



# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## MÉTODO ECONÓMICO DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS PARA COMUNIDADES RURALES

\*Germán Roberto Revelli<sup>1,2</sup>  
Matías Tomás Seuchuc<sup>1</sup>  
Fernando Gabriel Tonutti<sup>1</sup>  
Gabriel Valentín Costa<sup>3</sup>

*ECONOMIC METHOD OF REMOVAL OF ARSENIC IN  
WATER FOR RURAL COMMUNITIES*

*Recibido el 3 de diciembre de 2012; Aceptado el 19 de junio de 2014*

### Abstract

We found the ability to remove arsenic using filtration technology with Green Sand, in several experimental conditions, in samples of synthetic and underground water in the provinces of Santa Fe and Santiago del Estero, Argentina. The removal efficiency was found 96.3% for arsenic concentrations ranging between 0.038 and 0.608 mg/L, achieving the mantle filter retain 9.72 mg of arsenic per liter of Green Sand. The optimum flow of filtering for cross-section of the prototype tested was 0.50 L/min, it could be obtained in 8 hours of daily operational 240 L of water with arsenic concentrations not risky to health. This study represents an effective alternative, it does not require sophisticated technological development, it is low-cost, easy implementation, uses no electrical energy and complies with the recommendations of reference of arsenic in water for human consumption.

**Key words:** water for human consumption, rural communities, Green Sand, removal of arsenic.

<sup>1</sup> Escuela de la Familia Agrícola LL 76, Santiago del Estero, Argentina.

<sup>2</sup> Laboratorio Integral de Servicios Analíticos (L.I.S.A.), Santa Fe, Argentina.

<sup>3</sup> GRUMAN S.R.L. Tratamiento de Aguas, Entre Ríos, Argentina.

\*Autor correspondiente: Laboratorio Integral de Servicios Analíticos (L.I.S.A.). Cooperativa Tambara y Agropecuaria Nueva Alpina Ltda. Av. Italia 143. Ceres (2340), Santa Fe, Argentina. Email: [lisa@cotana.com.ar](mailto:lisa@cotana.com.ar)

## Resumen

Se estimó la capacidad de remoción de arsénico utilizando la tecnología de filtración con Green Sand, en varias condiciones experimentales, en muestras de agua sintética y subterránea de las provincias de Santa Fe y Santiago del Estero, Argentina. La eficiencia de remoción hallada fue del 96.3% para concentraciones de arsénico comprendidas entre 0.038 y 0.608 mg/L, logrando el manto filtrante retener 9.72 mg de arsénico por litro de Green Sand. El caudal óptimo de filtrado para la sección transversal del prototipo ensayado fue de 0.50 L/min, pudiéndose obtener en 8 horas de operatividad diaria 240 L de agua con una concentración de arsénico no riesgosa para la salud. Este estudio representa una alternativa efectiva, no requiere desarrollo tecnológico sofisticado, es de bajo costo, fácil implementación, no utiliza energía eléctrica y cumple con las recomendaciones de referencia de arsénico en aguas para consumo humano.

**Palabras clave:** agua para consumo humano, comunidades rurales, Green Sand, remoción de arsénico.

---

## Introducción

El Planeta Tierra, con sus diversas y abundantes formas de vida, que incluye a más de 7000 millones de seres humanos, se enfrenta en este comienzo del Siglo XXI con una grave crisis del agua. En la actualidad es escasa para millones de personas en todo el mundo y muchas mueren a diario según la Organización Mundial de la Salud (especialmente niños) por enfermedades transmitidas por el agua, no teniendo acceso al derecho alimentario más básico: consumir agua segura (Organización Mundial de la Salud, 2004).

La distribución de agua potable y servicios de saneamiento sigue un modelo de desigualdad característico de las regiones con agudas disparidades socioeconómicas, donde más de 1000 millones de personas carecen de agua potable de fuentes mejoradas y 2600 millones no cuentan con servicios básicos de saneamiento. En la región de América Latina y el Caribe, la cobertura de agua potable en el medio urbano es muy elevada, un 96%. Pero el medio rural se encuentra a la zaga con un 73%, y 34 millones de los 50 millones de personas que viven en zonas rurales no tienen acceso a fuentes mejoradas de agua para consumo (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, 2006).

El arsénico (As) es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza que se encuentra aproximadamente en un  $5 \times 10^{-4}\%$  de la corteza terrestre. El origen natural del arsénico en el agua subterránea está ligado a la litología de los materiales geológicos que conforman el acuífero y a los procesos de oxidación-reducción que afectan a este elemento (Smedley y Kinniburgh, 2002). Otras causas están relacionadas a factores antropogénicos como son los lixiviados de residuos de minas (Armienta *et al.*, 1997) o el uso de plaguicidas (ATSDR, 2007).

En diversas regiones del mundo se han encontrado acuíferos destinados para el consumo humano con niveles de arsénico que sobrepasan los límites recomendados por las agencias ambientales o requeridos por la legislación (Mandal y Suzuki, 2002), por lo que la población sintomática expuesta representa un grave problema potencial de salud pública.

Actualmente, tanto la Organización Mundial de la Salud (2004) como el Código Alimentario Argentino (1994), establecen como máximo tolerable 0.010 mg/L de arsénico en el agua de bebida para consumo humano.

