

Remoción de Arsénico (As) y Fluoruros (F⁻) en Aguas Subterráneas mediante Coagulación-Adsorción y Doble Filtración

González, A.; Ingallinella, A.M.; Pacini V., Fernández, R., Sanguinetti, G.; Vidoni, R.

Centro de Ingeniería Sanitaria (CIS), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario

E-mail: albertinagonzalez@hotmail.com

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 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 10.000 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. 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 1,5 y 2,2 mg/L.

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 (ver 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 (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 y Pesca y Alimentación que, en su artículo 1°, 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 y Pesca, se prorrogó dicho plazo por 5 años más, hasta contar con los resultados del estudio “Hidroarsenicismo y Saneamiento 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 11.220 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. En relación a la tecnología de coagulación-adsorción sobre flóculos 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 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).

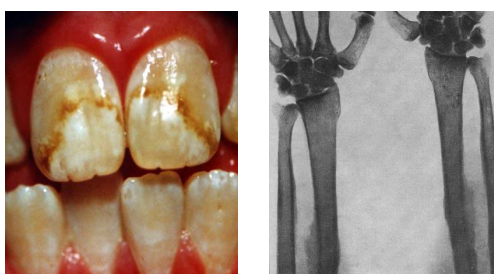


Figura 2. - Izq.) Fluorosis dental Der.) Fluorosis esquelética.

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 de 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 11.220, vigente en la provincia de Santa Fe, establece un valor límite de 1,5 mg/L.

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 y F^- con bajos sólidos totales.

Trabajos de investigación realizados en el Centro de Ingeniería Sanitaria (CIS)

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. La UNR tramitó el Registro de Marca del Proceso ArCIS-UNR® y de patente (Ingallinella, 2008).

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

Localidad	Provincia	Caudal	Año inauguración
Villa Cañas	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 (PAC), 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 10.000 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 de 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.

METODOLOGÍA GENERAL

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 filtración¹ (Carrera 1 a 15).

- 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 10 carreras de filtración (Carreras 1 a 10).

- Las técnicas analíticas utilizadas en las siguientes experiencias responden a Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF (1995), 19th Edition, USA). Para cada parámetro medido se establece a continuación el método empleado:

- pH: (Método Electrométrico).

- Turbiedad: (Método Nefelométrico), Turbidímetro HACH 2100.

- Al: Colorimétrico con Eriocromo Cianina R (Método 3500-Al D).

- F⁻: Método Electrodo Ion selectivo (Método 4500-F C).

- As: Durante los ensayos realizados en la Etapa 1 se utilizó el método 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 Dietilditiocarbamato 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 ArcCIS-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).

- Coagulante PAC 18 de Cloretil.

- Solución de hidróxido de sodio, NaOH 15N, para elevar el pH final y optimizar la remoción del Al.

¹ La *carrera de filtración* se define como el periodo de tiempo que transcurre entre dos lavados sucesivos de los filtros.

- 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. En la Tabla 3 se presentan los resultados de un análisis físico-químico completo que es representativo de la calidad determinada en los sucesivos envíos.

Tabla 2.- Valores de As, Turbiedad 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

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
Amoníaco	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 PAC. 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 PAC y diversos pH iniciales. Se utilizó una solución de ácido sulfúrico para disminuir el pH del agua cruda. 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 5 se presentan los resultados obtenidos en este ensayo, donde se puede evidenciar que a pH entre 5,5 y 6,5 mejora la remoción de F⁻.

Tabla 5.- Resultados del Ensayo 2

Jarra N°	Dosis Coagulante (mg/L)	Turbiedad Final (UNT)	F ⁻ Final (mg/L)	pH Inicial	pH Final
1	50	0,98	2,4	7	7,5
2	50	2,79	2,1	6	6,5
3	50	0,12	2,0	5	5,4

▪ El Ensayo N°3 se realizó para determinar la remoción de F⁻ y As para dosis de 100 mg/L de PAC 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⁻ es del 37,5 %. 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 Coagulante (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	No se determinó
2	100	7,0	7,3	1,9	0,011	No se determinó
3	100	6,5	7,1	1,7	< 0,01	No se determinó
4	100	6,0	6,6	1,5	< 0,01	0,25*
5	100	5,5	6,1	1,5	< 0,01	No se determinó
6	100	5,0	5,5	1,5	< 0,01	No se determinó

