

Universidad de Concepción del Uruguay
Facultad de Ciencias Agrarias
Centro Regional Rosario



REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA

NICOLÁS CASADEI

Tesis presentada para completar los requisitos del plan de estudios de la Licenciatura en Bromatología

Director de tesis: Bioq. Duilio Fittipaldi

Rosario, noviembre de 2018

“Las opiniones expresadas por los autores de esta Tesina no representan necesariamente los criterios de la carrera de Licenciatura en Bromatología de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Concepción del Uruguay”



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN6

INTRODUCCIÓN8

ANTECEDENTES11

JUSTIFICACIÓN15

OBJETIVOS16

HIPÓTESIS17

TOXICIDAD.....18

ESTADIOS DEL HIDROARSENICISMO21

HIDROARSENICISMO CRÓNICO REGIONAL ENDÉMICO EN ARGENTINA22

MATERIALES Y MÉTODOS.....25

RESULTADOS35

DISCUSIÓN43

CONCLUSIÓN45

ANEXOS47

 SOLENOIDE 47

 SATURACIÓN MAGNÉTICA DEL HIERRO..... 49

 HIERRO CERO-VALENTE 53

 OZONO 54

BIBLIOGRAFÍA62

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLAS CASADEI
 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1. DISTRIB. DE ARSÉNICO EN AGUA Y POB. AFECTADA.....	10
FIGURA 2. RUTA DEL ARSÉNICO EN ARGENTINA.....	23
FIGURA 3. ESQUEMA VISTA LATERAL METODOLOGÍA	28
FIGURA 4. FILTROS UTILIZADOS.....	30
FIGURA 5. RESULTADOS FILTRACIÓN	31
FIGURA 6. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (1/6)	35
FIGURA 7. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (2/6)	36
FIGURA 8. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (3/6)	36
FIGURA 9. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (4/6)	37
FIGURA 10. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (5/6)	38
FIGURA 11. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (6/6)	38
FIGURA 12. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (1/6)	39
FIGURA 13. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (2/6)	40
FIGURA 14. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2(3/6)	40
FIGURA 15. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (4/6)	41
FIGURA 16. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (5/6)	42
FIGURA 17. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (6/6)	42
FIGURA 18. POLARIZACIÓN DE UN SOLENOIDE	48
FIGURA 19. CAMPO MAGNETICO DE UN SOENOIDE	48
FIGURA 20. CURVA DE MAGNETIZACIÓN DE UNA SUSTANCIA.....	51
FIGURA 21. SATURACIÓN MAGNETICA EN EL HIERRO	52
FIGURA 22. ALINEACIÓN DE DOMINIOS: MONODOMINIO	53
FIGURA 23. POTENCIAL DE OXIDACIÓN DEL OZONO	54

FIGURA 24. PARÁMETROS CINÉTICOS DE INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS CON OZONO..... 56

FIGURA 25. VALORES DE CT PARA LA INACTIVACIÓN DE 2 LOG. 58



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

RESUMEN

El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre que se encuentra ampliamente distribuido en todo el medio ambiente. La contaminación con dicho metaloide de las aguas subterráneas es un problema muy extendido mundialmente, por lo que varios países presentan niveles importantes de consumo de agua contaminada.

Tal es así, que la OMS (Organización Mundial de la Salud) considera al arsénico una de las diez sustancias químicas más preocupantes para la salud pública. En consecuencia, la OMS ha definido un valor guía para el arsénico en cuanto a la calidad del agua potable, cuya finalidad es servir en el mundo entero de base para las tareas de reglamentación y normalización en esta esfera.