En América Latina, las estimaciones indican que por lo menos 4 millones de personas beben en forma permanente agua con niveles de arsénico que ponen en riesgo su salud. La cantidad de arsénico en el agua, sobre todo en el agua subterránea, llega en algunos casos a superar la concentración de 1 mg/L.

Experiencias realizadas en Argentina, muestran limitaciones con respecto a la calidad de agua y su uso para consumo humano, en especial por elevados niveles de arsénico (Tello, 1951; Biagini, 1974; Astolfi *et al.*, 1981, 1982; Farías *et al.*, 2003; Blanco *et al.*, 2006), observándose signos y síntomas de hidroarsenicismo en poblaciones expuestas.

El Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) se conoce en nuestro país desde el año 1913, ocupando después de EE.UU., el segundo lugar en el mundo entre los países más afectados (Gilardi, 1999). Por causa de esta enfermedad endémica, poblaciones enteras se encuentran con alto riesgo de adquirir patologías neurológicas, cardiovasculares, pulmonares, cirrosis hepática, hiperqueratosis, melanosis, teratogenicidad, cáncer pulmonar y de piel.

Un millón y medio de personas distribuidas en 11 provincias de la República Argentina consumen agua con niveles de arsénico que superan valores de 0.050 mg/L (Navoni *et al.*, 2007). En el noroeste de la provincia de Santa Fe y sur de Santiago del Estero, área en estudio, los antecedentes indican la existencia de acuíferos con concentraciones de minerales que superan ampliamente los valores recomendados para consumo humano. Estos niveles de salinidad aumentan con la profundidad, y se detectan además, la presencia de tóxicos como el arsénico, siendo un factor condicionante para el aprovechamiento del agua subterránea (Kacsan *et al.*, 1994; Bolzicco *et al.*, 1997; Kleinsorge *et al.*, 2001; Bundschuh *et al.*, 2004; Revelli *et al.*, 2008).

Las metodologías tradicionales de tratamientos de aguas son muy costosas, y el desafío es desarrollar tecnologías simples, eficientes y económicas para la eliminación *in situ* de la contaminación química y biológica. Hace ya más de 10 años que un grupo de expertos en tratamientos de efluentes por Tecnologías Avanzadas de Oxidación, validaron y difundieron metodologías de bajo costo para tratar aguas en localidades con escasos recursos hídricos y

económicos, a través del Proyecto OEA/AE/141 financiado por la Organización de Estados Americanos. Entre los países participantes, se destacan Argentina, Brasil, Chile, México, Perú y Trinidad & Tobago (Litter, 2002; 2004).

Actualmente existen varias opciones tecnológicas para remover arsénico del agua, entre ellas se encuentran la adsorción en medios específicos, el intercambio iónico en resinas sintéticas y los procesos de membranas como nanofiltración u ósmosis inversa (Cheng *et al.*, 1994). Sin embargo, los métodos fisicoquímicos siguen siendo los más empleados principalmente por su menor costo y la relativa facilidad de adaptación y operación del proceso (Litter *et al.*, 2008). Por otro lado, pocos estudios llevan a cabo pruebas a escala piloto para verificar las eficiencias reales de remoción con altas concentraciones de arsénico en sitio (Tubić *et al.*, 2010). Este tipo de pruebas son indispensables para realizar un análisis técnico y económico que permita evaluar la factibilidad de implementar la tecnología a escala real.

### Objetivo

El objetivo de esta experiencia fue desarrollar un prototipo práctico y con tecnología conocida (Green Sand), que logre la remoción de arsénico en agua subterránea destinada al consumo humano en zonas rurales, y a bajo costo.

## **Metodología**

### Área de estudio

La experiencia se realizó bajo la coordinación general del “Programa Calidad de Agua = + Salud” desarrollado por la Escuela de la Familia Agrícola LL 76 ubicada en Colonia Alpina, departamento Rivadavia, provincia de Santiago del Estero, Argentina (30° 4' S – 62° 6' W – 95 msnm).

La zona en estudio abarcó las localidades de Colonia Rosa, Colonia Ana y Hersilia (provincia de Santa Fe), y Colonia Alpina y Selva (provincia de Santiago del Estero).

### Metodología analítica

Para la toma de muestra se dejó purgar la descarga de agua durante un lapso de 3 minutos y luego se recogió en recipientes de plástico esterilizados con tapa a rosca de 1000 ml de capacidad. Se transportaron al laboratorio en forma refrigerada a 7 °C y se procesaron dentro de las 48 horas de su recolección.

Las metodologías para los análisis de agua fueron las siguientes: pH, Conductividad, Turbidez, Oxígeno Disuelto y Temperatura por Water Quality Checker U-10 Horiba (Kyoto, Japan), y para Sulfato, Nitrato, Nitrito y Dureza Total por Métodos Colorimétricos y Volumétricos Merck (Darmstadt, Germany). El Residuo Seco se realizó por el Método Gravimétrico y las

determinaciones de Arsénico por Espectrofotometría de Absorción Atómica (APHA, AWWA, WPCF, 1979), con un Límite de Detección de 0.001 mg/L.

#### Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico de los datos fue realizado con el programa STATISTICA 8.0 (2008) utilizando los módulos Basic Statistics and Tables (Estadística Descriptiva – Correlación de Matrices), Nonparametrics Statistics y Distribution Fitting (Estadística Inferencial – Test de Hipótesis) (Snedecor y Cochran, 1977).

