

**REMOCIÓN DE ARSÉNICO (As) y FLUORUROS (F⁻) EN AGUAS SUBTERRÁNEAS
MEDIANTE COAGULACIÓN, ADSORCIÓN Y DOBLE FILTRACIÓN****Albertina González, Ana María Ingallinella, Virginia Pacini, Rubén Fernández,
Graciela Sanguinetti y Hernán Quevedo**

Centro de Ingeniería Sanitaria. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis (2000). Rosario. Santa Fe. Argentina
e-mail: albertg@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

La presencia del Arsénico (As) en aguas destinadas a bebida ha ocasionado la diseminación del Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), enfermedad que se manifiesta principalmente por alteraciones dermatológicas, pudiendo evolucionar hacia distintos tipos de cáncer. Con respecto a la presencia de los Fluoruros (F⁻) en aguas de bebida, concentraciones menores a 1.5 mg/L protegen las dentaduras de los niños que hagan uso de las mismas, pero se ha demostrado que concentraciones de F⁻ superiores a los 2 mg/L generan fluorosis dental o manchado de los dientes, y diversas afecciones a los huesos como fluorosis esquelética. En el Centro de Ingeniería Sanitaria (CIS) se ha desarrollado un proceso para la remoción de As y F⁻ en aguas subterráneas con baja dureza y bajos contenidos de sales totales. El Proceso ArCIS-UNR® consiste en un proceso de coagulación-adsorción en flóculos de hidróxido de aluminio, corrección de pH inicial y dos etapas de filtración: una primera de prefiltración gruesa ascendente en mantos de grava y luego una filtración rápida. Dicho proceso permite lograr concentraciones de As menores a 0.05 mg/L en el agua tratada (con una operación más controlada 0.02 mg/L), y 1.5 mg/L de F⁻, y está siendo aplicado a escala real en poblaciones de hasta 10000 habitantes. Sin embargo, el Proceso ArCIS-UNR® es demandado por poblaciones con mayor número de habitantes y con concentraciones mayores de F⁻ en el agua a tratar. Por este motivo se propuso modificar el proceso original, por un lado trabajar con un pH de ingreso de 6, ya que según investigaciones previas, se remueve mejor el F⁻ a pH bajos, y por otro lado reemplazar la prefiltración gruesa por una etapa de filtración rápida ascendente, y así poder tratar mayores caudales con menor superficie filtrante. Los ensayos preliminares de este nuevo esquema indican que se pueden obtener buenos resultados en cuanto a remoción de As y F⁻. Para concentraciones de As en el agua cruda entre 0.08 y 0.12 mg/L, se obtuvieron concentraciones de salida en el agua tratada < 0.02 mg/L. Mientras que para concentraciones iniciales de F⁻ entre 2.7 y 3.0 mg/L, se lograron concentraciones de salida entre 1.4 y 1.6 mg/L.

Palabras clave: arsénico, fluoruros, aguas subterráneas, coagulación y adsorción, doble filtración.

ABSTRACT

The presence of arsenic (As) in drinking water has caused the spread of Chronic Regional Endemic Hydroarsenicism (HACRE), this is a disease that causes skin lesions and different types of cancers. Regarding the presence of fluoride (F⁻) in drinking water, lower concentrations to 1.5 mg/L protect the dentures of children who use them, but it has been shown that higher concentrations of F⁻ to 2 mg/L generate dental fluorosis (stained teeth) and diseases affecting the bones such as skeletal fluorosis. At the Center for Sanitary Engineering (CIS) has been developed a process for the removal of As and F⁻ in groundwater which has low total salinity. The ArCIS-UNR® process consists of a coagulation-adsorption process on aluminum hydroxide flocs, initial pH correction and two filtration stages: a first coarse upflow gravel prefiltration then rapid filtration. This process achieves As concentrations less than 0.05 mg/L in treated water (with a more controlled operation 0.02 mg/L), and 1.5 mg/L of F⁻, and is being applied to real scale in populations up to 10000 inhabitants. However, ArCIS-UNR® process is requested for cities with larger population and with higher concentrations of F⁻ in the water to be treated. Therefore it was proposed to modify the original process, on the one hand to work with a initial pH of 6, because according on previous research, the F⁻ removes better at low pH, and on the other hand to replace the coarse prefiltration stage by an stage of upflow rapid filtration so it could be possible to work with higher flow rates with lower filter surface. Preliminary tests indicate that this new scheme can achieve good results in terms of removal of As and F⁻. For concentrations of As in the raw water between 0.08 and 0.12 mg/L, outlet concentrations were obtained in the treated water < 0.02 mg/L. While initial concentrations of F⁻ to between 2.7 and 3.0 mg/L, outlet concentrations between 1.4 and 1.6 mg/L were achieved.

Key words: arsenic, fluoride, groundwater, coagulation-adsorption, double filtration.

INTRODUCCIÓN

Presencia de Arsénico (As) en aguas para consumo humano

La presencia del As en aguas destinadas a bebidas ha ocasionado la diseminación del Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), enfermedad que se manifiesta principalmente por alteraciones dermatológicas (Figura 1), pudiendo evolucionar hacia patologías más graves como distintos tipos de cáncer (Brown & Ross, 2002; Hopenhayn-Rich, et. al, 1998).



Figura 1. Alteraciones dermatológicas.

En base a datos toxicológicos provenientes de grandes poblaciones que han consumido agua con niveles altos de As durante muchas décadas, dicho elemento ha sido calificado por el IARC (International Agency for Research on Cancer) en el Grupo 1, que incluye aquellos compuestos sobre los que existen pruebas suficientes para considerarlos carcinogénicos para los seres humanos (WHO, 2004). Las concentraciones máximas admisibles de As en aguas de bebida han evolucionado hacia valores cada vez más bajos a medida que se realizan nuevos estudios que demuestran su toxicidad. Al ser considerado cancerígeno, no existe un “valor umbral” por debajo del cual no se observan efectos adversos para la salud. En los Estados Unidos y en Europa se han establecido límites máximos admisibles de 0.01 mg/L de As, y la Organización Mundial de la Salud ha fijado el mismo límite como valor guía provisional (WHO, 2004), manteniendo dicho valor provisional en la última versión de las guías (WHO, 2011). Basados en dichos antecedentes, en el año 2007, se aprobó la Resolución Conjunta N° 68/2007 y 196/2007 de la Secretaría de Políticas, Regulación y Relaciones Sanitarias y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos que, en su artículo 1º, modificó el artículo 982 del Código Alimentario Argentino (CAA, 1994) limitando la concentración de As en agua de bebida a 0.01 mg/L, dando un plazo de cinco años para que los prestadores de servicios de

agua se adecuen a las nuevas disposiciones. Posteriormente, en el año 2012, en base a la Resolución Conjunta N° 34/2012 y 50/2012 de la Secretaría de Políticas, Regulación e Institutos y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, se prorrogó dicho plazo por 5 años más, hasta contar con los resultados del estudio “Hidroarsenicismo y Sanearamiento Básico en la República Argentina - Estudios básicos para el establecimiento de criterios y prioridades sanitarias en cobertura y calidad de aguas” cuyos términos fueron elaborados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Planificación Federal. El Anexo A de la Ley 11220 de la provincia de Santa Fe, establece un límite obligatorio de 0.05 mg/L.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, 2000) elaboró un listado de las tecnologías para remoción de As consideradas BAT (Best Available Technologies): ósmosis inversa, electro diálisis inversa, coagulación-adsorción-filtración, intercambio iónico, alúmina activada y ablandamiento con cal. La tecnología de coagulación-adsorción sobre flocúlos de hidróxidos de hierro o aluminio resulta aplicable para tratar aguas con As que poseen baja dureza y bajos contenidos de sales totales, casos en los que compite favorablemente con el proceso de ósmosis inversa. Este último proceso, presenta alto costo operativo, alto consumo energético, insumos importados, altos volúmenes de rechazos de agua, etc.