(*) El valor de Al corresponde a muestras filtradas

▪ En el Ensayo N°5 el objetivo fue optimizar las condiciones logradas en el Ensayo N°3, en cuanto a las concentraciones finales de Al residual, para que verifique con lo establecido por la Norma. Para esto, se prosiguió de la siguiente manera: se realizó la experiencia colocando en todas las jarras 100 mg/L de PAC 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 consintió en extraer el sobrenadante, filtrarlo por papel Whatman 40, obteniéndose 3 litros. Estos son 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 5

Jarra N°	Dosis Coagulante (mg/L)	pH Inicial (1° etapa)	pH Final (2° etapa)	Turbiedad Final (UNT)	F ⁻ Final (mg/L)	As Final (mg/L)	Al Final (mg/L)
1	100	6,0	7,3	0,22	1,7	< 0,01	0,35
2	100	6,0	7,8	0,21	1,7	< 0,01	0,22
3	100	6,0	8,0	0,28	1,7	< 0,01	0,19

Con dosis de 100 mg/L en este caso se obtuvieron valores de 1,7 mg/L de F⁻, concentraciones < 0,01 mg/L de As, y llevando el pH 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°6 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 PAC) 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 es la concentración final de F⁻. En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de dicho ensayo

Tabla 8. - Resultados del Ensayo 6

Jarra N°	Dosis Coagulante (mg/L)	pH Inicial (1° etapa)	pH Final (2° etapa)	Turbiedad 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%).

- En el Ensayo N°7 se repitió el ensayo con las condiciones óptimas determinadas en el ensayo anterior.

Jarra N°	Dosis Coag. (mg/L)	pH ini. (1° Et.)	pH ini. (2° Et.)	F ⁻ Final (mg/L)	Al Final (mg/L)
1	125	6,0	8,0	1,5	0,18

Conclusiones de los Estudios en Laboratorio: Los ensayos realizados permiten concluir que con dosis de cloruro de polialuminio 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 los F⁻ y mayores al 85% para el 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

Objetivos: 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 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, 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 3.

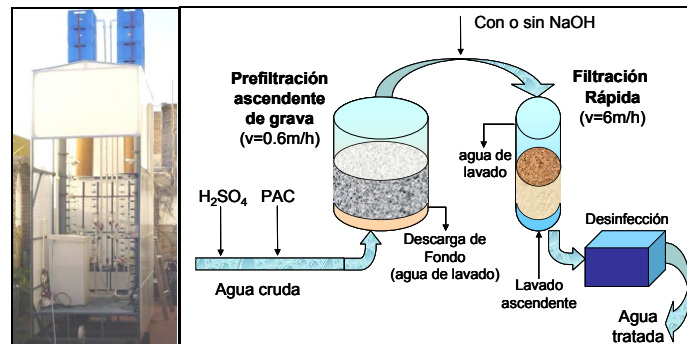


Figura 3.- Izq.)- Planta Piloto – Der.) - Proceso ArcIS-UNR®: prefiltración – filtración

- Se operaron dos líneas de tratamiento (L1 y L2) conformadas por 1 prefiltro de grava y 1 filtro rápido de arena cada una (prefiltro, PF y filtros rápidos, 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.
- La granulometría utilizada en los FR fue:
 - Línea 1: arena de tamaño efectivo 0,55 mm (provista por CIS).
 - Línea 2: arena tamaño efectivo 0,65 mm (provista por la Cooperativa).
- 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 a nivel variable: el agua filtrada ingresaba por la parte superior del FR y salía 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 iba aumentando a medida que se iba colmatando 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:
 - Corrección del pH inicial, antes del ingreso al PF: se utilizó una solución de ácido sulfúrico, H₂SO₄ (98%).
 - Coagulante: PAC 18 (cloruro de polialuminio, Cloretil). Dosis de 125 mg/L en todas las carreras realizadas.

- Corrección del pH final, antes del ingreso al FD: solución de hidróxido de sodio, NaOH 15N.