#### Desarrollo del prototipo

La geoquímica del arsénico revela que altas concentraciones en el agua subterránea, con frecuencia están asociadas a un incremento de  $Fe^{+2}$  y  $Mn^{+2}$ . Las fuentes de agua que contienen hierro y/o manganeso y arsénico pueden tratarse con procedimientos convencionales para la remoción de Fe/Mn. Estos procesos pueden reducir significativamente el arsénico y remover el hierro y el manganeso de la fuente de agua, con base en los mecanismos que ocurren con la adición de hierro. Cuando la concentración natural de Fe/Mn no es suficiente para alcanzar el nivel necesario para la remoción de arsénico, este puede adicionarse (EPA, 1997).

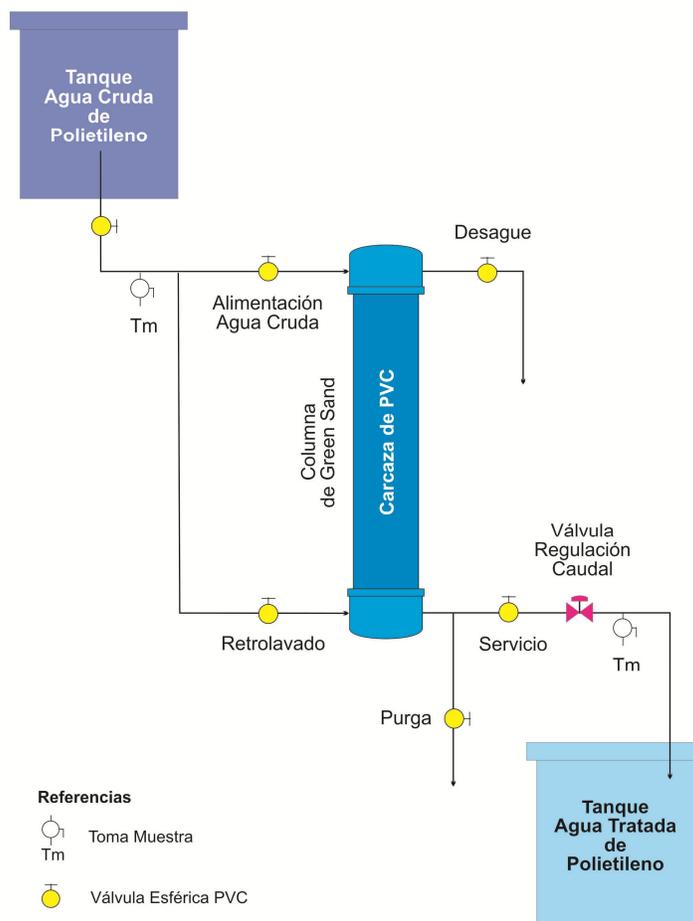
La tecnología de filtración mediante Green Sand (Arena Verde), es usada en la industria y en el tratamiento municipal del agua, desde hace aproximadamente 50 años.

El Green Sand es un medio filtrante granular utilizado para suprimir: hierro, manganeso, sulfuro de hidrógeno, arsénico y radio en el agua. Se compone de un núcleo de gluconita cuya superficie está revestida de dióxido de manganeso, que actúa como catalizador en la reacción de óxido/reducción.

En la Figura 1 se detalla el esquema conceptual de la Planta Piloto desarrollada en la experiencia. El prototipo se diseñó utilizando un filtro vertical de flujo descendente, ensayando aplicaciones de operación intermitente (OI) y operación continua (OC).

El método de operación intermitente (OI), consiste en acondicionar inicialmente el lecho filtrante haciendo pasar una solución concentrada de cloruro férrico, luego el filtro se opera en servicio hasta que el lecho se carga completamente con el material filtrado, momento en el cual se retrolava para evacuar hacia el desagüe el arsénico atrapado.

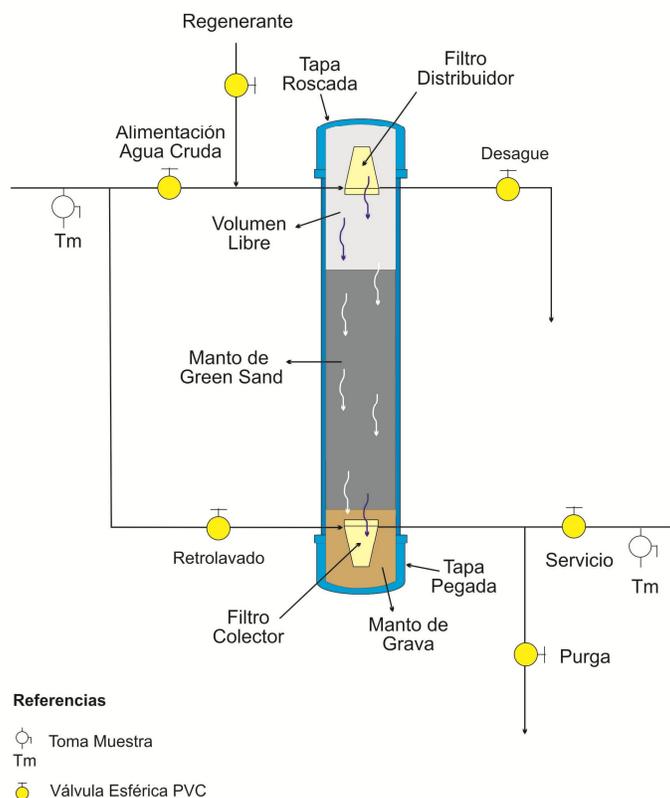
El método de operación continua (OC), requiere un pretratamiento del agua, que consiste en incorporar una cantidad determinada de coagulante (cloruro férrico) directamente al volumen de agua a procesar, antes de ingresar al filtro. El coagulante formará precipitados (hidróxidos metálicos) en los que se adsorbe el arsénico, ayudando al lecho a remover el metaloide.