Presencia de Fluoruros (F⁻) en aguas para consumo humano

Está documentado que las aguas empleadas para la bebida humana que contienen una proporción no mayor de 1 a 1.5 mg/L de F⁻, protegen las dentaduras de los niños que hagan uso de las mismas desde los primeros años de vida hasta los 12, 13 o 14 años. Asimismo, las mismas dosis de F⁻ son necesarias para reducir la posibilidad de aparición de caries durante toda la vida en personas adultas (WHO, 2004). Se ha demostrado, por otra parte, que concentraciones de F⁻ superiores a los 2 mg/L en aguas destinadas a consumo humano generan fluorosis dental o manchado de los dientes (WHO, 2004), y diversas afecciones a los huesos conocidas como fluorosis esquelética (ver Figura 2).

El F⁻ ha sido incluido por el IARC dentro del Grupo 3 como no cancerígeno, y por lo tanto el límite tolerable puede fijarse utilizando el método de la ingesta diaria admisible (IDA), o sea que existe un

valor por debajo del cual no se evidencian problemas para la salud humana. La WHO propone 1.5 mg/L como valor guía (WHO, 2004). En Argentina las concentraciones máximas para F⁻ en agua potable se establecen en función de la temperatura y varían entre 0.6 y 1.7 mg/L (CAA, 1994). El Anexo A de la Ley 11220, vigente en la provincia de Santa Fe, establece un valor límite de 1.5 mg/L.

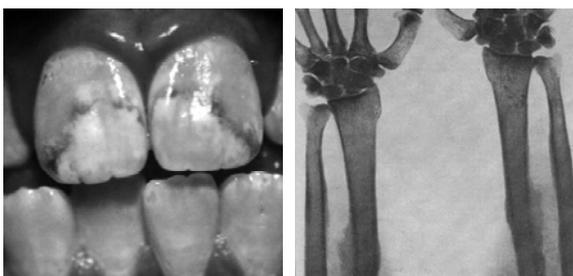


Figura 2. izq.) Fluorosis dental, der.) Fluorosis esquelética.

Algunas de las tecnologías disponibles para remover F⁻, como ósmosis inversa, alúmina activada e intercambio iónico, presentan desventajas como altos costos de instalación y operación, altos rechazos de agua, necesidad de personal altamente capacitado, etc. Los procesos de coagulación, adsorción y filtración, que requieren la adición de sales de aluminio, surgen como tecnologías apropiadas con menores desventajas que las anteriores, cuando se presentan concentraciones de As asociadas a concentraciones de F⁻ no muy altas.

Antecedentes

En el Centro de Ingeniería Sanitaria (CIS) se ha desarrollado el Proceso ArCIS-UNR®, que permite la remoción simultánea de As y F⁻ en aguas subterráneas, el que ha sido aplicado en varias plantas de tratamiento, como puede verse en la Tabla 1. Con el proceso se han logrado concentraciones de As menores a 0.05 mg/L en el agua tratada (con una operación más controlada < 0.02 mg/L), y 1.5 mg/L de F⁻, partiendo de concentraciones en el agua cruda de hasta 0.20 mg/L de As y 2.0 mg/L de F⁻ (Ingallinella et. al, 2003). Para concentraciones mayores a las indicadas, deben determinarse previamente en el laboratorio cuáles son las condiciones óptimas para lograr concentraciones finales acordes con la legislación vigente. El Intituto Nacional de la Propiedad Industrial otorgó la patente y el registro de marca del proceso denominado ArCIS-UNR® (Ingallinella, 2008).

Tabla 1: Plantas construidas en el Proceso ArCIS-UNR®.

Localidad	Provincia	Caudal	Año
Villa Cañás	Santa Fe	45 m ³ /h	2001
López	Santa Fe	6 m ³ /h	2003
Pueblo Andino	Santa Fe	14 m ³ /h	2006
Santa Isabel	Santa Fe	13 m ³ /h	2007
Lezama	Buenos Aires	35 m ³ /h	2008
Oriente	Buenos Aires	20 m ³ /h	2010
Vivorata	Buenos Aires	10 m ³ /h	2010
Aldao	Santa Fe	10 m ³ /h	2011

El Proceso ArCIS-UNR® consiste en un proceso de coagulación-adsorción en flóculos de hidróxido de aluminio utilizando como coagulante una sal polimerizada de aluminio, el cloruro de polialuminio (PACI), corrección de pH inicial a valores próximos de 7.0 y dos etapas de filtración: una primera de prefiltración gruesa ascendente en mantos de grava (v=0.6 m/h) y luego una filtración rápida final (v = 6 m/h) (Fernández et al, 2009). Se ha aplicado exitosamente a poblaciones con menos de 10000 habitantes. La sencillez en su operación y los bajos costos operativos posibilita que el proceso sea una alternativa frente a otras tecnologías disponibles como la ósmosis inversa.

Ante la demanda creciente de aplicación del Proceso ArCIS-UNR® para localidades con mayor número de habitantes y con concentraciones mayores de F⁻ en el agua a tratar, se continuaron las investigaciones para optimizar el proceso, con los siguientes objetivos:

- El primer objetivo fue mejorar la eficiencia en remoción de F⁻ para aquellas poblaciones cuyas aguas subterráneas contienen entre 2.0 y 3.0 mg/L de dicho elemento.
- El segundo objetivo, en el que se está trabajando actualmente, es optimizar el proceso para poblaciones con mayor número de habitantes, en las cuales la aplicación del Proceso ArCIS-UNR®, tal como fue concebido originalmente, resultaría en costos de instalación poco competitivos. Por lo tanto, se propuso modificarlo, implementando un sistema de doble filtración rápida que permita reducir superficies y disminuir costos de construcción, manteniendo una adecuada calidad en el agua tratada.

La metodología y los resultados obtenidos se exponen a continuación.

METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos planteados anteriormente, el trabajo se dividió en dos etapas:

- Etapa 1: la optimización del Proceso ArCIS-UNR® para mejorar la eficiencia en remoción de F⁻, se llevo a cabo mediante Ensayos de Jarras realizados en el laboratorio del CIS con agua cruda enviada desde la localidad de Coronel Moldes, provincia de Córdoba. Posteriormente, para verificar in situ los resultados obtenidos en los Estudios en Laboratorio, se instaló una Planta Piloto móvil en dicha localidad, con la cual se realizaron 15 carreras de filtración. La *carrera de filtración* se define como el periodo de tiempo que transcurre entre dos lavados sucesivos de los filtros.
- Etapa 2: para la implementación del sistema de doble filtración rápida, se está trabajando actualmente con la Planta Piloto instalada en el Laboratorio del CIS, y operándola con agua cruda enviada desde la localidad de Coronel Moldes. Hasta el momento se realizaron 13 carreras de filtración.

Las técnicas analíticas utilizadas en las siguientes experiencias responden a Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF (2005), 21th Edition, USA). Para cada parámetro medido se establece a continuación el método empleado:

- pH: Método Electrométrico.
- Turbiedad: Método Nefelométrico (Turbidímetro HACH 2100).
- Al: Método 3500-Al D (Colorimétrico con Eriocromo Cianina R).
- F⁻: Método Electrodo Ion selectivo (Método 4500-F C).
- As: Durante los ensayos realizados en la primer etapa se utilizó el método de Espectroscopia de Emisión con Plasma Inductivo (ICP). Mientras que en los ensayos en planta piloto realizados durante la segunda etapa se utilizó el Método del Dietilditio-carbamato de Plata, realizando algunas verificaciones con la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica.

A continuación, se describen todos los ensayos realizados a Escala Laboratorio y en Planta Piloto, para la optimización del Proceso ArCIS-UNR®.

Etapa 1: Optimización del Proceso ArCIS-UNR® en cuanto a remoción de F⁻

Ensayos en laboratorio

Metodología: Se realizaron 14 Ensayos de Jarras con agua cruda proveniente de la localidad de Coronel Moldes. La misma fue suministrada por la Cooperativa mediante tres envíos de bidones de 20 litros.

