127 Su objetivo fue lograr la saturación al punto en que el efluente rebasara los límites de las guías de la OMS y de la NOM-127.

Ep Minerals solicitó que se trabajase al pH de 6.5, referido como el óptimo para el proceso de adsorción, y manteniendo un tiempo de contacto de 5 minutos, al igual que los filtros C1 y C2, para ello se instaló una columna de acrílico, de 9 cm de diámetro, en la que se colocó una cantidad del material adsorbente NXT®-2 suficiente para tener un altura aproximada de 18 cm (0.865 Kg = 1.2 L). Esta columna se trabajó a un caudal nominal a 0.250 L/min, con lo que se mantuvo un tiempo de contacto aproximado de 5 minutos y una tasa de filtración de 2.36 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h. Se acordó con los representantes de Ep Minerals que este filtro se mantendría en operación hasta que el efluente rebasara el límite de la norma mexicana de 25 µg/L, dado que el volumen de agua requerido para el tratamiento sería menor, en comparación con el volumen demandado por las columnas C1 y C2.

El pH del influente se modificó, mediante la adición de ácido sulfúrico diluido a la corriente de agua cruda, buscando tener un valor de pH=6.5, el cual se considera adecuado para un óptimo desempeño del medio adsorbente (referencia de Ep Minerals).

La columna C3 inició su operación el día 11 de octubre de 2017 y se mantuvo trabajando de manera ininterrumpida, es decir trabajando todos los días, sólo con un descanso de tres horas diarias, durante 71 días, hasta el 21 de diciembre del mismo año, en que se detuvo 8 días, por el cierre del año. La prueba se retomó a partir del 3 de enero de 2018 y se mantuvo

operando hasta el día 21 de septiembre de 2018, con algunas interrupciones debidas a la falta de agua. Durante este periodo se tomaron muestras, periódicamente, del efluente de la columna, en donde se verificó el pH y la concentración remanente de arsénico. También diariamente se registraron el caudal, la lectura del totalizador y las presiones a la entrada y salida del filtro.

### ***Proceso de filtración.***

El proceso de filtración consistió en hacer pasar el agua problema a través del medio adsorbente durante un periodo de 21 h diarias y se interrumpía durante tres horas, a solicitud de Ep Minerals. La compañía informó que, de acuerdo a sus experiencias previas, trabajar de esta manera prolonga la vida de operación del medio hasta un 30%. Esta verificación quedó fuera de los objetivos del presente estudio.

### **Retrolavado de filtros.**

Para el retrolavado se empleó agua cruda.

Los criterios para la aplicación de los retrolavados fueron:

- incrementos en la concentración de arsénico en el efluente
- evidente formación de canales en el medio adsorbente, observables a simple vista
- incremento en la presión

La tasa de retrolavado sugerida por Ep Minerals fue de 22 m/h. En la práctica tasas de retrolavado de 15.7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h y hasta 37.7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h fueron trabajadas y resultaron efectivas. De acuerdo a la experiencia que se tuvo durante esta evaluación, los retrolavados se requirieron de entre 6 a 10 semanas.

**Monitoreo de los filtros.** Se inició la prueba monitoreando la concentración de arsénico en el agua cruda y en el efluente de cada columna, así como el pH. Los filtros C1 y C2 tuvieron que ser trasladados a las instalaciones del IMTA, después de 20 días de trabajo, debido a que las instalaciones en donde se encontraba sufrieron algunos daños a consecuencia del

sismo del 19 de septiembre de 2017, por lo que a partir de ese momento el agua de alimentación de los filtros fue trasladada desde el pozo PT, mediante pipas, hasta el IMTA.

Es necesario aclarar que durante los primeros 31 días de experimentación se trabajó con filtros abiertos, por lo que se monitoreaba la pérdida de carga hidráulica midiendo la columna de agua sobre el lecho filtrante, la cual es necesaria para mantener el caudal en cada columna. El caudal se fijó en 1 L/min, pues de esta manera se tenía un tiempo de residencia hidráulica de aproximadamente 5 minutos. Después de 5 semanas, se tomó la decisión, de común acuerdo con el personal de Ep Minerals, de trabajar los filtros cerrados, a presión, Ilustración 3 para mantener un mayor control de la operación y para descartar que la formación de una película delgada de un material con aspecto de arcilla, que se observaba en la parte superior del material adsorbente, se debiera a contaminación externa de las columnas

A la entrada y salida de cada columna se instalaron manómetros, para visualizar las presiones. Operando los filtros cerrados a presión se redujo considerablemente la frecuencia de retrolavados y se controló mejor su operación, ya que los caudales de entrada se mantenían constantes sin la necesidad de regular manualmente las velocidades en las bombas peristálticas ni manipular las válvulas de control es decir, dado que la pérdida de carga hidráulica en los sistemas abiertos se manifestaba con el incremento de la columna de agua sobre los medios adsorbente, lo que obligaba a realizar retrolavados más frecuentes, por lo que a partir de que se cerraron las columnas se requirió menor frecuencia de retrolavado y, por ello, menor cantidad de agua para su limpieza.

Las concentraciones de arsénico fueron determinadas mediante métodos rápidos, empleando el sistema Arsenator® de Palintest.



Ilustración 3. Operación de filtros cerrados.

Las concentraciones de arsénico fueron determinadas mediante métodos rápidos, empleando el sistema Arsenator® de Palintest. Aproximadamente un 10% de las muestras se estuvieron enviando periódicamente a un laboratorio acreditado ante la entidad mexicana de acreditamiento (ema), para verificar los datos obtenidos con el Arsenator®, mediante la determinación de arsénico por absorción atómica que tiene un límite de cuantificación de 0.0010 mg/L.

El método del Arsenator® es un método colorimétrico basado en el paso de las formas disueltas de arsénico presentes en el agua, a gas arsina. El gas es retenido en un filtro (tira de papel impregnado con bromuro mercúrico), que desarrolla color al reaccionar las especies y cuya intensidad es directamente proporcional a la concentración de arsénico en el agua (Ilustración 4); la intensidad es determinada mediante un fotómetro. Estudios previos desarrollados en el IMTA (no incluidos aquí), mostraron que el límite de cuantificación de este sistema es de 10 µg/L, por lo que cualquier valor menor que este límite, que aparezca

en este informe, se tendrá que interpretar simplemente como menor de 10 µg/L. Para efecto de las gráficas, se han incluido los valores tal y como se leyeron del Arsenator<sup>®</sup>.



Ilustración 4. Aspecto de la determinación de arsénico empleando el método del Arsenator<sup>®</sup>

## RESULTADOS.

### **Concentraciones de arsénico en el agua cruda.**

Con respecto a la concentración de arsénico en el agua cruda, la Ilustración 5 muestra los valores medidos con el Arsenator® y mediante absorción atómica. Se observa que la concentración puntual de arsénico en el agua cruda mostró cierta variabilidad. Cuando la concentración en el influente se incrementaba, se observaban también ciertos incrementos en los valores de arsénico medidos en el efluente. Y cuando la concentración en el agua cruda estaba por debajo de la media, la concentración en el efluente era un poco menor.

En la Ilustración 5 se muestran valores cuantificados por ambos métodos para muestras del agua de entrada a los filtros. El valor promedio determinado por el método del Arsenator® fue de 56 µg/L, en tanto que el valor promedio obtenido por absorción atómica fue de 53 µg/L.