**Figura 1.** Diagrama esquemático de la Planta Piloto para la filtración de arsénico en agua mediante la tecnología de Green Sand

El medio filtrante Green Sand utilizado en los ensayos, corresponde a la marca GreensandPlus™ (Inversand Company, Clayton, NJ, USA), con certificación de calidad NSF/ANSI 61. Entre sus características físicas se destacan: Forma Física: núcleo de arena de sílice natural recubierto con gránulos nodulares negros de dióxido de manganeso, Densidad Aparente: 1410 kg/m<sup>3</sup> neto, Tamaño Efectivo: 0.30 a 0.35 mm, Coeficiente de Uniformidad: <1.60 y Gravedad Específica: ~2.4.

La Figura 2 describe el detalle de diseño de la carga filtrante utilizada en la experiencia.



**Figura 2.** Filtro de Green Sand desarrollado

Para cumplir con los objetivos propuestos se consideraron tres pasos, a saber:

- 1- Determinar los parámetros operativos óptimos del lecho filtrante de Green Sand.
- 2- Evaluar la eficiencia del proceso y su economía operativa.
- 3- Extrapolar los datos recolectados en el ensayo, al diseño de una planta de tratamiento de arsénico a escala 1:1 para familias de comunidades rurales.

## Resultados

Encuestas realizadas previamente, sobre un total de 124 familias involucradas en el consumo de agua subterránea y que residen en zonas rurales, mostraron que el 98% nunca evaluó mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos el agua de bebida que consumen. El 76% desconoce las

posibles patologías que se pueden transmitir por el agua contaminada con arsénico, lo cual genera la urgente necesidad de difundir en forma más efectiva el conocimiento de enfermedades hídricas y sus implicancias para la salud. Al analizar que tipos de enfermedades conocían, el 24% restante mencionó: Cáncer (71%) y HACRE (29%). Referente a los métodos tecnológicos que se pueden aplicar para eliminar el arsénico del agua, la gran mayoría (87%) declara no conocer ninguno, mientras que el 13% restante menciona la tecnología de Ósmosis Inversa.

### Calidad de agua subterránea

El tratamiento estadístico composicional de las aguas subterráneas analizadas (número de observaciones, valores medios, desvíos estándares y valores máximos y mínimos) se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Indicadores de calidad de agua subterránea

Parámetros	n	V.M.	D.E.	V.Mínimo	V.Máximo
pH	10	7.56	0.229	7.02	7.77
Conductividad (mS/cm)	10	5.723	3.120	2.440	12.900
Turbidez (NTU)	10	20	38.820	0	100
Oxígeno Disuelto (mg/L)	10	8.62	0.292	7.99	8.85
Temperatura (°C)	10	23.5	0.662	22.1	24.6
Residuo Seco (mg/L)	10	4213	2563.824	1685	10449
Sulfato (mg/L)	10	1177	864.988	450	3250
Nitrato (mg/L)	10	63	70.371	ND	230
Nitrito (mg/L)	10	ND			
Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	10	396	294.814	120	970
Arsénico (mg/L)	10	0.203	0.189	0.031	0.608

ND: No Detectado, para Nitrato: <1 mg/L, para Nitrito: <0.01 mg/L

El 100% de las aguas analizadas eran incoloras e inodoras y el 80% poseían sólidos en suspensión. En la Tabla 1, observamos valores medios de residuo seco, sulfato, nitrato y arsénico de  $4213 \pm 2563.824$  mg/L,  $1177 \pm 864.988$  mg/L,  $63 \pm 70.371$  mg/L y  $0.203 \pm 0.189$  mg/L, respectivamente, niveles muy superiores a los reglamentarios, y similares a los encontrados por Kacsan *et al.* (1994), Kleinsorge *et al.* (2001) y Revelli *et al.* (2008) para la misma zona. Esto significó que la totalidad de las aguas analizadas no fueran aptas para consumo humano, adquiriendo especial relevancia los niveles de arsénico encontrados con un valor medio 20 veces superior al admitido, si lo referenciamos con la reciente modificación del Código Alimentario Argentino en mayo de 2007 (Resolución Conjunta 68/2007 – SPRRS y 196/2007 – SAGPyA), que toma un valor de referencia para el arsénico de 0.010 mg/L, coincidente con el recomendado por la Organización Mundial de la Salud (2004).

Al georreferenciar y agrupar las muestras de las distintas localidades en estudio, respecto a las concentraciones de arsénico halladas, podemos establecer por orden de importancia: Colonia Rosa (As: 0.411 mg/L), Colonia Alpina (As: 0.297 mg/L), Hersilia (As: 0.166 mg/L), Colonia Ana (As: 0.154 mg/L) y Selva (As: 0.040 mg/L).

