



Editorial de la Universidad  
Tecnológica Nacional

## **Remoción del Arsénico mediante Coagulación, Filtración y Sedimentación *Comparación con tecnologías disponibles y análisis de una planta tipo***

**Seminario: Agua**

Docentes:

**Milena Echevarria, Roberto Rodríguez**

Integrantes:

**Bournod, Luciano**

**Cabezas, Emanuel**

**Pérez, Cesar**

Carrera de Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental  
Facultad Regional Bahía Blanca  
Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N.

2010

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe

<http://www.edutecne.utn.edu.ar>

[edutecne@utn.edu.ar](mailto:edutecne@utn.edu.ar)

## Índice

1. Introducción
2. El arsénico en Argentina
3. Estados del arsénico en el agua
4. Efectos del arsénico en la salud: efectos agudos y crónicos
5. Límites máximos de concentración
6. Remoción del arsénico del agua – Tecnologías disponibles
  - a. Osmosis inversa
  - b. Intercambio iónico
  - c. Adsorción
  - d. Ablandamiento con cal
7. Proceso de coagulación-sedimentación-filtración: Estudio de caso
  - a. Características generales de una planta de tratamiento típica
  - b. Características fisicoquímicas del Agua a tratar
  - c. Descripción de sistema de captación
  - d. Análisis del proceso
    - Análisis en laboratorio
    - Corrección de pH - Oxidación
    - Coagulación/floculación
    - Sedimentación
    - Filtración
    - Tratamiento de barros
8. Conclusión
9. Bibliografía

## 1. Introducción

El presente trabajo pretende hacer una revisión de las tecnologías disponibles para la remoción del Arsénico (As) del agua; para ello se hace una breve descripción de las distintas alternativas de tratamiento, para luego enfocar el estudio en el proceso de Coagulación-Sedimentación-Filtración, del cual se dará un marco teórico y la aplicación en una planta típica (4.000 habitantes servidos; 50 m<sup>3</sup>/hora) para una mayor comprensión.

Antes de esto, y a modo introductorio, se analiza el estado de situación del As en Argentina, evaluando el modo en que se encuentra en el agua, las enfermedades que produce y el marco legal, sobre todo considerando que la tendencia mundial es a reducir cada vez mas su contenido para el agua de consumo.

## 2. El arsénico en Argentina

Las regiones afectadas por el contenido de As en la argentina conforman una de las áreas más extensas del mundo. Las provincias de Córdoba, La Pampa, Santiago del Estero, San Luís, Santa Fe, Buenos Aires, Chaco, Formosa, Salta, Jujuy, Tucumán, La Rioja, San Juan y Mendoza son las regiones más afectadas.

Se ha demostrado que el origen de la contaminación natural con arsénico en las aguas subterráneas se debe a la actividad volcánica de la cordillera de Los Andes. Los acuíferos arseníferos están formados por una secuencia sedimentaria con predominio de loess<sup>1</sup> de edad cuaternaria. Parte del arsénico en las aguas puede derivar de la disolución de vidrio volcánico.

La movilidad del arsénico entre el sedimento y el agua se debe a factores que están controlados por el pH, y las condiciones redox. Los procesos geoquímicos que intervienen en la movilización del arsénico son de adsorción-desorción. El arsénico inorgánico puede ser adsorbido por óxidos de hierro, manganeso y aluminio.

El aumento de la concentración de arsénico en agua dependerá del régimen hidrogeológico y paleohidrogeológico del acuífero. Es decir, que el problema tiene una dimensión temporal. Un factor crítico es el tiempo de residencia del agua en el

---

<sup>1</sup> Loess: material geológico sedimentario eólico compuesto por silicatos, carbonato de calcio detritos orgánicos y minerales del grupo de las arcillas. Estos son trasportados por tormentas de polvo a lo largo de miles de años.

acuífero. Una consecuencia de esto, es que en acuíferos profundos y antiguos la concentración de arsénico es baja. El aumento en el caudal de agua extraído, es decir una mayor explotación, de un pozo realizado en un acuífero arsenífero, producirá en el tiempo agua con mayor contenido de arsénico. Por este motivo, suelen realizarse nuevas perforaciones. Pero estas son soluciones de corto o mediano plazo, ya que el acuífero es el mismo, y por lo tanto a largo plazo puede incrementarse la concentración de arsénico en toda la zona abastecida por él.

En cada una de las provincias afectadas, pueden encontrarse diferentes situaciones. Existen localidades que tienen provisión de agua a través de una red de distribución, pero si estas no cuentan con una planta de remoción de arsénico, el agua distribuida probablemente contenga niveles de arsénico superiores a 0,010 mg/L (10 ppb).

No todas las aguas de pozo provenientes de suelos con altos niveles de As lo contienen. La presencia del mismo en el agua depende de: la forma química del As en el suelo, de la alcalinidad, y la dureza del agua. En general, a mayor alcalinidad y menor dureza, es mayor el contenido de arsénico en agua.

En aguas de la primera napa el contenido de arsénico es variable, por la influencia de las lluvias y las sequías y también por la explotación de los pozos. En napas más profundas el contenido de arsénico suele ser bajo y constante, pero el agua puede ser salobre.

Si bien la problemática del agua con arsénico en la República Argentina, se debe fundamentalmente a la presencia natural del arsénico, no es conveniente ignorar el aporte al incremento de su concentración que la actividad del hombre puede ocasionar. Las fuentes antropogénicas se deben al uso de compuestos de arsénico, como por ejemplo: óxido arsenioso, óxido arsénico, arseniatos de calcio y plomo, arsenicales orgánicos, arsénico elemental.