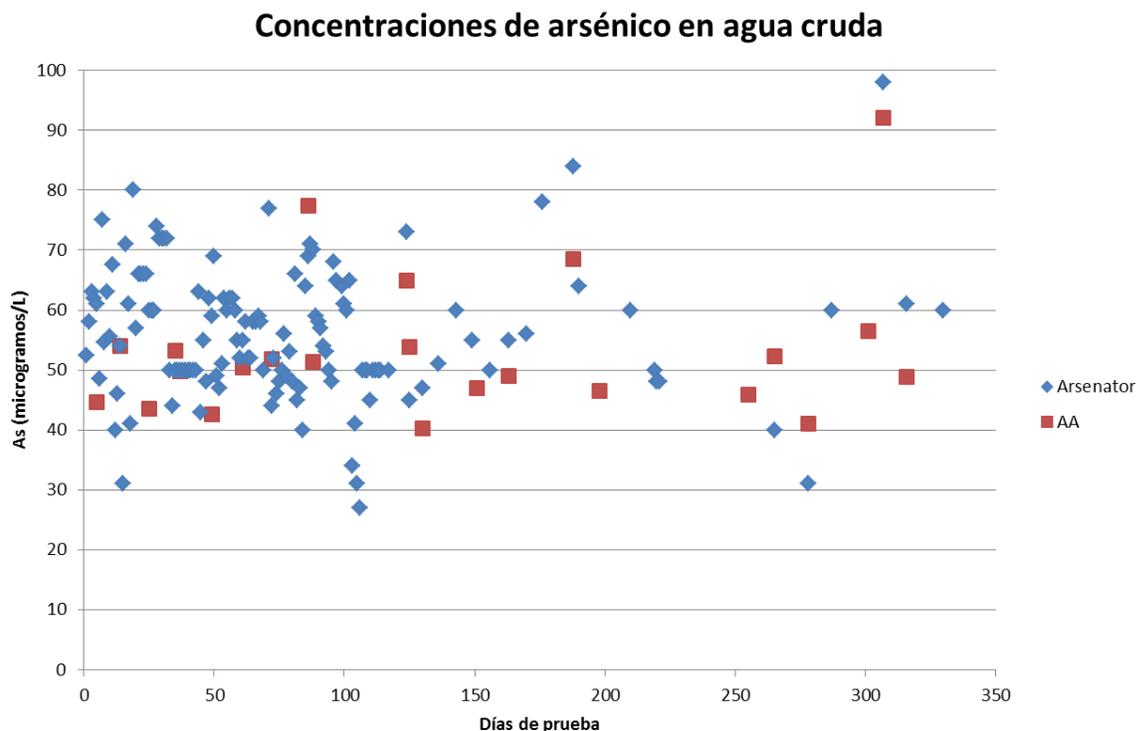


Ilustración 5. Valores de contenido de arsénico en el agua cruda determinados por Absorción atómica y por el método del Arsenator®.

## Comparativo C1 y C2

En la **Ilustración 6** se muestran las concentraciones de arsénico obtenidas en los efluentes de las columnas C1 y C2. Para simplificar la gráfica, se ha indicado sólo el valor promedio de la concentración de arsénico en el agua cruda (56.35 µg/L), valor que es más del doble del límite máximo permisible que establece la normatividad mexicana vigente (25 µg/L).

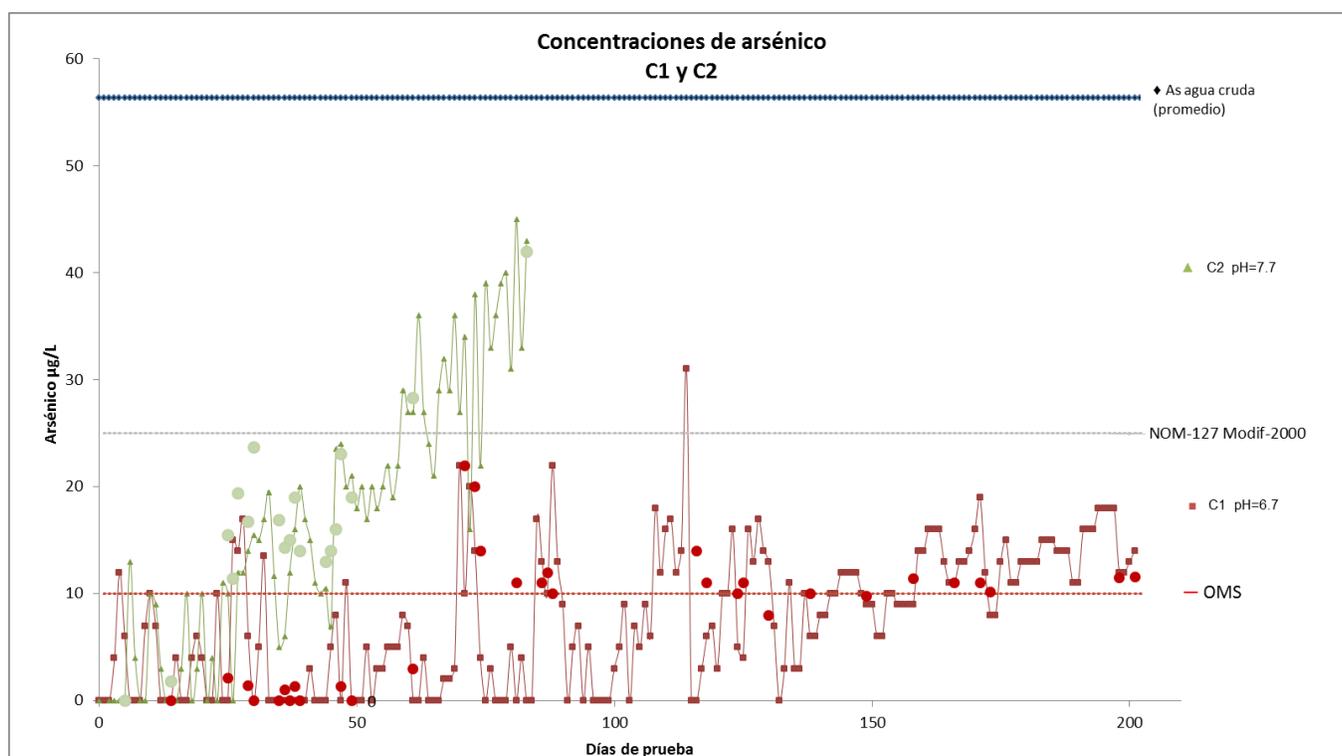


Ilustración 6. Concentraciones de arsénico de los efluentes de las columnas C1 y C2. Con 78 cm de altura del material filtrante.

Los puntos verdes y rojos (grandes) corresponden a valores obtenidos mediante AA.

En esta gráfica de la Ilustración 6 se puede observar el efecto de modificar el pH en una unidad. La comparación es entre columnas con la misma cantidad de medio adsorbente, trabajadas a condiciones semejantes de caudal y, por ello, de tiempo de contacto (aproximadamente 5 minutos). Los resultados corresponden al efluente de una columna (C2)

a la que se alimentó agua a su pH natural que fue 7.7 y para el sistema en que el pH se ajustó a 6.7 aproximadamente, (C1) empleando una disolución de ácido sulfúrico diluido.

En la misma Ilustración 6 también se han mostrado los resultados para la concentración de arsénico obtenidos mediante absorción atómica para ambas columnas (se han ilustrado como puntos más grandes), y es evidente que aunque los valores puntuales pueden mostrar diferencias, las tendencias obtenidas son equivalentes, lo que da validez al seguimiento realizado con el Arsenator®.