Si consideramos que en el ámbito rural un alto porcentaje de familias consumen únicamente agua de fuente subterránea, y teniendo en cuenta que los efectos tóxicos pueden observarse tardíamente, pudiendo comenzar los síntomas entre los 9 y 12 años de exposición y las lesiones malignizarse a los 50 años (Enríquez *et al.*, 1988), es de vital importancia detener urgente la ingesta de este tipo de agua, alertando y concientizando a toda la población.

Revelli *et al.* (2009), observaron que existe en la zona una elevada contaminación en las aguas subterráneas, reportando altos recuentos de coliformes totales y presencia de pseudomonas aeruginosa. Este antecedente generó la necesidad de clorar todas las muestras de agua antes de ingresar a la etapa de filtrado, asegurando en el lecho de Green Sand una calidad bacteriológica aceptable. Para tal fin, se dosificó hipoclorito de sodio con una concentración de 55 g/L de cloro, en una proporción de 1.5 ml cada 40 L de agua, mezclando suavemente y luego dejándola reposar durante un tiempo de 30 minutos. Transcurrido el proceso de filtración, y acorde a la reglamentación del Código Alimentario Argentino (1994), se realizó nuevamente un sanitizado agregando 0.50 ml de hipoclorito de sodio cada 40 L de agua, de modo de asegurar una concentración mínima de cloro libre de 0.50 mg/L.

#### Cálculo del caudal de filtrado

En una etapa inicial, y con el propósito de establecer caudales óptimos de filtrado, se prepararon muestras de aguas sintéticas sobre una matriz de agua desionizada (GT Lab, Rosario, Santa Fe, Argentina) con el agregado de arsenito de sodio,  $\text{NaAsO}_2$  (Merck, Darmstadt, Germany). Las concentraciones finales de arsénico total fueron de 0.100, 0.200 y 0.300 mg/L. En la Tabla 2 se detallan las distintas corridas experimentales realizadas, caudales de filtrado, concentración inicial y final de arsénico y capacidad de remoción.

Estos datos, se obtuvieron sin adicionar cloruro férrico al agua. Para cada uno de los 9 ensayos realizados, se procesó un volumen de 40 L. Sobre este volumen se tomó una muestra representativa de 1000 ml de agua, para medir la concentración de arsénico (indicada en la Columna "As Final mg/L" de la Tabla 2). Vale decir que la concentración de arsénico hallada es el promedio de operar el prototipo durante 40, 53 y 80 minutos, respectivamente, para cada caudal ensayado de 1.00, 0.75 y 0.50 L/min.

Mediante este ensayo preliminar, en el cual se consideraron valores de arsénico medios y extremos, según el promedio que caracteriza la zona, se definió un caudal de filtración adecuado de 0.50 L/min. De este modo se asegura una capacidad de remoción del 94.0%.

**Tabla 2.** Corridas experimentales realizadas con agua sintética, caudal de filtrado, concentración inicial y final de arsénico y porcentaje de remoción

Ensayos	Caudal de Filtrado (L/min)	As Inicial (mg/L)	As Final (mg/L)	Remoción (%)
1	1.00	0.100	0.009	91.0
2	0.75	0.100	0.007	93.0
3	0.50	0.100	0.006	94.0
4	1.00	0.200	0.020	90.0
5	0.75	0.200	0.014	93.0
6	0.50	0.200	0.012	94.0
7	1.00	0.300	0.037	87.7
8	0.75	0.300	0.024	92.0
9	0.50	0.300	0.018	94.0

#### Capacidad de retención del manto filtrante de Green Sand

Fue también propósito de esta experiencia determinar la capacidad de retención del manto filtrante por unidad de volumen. Para ello se trabajó sobre una muestra de agua subterránea de la localidad de Colonia Alpina (provincia de Santiago del Estero) con las siguientes características fisicoquímicas: pH: 7.56, Conductividad: 6.91 mS/cm, Turbidez: 3 NTU, Oxígeno Disuelto: 8.21 mg/L, Temperatura: 22.1 °C, Residuo Seco: 4906 mg/L, Sulfato: 718 mg/L, Nitrato: ND, Nitrito: ND, Dureza Total (mg CaCO<sub>3</sub>/L): 379 mg/L y Arsénico: 0.163 mg/L. Para lograr la saturación total del filtro se pasó un volumen de 400 L de agua a un caudal de 0.50 L/min y sin adicionar cloruro férrico. Según el dimensionamiento del prototipo desarrollado, la capacidad de retención del manto filtrante ensayado fue de 9.72 mg de arsénico por litro de Green Sand.

#### Métodos de acondicionamiento del filtro

Con el fin de acondicionar el lecho filtrante de Green Sand, se probó inicialmente el prototipo utilizando el método de operación intermitente (OI), usando como químico regenerante cloruro férrico comercial al 40% (Central Química Argentina S.A., Buenos Aires), luego el filtro se operó en servicio hasta que el lecho se cargó completamente con el material filtrado, momento en el cual se realizó un retrolavado para evacuar hacia el desagüe el arsénico atrapado. Los resultados se observan en la Tabla 3.