- Los ensayos de jarras se realizaron con las siguientes condiciones:
 - Condiciones de mezcla rápida: 1 minuto, gradiente de velocidad 300 seg⁻¹.
 - Condiciones de floculación: 15 minutos, gradiente de velocidad 50 seg⁻¹.
 - Condiciones de sedimentación: 20 minutos a 40 minutos.
- Los productos químicos utilizados a lo largo de todos los ensayos de laboratorio fueron:
 - Solución de ácido sulfúrico, H₂SO₄ (98%), para disminuir el pH inicial, ya que para una adecuada remoción de F⁻ se requiere trabajar con pH en un rango de 5.0-6.5 (Cusimano et al, 1992).
 - Cloruro de polialuminio, PACl 18 de Cloretil.
 - Solución de hidróxido de sodio, NaOH 15N, para elevar el pH final y optimizar la remoción del Al.
- El sobrenadante de los distintos vasos fue filtrado por papel Whatman 40. En las muestras filtradas se determinó Turbiedad, F⁻, As y Al residual. El As no se determinó en todos los vasos porque el objetivo principal se centró en optimizar la remoción de F⁻.

Resultados y Discusión: Las características del agua cruda de la localidad de Coronel Moldes utilizada en los distintos ensayos de laboratorio se incluyen en la Tabla 2 y Tabla 3. En la Tabla 2 se detallan los parámetros de mayor interés para este estudio, determinados sobre muestras de los distintos envíos realizados por la Cooperativa.

Tabla 2: Valores de As y F⁻ del agua cruda.

Fecha	As (mg/L)	F ⁻ (mg/L)
Primer envío (26/03/2007)	0.07	2.2
Segundo envío (20/04/2007)	0.07	2.4
Tercer envío (07/05/2007)	0.05	2.4

En la tabla 3 se presentan los resultados de un análisis físico-químico completo, el cual es repre-

sentativo de la calidad determinada en los sucesivos envíos.

Tabla 3: Calidad del agua cruda (26/03/2007).

Parámetro	Unidades	Valores
Color	UC	<2
Turbiedad	UNT	0.20
pH		7.8
Conductividad	µS/cm	2100
Sólidos Totales	mg/L	1325
Alcalinidad Total	CO ₃ Ca mg/L	305
Dureza Total	CO ₃ Ca mg/L	145
Calcio	Ca ⁺² mg/L	28
Magnesio	Mg ⁺² mg/L	21
Cloruro	Cl ⁻ mg/L	190
Sulfato	SO ₄ ⁺² mg/L	400
Nitrato	NO ₃ ⁻ mg/L	8
Nitrito	NO ₂ ⁻ mg/L	0.05
Amoniaco	NH ₄ ⁺ mg/L	<0.05
Hierro Total	Fe ³⁺ mg/L	<0.05

A continuación se presentan los resultados de los ensayos más representativos.

▪ El Objetivo del Ensayo N°1, fue determinar la remoción de F⁻ para diversas dosis de PACl. La turbiedad inicial del agua cruda utilizada fue de 0.28 UNT y la concentración de F⁻ de 2.4 mg/L. En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos. Como se observa, con las dosis ensayadas, no se obtuvo una remoción significativa de F⁻.

Tabla 4: Resultados del Ensayo 1.

Jarra N°	Dosis Coagulante (mg/L)	Turbiedad Final (UNT)	F ⁻ Final (mg/L)
1	50	0.41	2.3
2	60	0.42	2.2
3	70	0.47	2.2

▪ En el Ensayo N°2, el objetivo fue determinar la remoción de F⁻ con una dosis de 50 mg/L de PACl y diversos pH iniciales. Se utilizó una solución de ácido sulfúrico para disminuir el pH del agua cruda. La turbiedad inicial del agua utilizada fue de 0.12 UNT, la concentración de F⁻ de 2.4 mg/L y la de As de 0.07 mg/L. En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en este ensayo, donde se puede evidenciar que para pH iniciales entre 5.0 y 6.0 mejora la remoción de F⁻.

Tabla 5: Resultados del Ensayo 2.

Jarra N°	Dosis Coagulante (mg/L)	Turb. Final (UNT)	F ⁻ Final (mg/L)	pH inicial	pH final
1	50	0.98	2.4	7.0	7.5
2	50	2.79	2.1	6.0	6.5
3	50	0.12	2.0	5.0	5.4

▪ El Ensayo N°3 se realizó para determinar la remoción de F⁻ y As para dosis de 100 mg/L de PACl y distintos pH iniciales. La turbiedad inicial del agua cruda utilizada fue de 0.12 UNT, la concentración de F⁻ de 2.4 mg/L y la de As de 0.07 mg/L. En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos de dicho ensayo. Con dosis de 100 mg/L y pH inicial menores a 6.0 se obtuvieron valores finales de 1.5 mg/L de F⁻ y < 0.01 mg/L de As. La eficiencia en la remoción de F⁻ fue del 38%. La concentración de Al residual está por encima del límite tolerable (CAA: 0.20 mg/L), según la determinación realizada en la Jarra 4.

Tabla 6: Resultados del Ensayo 3.

Jarra N°	Dosis Coag. (mg/L)	pH Inicial	pH Final	F ⁻ Final (mg/L)	As Final (mg/L)	Al Final (mg/L)
1	100	7.5	7.4	2.0	0.016	ND
2	100	7.0	7.3	1.9	0.011	ND
3	100	6.5	7.1	1.7	< 0.01	ND
4	100	6.0	6.6	1.5	< 0.01	0.25*
5	100	5.5	6.1	1.5	< 0.01	ND
6	100	5.0	5.5	1.5	< 0.01	ND

(*) El valor de Al corresponde a muestras filtradas
ND: no se determinó

▪ En el Ensayo N°4 el objetivo fue optimizar las condiciones logradas en el Ensayo N°3, en cuanto a las concentraciones finales de Al residual. Para esto, se prosiguió de la siguiente manera: se realizó la experiencia colocando en todas las jarras 100 mg/L de PACl y llevando el pH a 6.00. De esta 1° etapa se obtuvo un Al residual de 0.47mg/L. Luego de realizado el ensayo, la 2° etapa consistió en extraer el sobrenadante, filtrarlo por papel Whatman 40, obteniéndose 3 litros de muestra. Estos tres litros fueron llevados a 3 jarras en las que se agregó distintas cantidades de hidróxido de sodio para elevar el pH y producir la precipitación del Al soluble. En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de dicho ensayo.

Tabla 7: Resultados del Ensayo 4.

Jarra N°	Dosis Coag. (mg/L)	pH Final (2°Et.)	Turb. Final (UNT)	F ⁻ Final (mg/L)	As Final (mg/L)	Al Final (mg/L)
1	100	7.3	0.22	1.7	< 0.01	0.35
2	100	7.8	0.21	1.7	< 0.01	0.22
3	100	8.0	0.28	1.7	< 0.01	0.19

(2°Et.) Corresponde al pH final de la 2° Etapa de la experiencia.

Como se puede observar de la tabla anterior, con dosis de 100 mg/L, se obtuvieron valores de 1.7 mg/L de F⁻, concentraciones < 0.01 mg/L de As, y llevando el pH final a 8.0 la concentración de Al disminuyó de 0.47 mg/L a 0.19 mg/L. Las diferencias en las concentraciones de F⁻ están dentro del error del método.

▪ El objetivo del Ensayo N°5 fue estudiar la influencia de varias variables al mismo tiempo. El agua cruda utilizada tenía las siguientes características: concentración de F⁻ de 2.4 mg/L y concentración de As de 0.05 mg/L. En este caso se realizó un diseño factorial con tres variables a dos niveles con lo que se hicieron 8 pruebas. Las variables fueron la dosis, el pH inicial de la 1° etapa (antes de agregar el PACl) y el pH final de la 2° etapa (luego de filtrar el sobrenadante de los vasos). Los niveles adoptados fueron 100 y 125 mg/L para la dosis, 6.0 y 5.5 para el pH inicial de la 1° etapa y 7.5 y 8.0 para el pH final de la 2° etapa. La variable respuesta fue la concentración final de F⁻. En la Tabla 8 se presentan los resultados de dicho ensayo.

Tabla 8: Resultados del Ensayo 5.