Se realizaron 15 carreras de filtración² (Carrera 1 a 15) con el esquema de operación que se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9.- Esquema de operación de la planta piloto

Carrera	Caudal de Filtración (L/h)	Solución H ₂ SO ₄	PAC (mg/L)	Solución NaOH	Regulación FR	Observaciones líneas
1 a 5	25	SI	125	SI	H variable	Puesta a punto del sistema
6 a 10	25	SI	125	SI	H variable	Funcionamiento L1 y L2
11 - 12	25	SI	125	NO	H variable	Funcionamiento L1 y L2
13 - 14	25	SI	125	SI	H variable	Funcionamiento L1
15	25	SI	125	NO	H variable	Funcionamiento L1

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:

Calidad del Agua Cruda: El agua cruda que se utilizó para operar la Planta Piloto provino de la bajada de tanque ya clorada, con características fisico-químicas similares a la presentada en la Tabla 3. En la Tabla 10 se presentan las concentraciones de As y F⁻ en agua cruda que ingresaron a la Planta Piloto en los ensayos.

Tabla 10.- 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 11 se presentan los valores promedio de pH, Turbiedad, As, F⁻ y Al para las Carrera 8 y 9, en las que se operó con las condiciones mostradas en la Tabla 9, dosificando ácido sulfúrico y PAC a la entrada del PF, e hidróxido de sodio en la entrada del FR.

Tabla 11.- Valores Promedios de la Carrera 8 y Carrera 9 para las líneas 1 y 2

Parámetro	Carrera 8					Carrera 9				
	Cruda	PF (L1)	FR (L1)	PF (L2)	FR (L2)	Cruda	PF (L1)	FR (L1)	PF (L2)	FR (L2)
pH	7,9	6,6	7,3	6,5	7,2	8,0	6,4	7,5	6,4	7,6
Turb. (UNT)	0,34	5,30	0,19	5,36	0,15	0,59	10,50	0,13	8,30	0,13

² La *carrera de filtración* se define como el período de tiempo que transcurre entre dos lavados sucesivos de los filtros.

F ⁻ (mg/L)	3,1	2,0	1,4	2,3	1,7	3,1	1,9	1,3	2,1	1,5
As (mg/L)	0,09	Nd	< 0,02	Nd	< 0,02	0,09	Nd	< 0,02	Nd	< 0,02
Al (mg/L)	Nd	Nd	< 0,03	Nd	< 0,03	Nd	Nd	< 0,03	Nd	< 0,03

Nd: no determinado

De los resultados mostrados en la Tabla 11, se desprende que la eficiencia en remoción de F⁻ en la L1 es de 54,8 % a 58,1 % mientras que para la L2 es de 45,2 % a 51,6 %. 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 sin dosificar hidróxido de sodio a la entrada del FR, cuyos resultados se muestran en la Tabla 12. Debido a problemas en la L2, solo se operó con la línea 1.

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

Parámetro	Carrera 12			Carrera 15		
	Cruda	PF (L1)	FR (L1)	Cruda	PF (L1)	FR (L1)
pH	7,9	6,5	6,6	8,0	6,8	6,7
Turb. (UNT)	0,3	8,8	0,7	0,3	4,4	1,3
F ⁻ (mg/L)	2,8	1,5	1,4	2,8	1,7	1,6
As (mg/L)	0,08	Nd	< 0,02	0,09	Nd	< 0,02
Al (mg/L)	Nd	Nd	0,27	Nd	Nd	0,47

Nd: no determinado

En la Tabla 12 se puede apreciar que las eficiencias en remoción de F⁻ y As fueron satisfactorias (42,8 % 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.

Duración de las Carreras: En la Figura 4 y Figura 5 se representaron las turbiedades y 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.