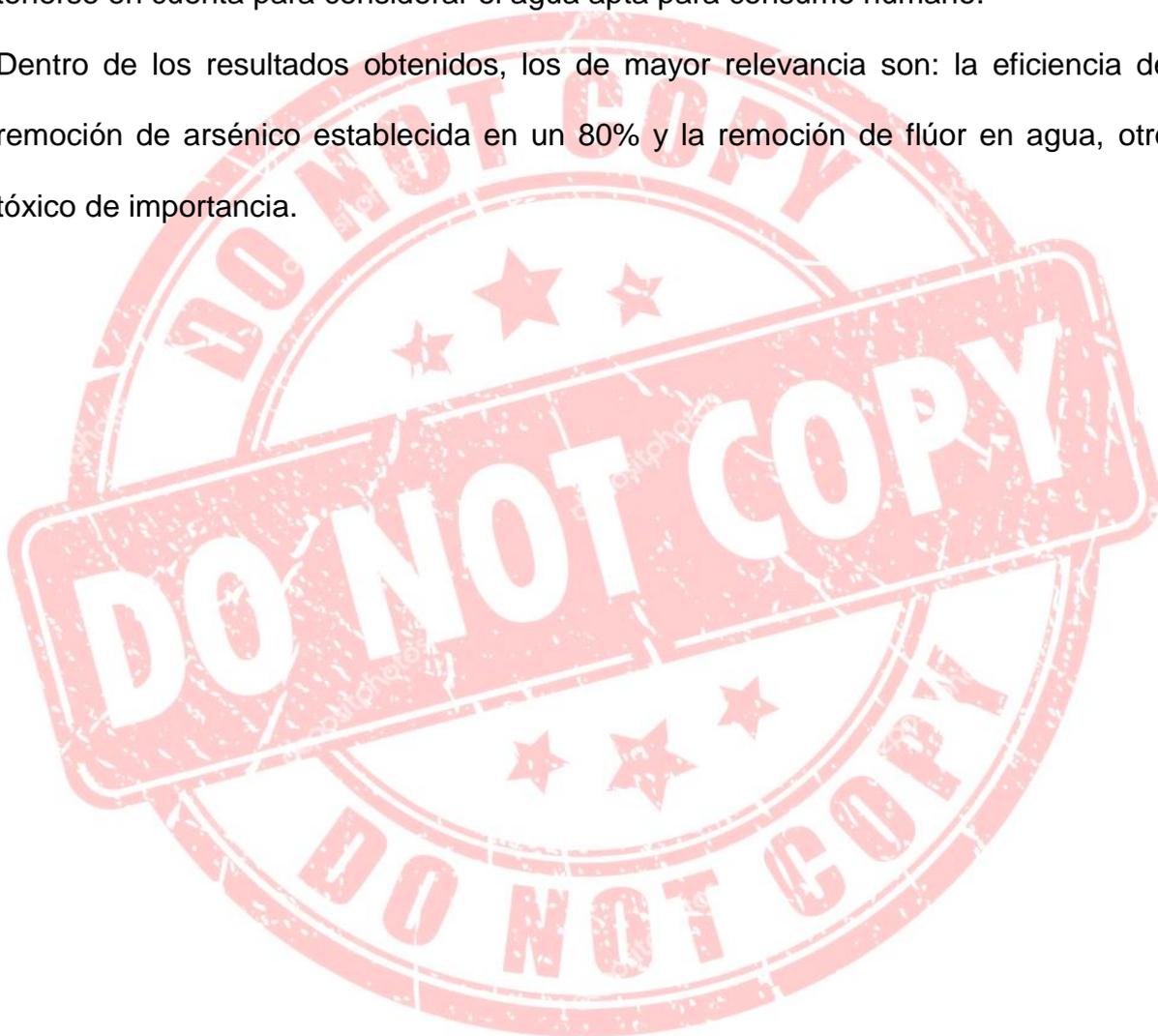
En este momento, el límite recomendado para la concentración de arsénico en el agua potable es de 0,01 mg/l (miligramos por litro), aunque este valor de referencia se considera provisional dadas las dificultades de medición y las dificultades prácticas relacionadas con la eliminación del arsénico del agua de bebida.

A expensas de esta problemática, la OMS en conjunto con UNICEF (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia) han fijado como objetivos a evaluarse en la agenda del año 2030, el acceso de la población a agua de bebida sin contaminación fecal ni contaminantes químicos prioritarios, entre ellos el arsénico. Por consiguiente, la intervención más importante en las comunidades afectadas consiste en prevenir que se prolongue la exposición al arsénico implantando un sistema seguro de abastecimiento de agua potable destinada al consumo como agua de bebida, a la preparación de alimentos y al riego de los cultivos alimentarios.

Es por ello, que en este trabajo de investigación se ha desarrollado una metodología

de abatimiento de arsénico en agua basado en un sistema de oxidación y electromagnetismo para contribuir en efecto con la problemática presentada. Además, se procedió a estudiar el comportamiento de distintas variables físicas, químicas y microbiológicas luego de aplicar el método desarrollado y que han de tenerse en cuenta para considerar el agua apta para consumo humano.

Dentro de los resultados obtenidos, los de mayor relevancia son: la eficiencia de remoción de arsénico establecida en un 80% y la remoción de flúor en agua, otro tóxico de importancia.



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

INTRODUCCIÓN

Al hablar del agua nos enfrentamos a una paradoja. Es la sustancia más abundante de la Tierra y, a su vez, escasea en muchos lugares. Da la vida y, en ocasiones, la quita. Une y separa.