Jarra N°	Dosis Coag. (mg/L)	pH Inicial (1°Et.)	pH Final (2°Et.)	Turb. Final (UNT)	F ⁻ Final (mg/L)	Al Final (mg/L)
1	125	6.0	8.0	0.3	1.7	0.19
2	125	6.0	7.5	0.3	1.7	ND
3	100	6.0	8.0	0.2	1.9	ND
4	100	6.0	7.5	0.2	1.9	ND
5	125	5.5	8.0	0.2	1.9	0.14
6	125	5.5	7.5	0.1	2.0	ND
7	100	5.5	8.0	0.1	2.1	ND
8	100	5.5	7.5	0.1	2.2	ND

Se puede concluir que los mejores resultados se obtuvieron con un pH inicial de 6.00 y una dosis de 125 mg/L (porcentaje de remoción es de F⁻ 29%).

▪ Por último, en el Ensayo N°6 se repitió el ensayo con las condiciones óptimas determinadas en el ensayo anterior (ver Tabla 9).

Tabla 9: Resultados del Ensayo 6.

Dosis Coag. (mg/L)	pH Inicial (1°Et.)	pH Final (2°Et.)	F ⁻ Final (mg/L)	Al Final (mg/L)
125	6.0	8.0	1.5	0.18

De esta forma, se observó repetibilidad de los resultados obtenidos en los Ensayos N°5 y N°6.

Conclusiones de los Estudios en Laboratorio: Los ensayos realizados permiten concluir que con dosis de PACl entre 100 y 125 mg/L, y llevando el pH inicial del agua a valores entre 5.5 y 6.0, se logran concentraciones finales de As < 0.01 mg/L y concentraciones de F⁻ entre 1.5 y 1.7 mg/L, lo que corresponde a una eficiencia en remoción aproximadamente de un 37% para F⁻ y mayores al 85% para As. Una etapa de alcalinización, llevando el pH a valores de 7.5–8.0, permite lograr concentraciones finales de Al menores a los valores tolerables de la legislación vigente.

Ensayos en Planta Piloto

En vista de las conclusiones y recomendaciones de los Ensayos de Laboratorio, se decidió realizar ensayos en Planta Piloto para:

- Verificar in situ los resultados obtenidos en los Estudios previos en Laboratorio.
- Determinar parámetros de diseño y operación del sistema completo en condiciones reales, teniendo en cuenta que el objetivo principal es optimizar la remoción de F⁻.

Metodología: Se trasladó a la ciudad de Coronel Moldes la Planta Piloto móvil con que cuenta el CIS para realizar estudios in situ (ver Figura 3), y se instaló en el predio donde está ubicado el tanque elevado. La misma se operó con el esquema de tratamiento detallado en la Figura 4.

▪ Se operaron dos líneas de tratamiento (L1 y L2) conformadas cada una por 1 prefiltro de grava (PF) y 1 filtro rápido de arena (FR), con las siguientes dimensiones:

- PF 1 = PF 2 (parte superior de PVC, y parte inferior de acrílico).

Diámetros externos: 247 mm la parte de PVC, y 232 mm la de acrílico.

Espesor de pared: 6 mm la parte de PVC y 4 mm la de acrílico.

Altura total de los reactores 2.50 m.

- FR 1 = FR 2 (PVC)

Diámetro externo: 110 mm, espesor de pared de 5.3 mm y altura total de los reactores 2.50 m.



Figura 3. Planta Piloto móvil.

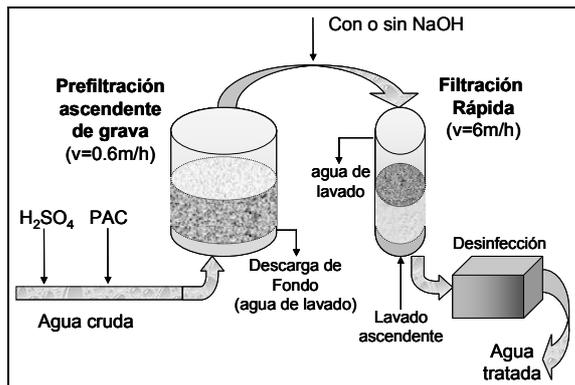


Figura 4. Proceso ArcIS-UNR®: prefiltración – filtración.

- La granulometría utilizada en los FR fue:
 - Línea 1: arena de tamaño efectivo 0.55 mm.
 - Línea 2: arena tamaño efectivo 0.65 mm.
- La carga total disponible para la carrera de filtración del FD fue de 1.80m.
- Las características hidráulicas del sistema fueron:
 - Caudal de filtración y velocidad: en ambas líneas se consideró un caudal de filtración constante de 25 L/h, lo que correspondió a una velocidad de filtración de 0.6 m/h en el PF y de 6 m/h en el FR.
 - El método de regulación del filtro FR fue de nivel variable: el agua filtrada ingresa por la parte superior del FR y sale por la parte inferior del mismo mediante un vertedero ubicado a la altura del nivel de la arena. Para un caudal constante, el nivel del agua va aumentando a medida que se colmata el FR.
 - El caudal entregado a la Planta Piloto se bombea desde una cisterna de agua cruda.

- La dosificación de productos químicos utilizados fue la siguiente:
 - Solución de ácido sulfúrico, H₂SO₄ (98%), para corrección del pH inicial, antes del ingreso al PF.
 - Cloruro de polialuminio, PACI 18 de Cloretil. Dosis de 125 mg/L en todas las carreras realizadas.
 - Solución de hidróxido de sodio, NaOH 15N, para corrección del pH final, antes del ingreso al FD.

Se realizaron 15 carreras de filtración (Carrera 1 a 15) con el esquema de operación que se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: Esquema de operación de la planta piloto.

Carrera	Caudal de filtración (L/h)	Solución H ₂ SO ₄	Dosis PACI (mg/L)	Solución NaOH	Líneas en funcionamiento
1 a 5	25	SI	125	SI	(*)
6 a 10	25	SI	125	SI	L1 y L2
11 -12	25	SI	125	NO	L1 y L2
13 - 14	25	SI	125	SI	L1
15	25	SI	125	NO	L1

(*) Puesta a punto del sistema.

Durante el proceso de filtración se realizaron mediciones de caudales de filtración, pérdidas de carga, consumo y caudales de dosificación de los productos químicos utilizados. Se tomaron muestras en agua cruda, agua prefiltrada y agua tratada con una frecuencia de aproximadamente 1 a 2 horas, y se realizaron las siguientes determinaciones en el Laboratorio del CIS: Turbiedad, pH, As, F⁻, Al total.

Resultados y Discusión: El agua cruda que se utilizó para operar la Planta Piloto provino de la bajada de tanque ya clorada, con características físico-químicas similares a la presentada en la Tabla 3. En la Tabla 11 se presentan las concentraciones de As y F⁻ en agua cruda que ingresaron a la Planta Piloto en los ensayos.

Tabla 11: Concentración promedio de As y F⁻.

Parámetro	Concentración promedio (mg/L)	N (número de muestras)	Desvío Estandard
Arsénico	0.08	9	0.007
Fluoruros	2.9	11	0.212

A continuación se presentan los resultados de las carreras que se consideraron representativas del proceso.

Eficiencias en Remoción: En la Tabla 12 se presentan los valores promedio de pH, Turbiedad, As, F⁻ y Al para las Carreras 8 y 9, en las que se operó con las condiciones mostradas en la Tabla 9, dosificando ácido sulfúrico y PACl a la entrada del PF, e hidróxido de sodio en la entrada del FR.

Tabla 12: Valores Promedios de la Carrera 8 y Carrera 9 para las líneas 1 y 2.