Sus usos son:

- Insecticidas o herbicidas para cultivos (vid, tomate, algodón, café, etc.).
- Antiparasitario de animales (ovejas, cabras etc.).
- Tratamiento de maderas (preservante por su acción fungicida).
- Subproducto de fundición de metales: cobre, estaño, cobalto y plomo.
- En la combustión del coke.
- En la industria de semiconductores.
- Terapéutica humana y veterinaria.

### 3. Estados del arsénico en el agua

El arsénico puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica, siendo esta última la forma en que se haya en las aguas naturales.

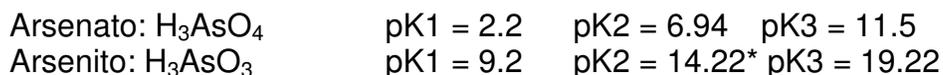
A su vez presenta cuatro estados de oxidación bajo condiciones normales siendo los más comunes sus estados trivalente As (III) (arsenitos) y pentavalente As (V) (arsenatos).

En aguas superficiales, con condiciones aeróbicas, es más frecuente encontrar el arsénico en estado pentavalente As (V), mientras que en aguas profundas o de pozo, en condición de anaerobiosis es más común encontrarlo en estado trivalente As (III)

En pH de 4 a 10 el As (V) se encuentra cargado negativamente, lo que explica su mayor eficiencia en los sistemas de remoción, comparándolo con el As (III) que, a esos valores de pH, no posee carga.

Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio a especies pentavalentes y, a la inversa, aquellas que favorecen la reducción cambian el equilibrio al estado trivalente.

La ionización de arsénico está expresada por la constante de disociación, pKa, cuyos valores para el arsenato y arsenito son:



La capacidad de disociación del arsenato es más alta que la del arsenito, ya que sus constantes de disociación son menores. Esto hace que el arsenato se combine más fácilmente con otros compuestos y su remoción sea más eficiente, si se lo compara con el arsenito. Esto justifica la oxidación, en caso de tener el arsénico en su estado trivalente, previo al tratamiento del agua. En el gráfico 1 se observan los cambios de estado de ionización de As (V) y As (III) frente a diferentes pH.

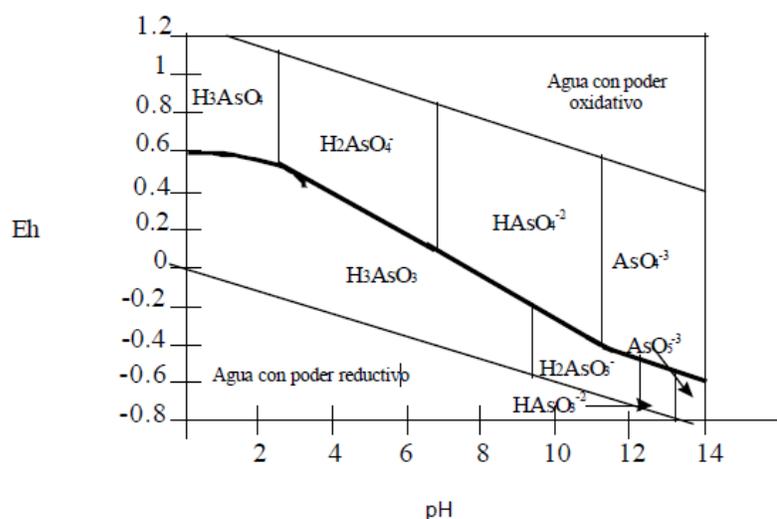


Gráfico 1 – Estados del As a diferentes pH

#### 4. Efectos del arsénico en la salud

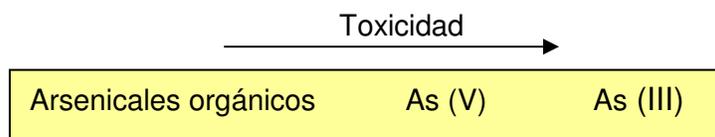
Las vías más ligadas con los modos de exposición son:

- Por ingestión
- Por inhalación
- Dérmica

Los **efectos agudos** más destacados de la intoxicación aguda por arsenicales inorgánicos son:

- Daño severo gastrointestinal con dolores, vómitos y diarrea.
- Vasodilatación, caída de la presión sanguínea, shock.
- Daño renal glomerular y tubular con reducción de volumen urinario y anuria final.
- Depresión y parálisis de la respiración. Esta es frecuentemente la causa de muerte.
- Pérdida de movimientos voluntarios y parálisis de origen central.
- Hipotermia.
- Contracciones musculares.
- Anormalidades cardíacas.

La toxicidad de los compuestos de arsénico es altamente dependiente de su forma química:



Los **efectos crónicos** son:

- a) Tipo general.
- b) Teratogénesis.
- c) Mutagénesis.
- d) Carcinogénesis.

a) Tipo general:

- Desbalance electrolítico, pérdidas excesivas desde sangre a tejidos y tracto intestinal.
- Depresión hematopoyética, disminución de leucocitos y ocasionalmente anemia aplásica.
- Inflamación de ojos y tracto respiratorio.
- Pérdida de apetito y peso.
- Daño hepático de distinto grado: ictericia, cirrosis, etc.
- Alteraciones sensoriales.
- Dermatitis: hiperpigmentación, hiperqueratosis palmo-plantar, descamación y caída del cabello. (Indicadores de intoxicación crónica).
- Estrías blancas en uñas.
- Isquemia de miocardio.
- Enfermedades vasculares periféricas (enfermedad del “pie negro”).

b) Teratogénesis: Alteración estructural y funcional del desarrollo que impide la formación armónica del individuo. En casos extremos puede conducir a la muerte del embrión. El As y algunos de sus compuestos han demostrado tener propiedades teratogénicas. Se ha demostrado tanto en humanos como en animales, aunque en humanos los datos son escasos.