Para un valor medio de arsénico inicial de 0.123 mg/L, la capacidad promedio de remoción del sistema fue del 93.1%. Estos resultados nos llevaron a obtener agua con concentraciones de arsénico inferiores a las sugeridas por el Código Alimentario Argentino (Arsénico: Máx. 0.010 mg/L). Por otro lado, observamos que los dos indicadores que variaron significativamente ( $P < 0.01$ ) fueron turbidez y arsénico, mientras que pH y residuo seco no sufrieron modificaciones. Esto demuestra la gran capacidad que tiene el prototipo únicamente para filtrar sedimentos en suspensión y remover el arsénico del agua de bebida.

**Tabla 3.** Ensayos experimentales del prototipo con aguas subterráneas de la zona, utilizando el método de operación intermitente (OI)

Ensayos	pH	Turbidez (NTU)	Residuo Seco (mg/L)	Arsénico (mg/L)	Remoción (%)
1 (ST)	7.99	4	3208	0.127	
1 (CT)	7.93	0	3216	0.008	93.7
2 (ST)	8.21	1	2188	0.118	
2 (CT)	8.07	0	2161	0.009	92.4

ST: Sin Tratamiento, CT: Con Tratamiento. Volumen de agua tratado por corrida: 40 L. Caudal de filtrado: 0.50 L/min

Considerando los resultados alentadores obtenidos, y pensando en la practicidad operativa del equipo, ensayamos el sistema bajo el método de operación continua (OC), el cual involucró el suministro de una cantidad determinada de cloruro férrico directamente al agua, antes de ingresar al filtro de Green Sand. En esta etapa nos propusimos calcular el volumen mínimo de cloruro férrico agregado para asegurar concentraciones de arsénico que permitan calificar las aguas como aptas para consumo humano. Los resultados se ilustran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Ensayos experimentales del prototipo con aguas subterráneas de la zona, utilizando el método de operación continua (OC), con distintos volúmenes de cloruro férrico agregado

Ensayos	FeCl <sub>3</sub> (ml)	pH	Turbidez (NTU)	Residuo Seco (mg/L)	Arsénico (mg/L)	Remoción (%)
1 (ST)		7.18	2	3175	0.038	
1 (CT)	20.00	7.23	0	3188	0.001	97.4
2 (ST)		7.48	100	4431	0.608	
2 (CT)	10.00	7.55	0	4486	0.010	98.4
3 (ST)		7.77	0	10449	0.119	
3 (CT)	5.00	7.86	0	10426	0.004	96.6
4 (ST)		8.11	98	2077	0.045	
4 (CT)	2.50	8.18	0	2192	0.002	95.6
5 (ST)		7.56	3	4906	0.163	
5 (CT)	1.25	7.58	1	4985	0.011	93.3

ST: Sin Tratamiento, CT: Con Tratamiento. Volumen de agua tratado por corrida: 40 L. Caudal de filtrado: 0.50 L/min

De las cinco corridas experimentales realizadas en esta etapa, para un promedio de arsénico de 0.174 mg/L (representativo de la zona en estudio, y comprendido entre valores mínimos y máximos de 0.038 y 0.608 mg/L, respectivamente), la capacidad de remoción del prototipo fue del 96.3%. Nuevamente observamos diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) para los parámetros

turbidez y arsénico, no modificándose el resto de los indicadores analizados. En todas las muestras estudiadas, los resultados de pH se encontraron dentro de los valores sugeridos por Zabel (1991) (pH: 6.2-8.5), establecido como rango de mayor eficiencia operativa del Green Sand.

Como en este caso las muestras se trataron previamente con cloruro férrico, se midió la concentración de hierro en el agua con tratamiento (CT). Para los volúmenes agregados de  $\text{FeCl}_3 = 5.00, 2.50$  y  $1.25$  ml (referidos en la Tabla 4), el hierro no fue detectado en el agua filtrada (Hierro  $<0.05$  mg/L).

Si el caudal optimizado de alimentación del filtro es de  $0.50$  L/min, se podría producir  $30$  L/h de agua con concentraciones de arsénico no riesgosas para la salud.

#### Costo operativo del prototipo desarrollado

En la Tabla 5 se describe el costo operativo del prototipo desarrollado, el cual incluye material y reactivos utilizados (Green Sand, cloruro férrico e hipoclorito de sodio). Se definió una vida útil del Green Sand de 6 años (teniendo en cuenta el bajo caudal de operación propuesto). El costo de la grava se consideró despreciable.

Los valores del Green Sand se calcularon originalmente en dólares americanos y posteriormente se convirtieron a pesos argentinos. El tipo de cambio usado fue de  $5.48$  pesos por dólar, paridad del 25 de Julio de 2013, según Banco de la Nación Argentina.

Experiencias en la región, observan que los filtros municipales de Green Sand, para remoción de hierro y manganeso, trabajando a tasas de flujo más altas que la propuesta en este ensayo, poseen una vida media mínima de 3 años, bajo condiciones de operación continua ( $24$  h/día los  $365$  días al año). Como la aplicación del prototipo ensayado es producir agua con bajo contenido de arsénico, para ingesta oral en familias rurales, si se asume que se producirán  $30$  L/día, a un flujo de  $0.5$  L/min, es decir  $1$  hora de funcionamiento diario, al cabo de 6 años de operación, el filtro habrá funcionado  $2190$  horas, equivalente a 3 meses de operación continua, lo que supone una postura conservadora para el cálculo de la vida útil del Green Sand.