Parámetro	Cruda	PF (L1)	FR (L1)	PF (L2)	FR (L2)
Carrera 8					
pH	7.9	6.6	7.3	6.5	7.2
Turb. (UNT)	0.34	5.30	0.19	5.36	0.15
F ⁻ (mg/L)	3.1	2.0	1.4	2.3	1.7
As (mg/L)	0.09	Nd	< 0.02	ND	< 0.02
Al (mg/L)	ND	ND	< 0.03	ND	< 0.03
Carrera 9					
pH	8.0	6.4	7.5	6.4	7.6
Turb. (UNT)	0.59	10.50	0.13	8.30	0.13
F ⁻ (mg/L)	3.1	1.9	1.3	2.1	1.5
As (mg/L)	0.09	ND	< 0.02	ND	< 0.02
Al (mg/L)	ND	ND	< 0.03	ND	< 0.03

ND: no se determinó

De los resultados mostrados en la Tabla 12, se desprende que la eficiencia en remoción de F⁻ en la L1 es de 55 % a 58 % mientras que para la L2 es de 45 % a 52 %. Esta diferencia puede atribuirse a las distintas granulometrías utilizadas en la etapa de filtración rápida. En relación al As sólo se pueden informar concentraciones menores 0.02 mg/L debido a la técnica empleada. En algunas muestras se realizaron paralelamente determinaciones por ICP que dieron por resultados concentraciones menores a 0.01 mg/L. Esto indica que la eficiencia en remoción de As fue la esperada de acuerdo a los resultados de los ensayos en laboratorio. También se puede observar que las concentraciones de Al residual en el agua tratada son menores a 0.03 mg/L, muy por debajo de lo requerido por la normativa vigente (máximo 0.20 mg/L).

Necesidad de Alcalinización previa a la Filtración: con el objetivo de corroborar la necesidad de alcalinización en el ingreso al FR, se realizaron carreras de filtración con pH iniciales próximos a 6.5 sin dosificar hidróxido de sodio a la entrada del FR, cuyos resultados se muestran en la Tabla 13. Debido a problemas en la L2, solo se operó con la línea 1.

En la Tabla 13 se puede apreciar que las eficiencias en remoción de F⁻ y As fueron satisfactorias (43 % y 50%

para el F⁻ y > 78% As). Sin embargo las concentraciones promedio de Al residual a la salida del FR fueron en promedio 0.27 mg/L y 0.47 mg/L respectivamente. Estas concentraciones no cumplen con la normativa vigente y reafirman la necesidad de la alcalinización antes de ingresar a la filtración rápida, cuando se trabaje con pH iniciales menores a 6.9.

Tabla 13: Valores Promedios (a partir de 3^o hora) en Carrera 12 y carrera 15 para la línea 1.

Parámetro	Cruda	PF (L1)	FR (L1)
Carrera 12			
pH	7.9	6.5	6.6
Turb. (UNT)	0.3	8.8	0.7
F ⁻ (mg/L)	2.8	1.5	1.4
As (mg/L)	0.08	ND	< 0.02
Al (mg/L)	ND	ND	0.27
Carrera 15			
pH	8.0	6.8	6.7
Turb. (UNT)	0.3	4.4	1.3
F ⁻ (mg/L)	2.8	1.7	1.6
As (mg/L)	0.09	ND	< 0.02
Al (mg/L)	ND	ND	0.47

ND: no se determinó

Duración de las Carreras: En la Figura 5 y Figura 6 se representan las turbiedades, y en la Figura 7 y Figura 8 las pérdidas de carga a lo largo de las Carreras 8, 9, 12 y 15. Las mismas fueron finalizadas por cuestiones operativas antes de llegar a la máxima carga disponible del FR. Por tal motivo, en cada carrera, se realizó la proyección de las pérdidas de carga medidas en el FR a través de una función polinómica de segundo orden (línea de puntos), la cual se ajustaba adecuadamente a las mediciones realizadas (línea llena), hasta alcanzar la máxima pérdida de carga disponible de 1.80 metros en el FR.

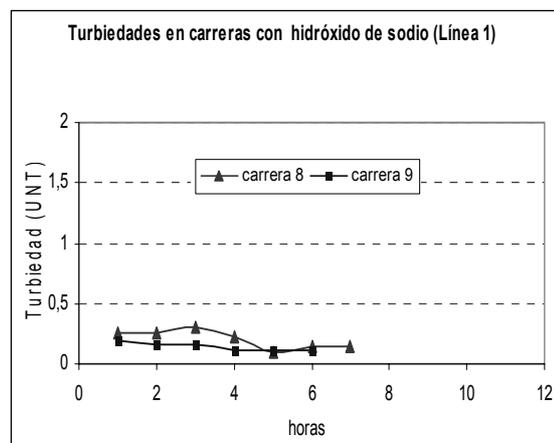


Figura 5. Turbiedades de las Carreras 8 y 9.

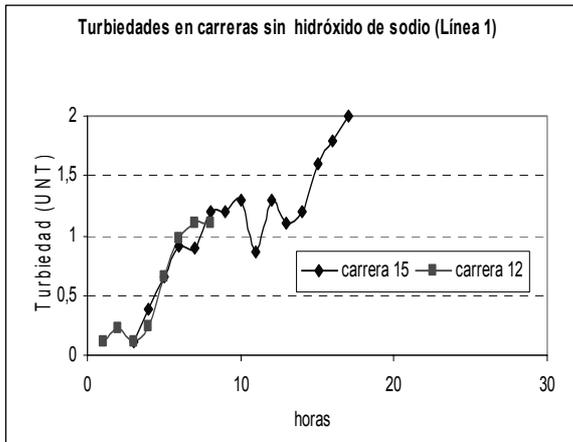


Figura 6. Turbiedades de las Carreras 12 y 15.

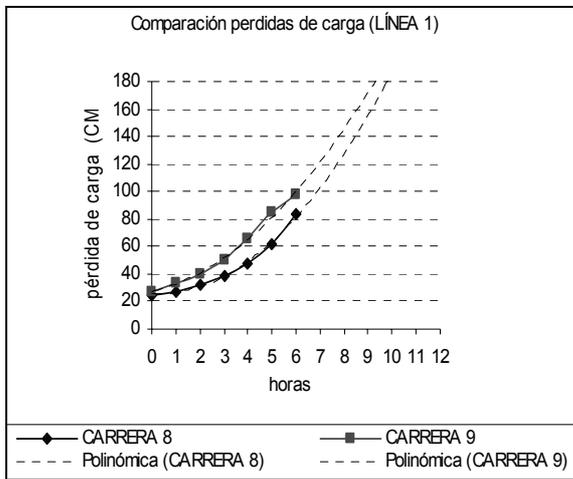


Figura 7. Pérdidas de carga de las Carreras 8 y 9.

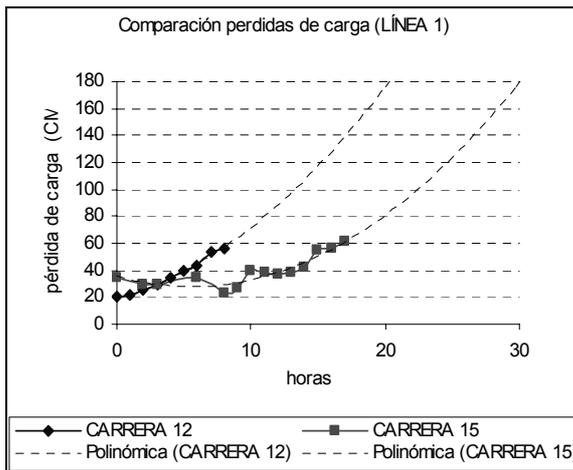


Figura 8. Pérdidas de carga de las Carreras 12 y 15.

En las Carreras 8 y 9 (con hidróxido) las turbiedades se mantuvieron por debajo de 0.5 UNT durante las horas en que se operó la planta. Por otra parte la pérdida de carga disponible se alcanzaría a las 10 horas de operación. En las Carreras 12 y 15 (sin hidróxido) a partir de la cuarta hora se superan los 0.5 UNT llegando a valores mayores a 1.5 a las 10 horas de operación. Sin embargo la pérdida de carga disponible se alcanzaría a las 20 horas de operación.

A pesar de que los resultados respecto a la eficiencia de remoción de As y F⁻ son semejantes para ambas modalidades, se concluye que no se puede trabajar sin agregado de hidróxido de sodio, cuando se trabaje con pH menores a 6.9, porque tanto los parámetros Turbiedad y Al quedan fuera de norma a las pocas horas de operación.

Conclusiones de la operación in situ de la Planta Piloto: El proceso de tratamiento ensayado permitió remover en forma conjunta As y F⁻ con eficiencias del 75 al 85% para As y del 40 a 60% para F⁻, logrando concentraciones de As en agua tratada menores que 0.02 mg/L y entre 1.2 y 1.7 mg/L para F⁻.