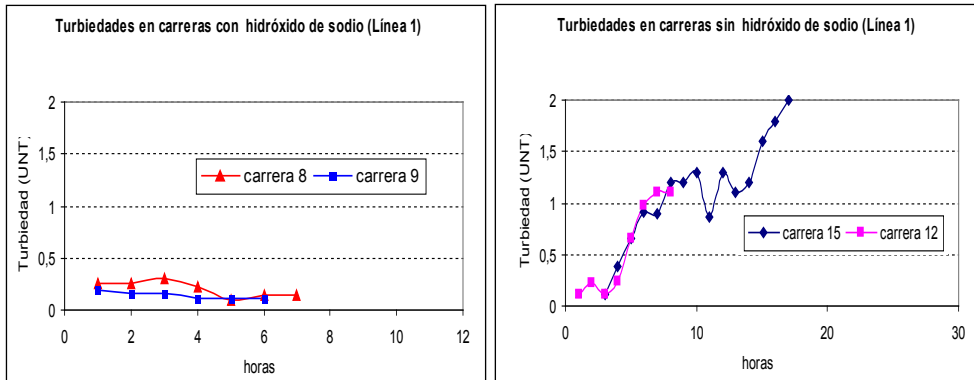


Figura 4.- Turbiedades a lo largo de las carreras 8, 9, 12 y 15. Q= 25 l/h

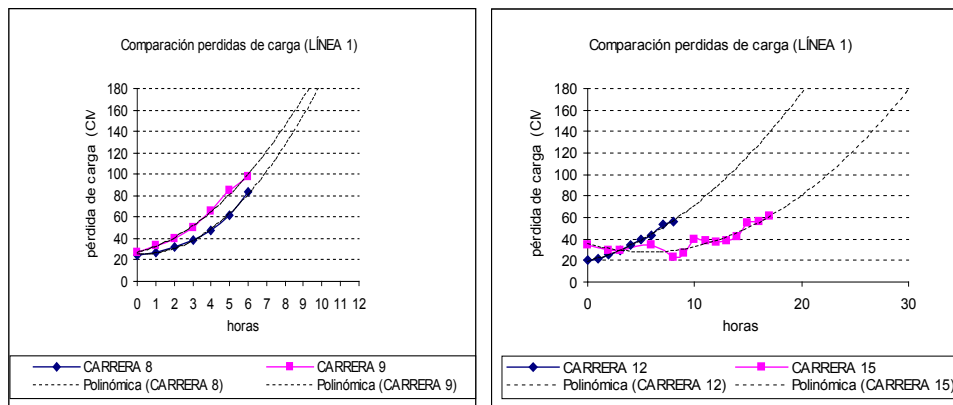


Figura 5.- Pérdidas de carga a lo largo de las carreras 8, 9, 12 y 15. Q= 25 l/h

En las Carreras 8 y 9 (con hidróxido) las turbiedades se mantienen 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 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 al 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 aluminio y mejorar la remoción de F⁻. (Ingallinella et al, 2011).

ETAPA 2: OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO ARCIS-UNR®: IMPLEMENTACIÓN DE DOBLE FILTRACIÓN RÁPIDA

Objetivos: Ensayar una modificación al esquema original del Proceso ArCIS_UNR®, reemplazando la primera etapa de filtración gruesa ascendente en mantos de grava por una filtración rápida ascendente en arena, manteniendo las eficiencias en cuanto a remoción de As y F⁻.

Metodología: Se realizaron ensayos en la Planta Piloto instalada en el CIS, con el esquema de tratamiento detallado en la Figura 6, 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

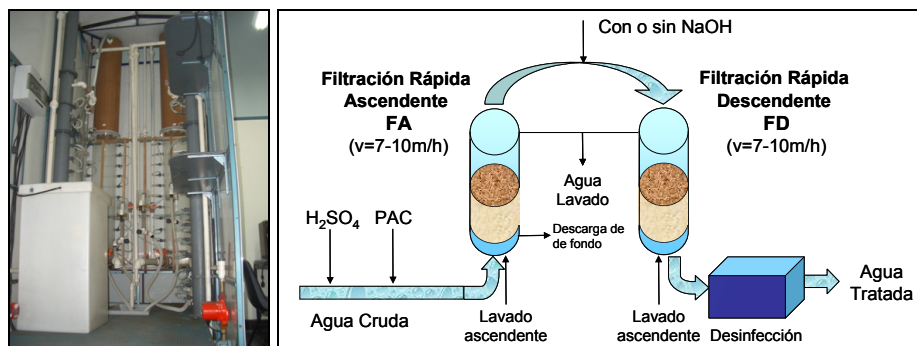


Figura 6. - Izq.)- Planta Piloto – Der.) - Proceso ArCIS-UNR® Modificado - Doble filtración rápida

▪ 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, descripto 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, descripto 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 cm 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.

- Se diseñó una configuración de descarga de fondo para el FA de acuerdo con lo revisado en la bibliografía (Di Bernardo, 1997), de manera tal de eliminar sólidos retenidos y alargar la carrera del FD. La descarga se realizó en una de las carreras, abriendo la válvula colocada en el fondo del FA, permitiendo el descenso del nivel del agua hasta que llegue a 10 cm por encima de la parte superior del lecho de arena.

- La dosificación de productos químicos utilizados fue la siguiente:

- Corrección del pH inicial, antes del ingreso al FA: solución de ácido sulfúrico, H_2SO_4 (98%).