### ***Discusión de resultados para la columna 2, trabajada a pH natural (pH = 7.7)***

Si las condiciones de pH no son favorables para el proceso, como sucedió en este caso, en el que el pH natural del agua fue de 7.7, el medio adsorbente se satura pronto. Cuando se empleó el NXT®-2 para remover arsénico de agua sin modificar su pH natural (C2), el sistema rebasó el límite de 25 µg/L, establecido por la NOM-127, después de 58 días, tiempo en el que se trató un volumen de 73 metros cúbicos, equivalente a 14,734 volúmenes de lecho vacío).

### ***Discusión de resultados para la columna 1, trabajada a pH =6.7***

Para la columna en que se ajustó el pH a 6.7, se observa que el límite que establecen las guías de la OMS se rebasó durante varios momentos de la prueba. Cada uno de estos eventos es discutido a continuación.

Días 27-29. En esos momentos aún se trabajaba con las columnas abiertas. El pH se encontraba controlado, por lo que al observar consistentemente valores por arriba de 10 µg/L, se procedió a realizar un retrolavado, lo que permitió la recuperación de la capacidad de adsorción de arsénico, ya que posterior al retrolavado se obtuvieron valores por debajo de

los 10 µg/L, durante aproximadamente 40 días más. Un periodo tan amplio de estabilidad del sistema es una ventaja relevante del uso de este material, ya que disminuye los requerimientos de supervisión, de tiempo y energía dedicados a los retrolavados.

Días 71-74. En esa ocasión, el incremento en la concentración de arsénico en el efluente se correlacionó con desajustes en el control del pH, ya que se observó que la garrafa desde la cual se alimentaba el ácido mostraba una menor disminución de su volumen, es decir que probablemente durante el periodo no monitoreado (horas de la noche), se dosificó una menor cantidad de ácido, teniendo como consecuencia que el pH en el sistema se incrementara; esto sucedió para el periodo de trabajo entre los días 71 y 74, de acuerdo a registro en bitácoras.

Los intentos por regular la dosificación de ácido no fructificaban, lo que se ve reflejado en la concentración de arsénico en el efluente durante esos días, así como en algunos de los valores obtenidos para el pH del efluente, que registro valores de 7.6 y 7.43 como se muestra en la gráfica. Esto ocasionó que la concentración de arsénico en el efluente llegara a alcanzar los 22 µg/L (Ilustración 6). Este punto es de importante consideración, ya que indica que durante la operación de este tipo de sistemas se debe vigilar el pH en el agua de alimentación, tanto en el sistema de dosificación del ácido como en la medición del pH, para evitar que se fugue arsénico en el agua tratada.

Posteriormente, los días 85 a 88 se presentaron nuevamente concentraciones por arriba de los 10 µg/L. Durante este periodo no se observó ninguna anomalía en la dosificación de ácido, el pH medido mostraba valores cercanos al esperado (6.5), por lo que se realizó un retrolavado, al cumplirse la condición a) de las premisas acordadas para el retrolavado. Después del retrolavado la concentración tuvo todavía un par de valores altos antes de volver a estar por debajo de los 10 µg/L. En general, después de los retrolavados podía observarse un incremento en la concentración de arsénico en el efluente. Debido a la configuración de los materiales acomodados en el filtro, se tenía un espacio muerto en la parte más baja de la columna, por lo que cierto volumen de agua cruda, empleada en el retrolavado quedaba atrapada en esa área, fuera de la zona de influencia del medio

adsorbente, por lo que no se puede descartar que, al menos una parte del retardo observado en la recuperación de los niveles de arsénico, que cumplan con la norma, en el efluente de la columna, se deba a la “salida” del agua sin tratar atrapada en la porción más baja de la columna.

El volumen de la cámara en la parte inferior era pequeño comparado con el volumen de lecho vacío, por lo que se recomienda verificar, en los sistemas reales, el tiempo que debe esperarse para la recuperación del estado estacionario que conduzca a un efluente que cumpla con la norma.

De este comportamiento se dedujo que, de aplicarse este material al control de arsénico en agua que contenga al metaloide y se quiera mantener una concentración de arsénico en el agua tratada menor de 10 microgramos por litro, será muy importante mantener el pH lo más aproximado a 6.5 que sea posible, o ligeramente debajo de este valor para evitar la necesidad de ajustar el pH nuevamente. Si el pH se eleva existe la posibilidad de que se rebase esta concentración durante la operación del sistema.

La normatividad mexicana marca que el pH deberá estar en el intervalo de 6.5 a 8.5, para el agua potable, por lo que se recomienda mantener el pH cerca del límite inferior, para cumplir con este parámetro y mantener condiciones favorables para la adsorción del arsénico en el NXT®-2. Es importante mencionar que el pH del efluente (agua tratada) mantiene el mismo valor del pH del influente, por lo que, a fin de no tener que ajustar el pH posteriormente al proceso de adsorción, es aconsejable mantenerlo lo más cerca posible a 6.5.

También se recomienda vigilar las concentraciones de arsénico en el efluente después de realizar retrolavados, ya que es posible que se presenten concentraciones altas, hasta por un periodo de 48 horas posteriores al procedimiento. Es importante comentar que el agua que no cumpla con la norma puede colectarse y reinyectarse en el influente, lo mismo que con el agua proveniente de los retrolavados, misma que podrá reincorporarse a la entrada del sistema en una proporción de 5 a 10% del volumen de alimentación.

En la Ilustración 7 se muestran los valores obtenidos para la concentración de arsénico, así como los de pH para la C1. Se mantuvo un ritmo de retrolavados periódico, como se observa en la misma gráfica (las líneas verticales azules marcan los momentos de los retrolavados).