Por ejemplo se observó mayor incidencia de malformaciones múltiples en hijos de empleadas de fundiciones de metales expuestas a As, que en niños nacidos en el vecindario.

c) Mutagénesis: Consiste en una modificación de las bases que constituyen el ADN. El As ha demostrado ser mutágeno en humanos y en animales de experimentación. Las evidencias en el hombre incluyen tanto:

- observaciones de frecuencia aumentada de algunas consecuencias clínicas de las mutaciones (vejez prematura, cáncer, anomalías congénitas transmisibles, mortalidad del feto, esterilidad, etc.),
- observaciones y anomalías a nivel del material genético.

d) Carcinogénesis: Desde fines del siglo XIX, el As fue una de las primeras sustancias reconocida como carcinógeno humano. En poblaciones humanas expuestas, el As está asociado a tumores de piel y pulmones, pero también puede asociarse con tumores de vejiga, riñón e hígado. A pesar de ser claramente un carcinógeno humano, su carcinogenicidad continúa siendo un enigma. De hecho, es el único agente que la IARC<sup>2</sup> considera un carcinógeno humano, a pesar de que son “inadecuadas” las evidencias de su potencial carcinogénico en animales.

Los datos de su carcinogenicidad en animales son negativos o dudosos para la IARC. Datos en animales: Muchos estudios dieron negativos.

Datos en humanos: Gran número de casos de cáncer de piel en personas expuestas a As inorgánico a través de drogas, agua o pesticidas. Dos estudios epidemiológicos diferentes muestran resultados opuestos con respecto a la correlación entre exposición a As por agua de bebida y cáncer de piel. Varios casos de cáncer ocupacional de pulmón, hígado. El arsenito atraviesa la placenta y produce abortos y malformaciones.

Evaluación: Inadecuada evidencia en animales, suficiente evidencia de cáncer de piel y pulmón en humanos.

### Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico

Sin duda una de los problemas más importantes del As en aguas es el Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (de ahora en más: ACRE), enfermedad producida por el consumo de arsénico a través del agua y los alimentos. Esta enfermedad se caracteriza por presentar lesiones en la piel y alteraciones sistémicas cancerosas y no cancerosas, luego de un período variable de exposición a concentraciones mayores de 10 ppb (0,01mg/L) en agua de consumo diario. Estudios recientes han demostrado que la población infantil expuesta durante el período prenatal y posnatal puede tener menor desempeño neurológico que los niños no expuestos.

---

<sup>2</sup> International Agency of Research of Cancer

## 5. Límites máximos de concentración

El Código Alimentario Argentino establecía hasta 2007 un valor máximo de concentración de As en agua de  $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ . Ese año se decidió bajar el valor a  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ , de acuerdo a una resolución que establecía un plazo de implementación de 2 años.<sup>3</sup>

Esto se corresponde con la tendencia a nivel mundial que viene bajando progresivamente las concentraciones máximas: la Unión Europea en publicó su nuevo valor de  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$  en 1998, al igual que la EPA lo hizo en 2001<sup>4</sup>.

Teniendo en cuenta las recientes modificaciones en la legislación y sus tendencias, se hace imperativo pensar en nuevas formas de remover el As del agua, pensando siempre en aumentar la eficiencia y sin dejar de lado las características regionales/locales y las condiciones coyunturales.

## 6. Remoción del arsénico del agua - Tecnologías disponibles

Existen en diversas alternativas para la remoción del As en agua. Cada una presenta ventajas y desventajas y, a la hora de su elección en la etapa de diseño, su conveniencia estará dada por su eficiencia, costos, tamaño de población a la que sirve, condiciones de mercado, entre otros.

Además se deberán tener en cuenta parámetros fisicoquímicos del agua, algunos de los cuales se presentan en el siguiente listado.

*Parámetros de diseño del sistema de tratamiento:*

- Conductividad ( $20^{\circ}\text{C}$ )
- Residuo conductimétrico
- pH
- Alcalinidad
- Cloruro ( $\text{Cl}^{-}$ )
- Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )
- Nitrato ( $\text{NO}_3^{-}$ )
- Dureza total
- Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )
- Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ )
- Sodio + Potasio ( $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ ), expresados como  $\text{Na}^{+}$
- Flúor ( $\text{F}^{-}$ )
- Hierro ( $\text{Fe}$ )

---

<sup>3</sup> Código Alimentario Argentino Capítulo XII – Bebidas hídricas, agua y agua gasificada – Agua potable – Art. 982.