El 97.5% del agua en la tierra se encuentra en los océanos y mares, únicamente el restante 2.5% es agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo, el 69% se encuentra en los polos y en las cumbres de las montañas más altas y se encuentra en un estado sólido. El 30% del agua dulce del mundo, se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos. Solo el 1% del agua dulce en el mundo, escurre por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos y ríos y se depositan en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua y en acuíferos.

Las aguas dulces constituyen un recurso escaso, amenazado y en peligro. De acuerdo a los datos proporcionados por Greenpeace sobre los balances hídricos del planeta, solamente el 0.007% de las aguas dulces se encuentran realmente disponibles a todos los usos humanos directos (Greenpeace, 2017).

Además de este escaso porcentaje, el agua se encuentra distribuida de forma muy irregular en la superficie del planeta, lo que hace que en ocasiones su uso plantee complejos problemas.

La contaminación de agua con arsénico es un serio problema de salud pública de importancia a nivel mundial debido al poder carcinógeno y neurotóxico del elemento. Si bien el arsénico se encuentra presente mayoritariamente en aguas subterráneas, en una menor proporción también esta presente en aguas superficiales, y su origen varía de acuerdo con la zona que se considere.

Gran parte del porcentaje de arsénico que afecta a los recursos hídricos en nuestro

país proviene de fuentes naturales, asimismo una porción mucho más limitada de esta contaminación es aportada por acciones que derivan de actividades antropogénicas (Asociación Toxicológica Argentina, 2006).

Se define como Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) a la 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 0,01 PPM (Partes Por Millón) en agua de consumo diario (Ministerio de Salud de la República Argentina, 2011).

La población que vive en áreas de agua contaminada con arsénico en Argentina supera los cuatro millones de personas, es decir que, al menos uno de cada diez argentinos vive en una zona donde el agua contiene dicho metaloide.

Argentina es uno de los doce países en el mundo con mayor concentración de arsénico en agua. En América latina, por lo menos más de una decena de países comparten el problema, con unos 14 millones de personas en riesgo por la falta de plantas de tratamiento y distribución de agua segura para el consumo (Diario La Nación, 2016).

La Real Sociedad Geográfica del Reino Unido, radicada en Londres, en uno de sus informes anual publicado en el año 2007, ponía cifras a la magnitud de la problemática, plasmándolo sobre números que refieren a las personas afectadas a nivel mundial por la contaminación acuática con arsénico, dejando como saldo un total de 137 millones de personas en más de 70 países (Diario El Mundo, 2007). (Figura 1).