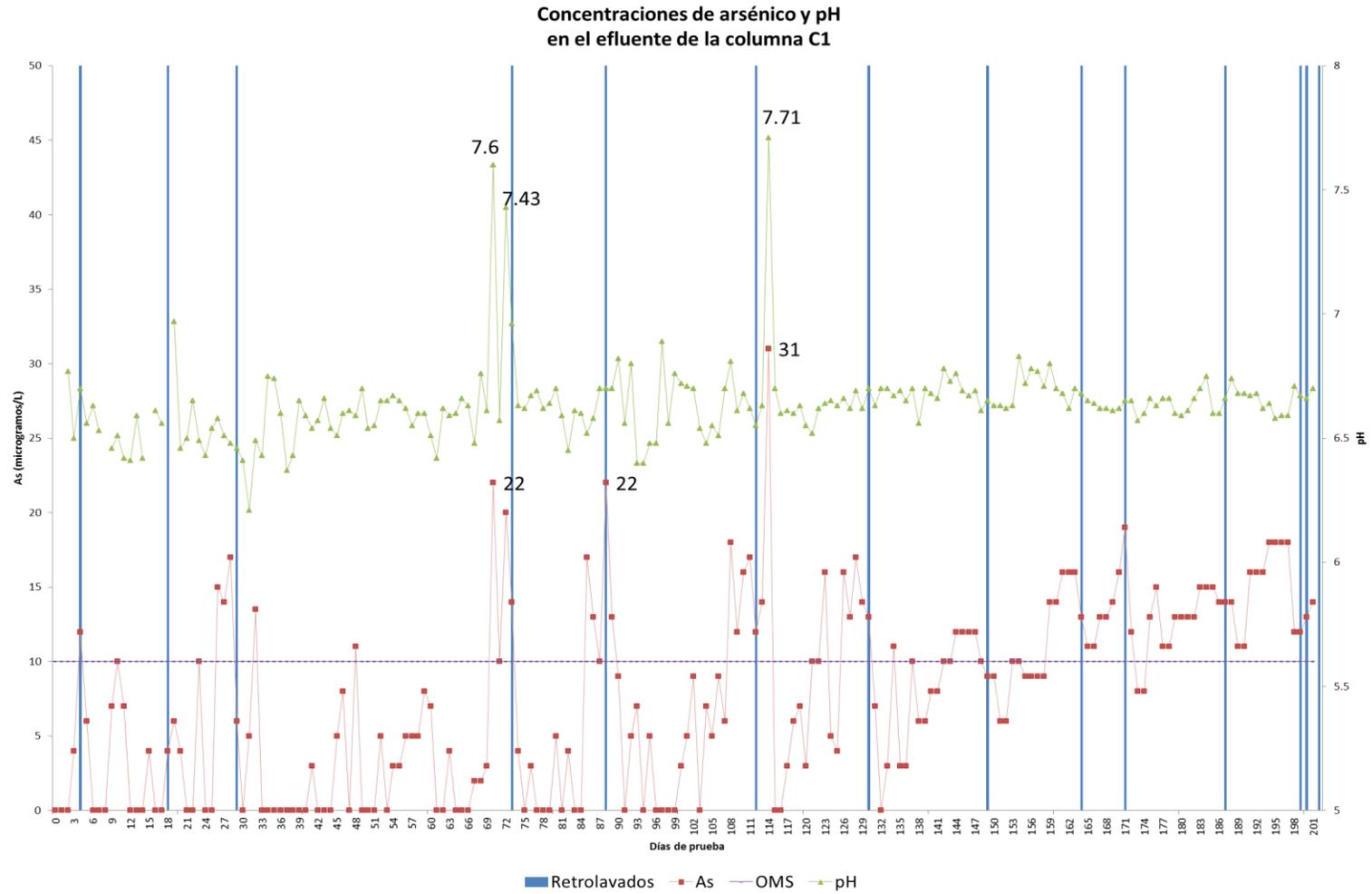


Ilustración 7. Resultados para la columna 1 (C1).

Los retrolavados permitieron recuperar la capacidad de adsorción del NXT®-2 en ocho ocasiones durante la evaluación realizada a pH de 6.7 (C1), es decir que aunque la concentración de arsénico en el efluente había rebasado los 10 microgramos por litro, después del retrolavado, dicha concentración volvió a estar por debajo de este valor. Cabe comentar que al iniciar la prueba, debido a que los filtros estaban abiertos éstos requerían retrolavados más frecuentes, y las carreras de filtración eran muy cortas. Una vez que se cerraron, se redujo significativamente la frecuencia de los retrolavados.

En la Ilustración 7 se observa que después de 158 días, se rebasó sistemáticamente el límite que establecen las guías de la OMS, de 10 µg/L para arsénico, periodo en el que se trató un total de 199 m<sup>3</sup>, que equivalen a 40,137 volúmenes de lecho vacío.

Las concentraciones de arsénico después de esa fecha no disminuyeron a pesar de los retrolavados realizados (seis en total), por lo que la prueba se detuvo después de 202 días, cuando se tuvo la plena seguridad de que se había rebasado el límite de 10 µg/L de arsénico en agua previamente establecido; momento en que la concentración en el efluente era de 13 µg/L medida con Arsenator® (12 µg/L determinada por absorción atómica).

### ***Discusión de resultado para la columna 3, trabajada a pH =6.5***

Los resultados de la remoción de arsénico para esta columna se muestran en la Ilustración 8. Se observa que después de iniciada la prueba, la concentración de arsénico se mantuvo por debajo de los 10 µg/L durante poco más de 50 días. Por cuatro días consecutivos (puntos 53 a 56) la concentración medida en el efluente de la Columna 3 fue mayor de 10 µg/L. Al observar que los valores obtenidos eran consistentemente mayores a 10 µg/L, se determinó que era el momento de realizar un retrolavado. Dicho de otra manera, para este sistema, fue hasta después de 52 días de trabajo continuo que se rebasó el límite establecido de 10 µg/L,

por lo que se realizó el primer retrolavado. En la gráfica, cada retrolavado se indica mediante una línea vertical de color rojo.

Tuvieron que pasar 8 semanas de trabajo continuo para que se requiriera el primer retrolavado. Esta característica muestra que el medio adsorbente mantiene una alta capacidad de adsorción de arsénico por periodos prolongados de tiempo sin la necesidad de retrolavado, pero si requiere un adecuado control del caudal (flujo) para obtener el tiempo de contacto establecido, y además un monitoreo del pH, es decir, vigilancia en la dosificación del ácido, para evitar que baje o suba el valor del pH preestablecido.

En cuando al consumo de agua de los retrolavados, la ventaja que ofrece este material adsorbente, es que el agua de los retrolavados, una vez que se ha separado de los sólidos suspendidos -mediante un proceso de sedimentación, puede ser reincorporada a la entrada del sistema sin producir afectación al proceso de adsorción ni a la hidráulica del mismo, ya que no se generaron pérdidas de carga hidráulica significativas, aún con el contenido remanente de sólidos suspendidos en el agua después de la sedimentación. Como ya se mencionó, la proporción para reincorporación de agua de retrolavado al agua de llegada se recomienda que sea de 5 a 10 %.

Una vez que se retrolavó, el sistema recuperó los niveles de arsénico en el efluente inferiores a 10 microgramos por litro.

Se observó que después de los retrolavados el sistema tendía a tardar un poco en recuperarse. Parte de ese comportamiento se puede atribuir al volumen de agua cruda que mantenía la columna en su bajo dren, ya que para los retrolavados se utilizó agua cruda, y una vez finalizado el proceso del retrolavado, ésta se mezcló con el agua tratada mermando así la calidad de la primera parte de dicha agua, otra posible razón de dicho fenómeno es que debido a que la adsorción es un fenómeno de superficie, el material adsorbente requiera de un tiempo para recuperar nuevamente el equilibrio con el soluto. Se recomienda que después de cada retrolavado se verifique que el efluente esté cumpliendo con la norma, y en caso de no ser así, se colecte el agua en un recipiente adecuado para incorporarlo,

posteriormente, junto con el agua recuperada del retrolavado, al agua de llegada. Esto no será necesario si, como es usual, se tiene un tren de unidades, en donde el efluente de una unidad pase a la siguiente, ya que en la unidad posterior puede adsorberse el arsénico no retenido. Será importante, en todo caso, vigilar que el agua tratada, efluente final del sistema de tratamiento esté cumpliendo con el límite establecido.

La columna C3 operada a un pH controlado a 6.5, mostró un buen desempeño del adsorbente NXT®-2, que después de 71 días de operación continua, durante 2017, permitía obtener agua con valores inferiores a los 10 µg/L, cumpliendo así con los niveles permisibles de la NOM-127 y los criterios de la OMS. La prueba se continuó en enero del 2018 (después de 10 días naturales de descanso, asociado al cierre del año), partir del 3 de enero (día 72 de prueba). El sistema se mantuvo operando proporcionando agua con un contenido de arsénico residual por debajo de 10 µg/L, sumando un total de 210 días. Durante este periodo de trabajo, se presentaron algunas interrupciones debido a la falta de agua, en los días 103 (durante 3 días), 143 (tres días), y 154 (por 7 días). También por falta de agua se presentaron paros en los días 222 y 225 de prueba, durante 4 días cada uno. En la Ilustración 8 se han representado los resultados de manera continua, sin indicar las interrupciones.