<sup>4</sup> USEPA: <http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/arsenic/index.cfm>

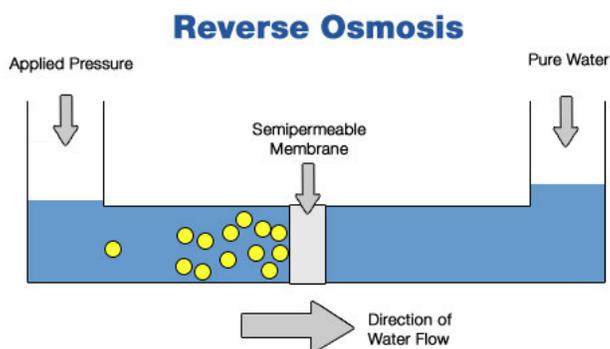
- Manganeso (Mn)
- Cromo VI (Cr(VI))
- Cobre (Cu<sup>2+</sup>)
- Boro (B)
- **Arsénico (As)**
- Mercurio (Hg)
- Plomo (Pb)

A continuación se hace una breve descripción de algunas de las tecnologías disponibles en la remoción de As, sin considerar la de coagulación/floculación-sedimentación-filtrado, que es en la que motiva el presente trabajo y que será estudiada con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

### a) Osmosis inversa

Se entiende por ósmosis, el pasaje del agua a través de una membrana semipermeable, de una solución menos concentrada hacia una de mayor concentración. Esta diferencia de presión se denomina presión osmótica.

La ósmosis inversa se produce cuando se ejerce presión para invertir el flujo osmótico normal. Al aplicar presión, el agua es forzada a pasar a través de la membrana semipermeable desde el lado más concentrado (agua cruda), hacia el lado menos concentrado (agua tratada), quedando retenidos en la membrana, por su tamaño, los iones del arsénico.



Esquema 1 - Osmosis inversa<sup>5</sup>

La eficiencia en la remoción de As de los equipos de ósmosis inversa puede llegar al 98%, siendo su mayor problema el costo que origina la utilización de reactivos y la reposición de la membrana semipermeable (4 o 5 años de vida útil).

---

<sup>5</sup> Esquema: Hydrocomponents & Technologies Inc. <http://www.hcti.com/sm/aboutro/aboutro.html>

Para el funcionamiento de la planta de ósmosis se deben tener en cuenta como principales factores: la presión, la temperatura de operación, la calidad del afluente (en cuanto a su contenido de sales y As) y la presencia de oxidantes (como el cloro) que deterioran la membrana y obligan a un pretratamiento.

Además debe considerarse el posterior tratamiento del agua que queda como solución concentrada (agua remanente del proceso) y que tiene altos contenidos de sales y de iones de As.

### **b) Intercambio iónico**

El intercambio iónico es un proceso fisicoquímico de intercambio reversible de iones entre una fase líquida y una sólida, donde no hay un cambio permanente en la estructura del sólido. La solución se pasa a través del lecho hasta que se satura y comienza la fuga de contaminantes. En ese momento la resina (fase sólida) se reactiva con una solución de regenerante que lleva los contaminantes retenidos para disposición como efluente líquido.

Las resinas más utilizadas para la remoción del As(V) son las sulfato selectivas, mientras que las nitrato selectivas también remueven As (III).

En la etapa de diseño se debe considerar: el pH, la capacidad de intercambio, la inyección del regenerante, la presencia de otras sustancias iónicas (sulfatos, cloruros, entre otros), el ensuciamiento de las resinas, etc.

### **c) Adsorción**

La adsorción es un proceso de transferencia de masa, basado en la capacidad de determinadas sustancias en la retención de moléculas sobre su superficie de una manera más o menos reversible.

La capacidad de adsorción depende de la superficie específica del material, la naturaleza del enlace entre sustancia adsorbida y adsorbente, y tiempo de contacto entre sustancia y adsorbente.

El As puede ser adsorbido en la superficie de varios adsorbentes, como pueden ser:

- Alúmina activada, con una composición similar a  $Al_2O_3$ , en el cual el agua a tratar se pasa a través de un lecho fijo que contiene a dicha sustancia. Es muy efectivo para remover As(V) y el pH debe estar cerca de 8.
- Hierro y otros óxidos.
- Adsorbentes naturales: bentonitas, sílices, etc.

#### **d) Ablandamiento con cal**

El ablandamiento con cal se utiliza para quitar la dureza al agua mediante el agregado de cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Además, el método es efectivo para la remoción de As (III) y (V), aunque para reducir a valores de 0,010 ppm (límite vigente para Código Alimentario Argentino) se necesita de otro tratamiento. Debe tenerse especial cuidado en el manejo del pH ya que cambia notablemente el proceso y como otra desventaja produce una gran cantidad de barros.

### **7. Proceso coagulación-sedimentación-filtración: Estudio de caso**

Las condiciones socio-económicas de un país limitan el accionar y modifican las tendencias en el uso de algunas tecnologías. Esto es lo que ocurrió en Argentina en el caso del tratamiento de remoción de As para el agua de consumo. En la década del 90' principalmente, se importaron plantas compactas de tratamiento por ósmosis inversa, que tenían gran eficiencia y que daban solución al problema del contenido de As en agua. Los inconvenientes comenzaron a notarse, luego de la crisis socio-económica del año 2001, ya que el proceso requería del cambio periódico de las membranas semipermeables (cada 4 o 5 años) y sus precios en dólares se hacían muy elevados.

Fue por esto que comienzan a utilizarse otros métodos, como es el caso del de coagulación-sedimentación-filtración, que dan similares resultados en términos de eficiencia operativa y que, a su vez, resultan económicamente sustentables.