En las condiciones operativas utilizadas (cargas disponibles de 1.80 m) la duración de las carreras pudo estimarse entre 10 - 12 horas, si se trabaja agregando hidróxido de sodio. Al trabajar con pH próximos a 6.0 en la entrada del prefiltro, la eficiencia de remoción de F⁻ aumenta, pero a dicho pH el floc que se forma es muy fino y no se retiene en los mantos filtrantes del FR. Por tal motivo se ratifica la necesidad de una etapa de alcalinización antes de ingresar en la etapa de filtración rápida, para lograr la formación de nuevos precipitados de Al y mejorar la remoción de F⁻ (Ingallinella et al, 2011).

Etapas 2: Optimización del Proceso ArcIS-UNR®: Implementación de Doble Filtración Rápida.

Metodología: Se realizaron ensayos en la Planta Piloto instalada en el CIS (ver Figura 9), con el esquema de tratamiento detallado en la Figura 10, la cual fue operada con aguas subterráneas de la localidad de Coronel Moldes, enviada por la Cooperativa en tanques de 250 litros.

- A lo largo de todo este estudio se operó una línea de tratamiento conformada por 2 filtros de acrílico (filtro ascendente, FA y filtro descendente, FD):

- Diámetro externo: 82 mm
- Espesor de pared: 4 mm
- Altura total de los reactores: 2.50 m

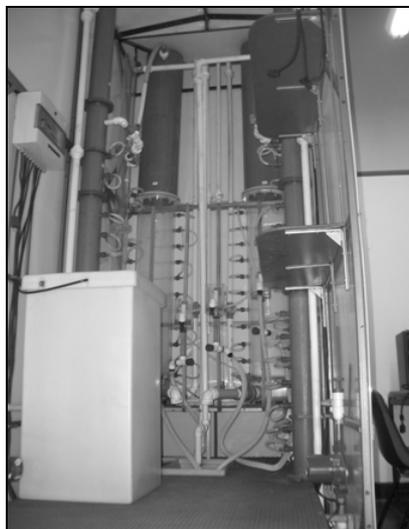


Figura 9. Planta Piloto móvil instalada en el CIS.

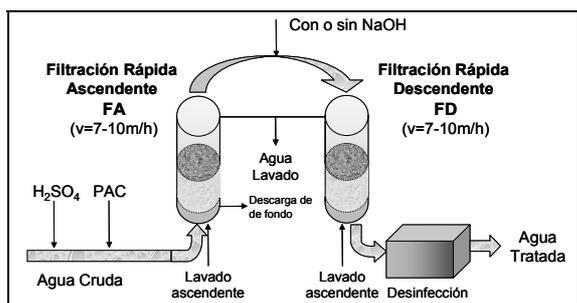


Figura 10. Proceso ArCIS-UNR® Modificado – Doble filtración rápida.

- En base a datos recopilados en la bibliografía para filtración directa (Di Bernardo, 1997), se utilizaron los mantos filtrantes que se describen a continuación:
 - Para el filtro ascendente (FA) se adoptaron 2 configuraciones granulométricas distintas:
 - Granulometría 1 (G1): como manto sostén, descrito de abajo hacia arriba: 15 cm de grava 10-30 mm, 15 cm de grava 6-10 mm, y 30 cm de grava 4-6 mm. Para el manto filtrante se utilizó 1.10 m de altura de arena 0.9-1.0 mm de tamaño efectivo.
 - Granulometría 2 (G2): como manto sostén, descrito de abajo hacia arriba: 50 cm de grava 20- 30 mm, 30 cm de grava 12-20 mm, 20 cm de grava 6-12 mm y 20 cm de arena 2-5 mm. Para el manto filtrante se utilizó 0.70 m de arena 0.9-1.0 mm de tamaño efectivo.
 - Para el filtro descendente (FD) se adoptó como manto sostén la siguiente granulometría detallada

de abajo hacia arriba: 10 cm de grava 10-30 mm, 10 cm de grava 6-10 mm, 10 cm de grava 4-6 mm, y 10 cm de arena 0.9-1.0 mm. Para el manto filtrante se utilizó 0.70 m de altura de arena de tamaño efectivo 0.55 mm.

- La carga total disponible para la carrera de filtración del FD fue de 1.15m.
- Las características hidráulicas del sistema fueron:
 - Velocidad y caudal de filtración. Se utilizaron velocidades de filtración de 7 y 10 m/h en ambas etapas de filtración, lo que resulta un caudal de filtración de 30 y 43 L/h correspondientemente.
 - El método de regulación del filtro FD fue de nivel variable (con caudal de filtración constante).
 - El caudal entregado a la planta piloto se bombea desde una cisterna de agua cruda.
- La dosificación de productos químicos utilizados fue la siguiente:
 - Solución de ácido sulfúrico, H₂SO₄ (98%), para corrección del pH inicial, antes del ingreso al FA.
 - Cloruro de polialuminio, PACI 18 (Petroquímica Río Tercero, 16.9% Al₂O₃). Dosis de 100 mg/L en todas las carreras realizadas.
 - Solución de hidróxido de sodio, NaOH 15N, para corrección del pH final, antes del ingreso al FD.

La aplicación del coagulante y de la solución de ácido sulfúrico se realizó en línea sobre la cañería, previo ingreso al FA. La solución de hidróxido de sodio se incorporó a la salida del FA.

Se efectuaron 21 carreras en total, de las cuales 8 correspondieron a la puesta a punto del sistema. En la Tabla 14 se resumen las condiciones operativas bajo las cuales se realizaron las 13 carreras restantes. Para cada carrera se fijaron ciertos parámetros operativos tales como dosis de PACI y granulometría del FD, y se variaron otros como velocidad de filtración (caudal), granulometría del FA, distintas condiciones de pH inicial, e incorporación de una etapa de alcalinización intermedia, de manera tal de poder estudiar la influencia de estas variables sobre distintos parámetros como el Aluminio residual, F⁻ y As residual, y pérdidas de carga y duración de carreras.

Durante el proceso de filtración se realizaron mediciones de caudales de filtración, pérdidas de carga, consumo y caudales de dosificación de los productos químicos utilizados. Se tomaron muestras en agua cruda, agua prefiltrada y agua tratada con una frecuencia de aproximadamente media hora, y se realizaron las siguientes determinaciones en el Laboratorio del CIS: Turbiedad, pH, As, F⁻, Al total.

Tabla 14: Esquema de operación de la Planta Piloto con agua de la localidad de Coronel Moldes.

Carrera	Velocidad de filtración (m/h)	Configuración granulométrica FA	pH ingreso FA	Solución NaOH	pH salida FD
1	10	1	6.6	NO	6.7
2 a 3	10	1	6.0	SI	7.3
4	10	1	6.2	SI	7.3
5 - 6	10	1	6.9	NO	7.0
7	7	1	6.3	SI	7.6
8	7	2	6.9	NO	7.1
9 - 10	7	2	6.0-6.1	SI	7.1-7.2
11	7	2	6.9	NO	7.0
12 - 13	7	2	6.0	SI	7.3

Finalizada la carrera ambos filtros se lavan a contracorriente, durante 10 minutos, extrayéndose muestras del agua de lavado cada 2.5 minutos. En las muestras así obtenidas durante el lavado se determinó la turbiedad. El objetivo de este muestreo fue determinar el tiempo óptimo de lavado.

Resultados y Discusión: En la Tabla 15 se detallan los parámetros físico-químicos de mayor interés para este estudio, determinados sobre muestras de agua cruda de Coronel Moldes, en función de los distintos envíos realizados por la Cooperativa. Las características físico-químicas restantes son similares a las mencionadas en la Tabla 3.

Tabla 15: Valores de pH, Turbiedad y concentraciones de As y F⁻ en el agua cruda.

Parámetro	Envío 1 (07/2009)	Envío 2 (08/2009)	Envío 3 (03/2010)	Envío 4 (06/2011)	Envío 5 (12/2011)
Turbiedad (UNT)	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
pH	8.0	7.9	8.0	8.2	7.9
Arsénico (mg/L)	0.09	0.08	0.08	0.08	0.12
Fluoruros (mg/L)	3.0	2.7	2.9	2.5	2.5

A continuación se presentan y discuten los resultados de las distintas experiencias.