Hasta diciembre de 2018, la NOM-127 se encuentra vigente y marca como límite permisible 25 µg/L de arsénico en el agua para uso y consumo humano, por lo que se puede establecer que el periodo de operación de la columna C3 utilizando NXT®-2 como medio adsorbente cumple con dicho límite hasta el día 295 de operación, produciendo un volumen de agua tratada de 97.72 m<sup>3</sup>, lo que representa un valor de 81,430 volúmenes de lecho vacío.

Una observación que vale la pena comentar, es que los valores para la concentración de arsénico, obtenidos por absorción atómica (AA), para las muestras de los días finales fueron ligeramente menores a los obtenidos por el Arsenator®, y están un poco abajo del límite establecido en la NOM.127, como se muestra en la Ilustración 9.

Los valores medidos por AA para estas muestras fueron 22 µg/L, apenas 3 µg/l por abajo del límite permisible establecido en la NOM-127. Si se observa la pendiente de la curva de

tendencia se notará que era cuestión de, quizá, cinco días más para que los valores medidos por absorción atómica alcanzasen el límite de la NOM-127. La diferencia no es significativa, por lo que no cambian las conclusiones. La prueba se detuvo cuando los valores medidos con el Arsenator® estaban en 30 µg/L, claramente arriba de límite permisible.

Concentración de arsénico y pH en el efluente de la columna C3 (pH=6.5)

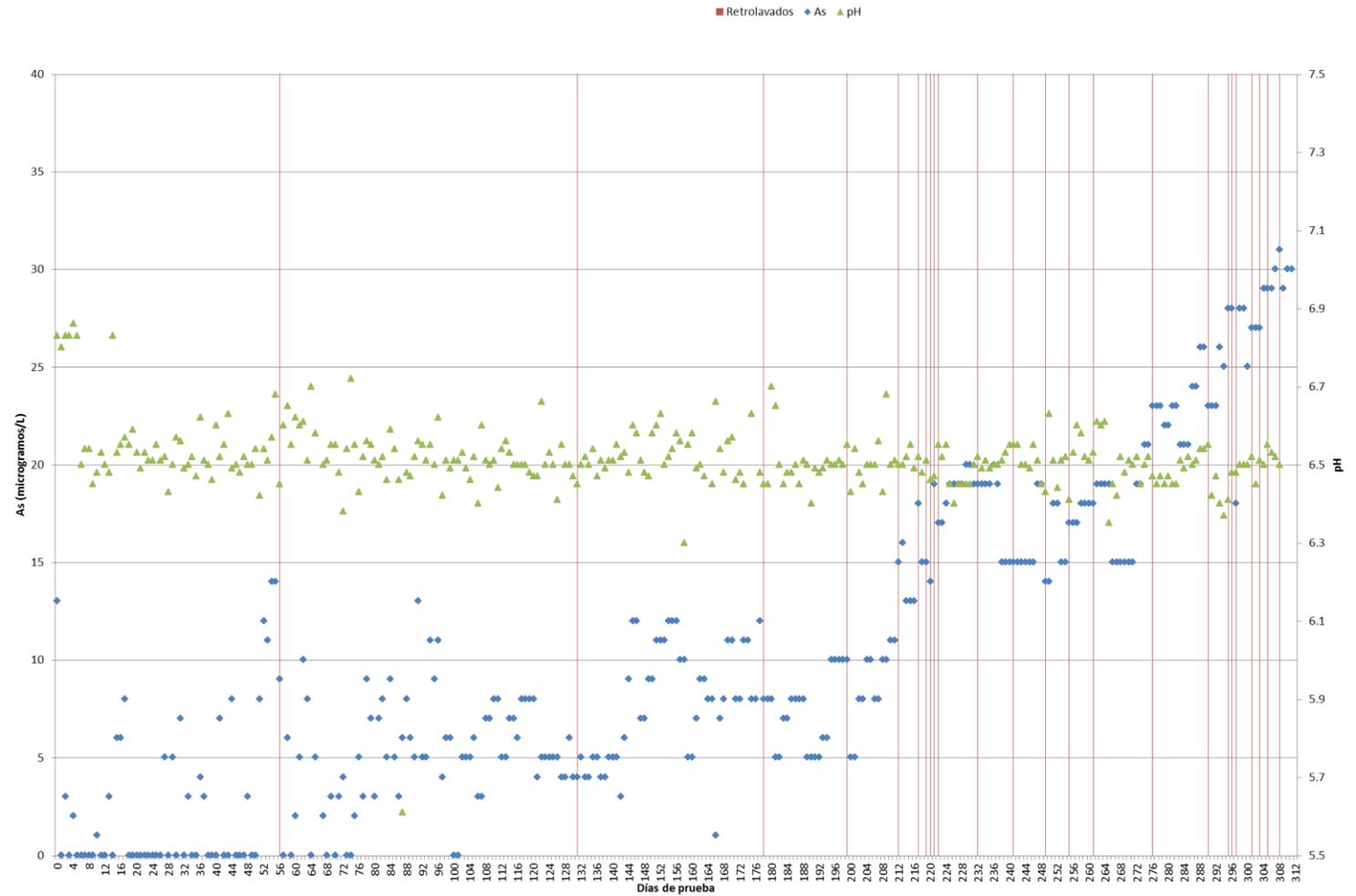


Ilustración 8. Resultados obtenidos para el efluente de la columna C3

### Comparativo entre los tres valores de pH trabajados (6.5, 6.7 y 7.7)

En la Ilustración 9 se aprecian los resultados obtenidos para los tres valores de pH probados en las columnas: C1 pH= 6.7, C2 pH= 7.7, C3 pH= 6.5