Como se puede observar, el costo operativo total del sistema es de  $0.0023$  \$/L de agua a tratar, lo cual infiere una alternativa económica y viable de ser aplicada en poblaciones rurales, e incluso, con bajos recursos. Si planteamos el desarrollo a escala para un hogar tipo de 6 personas y con el objeto de producir únicamente agua para beber y procesar alimentos (estimación de  $5$  L/persona/día), lograríamos cubrir las necesidades básicas de consumo diario con  $30$  L de agua segura y a muy bajo costo.

**Tabla 5.** Costo operativo del prototipo desarrollado

Ítem	Descripción	Unidades	Valor
GreensandPlus™	Volumen	L	6.71
	Costo	\$/L	84
	Duración de la carga	años	6
	Costo por litro de agua tratada	\$/L	0.0011
	Costo mensual	\$/mes	7.72
Cloruro Férrico	Dosis	cm <sup>3</sup>	2.5
	Volumen de agua a tratar	L	40
	Peso Específico	g/cm <sup>3</sup>	1.45
	Concentración	mg/L	91
	Costo	\$/kg	10.4
	Costo por litro de agua tratada	\$/L	0.0009
	Consumo diario de agua	L/día	240
	Costo mensual (7200 L)	\$/mes	6.79
Hipoclorito de Sodio	Dosis	cm <sup>3</sup>	2
	Volumen de agua a tratar	L	40
	Concentración	g/L	55
	Costo	\$/L	5.74
	Costo por litro de agua tratada	\$/L	0.0003
	Consumo diario de agua	L/día	240
	Costo mensual (7200 L)	\$/mes	2.16
Costo Operativo Total	Para 7200 L/mes	\$/mes	16.67
	Por litro de agua tratada	\$/L	0.0023

### Conclusiones

El sistema propuesto, utilizando el método de filtración con Green Sand, logra una remoción significativa del arsénico en el agua de bebida. Partiendo de una concentración elevada de arsénico inicial (Promedio: 0.174 mg/L), al cabo de 60 minutos de tratamiento se logra alcanzar un volumen de 30 L de agua con un nivel por debajo del valor de referencia (Arsénico: Máx. 0.010 mg/L). Con una operatividad de 8 horas diarias el prototipo produce 240 L de agua con una concentración de arsénico no riesgosa para la salud.

La unidad a escala piloto demostró que es capaz de remover el arsénico en bajas y altas concentraciones, por lo tanto es eficaz, robusta y tiene la ventaja de no utilizar energía eléctrica. Este estudio representa una alternativa amigable para la remoción de arsénico, debido a su simplicidad operativa, económica y de fácil uso en comunidades rurales.

## Agradecimientos

La presente experiencia se desarrolló en el marco del “Programa Calidad de Agua = + Salud” perteneciente a la Escuela de la Familia Agrícola LL 76, Colonia Alpina, Santiago del Estero, Argentina.

Los autores agradecen el procesado analítico realizado por el Laboratorio Integral de Servicios Analíticos (L.I.S.A.) perteneciente a la Cooperativa Tambara y Agropecuaria Nueva Alpina Ltda. y a la empresa GRUMAN S.R.L. por su permanente apoyo y la provisión de materiales e insumos.

## Referencias bibliográficas

- APHA, AWWA, WPCF. (1979) Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater. Método para la Determinación de Arsénico por Espectrofotometría Visible del Complejo Formado entre Arsina y AgDDTC. American Public Health Association, Washington DC, USA.
- Armienta, M.A., Rodríguez, R., Aguayi, A., Ceniceros, N., Villaseñor, G., Cruz, O. (1997) Arsenic contamination of groundwater at Zimapan, México, *Hydrogeology Journal*, **5**(2), 39-46.
- Astolfi, E., Maccagno, A., García Fernández, J.C., Vaccara, R., Stimola, R. (1981) Relation between arsenic in drinking water and skin cancer, *Biological Trace Element Research*, **3**, 133-143.
- Astolfi, E., Besuschio, S.C., García Fernández, J.C., Gerra, C., Maccagno, A. (1982) Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico. Edit. Coop. Gral. Belgrano, Buenos Aires, 144 p.
- ATSDR. (2007) Toxicological Profile for Arsenic, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, USA, 500 p.
- Biagini, R.E. (1974) Consideraciones actuales sobre Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE). *Semana Médica*, 19 de septiembre, pp. 716-723.
- Blanco, M.C., Paoloni, J.D., Morrás, H.J.M., Florentino, C.E., Sequeiro, M. (2006) Contents and distribution of arsenic in soils, sediments and groundwater environments of the southern Pampa region, Argentina, *Environmental Toxicology*, **21**, 561-574.
- Bolzicco, J.E., Bettig, A.P., Bojanich, E., Cremona Parma, G. (1997) El arsénico en aguas de consumo humano en la provincia de Santa Fe. Distribución areal, evolución temporal, soluciones. Congreso Internacional sobre Aguas. Buenos Aires, Argentina, II. 7.
- Bundschuh, J., Farias, B., Martin, R., Storniolo, A., Bhattacharya, P., Cortes, J., Bonorino, G., Albouy, R. (2004) Groundwater arsenic in the Chaco-Pampean Plain, Argentina: Case study from Robles County, Santiago del Estero Province, *Applied Geochemistry*, **19**(2), 231-243.
- Código Alimentario Argentino (CAA) (1994) Capítulo XII. Artículo 982 (Res. MSyAS N° 494, 07/07/94).
- Cheng, R.C., Liang, S., Wang, H-Ch., Beuhler, M. (1994) Enhanced coagulation for arsenic removal, *Journal American Water Works Association*, **86**(9), 79-90.
- Enríquez, A., De la Vega, C., Valenzuela, A., Enacan, A., Molina, A. (1988) Diagnóstico de la Zona Endémica de Hidroarsenicismo Crónico en la Provincia del Chaco. Curso de Administración Hospitalaria. II Nivel. Colegio Médico. Resistencia, Chaco.
- EPA. (1997) *Arsenic in Drinking Water, Treatment Technologies*, Washington DC: EPA.
- Farías, S.S., Casa, V.A., Vázquez, C., Ferpozzi, L., Pucci, G.N., Cohen, I.M. (2003) Natural contamination with arsenic and other trace elements in ground waters of Argentine Pampean Plain, *Science of the Total Environment*, **309**(1-3), 187-199.
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (2006) Progreso para la Infancia. Un balance sobre agua y saneamiento. Número 5, Septiembre de 2006. UNICEF. 3 United Nations Plaza, H-9F. New York, NY 10017, USA, pp. 22-23.