Relación entre pH inicial y remoción de F⁻ para una velocidad de filtración de 10 m/h: Como se puede apreciar en la Tabla 16 no se detectaron diferencias

apreciables en cuanto a la remoción de F⁻ bajo distintas condiciones de pH inicial, para una velocidad de filtración de 10 m/h. Las Carreras 1 a 4 se realizaron con pH iniciales entre 6.0 y 6.6, logrando remociones de F⁻ entre 22% y 30%, mientras que en la Carrera 5, que se trabajó a un pH de ingreso más alto, se logró una remoción del 31 %. En ninguno de los casos, la concentración de F⁻ a la salida del FD se aproximó al límite establecido por la norma.

Tabla 16: Relación entre pH inicial y remoción de F⁻ para una velocidad de filtración de 10 m/h.

CARRERA	Velocidad de Filtración (m/h)	pH ingreso FA (prom.)	pH salida FD (prom.)	F ⁻ agua cruda (mg/L)	F ⁻ FD (prom. mg/L)
1	10	6.6	6.7	2.7	2.1
2	10	6.0	7.3	2.7	2.0
3	10	6.3	7.3	2.7	1.9
4	10	6.2	7.3	2.4	1.8
6	10	6.9	7.0	2.6	1.8

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se decidió ensayar una velocidad de filtración menor (7 m/h).

Relación entre pH inicial y remoción de F⁻ para una velocidad de Filtración de 7 m/h: En la Tabla 17 se presentan los resultados, en cuanto a la remoción de F⁻, de las carreras que se operaron con velocidad de filtración de 7 m/h.

Tabla 17: Relación entre pH inicial y remoción de F⁻ para una velocidad de filtración de 7 m/h.

CARRERA	Velocidad de Filtración (m/h)	pH ingreso FA (prom.)	pH salida FD (prom.)	F ⁻ agua cruda (mg/L)	F ⁻ FD (prom. mg/L)
7	7	6.3	7.6	2.6	1.6
8	7	6.9	7.0	2.5	2.1
9	7	6.1	7.1	2.5	1.5
10	7	6.0	7.2	2.6	1.4
11	7	7.0	7.1	2.5	2.0
13	7	6.1	7.3	2.6	1.4

Se observa que en las carreras realizadas con pH de ingreso 6.9-7.0, las eficiencias en remoción de F⁻ están entre un 16% y 20%, mientras que las que trabajaron con pH iniciales más bajos (6.3-6.1) lo-

graron mejores eficiencias (38% y 46%), con concentraciones de F⁻ a la salida del FD aceptables según el valor establecido por Norma.

Comparando los resultados entre las carreras realizadas con velocidad de filtración de 10 m/h (Tabla 16) y las realizadas con velocidades de 7 m/h (Tabla 17), se observa que la disminución de esta velocidad mejora la remoción de F⁻, por lo que se deduce que es conveniente trabajar con velocidades del orden de los 7m/h. Esto se puede dar por el hecho que al trabajar con velocidades más bajas, hay un tiempo mayor de contacto entre el agua a tratar y el coagulante, mejorando de esta forma la etapa de coagulación – floculación.

Al residual a la salida del FD: Durante todas las carreras realizadas, a excepción de la N°1, el Al residual en el agua tratada se mantuvo menor al límite establecido por la norma 0.20 mg/L.

Concentración de As a la salida del FD: Con respecto a la remoción de As, la misma fue adecuada en todas las carreras, logrando concentraciones en el agua filtrada < 0.02 mg/L. En relación al As sólo se pueden informar concentraciones menores 0.02 mg/L debido a la técnica empleada. Simultáneamente, 3 muestras correspondientes a la Carrera 9 fueron enviadas a un laboratorio externo para ser analizadas por Espectrofotometría por Absorción Atómica. Con dicha técnica se obtuvieron concentraciones finales de As en agua filtrada a la salida del FD de 0.018 mg/L en una de las muestras y < 0.01mg/L en las dos restantes.

Determinación de la duración de los lavados: En la Figura 11, Figura 12 y Figura 13 se muestran las turbiedades en el agua de lavado de los filtros. Los lavados de las unidades de filtración se realizaron durante 10 minutos, y se tomaron muestras del agua de lavado cada 2.5 min.

Las gráficas anteriores demuestran que para una duración del lavado entre 5 y 6 minutos se alcanzan bajas turbiedades en el agua de lavado que se mantienen constantes, por lo que se concluye que el

tiempo óptimo de lavado es de 5 a 6 minutos.

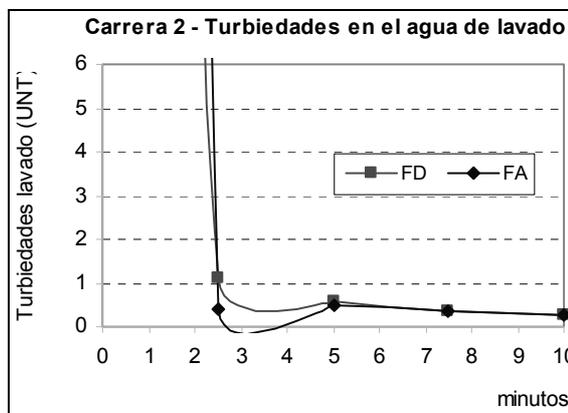


Figura 11. Turbiedades de lavado de la Carrera 2.

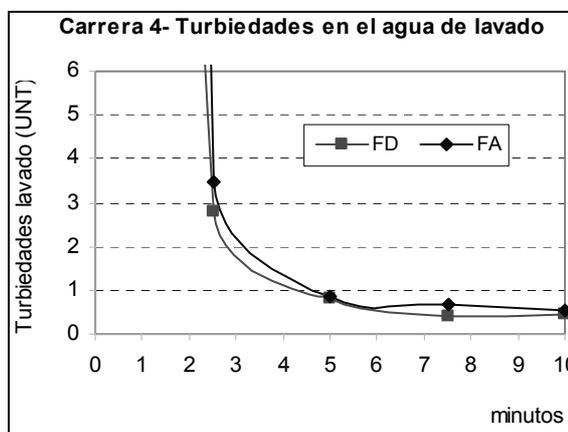


Figura 12. Turbiedades de lavado de la Carrera 4.

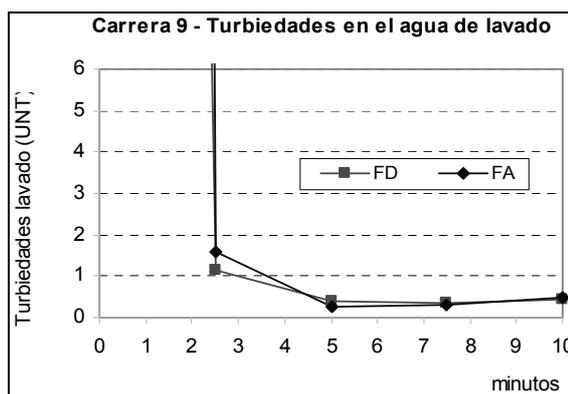


Figura 13. Turbiedades de lavado de la Carrera 9.

Relación entre valores de Turbiedad en el agua tratada y concentración de Aluminio: En la Figura 14 se han representado las turbiedades a la salida del FD en función de las concentraciones de Al, para todas las carreras realizadas.

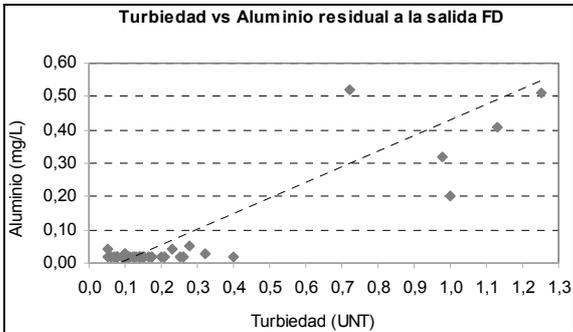


Figura 14. Relación entre turbiedades y concentraciones de aluminio residual para todas las carreras.