Esta sección del trabajo se organizará de la siguiente manera: primero se enunciarán las características generales de la planta de tratamiento tipo, se expondrán las características fisicoquímicas del agua a tratar y se hará una descripción de sistema de captación, para luego hacer un análisis más minucioso del proceso, brindando un marco teórico y los parámetros de operación específico para cada etapa.

La planta de planta de tratamiento a analizar esta diseñada para dotar de agua potable a unos 4.000 habitantes en una localidad del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, bajo los procesos de coagulación, sedimentación y filtración. Como la planta aun no se encuentra en funcionamiento no podremos describir el comportamiento práctico de dicho proceso, pero lo plantearemos como alternativa de proyecto. Igualmente se expondrán algunos parámetros de diseño.

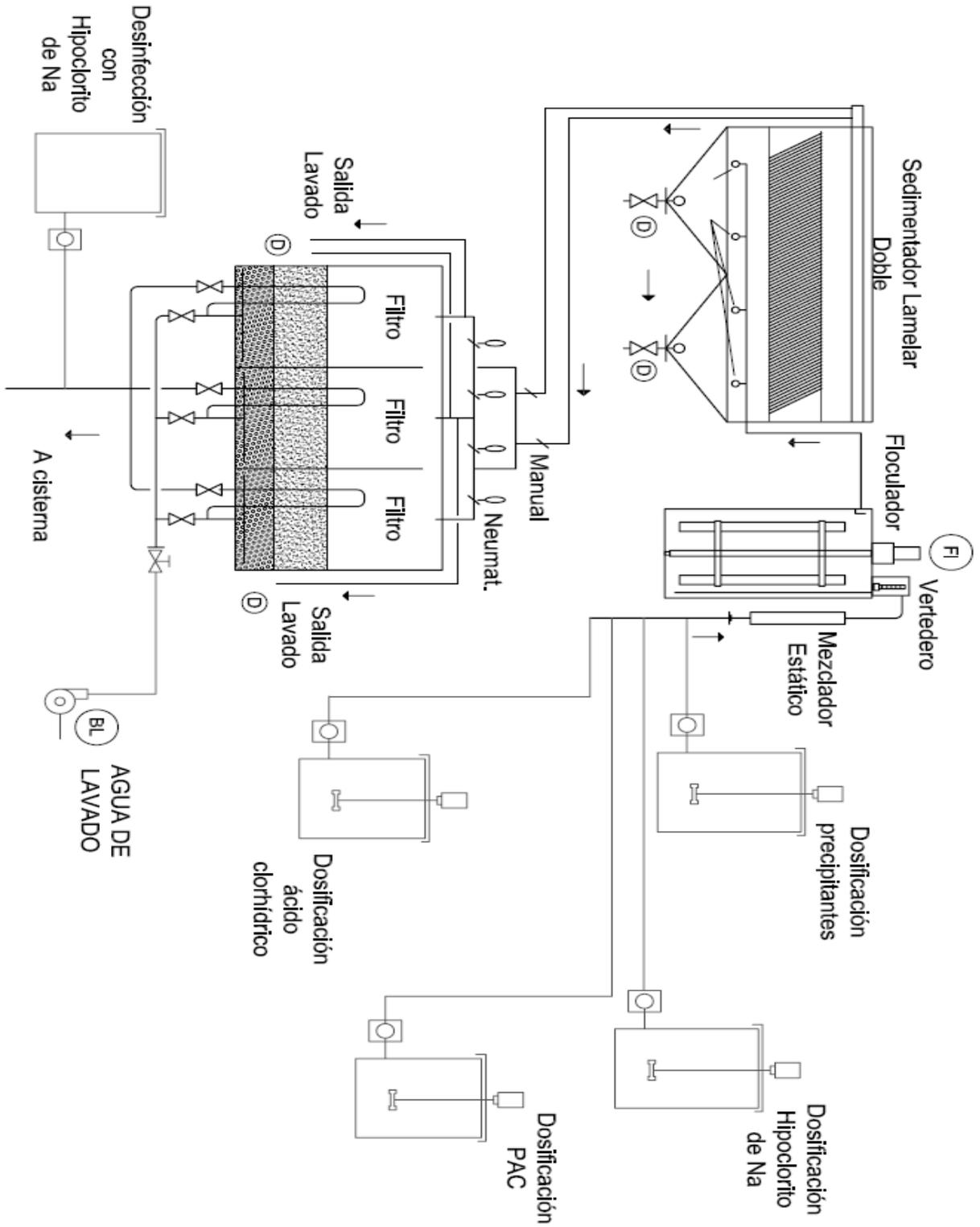
### a) Características generales de una planta de tratamiento típica