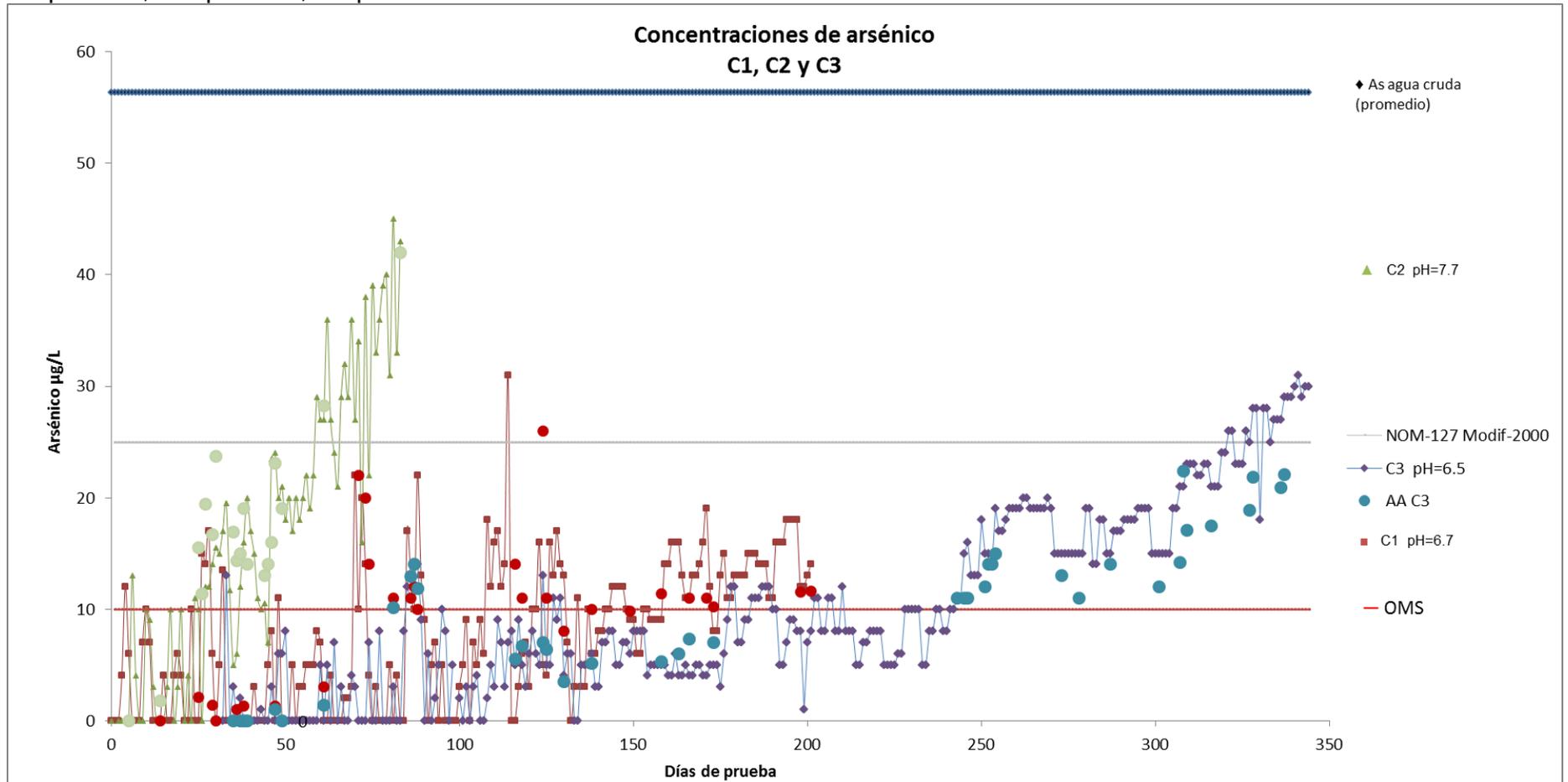


Ilustración 9. Comparativo de concentraciones de arsénico en efluentes de columnas C1, C2 y C3.

Los resultados obtenidos para estas tres columnas son comparables ya que se mantuvo como factor común entre ellas el tiempo de contacto. Así, la tercera columna, que operó a pH=6.5, tenía menor cantidad de material adsorbente que las otras dos. El caudal se ajustó para tener el mismo tiempo de contacto, de 5 minutos. El caudal que se hizo pasar por el medio en esta columna corta ( $\approx 18$  cm de altura del lecho), fue de 0.250 L/min, en tanto que para C1 y C2 el caudal fue de 1 L/min..

De acuerdo con los resultados obtenidos, la mejor condición de remoción de arsénico se tuvo cuando se trabajó a pH lo más aproximado posible a 6.5. Para este caso, se logró mantener la concentración de arsénico en el efluente por debajo del límite que establecen las guías de la OMS por un periodo de 210 días, lo que equivale al tratamiento de 58,000 volúmenes de lecho vacío.

Una advertencia importante al revisar la gráfica de la Ilustración 9 es que debe tomarse en cuenta que en la gráfica pareciera que el efluente de la columna C3 alcanzó el límite recomendado en las guías de la OMS a los 240 días. Debe recordarse que esta columna inició operaciones un mes después que C1 y C2, por lo que el tiempo efectivo de operación corresponde a 210 días, tiempo en que se alcanzaron los 10  $\mu\text{g/L}$  en el efluente.

Los resultados obtenidos, para alcanzar los 10  $\mu\text{g/l}$  en las tres columnas, se resumen de la siguiente manera.

Tabla 3. Valores de pH de operación y volúmenes de lecho para las tres columnas.

Columna	pH de trabajo	VB*
C1	6.7	40,137
C2	7.7	6,605
C3	6.5	58,000

\* Número de volúmenes de lecho vacío tratados antes de rebasar el límite que establecen las guías de la OMS en agua para uso y consumo humano.

### Cambios en la calidad del agua observados durante el periodo de pruebas.

El día 90 de prueba, se tomaron muestras de los efluentes de las tres columnas y se analizaron en todos sus parámetros fisicoquímicos. A continuación se presenta el resumen de los resultados y las observaciones realizadas.

	Agua cruda	C1 pH=6.7	C2 pH=7.7	C3 pH=6.5	Observaciones
Cloruros	9	10.2	8.18	10.6	Las columnas C1 y C3 mostraron un ligero incremento en la concentración de cloruros.
Dureza total	419	378	376	382	No se tienen elementos para determinar si la diferencia en dureza entre el agua cruda y tratada es significativa.
Fosfatos totales	0.12	0.12	0.12	0.04	Se observa que al pH óptimo de remoción de arsénico, también son removidos los fosfatos ( Remoción de 66.7%).
Fluoruros	0.591	0.657	0.661	0.694	No se tienen elementos para determinar si la diferencia en el contenido de F <sup>-</sup> entre el agua cruda y tratada es significativa.
Sulfatos	210	246	192	295	En las columnas C1 y C3 la concentración de sulfuros correlaciona con la adición de ácido sulfúrico al sistema.
Nitrógeno amoniacal	<0.200	<0.200	<0.200	<0.200	SC
Nitratos	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	SC
Nitritos	<0.0200	<0.0200	<0.0200	<0.0200	SC
SAAM	<0.100	<0.100	<0.100	<0.100	SC
SDT	546	544	522	554	Los incrementos se asocian a la adición de ácido sulfúrico para control de pH en C1 y C3.
Turbiedad	0.5	0.05	0.1	0.05	Las partículas causantes de la turbiedad son retenidas a su paso por las columnas del medio adsorbente.
Antimonio	0.0038	0.0035	0.0037	0.0034	SC
Arsénico	0.0545	0.0158	0.031	0.0078	La concentración de As disminuyó 85.68% El efluente cumple con el LP que establecen la OMS y la NOM-127 Modificación 2000.
Bario	<0.500	<0.500	<0.500	<0.500	SC
Cadmio	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	SC
Cobre	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	SC
Cromo	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	SC
Hierro	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	SC
Manganeso	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	SC
Plomo	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	SC
Selenio	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	SC
Silicio	26.57	29.122	28.025	28.339	No hay diferencias significativas entre los valores.
Sodio	13.73	13.43	13.94	14.34	No hay diferencias significativas entre los valores.
Zinc	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	SC
<b>SC.- sin cambio</b>					

Resaltan por su relevancia para el proceso, los resultados de arsénico en los efluentes de las columnas C1 y C3, así como la remoción parcial de fosfatos (a pH=6.5).

### **Comentarios sobre el proceso de retrolavado.**

Se probaron tres tasas de retrolavado, 15, 38 y 47 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h. Los tres valores permitieron el movimiento total del material y expansiones que se podía observar a través de las paredes de la columna de acrílico. Asimismo, con los tres valores se observó recuperación de la capacidad de adsorción. Cuando se aplicó la mayor tasa, fue posible alcanzar una expansión del medio del 20%.