Como se puede apreciar, para turbiedades en el agua tratada menores a 0.4 UNT, las concentraciones de aluminio residual son menores a 0.10 mg/L. Para turbiedades mayores a dicho valor, se observan valores de aluminio residual superiores a lo que establece la Ley 11.220 - Anexo A (0.20 mg/L). Este hecho es importante desde el punto de vista operacional ya que las mediciones de turbiedad en planta podrían ser tomadas como un parámetro subrogante para el control de la concentración de Al residual en el agua tratada.

En función de lo anterior, podemos concluir que las carreras que lograron los mejores resultados en cuanto a la remoción de F⁻ y As con este nuevo proceso de doble filtración rápida son las Carreras 7, 9, 10 y 13, como se puede apreciar en la Tabla 18. Las mismas se desarrollaron a una velocidad de filtración de 7 m/h, con un pH de ingreso de alrededor de 6 y con una posterior etapa de alcalinización.

Tabla 18: Eficiencia en remoción de As y F⁻ de las carreras 7, 9, 10 y 13.

CARRERA	Velocidad de Filtración (m/h)	Granulometría FA	pH ingreso FA (prom.)	As salida FD (prom. mg/L)	F ⁻ salida FD (prom. mg/L)	Al salida FD (mg/L)
7	7	1	6.3	< 0.02	1.6	< 0.02
9	7	2	6.1	< 0.02	1.5	< 0.02
10	7	2	6.0	< 0.02	1.4	< 0.02
13	7	2	6.1	< 0.02	1.4	0.02

En cuanto a las duraciones de las carreras los mejores resultados se lograron con las Carreras 9 y 10. Como se puede apreciar en la Figura 15, la Carrera 9 se operó durante aproximadamente 7 horas, en donde alcanzó la máxima pérdida de carga disponible, mientras que la Carrera 10 fue finalizada por cuestiones operativas, al cabo de 8.5 horas, antes de llegar a la máxima carga disponible del FD. Por tal motivo se realizó una proyección de las pérdidas de carga del FD a través de una función polinómica de segundo orden, la cuál es la que mejor se ajusta a la mediciones realizadas, dando como resultado que para 9.3 horas de operación se llegaría a la máxima pérdida de carga disponible de 115 cm (ver Figura 16).

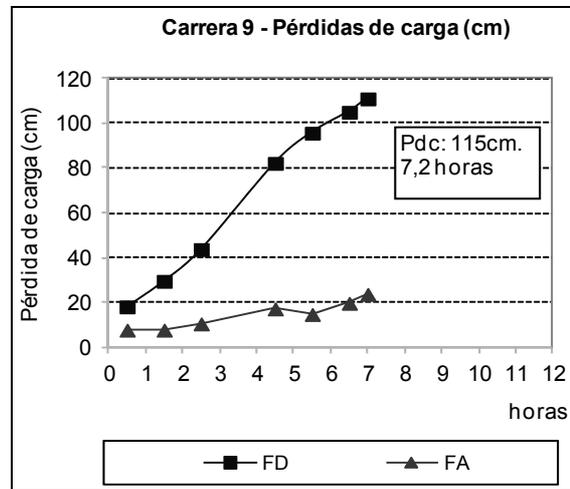


Figura 15. Pérdida de carga de los FA y FD de la Carrera 9.

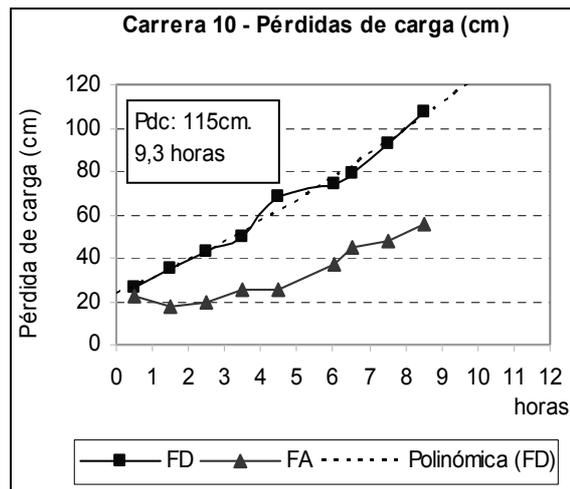


Figura 16. Pérdida de carga de los FA y FD de la Carrera 10.

Conclusión de la operación de la Planta Piloto con el esquema de doble filtración rápida: Los mejores

resultados se obtuvieron con velocidades de 7 m/h, con un pH inicial variable entre 5.5 – 6.5 y con el consiguiente agregado de hidróxido de sodio antes de ingresar a la etapa de filtración rápida descendente para lograr un pH final mayor a 7, y poder controlar el Al residual en el agua tratada. De esta forma se obtuvo una remoción de As mayor al 83%, una remoción en F⁻ entre 38 y 46%, y duraciones en las carreras de filtración entre 7 y 9 hs.

CONCLUSIONES

En base a todos los resultados obtenidos se concluye que es factible la Optimización del Proceso ArCIS-UNR®, ya sea para tratamientos de aguas subterráneas con concentraciones de F⁻ entre 2 mg/L y 3 mg/L, o para localidades con un gran número de habitantes.

De todas las experiencias realizadas, se verifica que la mayor remoción de F⁻ se da a pH iniciales entre 5.5 – 6.5, y por tal motivo se requiere posteriormente una etapa de alcalinización para controlar la turbiedad y por lo tanto el Al residual a la salida del FD.

Respecto a la implementación de la doble filtración rápida, se requiere continuar con ensayos que permitan prolongar la duración de las carreras, ensayando alternativas que incluyan la optimización de la configuración granulométrica de ambas etapas de filtración y la implementación de descargas de fondo intermedias en el filtro ascendente (Di Bernardo, 1997).

REFERENCIAS

APHA, AWWA, WEF. 2005 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Edition.
Brown, K. G.; Ross, G. L. 2002. Arsenic, Drinking Water, and Health: A Position Paper of the American Council on Science and Health. *Regulatory Toxicol. Pharmacol.* 36: 162–174.
CAA. Código Alimentario Argentino Actualizado. 1994. De La Canal y Asociados S.R.L., Buenos Aires.
Cusimano, N. O.; Deambrossi, N. E.; Albina, L. C. and Callegaro, R. S. 1992. Arsenic in Potable Waters of

The República Argentina, Techniques for its Removal. International Seminar Proceedings (51-58). Arsenic in the Environment and its Incidence on Health, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
Di Bernardo. 1997. Normas para la Presentación de Procesos de Agua Potable. Cap VII - 13: Doble Filtración Rápida. ENHOSA.
Hopenhayn-Rich, C.; Biggs, M. L. and Smith A. H. 1998. Lung and kidney cancer mortality associate with arsenic in drinking water in Córdoba, Argentina. *Int. J. Epidemiol.* 27: 561-569.
Ingallinella, A. M.; Fernández, R. G.; Stecca, L. M. 2003. Proceso ArCIS-UNR para la remoción de As y flúor en aguas subterráneas: una experiencia de aplicación. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Edición N° 66 y 67, AIDIS Argentina.
Ingallinella A. M. 2008. Patente de Invención, Procedimiento para la eliminación de As y fluoruros de aguas subterráneas-1999-2009. N° Registro AR051530b1.
Fernández, R. G.; Ingallinella, A. M.; Stecca, L. M. 2009. Arsenic removal from groundwater by coagulation with polyaluminium chloride and double filtration. *Natural Arsenic in groundwater of Latin America Arsenic in the environment*. Vol 1. Taylor & Francis Group (London).
Ingallinella, A. M.; Pacini, V. A.; Fernández, R. G.; Vidoni R. y Sanguinetti G. 2011. Simultaneous removal of arsenic and fluoride from groundwater by coagulation-adsorption using polyaluminum chloride. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46:11, 1288-1296.
USEPA. 2000. Environmental Protection Agency. Federal Register, 40 CFR Parts 141 and 142, National Primary Drinking Water Regulations; Arsenic and Chloride to Compliance and New Source Contaminants Monitoring: Proposed Rule.
WHO. 2004. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality - Three Edition, Geneva.
WHO. 2011. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality - Four Edition, Geneva.

Artículo recibido el 12/2014 y aprobado para su publicación el 03/2015