<b>Tipo</b>	Compacta modular → Objetivo: favorecer el montaje y transporte desde fábrica.	
<b>Remoción</b>	Arsénico pentavalente	
<b>Caudal Nominal</b>	50 m <sup>3</sup> /h	
<b>Caudal Máximo</b>	58 m <sup>3</sup> /h	
<b>Forma de trabajo</b>	Impulsión hasta cámara de carga, por rebalse, decantación lamelar, filtros descendentes por gravedad, almacenaje en cisterna por gravedad.	
<b>Partes</b>	Acueducto Recolector	Diámetro nominal: 110 mm, Material PVC, Cl 6.
	Sala de dosificación	Medición de caudal: Caudalímetro magnético
		Inyección de productos químicos: Acido Clorhídrico (HCl), PAC <sup>6</sup> , Hipoclorito de Sodio (NaClO), Precipitante “Sanurfloc 171”.
		Mezclador estático en línea. Medición pH.
	Cámara de Carga	Dispensor.
		Medición de caudal por vertedero triangular.
	Floculador	Tiempo de retención: 15 minutos, Volumen: 13,5 m <sup>3</sup> , Agitado: agitador a paletas a 6 RPM.
	Decantador	Decantador Lamelar Doble, Carga Superficial: 100m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día,
		Tiempo de retención: 50 minutos
	Cámara repartidora	A compuertas neumáticas.
Filtros	Cantidad: 3	
	Velocidad de Filtración media: 130 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día	
	Manto Filtrante: Piedra (Granometría: 30-20, 20-12, 12-6), Grava (Granometría: 6-1.2, 1.2-0.9), Arena (Granometría: 0.6), Antracita.	
	Carrera del Filtro: 24 hs Volumen Agua de Lavado: 30 m <sup>3</sup> en 5 minutos.	
Sifones de salida y cañería recolectora		

*Cuadro 1 - Características planta de tratamiento*

<sup>6</sup> PAC: Policloruro de Aluminio

Diagrama general de la planta



## b) Características fisicoquímicas del agua a tratar

Las características fisicoquímicas del agua son fundamentales a la hora del diseño y de la operación de la planta. En el cuadro 2 se presentan algunos de los parámetros más importantes medidos en muestras de agua tomadas a la entrada de la planta.

Parámetro	Valor	Unidad
Turbiedad	0,34	UNT
pH	7,88	-
Alcalinidad	504	
Colif. Totales	A	A/P
Color	2,5	Uc.
Olor	Inodora	NOU
Cloruro	147	mg/l
Hierro	0,1	mg/l
Sodio	354	mg/l
Sulfato	22,3	mg/l
SDT	1186	mg/l
<b>Arsénico</b>	<b>0,11</b>	<b>mg/l</b>
Flúor	1,7	mg/l
Manganeso	0,05	mg/l
Nitrato (NO <sub>3</sub> -)	156	mg/l
Nitrito (NO <sub>2</sub> -)	0,05	mg/l

*Cuadro 2 – Parámetros fisicoquímicos*

## c) Descripción de sistema de captación

Explotación:

Perforación 1:

- Caudal : 7m<sup>3</sup>/h
- Profundidad: 20mts
- Nivel Dinámico: 8mts

Perforación 2:

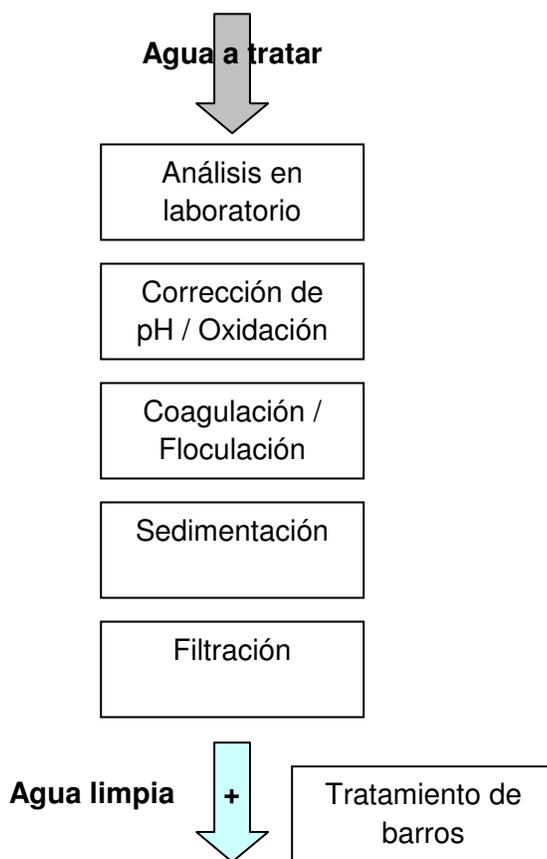
- Caudal: 10m<sup>3</sup>/h
- Profundidad: 24mts

Perforación 3:

- Caudal: 17m<sup>3</sup>/h
- Profundidad: 30mts

El agua es transportada a través de un acueducto recolector, aproximadamente 100 mts hasta el ingreso de la planta, lo cual garantiza un mezclado óptimo del agua de las tres perforaciones. Esta mezcla será la analizada para el diseño y ensayo de la planta.

#### d) Análisis del proceso



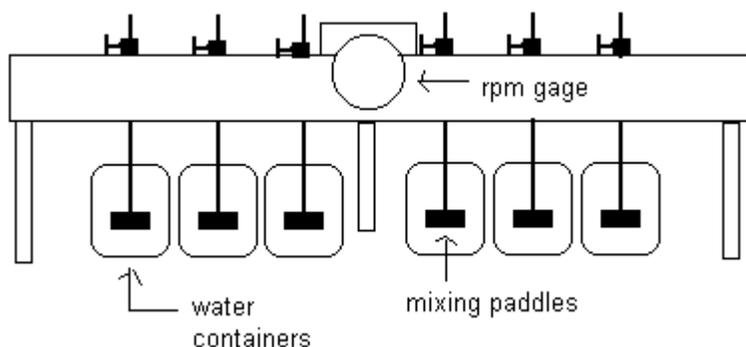
*Esquema 2 – Proceso*

#### **Análisis en laboratorio**

Como se mencionó con anterioridad, es necesario, como primera medida, tomar muestras del agua a tratar y realizarles los análisis en el laboratorio. Estos procedimientos van a permitir anticipar y predecir, al menos de manera aproximada, cual va a ser el comportamiento del proceso, y poder así calibrar sus parámetros críticos.