- Coagulante: fue PAC 18 (cloruro de polialuminio, Petroquímica Río Tercero, 16,9% Al_2O_3). Dosis de 100 mg/L en todas las carreras realizadas.

- Corrección del pH final, antes del ingreso al FD: solución de hidróxido de sodio, NaOH 15N.

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 18 carreras en total, 8 correspondientes a la puesta a punto del sistema. En la Tabla 13 se resumen las condiciones operativas bajo las cuales se realizaron las distintas carreras. Para cada carrera se fijaron ciertos parámetros operativos tales como dosis de PAC y granulometría del FD, y se variaron otros como velocidad de filtración (caudal), granulometría del FA, distintas condiciones de pH inicial, incorporación de una etapa de alcalinización intermedia, y realización de lavados intermedios del FA, 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.

Tabla 13. - Esquema de operación de la Planta Piloto con agua de la localidad de Coronel Moldes.

Carrera	Velocidad de Filtración (m/h)	Configuración Granulometría FA	pH ingreso FA	Solución NaOH	pH salida FA	Descarga de Fondo
1	10	1	6,6	NO	6,7	SIN
2-3	10	1	6,0	SI	7,3	SIN
4	10	1	6,2	SI	7,3	CON
5-6	10	1	6,9	NO	7,0	SIN
7	7	1	6,3	SI	7,6	SIN
8	7	1	6,9	NO	7,0	SIN
9	7	2	6,1	SI	7,1	SIN
10	7	2	7,0	NO	7,1	SIN

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.

Resultados y Discusión:

Calidad del agua cruda: En la Tabla 14 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 14. - Valores de pH, Turbiedad y concentraciones de As y F- en el agua cruda

Parámetro	Unidades	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 distintos resultados que se fueron presentando a lo largo de toda esta parte de la investigación.

Relación entre pH inicial y concentración de Al residual: En la Tabla 15 se comparan los resultados de la Carrera 1 con las Carreras 2 y 3 (réplicas entre sí).

Tabla 15. - Relación entre pH inicial y concentración de Al residual

CARRERA	pH ingreso FA (prom.)	pH salida FD (prom.)	Turb. FD (prom. UNT)	Al FD (prom. mg/L)
1	6,6	6,7	1,1	0,36
2	6,0	7,3	0,1	< 0,02
3	6,3	7,3	0,1	< 0,02

En la Carrera 1, se trabajó con una velocidad de filtración de 10 m/h, pH inicial de 6,6, y sin agregado de hidróxido de sodio, se llegó a un pH a la salida del FD de 6,7. Se puede observar en la Tabla 15 que la turbiedad a la salida del FD es alta (en promedio 1,1 UNT), y el Al residual mayor a lo permitido por la Norma (0,20 mg/L). Para mejorar las turbiedades y el Al residual a la salida del FD, trabajando con pH

inicial próximos a 6,00, se incorporó la etapa de alcalinización antes del ingreso al mismo, y así permitir la formación de nuevos precipitados de Al para facilitar su remoción en el FD. Las Carreras 2 y 3, se realizaron bajo similares condiciones de operación a la Carrera 1 (vel.: 10 m/h, pH: 6,0 y 6,3), pero se aumentó el pH a la salida del FD mediante una etapa de alcalinización. De esta forma, se puede observar en la Tabla 15, que tanto las turbiedades como el Al residual a la salida del FD mejoraron con respecto a los resultados de la Carrera 1.

Comparando los resultados de la Carrera 1 con los de las Carreras 2 y 3, se verifica la necesidad de alcalinizar a la entrada del FD, para controlar el Al residual cuando se trabaje a pH iniciales de 5,5 a 6,5.

Descargas de Fondo del FA: En la Tabla 16 se muestra como influye la implementación de descargas de fondo del FA, sobre la duración de la carrera de filtración.

Tabla 16.- Influencia de la implementación de las descargas de fondo del FA en las duraciones de las carreras

CARRERA	Duración de la carrera (horas)	Descarga de Fondo del FA
2	2,8	SIN
4	4,9	CON

La Carrera 4 se realizó bajo condiciones de operación similar en cuanto a pH iniciales y finales respecto de las Carrera 2 y 3, con la diferencia que en esta nueva carrera se hicieron 2 descargas de fondo del FA. Para una carga disponible del FD de 115cm, se observó que la Carrera 2 duró 2,80hs, mientras que la Carrera 4 tuvo una duración de 4,9hs. Esto indica que la duración de la carrera se extendió un 43% con las descargas de fondo del FA.