### **Otras observaciones durante la operación de los filtros.**

Durante la evaluación realizada, los filtros se operaron tratando de seguir las recomendaciones proporcionadas por Ep Minerals, sin embargo, como se menciona dentro del cuerpo de este informe, la operación de los filtros se vio interrumpida ocasionalmente por la falta de agua. Estas interrupciones no tuvieron consecuencias negativas en el desempeño del material, pues tan pronto como se reestablecía la operación, el sistema se recuperaba dentro de las siguientes 24 horas, sin que se presentaran altas concentraciones de arsénico en el efluente.

En el sistema que se montó para la evaluación del adsorbente, se emplearon columnas de acrílico, así como mangueras de plástico translúcido, que se encontraban en un área casi al aire libre. La presencia de luz y ambiente húmedo favorecen el desarrollo de algas, que crecen sobre las paredes de acrílico y sobre las mangueras. Cada vez que se observaba el desarrollo de manchas pardas sobre las superficies se aplicaba cloro y, si era posible, se tallaban para eliminarlas. Como el desarrollo de algas es una situación que tiene alta probabilidad de presentarse en los sistemas de tratamiento, se recomienda vigilar e impedir la proliferación de algas ya que pueden causar problemas de olor y sabor desagradables. Si el sistema es, como lo es usualmente, de filtros metálicos cerrados, es muy poco probable que se presente una situación así, por lo que la sugerencia queda sólo para casos en donde exista el riesgo de crecimiento de algas.

### RESULTADOS DEL ANÁLISIS CRIT PARA LOS RESIDUOS DEL NXT-2 OBTENIDOS DE LA COLUMNA 3.

A solicitud de Ep Minerals, una vez que se detuvo la columna C3, una muestra del material adsorbente de la misma, fue enviada a análisis CRIT, para determinar su clasificación de acuerdo a su peligrosidad.

Una vez que la concentración de arsénico en el efluente de la columna C3 se mantuvo por arriba del límite que establece la NOM-127, se detuvo el paso del agua de alimentación y se desconectó la manguera de la conexión en la parte baja de la columna, con lo que se drenó el agua contenida en la misma. En ese momento un muestreador acreditado ante la ema, tomó una muestra del medio adsorbente, en un frasco de vidrio, empleando una cuchara plástica, Ilustración 10, para enviarla a su análisis. La muestra se mantuvo en refrigeración a 4°C hasta que se entregó al Laboratorio ABC, para su análisis.



**Ilustración 10 Toma de muestra de material adsorbente para su análisis CRIT.**

En condiciones reales, el medio adsorbente sería descartado hasta su agotamiento, es decir, hasta que la concentración en el efluente fuese la misma que la de entrada. En esta evaluación no se alcanzó esa condición, por lo que se optó, como alternativa, analizar el medio, una vez que el efluente rebasó el límite de 25 µg/L.

De acuerdo con el análisis realizado, medio “agotado”, que puede ser considerado el residuo del proceso, para una concentración de 25µg/L de arsénico en el efluente, no resultó corrosivo, ni reactivo, tampoco explosivo, ni tóxico. (Véase Anexo 2). Este resultado permite realizar la disposición del medio como un residuo no peligroso, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

### **Requerimientos de personal para la operación**

Para la operación de una planta que use el medio adsorbente NXT®-2 en lecho fijo, se estima que sería necesaria la presencia de al menos un analista durante un periodo de 3 horas diarias. Es posible que se requiera menor cantidad de tiempo si los procesos están perfectamente automatizados, ya que el personal sólo tendrá como tarea la verificación de la buena marcha de todos los sistemas, y verificar la calidad del agua producida. Se recomienda que el analista sea, al menos, un técnico laboratorista entrenado para realizar la verificación del pH del efluente así como la determinación de arsénico en el mismo, registrar los valores de caudal, presiones y en su caso totalizadores de flujo. Para garantizar el suministro de agua que cumpla la normatividad considerada se deberá automatizar el sistema, para ajustar la dosis de ácido a las variaciones del pH en el efluente y el caudal de agua.

La automatización deberá incluir el retrolavado de las unidades. La frecuencia de retrolavado se ha verificado que puede ser de entre 4 a 6 semanas posteriores a arrancar el tratamiento,

después la frecuencia se ajustará según las características del agua que se esté tratando, para cumplir con la normatividad.

### Comparación de opciones tecnológicas para remoción de arsénico.

La tabla 4 es un cuadro comparativo entre diferentes tecnologías empleadas para la remoción de arsénico, evaluadas por el IMTA en la comarca Lagunera (Calderón et al., 2010), a la que se ha añadido la columna con datos para el NXT<sup>®</sup>-2. Es importante comentar que las cinco primeras tecnologías fueron evaluadas en el 2010, y que el NXT<sup>®</sup>-2 fue evaluado en 2017-2018 bajo condiciones de laboratorio si bien con agua contaminada de manera natural, de calidad diferente a la utilizada para la evaluación de las otras tecnologías.

Tabla 4. Comparación entre tecnologías para remover arsénico (Calderón et al., 2010)

	Adsorción Adsorbisía	Coagulación convencional	Electro- coagula- ción <sup>1</sup>	Micro- filtración	Nano- filtración	Adsorción NXT <sup>®</sup> -2
Demanda de mano de obra (h.h./mes) <sup>2</sup>	240	720	720	360	360	90-120
Agua perdida %	2	5	5	2	20 a 25	1-2
Lodos de desecho (ton/mes)	6	17.17	10.34	5.24	N.A.	1 <sup>7</sup>
Espacio requerido (m <sup>2</sup> )	110	200 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>	140	140	110 <sup>5</sup>
Remoción de otras sustancias	No <sup>4</sup>	No <sup>4</sup>	No <sup>4</sup>	No <sup>4</sup>	Ca <sup>2+</sup> <sup>4</sup> Mg <sup>2+</sup> <sup>4</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <sup>4</sup> Cl <sup>-</sup> <sup>4</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> <sup>4</sup> SiO <sub>4</sub> <sup>-</sup> <sup>4</sup> Pb <sup>6</sup> Cr <sup>6</sup> Se <sup>6</sup> F <sup>6</sup> Sb <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Electrocoagulación con electrodos de hierro.

<sup>2</sup> Para la mano de obra se consideró que cada una de las tecnologías tiene una demanda específica de mano de obra, para equiparar se hizo el cálculo de las horas hombre que demanda cada tecnología en forma mensual. Coagulación convencional y electrocoagulación requieren 720 horas hombre al mes (tres turnos de tiempo completo), los procesos de membrana pueden operar con la mitad de mano de obra (360 horas hombre/mes) ya que los procesos están automatizados y la filtración en medios adsorbentes requiere un tercio de la mano de obra que la coagulación convencional. Esto quiere decir que el personal asignado a ello puede tener otras funciones, o atender otras plantas en caso de haberlas.

<sup>3</sup> Tienen muy poca flexibilidad para la instalación.

<sup>4</sup> Remoción parcial, con base en los parámetros medidos.

<sup>5</sup> Valor aproximado, considerado similar al requerido para el medio adsorbente “Adsorbisia”.

<sup>6</sup> Datos proporcionados por el proveedor, no verificados.

<sup>7</sup> Asumiendo un arreglo de 6 filtros y dos etapas de filtración. Frecuencia de retrolavado cada 6 semanas, en promedio 4 retrolavados por mes.