Obtenidos los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua a tratar por la planta (cuadro 2), se procederá a realizar un ensayo determinante para el diseño de la planta, ensayo de JAR test<sup>7</sup>. El JAR test (ensayo de jarra) consiste en determinar, a escala piloto, las condiciones óptimas de operación en el tratamiento químico de agua. Mediante la modificación de los parámetros de operación, como son el pH, tipo y cantidad de coagulante, velocidad de mezclado, etc., el mismo permite predecir el comportamiento de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, y así asegurar una mayor eficiencia en el proceso.

El equipamiento está conformado por seis paletas (mixing paddles) que agitan igual número de recipientes (water containers) de un litro. Un recipiente actúa como el de control, mientras que en el resto se van modificando las condiciones de operación. En la parte superior se encuentra el control de rpm (rpm gage) en el cual se calibra y uniformiza la velocidad de mezclado de los recipientes.



Esquema 3 - JAR test

Ensayo		As mg/l	pH	Color	Observaciones
CRUDA		0,18	8		Muestra de entrada a planta
JART TEST	F 1	0,06	7	2,5	CLORURO FERRICO
	F 2	0,03	7	5	CLORURO FERRICO
	F 3	0,02	7	5	CLORURO FERRICO
	F 4	0,13	7	2,5	PAC
	F 5	0,12	7	2,5	PAC
	F 6	0,11	7	2,5	PAC

Cuadro 3 – JAR Test

Como se observa en los resultados que arrojó el JAR test (cuadro 3), en cuanto a los coagulantes, se observa que el cloruro férrico tiene una mayor eficiencia de remoción de As que el PAC. Por otro lado debe considerarse que este muestra mejores condiciones de color, además de requerir menos dosis.

<sup>7</sup> “Jar Testing - Tech Brief” Zane Satterfield, P. E. National Environmental Services Center.

Este ensayo no solo se utiliza para el diseño preliminar de la planta, sino que es parte de los ensayos de rutina. Diariamente los técnicos de proceso realizan este análisis para determinar el punto justo de la dosificación de PAC, de hipoclorito de Na, del precipitante polielectrolito aniónico y del ácido clorhídrico.

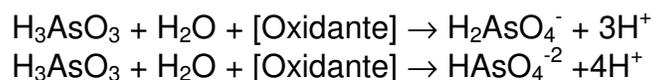
### **Corrección de pH - Oxidación**

Es necesario en nuestro caso corregir el pH del agua a tratar (ver cuadro 2) ya que el agua esta a un pH 7,8 y el PAC reaccionará con el As (V) en un pH ajustado entre 6 y 7, optimizando la reacción y la formación del floc. La corrección del pH se realizará en primera instancia con la dosificación de ácido clorhídrico.

Luego deberá producirse la oxidación/reducción, que es una reacción con transferencia de electrones. La misma está fundamentada en la capacidad de que las sustancias cambien entre un estado oxidado y reducido mediante la ganancia (reducción) o pérdida (oxidación) de electrones.

En cuanto al As, la eficiencia de remoción de As (V) comparada con la de As (III) justifica la oxidación del agua previo tratamiento. El oxidante utilizado para realizarla será hipoclorito de Na.

La oxidación del As (III) a As (V) se produce de acuerdo a las siguientes reacciones químicas:



Para garantizar una buena reacción se colocará en la línea del proceso un mezclador estático.

### **Coagulación/floculación**

La *coagulación* consiste en el agregado de productos químicos al agua para desestabilizar los coloides en suspensión, reduciendo las fuerzas que tienden a mantener separadas las partículas en suspensión.

$$\boxed{\text{Energía de interacción total} = \text{Energía de Atracción (-)} + \text{Energía de Repulsión (+)}}$$

Esta ruptura de cargas se hace mediante una agitación violenta, con altas velocidades de mezclado y los coagulantes más utilizados son:

- sulfato de aluminio:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- el cloruro férrico:  $\text{FeCl}_3$
- cloruro de polialuminio (PAC):  $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{(3n-m)}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ; donde  $0 < m < 3n$ .

En el caso de nuestro estudio, como ya se indicó se utilizará PAC. En el cuadro 3 (de JAR test) se muestran los distintos resultados en función de dosis diferentes. La elección de este coagulante se justifica en que, a pesar de ser menos eficiente en la remoción de As que el cloruro férrico, el PAC usa menores dosis y tiene mejores condiciones de color. El cloruro férrico requiere un manejo muy preciso del pH, ya que ante la mínima variación le da coloración al agua, lo que hace compleja la operación en un aspecto que resulta crítico para un agua de consumo.

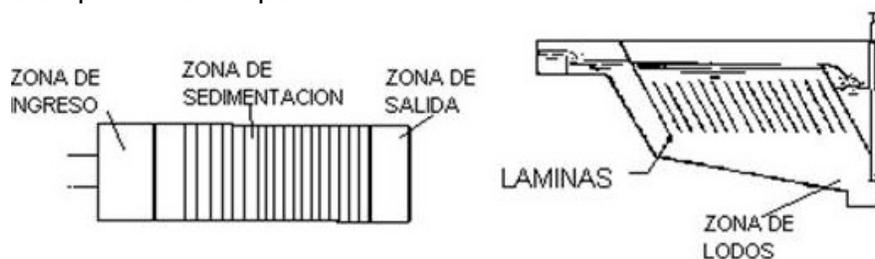
La *floculación* es la aglomeración de las partículas por efecto del movimiento lento del agua, formando compuestos de mayor tamaño (flocs) que puedan sedimentar por gravedad con mayor velocidad. En este caso debe haber una agitación lenta con baja velocidad de mezclado y se llevará a cabo en el floculador luego de un óptimo mezclado.