Relación entre pH inicial y remoción de F⁻ para una velocidad de filtración de 10 m/h: Como se puede apreciar en la Tabla 17 no se detectaron diferencias en cuanto a la remoción de F⁻ bajo distintas condiciones de pH inicial y final, 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 30 %. En ninguno de los casos, la concentración de F⁻ a la salida del FD se aproximó al límite establecido por la norma.

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

Tabla 17.- 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
5	10	6,9	7,0	2,6	1,8

Relación entre pH inicial y remoción de F⁻ para una velocidad de Filtración de 7 m/h: En la Tabla 18 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 18. - 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	7,0	7,1	2,5	2,0

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) lograron mejores eficiencias (38 y 40%), con concentraciones de F⁻ a la salida del FD cercanas al valor establecido por Norma.

Comparando los resultados entre las carreras realizadas con velocidad de filtración de 10 m/h (Tabla 17) y las realizadas con velocidades de 7 m/h (Tabla 18), 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 al 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.

A continuación se presentan las carreras en las que se lograron los mejores resultados en cuanto a remoción de As y F.

En la Figura 7 se graficaron las pérdidas de carga totales generadas en los mantos filtrantes de los filtros a lo largo de la duración de las Carrera 7 y Carrera 9.

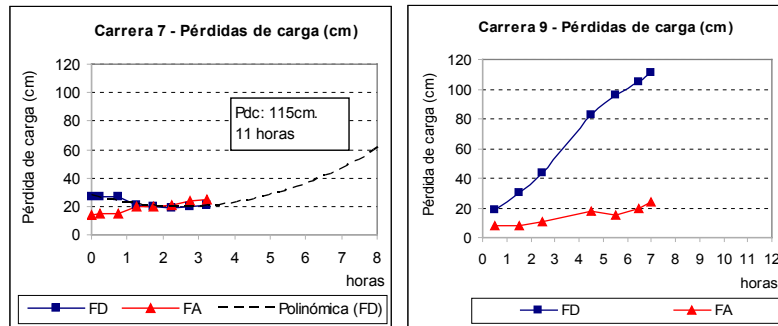


Figura 7.- Izq.) - Pérdidas de carga de la Carrera 7 - Der.) - Pérdidas de carga de la Carrera 9.

Como se puede apreciar en la Figura 7-Izq., la Carrera 7 fue finalizada por cuestiones operativas 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 11 horas de operación se llegaría a la máxima pérdida de carga disponible de 115 cm. En la Figura 7-Der., se observa que la Carrera 9 se operó aproximadamente 7 horas, en donde alcanzó la máxima pérdida de carga disponible del FD.

En la Figura 8 y Figura 9 se representaron otros resultados de las Carreras 7 y 9. La Figura 8-Izq. y Figura 9-Izq. grafican las turbiedades de salida del FA y FD medidas a lo largo de la carrera. Mientras que las Figura 8-Der. y Figura 9-Der. Representan las pérdidas de carga que se van produciendo a distintas alturas del manto filtrante del FA.

Comparando entre sí las gráficas de turbiedades, se observa que en ambas carreras las turbiedades a la salida del FD se mantuvieron bajas. No así las turbiedades del FA, ya que las de la Carrera 7 se mantuvieron bajas a lo largo de la duración de la carrera, mientras que en la Carrera 9 no ocurrió lo mismo. Esta diferencia puede atribuirse a las distintas granulometrías utilizadas en el FA en cada caso: en la Carrera 7, donde se uso la granulometría tipo 1 con un manto filtrante de aproximadamente 1,20 m, se produjo una mejor remoción que con la granulometría tipo 2, utilizada en el FA durante la Carrera 9, donde es menor la longitud del manto filtrante (0,70 m).

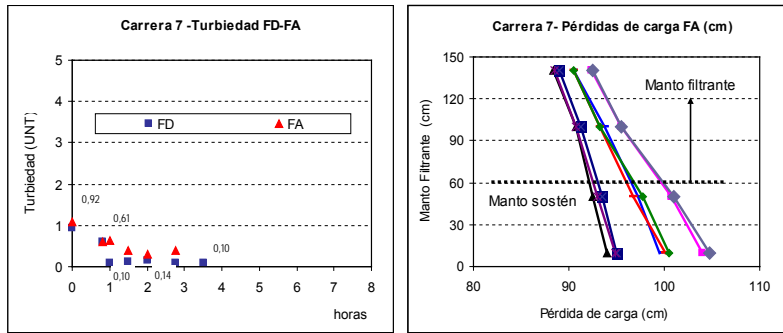


Figura 8.- Resultados de la Carrera 7 ($V = 7\text{m/h}$, pH inicial = 6,3, Granul. FA = Tipo1)
Izq.) - Gráfica de Turbiedades - Der.) – Gráfica de las pérdidas de carga a distintas alturas del manto del FA.