Retomando las conclusiones del trabajo realizado por Calderón et al., 2010, “no hay una solución única” los sitios en que se ubican los pozos con problemas de arsénico pueden presentar limitaciones de espacio para las instalaciones, en personal que opere las plantas, o en costo por metro cúbico de agua tratada. Cada sitio deberá realizar la elección que le funcione mejor.

Por ejemplo, en los pozos en que el agua además de arsénico, presenta alta dureza y/o conductividad, la nanofiltración es una alternativa a considerar ya que es la única que además de remover arsénico puede eliminar dureza del agua.

Para aquellos sitios en que el único parámetro que exceda la NOM-127 sea el arsénico, el uso del NXT®-2 puede representar una excelente opción de tratamiento, pues en este trabajo se demostró que se puede tratar una cantidad de agua equivalente a más de 80,000 volúmenes de lecho vacío. Este medio adsorbente ofrece la ventaja de la sencillez en la operación de una planta de filtración totalmente automatizada y la no generación de lodos ni de residuos peligrosos.

## CONCLUSIONES

El medio adsorbente NXT®-2 es un material patentado, por Ep Minerals. Consiste en un sólido granular fino, que se emplea en lecho fijo, para eliminar arsénico presente en agua, con fines de potabilización.

Para evaluar el desempeño de este medio adsorbente, se empleó agua subterránea contaminada de manera natural con arsénico (50 µg/L), el agua utilizada cumplía todos los parámetros indicados en la NOM-127 Modificación 2000, y contenía del orden de 50 mg/L de sílice. El sistema se manejó en columnas de acrílico en forma de filtro por el que se hizo pasar el agua a dos tasa de filtración (5 y 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h) para un tiempo de contacto, en ambos casos, de 5 minutos.

De acuerdo a lo observado, para mantener una concentración de arsénico en el agua tratada menor de 10 microgramos por litro, se recomienda controlar el pH en un valor lo más cercano a 6.5 posible. En el mismo sentido se recomienda mantener el tiempo de contacto en 5 minutos.

El medio NXT-2 mostró buen desempeño en la remoción de arsénico, aún en presencia de 50 mg/L de sílice en el agua cruda.

Durante la evaluación efectuada, en la que el pH se mantuvo entre 6.4 y 6.8, fue posible tratar 81,430 volúmenes de lecho vacío, antes de que el efluente rebasara la concentración límite de 25 microgramos por litro, que marca la normatividad mexicana.

El sistema evaluado requiere poca supervisión, especialmente si se cuenta con sistemas automatizados, y sólo es necesaria la verificación constante de la concentración de arsénico y del pH que conviene se mantenga cercano a 6.5, para optimizar la remoción de arsénico y

prolongar la vida útil del adsorbente, sin requerir ajustes posterior del pH para cumplir con la normatividad.

Adicionalmente se requiere de retrolavados periódicos, mismos que pueden realizarse con agua cruda, recuperando el agua de retrolavado y reinyectándola a la entrada del sistema, a razón de 5 a 10% de agua cruda, por lo que prácticamente no hay pérdidas por retrolavado. El tratamiento ofrece ventajas de sencillez en la operación y una baja producción de lodos (aproximadamente 2%) durante su funcionamiento.

Para esta evaluación, los filtros se manejaron generalmente con un ritmo de 21 horas de trabajo por tres de descanso diario. En cuanto a los periodos de reposo, esta evaluación no tuvo como objetivo evaluar sus efectos, sin embargo, a decir de Ep Minerals, su efecto, al igual que el control del pH, es alargar la vida útil del medio adsorbente. En este sentido, durante este estudio quedó demostrado, para la calidad del agua con que se trabajó, que, en efecto, el utilizar pHs más bien ácidos (6.7, 6.5) alarga la vida útil del producto, con respecto al caso en que no se controla el pH.

El resultado del análisis CRIT para el medio adsorbente, al momento en que el efluente contenía 25 µg/L, indica que pasó la prueba, por lo que, en principio, el medio podrá disponerse en la categoría de no peligroso.

La principal desventaja, como con todos los sistemas de adsorción, es que una vez agotado el medio, debe sustituirse totalmente por medio adsorbente nuevo.

## ANEXO 1

MÉTODOS DE ANÁLISIS (Manual HACH).

### **Cuantificación de arsénico.**

Método del Arsenator® .

El método se basa en una variación del método Gutzeit, y consiste en transformar el arsénico presente en el agua, mediante una reducción con borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ), a gas arsina ( $\text{AsH}_3$ ), con la ayuda del ácido sulfámico ( $\text{H}_3\text{NSO}_3$ ), que luego reacciona con bromuro mercúrico ( $\text{HgBr}_2$ ) contenido en un papel filtro. Mediante la reacción entre la arsina y el bromuro mercúrico, se desarrolla una coloración amarilla cuya intensidad es proporcional a la concentración de arsénico (en  $\mu\text{g/L}$ ) en la muestra. El equipo que se utilizó fue un Arsenator® marca Palintest modelo Digipass. El intervalo de medición es de 10 a 100  $\mu\text{g/L}$ . Cualquier valor entre cero y diez, se debe reportar como menor a 10  $\mu\text{g/L}$ .

### **Cuantificación de hierro.**

Método colorimétrico HACH®.

El hierro se determinó mediante una técnica colorimétrica con el método FerroVer. Para realizar una cuantificación correcta del hierro es necesario agregar una gota de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) a un volumen de 100 ml de muestra para disolver las partículas que se hubiesen aglomerado. Una alícuota de la muestra se vierte a una celda de 25 ml, se agrega un sobre del reactivo FerroVer que reacciona con el hierro disuelto y la mayoría de las formas insolubles del hierro presentes en la muestra para producir hierro ferroso soluble, el hierro ferroso reacciona con la Fenantrolina 1,10 (reactivo FerroVer) para formar un color naranja cuya intensidad es proporcional a la concentración de hierro. Después de transcurridos 3

minutos de haber disuelto el reactivo, las muestras se miden en un espectrofotómetro de la marca HACH® modelo DR 2800. Esta técnica utiliza agua desionizada como blanco.

### **Determinación de pH.**

El pH se modificó mediante la adición de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Para las mediciones de pH se utilizó un potenciómetro Orión® modelo 420 A. Este equipo se calibró diariamente empleando las siguientes disoluciones amortiguadoras estándar.

pH=4, Marca Fermont, lote 620446, caducidad 2018/04.

Marca Fermont, lote 521243, caducidad 2018/12

pH=7, Marca Fermont, lote 614441, caducidad 2018/12.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Proyecto TC 0815.3

Evaluación técnico económica de cinco tecnologías para remoción de arsénico.

Informe final. (2010).

César G. Calderón Mólgora, Pedro Arroyo Martínez, Flor V. Cruz Gutiérrez, Sofía E. Garrido Hoyos, Silvia Gelover Santiago, Raúl López Corzo, Alejandra Martín Domínguez, Sara Pérez Castrejón, María Laura Quezada Jiménez, María de Lourdes Rivera Huerta, Norberto Segura Beltrán.

Vargas 2017.- Comunicación personal, Jesús Vargas, Director del Sistema de Agua Potable del Municipio de Emiliano Zapata (2015-2018), México.

HACH.

DR/2800 Spectrophotometer. Procedures Manual. 2007.

## ANEXO 2: RESULTADOS DEL ANÁLISIS CRIT.