### **Sedimentación**

La sedimentación se define como el proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en su seno en suspensión, son removidas por la acción de la gravedad.

En este caso hablamos de una sedimentación de tipo II (floculenta), en la cual las partículas al unirse, van aumentando su masa y consecuentemente, su velocidad de sedimentación.

Para aumentar la eficiencia en el proceso pueden utilizarse sedimentadores de tipo lamelar en los que se colocan placas o láminas, aumentando el área de sedimentación por m<sup>2</sup> de superficie.



Esquema 4 - Sedimentador lamelar<sup>8</sup>

### **Filtración**

La filtración es un proceso de separación basado en el paso de una mezcla sólido- líquido a través de un medio poroso (filtro) que retiene el sólido y permite el paso del líquido (filtrado).

---

<sup>8</sup> "Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores" OPS CEPIS. Lima 2005.

En el caso de estudio se utilizarán 3 filtros cuyo manto estará compuesto por piedra (granometría: 30-20, 20-12, 12-6 mm), grava (granometría: 6-1.2, 1.2-0.9 mm), arena (granometría: 0.6 mm) y antrasita. La velocidad de filtración media será de  $130 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$  y el volumen agua de lavado de  $30 \text{ m}^3$  en 5 minutos.

### ***Tratamiento de barros***

Por ultimo debe considerarse como y donde se van a disponer los barros que surgen luego de la sedimentación, ya que además de contar con una gran concentración de As, van a tener residuos de productos químicos como PAC, hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico, precipitantes, etc.

Luego de realizar el tratamiento deben hacerse las pruebas pertinentes para saber si es posible disponerlo en el relleno sanitario. En caso de superar los límites legales en cuanto al contenido de As y demás elementos, no podrá llevarse al relleno sanitario, teniendo que ser considerados como residuos peligrosos. Esto traerá como consecuencia directa un aumento en los costos de tratamiento.

## **8. Conclusión**

Luego de haber analizado el método de coagulación-sedimentación-filtración podemos concluir que el mismo brinda resultados satisfactorios para la remoción de Arsénico en agua. Se ha hecho una descripción del método, dando un marco teórico de cada uno de los procesos y operaciones y se ha presentado un caso particular de una planta que sirve a unos 4.000 habitantes y está ubicada en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires para facilitar su comprensión.

A través de la comparación con las otras alternativas de tratamiento, se ha verificado la efectividad del método, que se destaca por su accesibilidad a los productos químicos insumos del proceso, ya que se encuentran disponibles en el mercado y a precios alcanzables. Esto resulta claro si se lo compara con alternativas como la de ósmosis inversa, que era el más utilizado en el país y cuyas membranas de intercambio hacían antieconómico el servicio de provisión de agua potable para ciudades de ese tamaño.

Por lo tanto, resulta una alternativa viable para poblaciones de pocos habitantes, siendo necesario:

- Realizar correctamente los análisis de laboratorio: previo al funcionamiento y también periódicos;

- Contar con personal con un buen manejo de los productos químicos (para realizar la dosificación, ajuste de pH, oxidación, floculación, etc.) y con conocimiento de los procesos involucrados; y
- Tener planificado previamente donde y como disponer los barros generados, cuyo mal manejo puede hacer fracasar el proyecto.

## Bibliografía

- “Modelo de Intervención para el Abatimiento de Arsénico en Aguas de Consumo” Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) Informe Mayo 2009.
- “Remoción de arsénico y flúor en aguas subterráneas por procesos de coagulación-adsorción-doble filtración” V Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental Abril 2008, Mar del Plata. Ana María Ingallinella. Universidad Nacional de Rosario.
- “Alternativas tecnológicas a tener en cuenta para la toma de decisiones frente a la problemática del arsénico en el agua de bebida” Programa Nacional de Minimización de Riesgos por Exposición a Arsénico en Agua de Consumo – Res. Ministerial 253/01. Ministerio de Salud de la Nación. Año 2008.
- “Experiencia piloto con participación de la comunidad en la minimización de riesgos por exposición a arsénico en agua de consumo” Programa de minimización de riesgos por exposición a arsénico en agua de consumo. Ministerio de salud (Resol. Min. 153/01) Buenos Aires, 2003.
- “Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores” OPS CEPIS. Lima 2005.
- Código Alimentario Argentino. [http://www.alimentosargentinos.gov.ar/programa\\_calidad/marco\\_regulatorio/caa.asp](http://www.alimentosargentinos.gov.ar/programa_calidad/marco_regulatorio/caa.asp)
- Apuntes de seminario “Agua” Profesores: Milena Echevarria, Roberto Rodríguez. Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental. Año 2010.
- Apuntes de seminario “Aguas residuales” Profesor: Horacio Campaña. Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental. Año 2010.
- “Reverse Osmosis Process” Capsule Report. USEPA Septiembre de 1998.(<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r96009/625r96009.pdf>)

## Agradecimientos

- Al señor L.M.F.