- Gilardi, J. (1999) Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), un problema de salud pública, *Mundo Hospitalario*, Año VIII, N° 63.
- Kacsan, E., Scagnetti, J., Buniva, M.A., Mastandrea, C., Grigolato, R., Loteste, A. (1994) Determinación de los niveles de arsénico en agua de consumo humano en las localidades de Ceres y Villa Trinidad (Pcia. de Santa Fe). IX Congreso y XIV Jornadas Interdisciplinarias de Toxicología. Buenos Aires. ATA Informa. N° 24.
- Kleinsorge, E., Scagnetti, J., Grigolato, R., Prida, M., Gras, M. (2001) Hidroarsenicismo crónico en una región de la provincia de Santa Fe. XII Congreso Argentino de Toxicología, XXI Jornadas Interdisciplinarias de Toxicología y I Jornadas Rioplatenses de Toxicología. Rosario, Santa Fe. Libro de actas: 14.
- Litter, M.I. (2002) Relevamiento de comunidades rurales de América Latina para la aplicación de tecnologías económicas para potabilización de aguas. Proyecto OEA AE 141. M. I. Litter (Editora) Digital Grafic, La Plata 2002, Buenos Aires, Argentina.
- Litter, M.I., Jiménez González, A. (2004) Avances en tecnologías económicas solares para desinfección, descontaminación y remoción de arsénico en aguas de comunidades rurales de América Latina (métodos FH y RAOS) – Proyecto OEA AE 141. M. I. Litter y A. Jiménez González (Editores) Gráfica 12/50, La Plata 2004, Buenos Aires, Argentina.
- Litter, M.I., Fernández, R.G., Cáceres, R.E., Grande Cobián, D., Cicerone, D., Fernández Cirelli, A. (2008) Tecnologías de bajo costo para el tratamiento de arsénico a pequeña y mediana escala, *AIDIS Argentina – Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, N° 100, 41-50.
- Mandal, B.K., Suzuki, K.T. (2002) Arsenic Round the World: a Review, *Talanta*, **58**(1), 201-235.
- Navoni, J., Olivera, M., García, S.I., Villaamil Lepori, E.C. (2007) Evaluación del riesgo por ingesta de arsénico inorgánico en poblaciones de zonas endémicas argentinas, *La Alimentación Latinoamericana*, N° 270, 66-70.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2004) Guidelines for Drinking-water Quality, Vol. 1. Recommendations. Third Edition, OMS, Geneva, Switzerland, 515 p.
- Revelli, G.R., Fito, G.B., Biassoni, M.V., Olivero, E.V., Fiore, P.C., Quintana, S.I. 2008. Calidad de agua para consumo humano en la zona noroeste de Santa Fe y sur de Santiago del Estero, *La Alimentación Latinoamericana*, N° 274, 58-65.
- Revelli, G.R., Fito, G.B., Biassoni, M.V., Olivero, E.V., Fiore, P.C., Quintana, S.I., Facta, A.C. (2009) Análisis microbiológicos y residuos de plaguicidas en agua para consumo humano, *Agua. Tecnología y Tratamiento – Saneamiento Ambiental*, Año XXXIII, N° 174, 54-63.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G. (2002) A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters, *Applied Geochemistry*, **17**, 517-569.
- Snedecor, G.W., Cochran, W.G. (1977) Métodos Estadísticos. Compañía Editorial Continental S.A. México.
- STATISTICA 8.0. 2008. Copyright © StatSoft, Inc.
- Tello, E.E. (1951) Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico. Sus manifestaciones clínicas. Imprenta de la Universidad de Córdoba. República Argentina.
- Tubić, A., Dalmacija, B., Agbaba, J., Ivančev-Tumbas, I., Klačnja, M., Dalmacija, M. (2010) Tracking disinfection by-products and arsenic removal during various drinking water treatment trains, *Water Science & Technology*, **61**(12), 3169-3177.
- Zabel, K.R. (1991) Manganese Options, *Water Technology*, (November), 50-51.