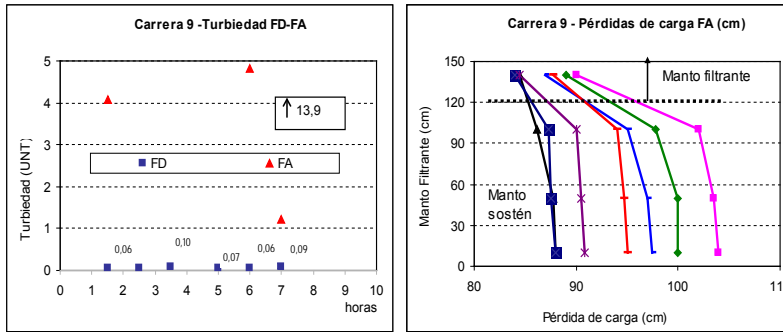


Figura 9.- Resultados de la Carrera 9 ($V = 7\text{m/h}$, pH inicial = 6,1, Granul. FA = Tipo2)
Izq.) - Gráfica de Turbiedades – Der.) - Gráfica de las pérdidas de carga a distintas alturas del manto del FA

Finalmente, en la Figura 10 se representan las eficiencias en remoción de As y F^- de ambas carreras.

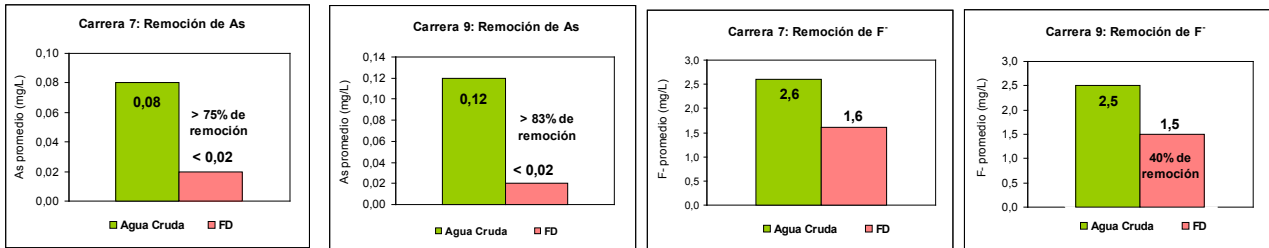


Figura 10.- Resultados de remoción de As y F^- de las Carrera 7 y Carrera 9.

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%, y una remoción en F^- entre 38 y 40%, y duraciones en las carreras de filtración entre 7 y 11 hs.

No se observaron grandes diferencias en remoción con respecto a los dos tipos de granulometrías utilizadas en el FA.

CONCLUSIONES GENERALES

- Por lo tanto, se propuso modificarlo, implementando un sistema de doble filtración rápida que permita reducir superficies y disminuir costos de construcción.
- 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.

REFERENCIAS

- APHA, AWWA, WEF (1995) 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.
- ENHOSA – Normas para la Presentación de Procesos de Agua Potable. Cap VII - 13: Doble Filtración Rápida, Di Bernardo (1997).
- 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).
- Hopenhayn-Rich, C.; Biggs, M. L.; Smith A. H. (1998). Lung and kidney cancer mortality associated 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.

Ingallinella, A.M., Pacini, V.A., Fernández, R. G., Vidoni R., 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.

Martín Wegelin (1996) *Surface Water Treatment by Roughing Filters*.

USEPA(2000) USEPA, Environmental Protection Agency (2000), Federal Register,40 CFR Parts 141 and 142, National Primary Drinking Water Regulations; Arsenic and Clarifications to Compliance and New Source Contaminants Monitoring: Proposed Rule.

WHO, World Health Organization, (2004). *Guidelines for Drinking-water Quality - Three Edition*, Geneva

WHO, World Health Organization, (2011) *Guidelines for Drinking-water Quality - Four Edition*., Geneva