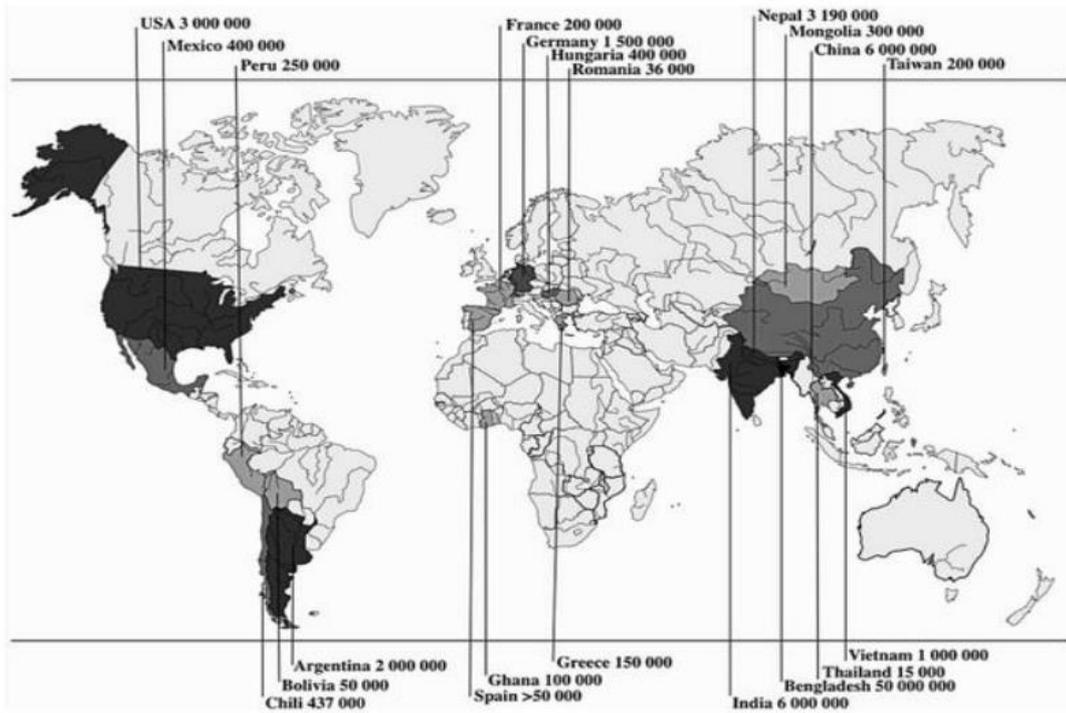
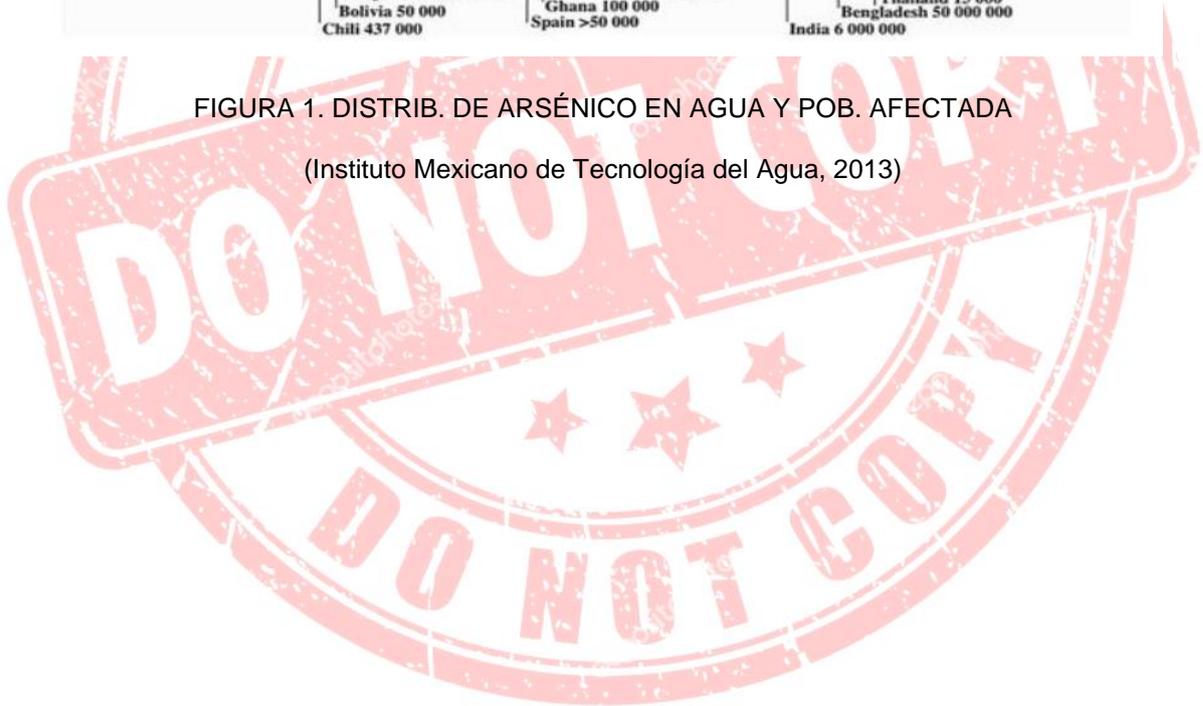


FIGURA 1. DISTRIB. DE ARSÉNICO EN AGUA Y POB. AFECTADA

(Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2013)



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

ANTECEDENTES

(Lepori, 2015)

El objetivo general del trabajo realizado por Lepori es evaluar el riesgo carcinogénico de la población argentina expuesta al consumo de arsénico a través de la ingesta de agua no segura, poniendo en evidencia dicha situación a través de una serie de datos clasificados, y logrando de cierto modo una actualización sobre la situación de este agravante en el país. A través de un hilo conductor donde se recopilan numerosos estudios científicos sobre el HACRE en Argentina, se estima que el problema afecta a por lo menos cuatro millones de personas.

La situación es extensa en gran parte del territorio argentino, donde se conoce por lo menos hace 100 años la problemática que ocasiona la presencia de este metaloide en el agua, y la gravedad a su posterior consumo. Por tal cuestión, urge abastecer de agua segura a los habitantes de estas regiones. Toda la información recabada no hace más que calificar a las regiones de HACRE en Argentina como de urgencia ambiental, señalando la gravedad del problema como interés de salud pública, lo cual requiere una definitiva solución.

Sin dudas, en este trabajo de investigación que busca desarrollar un método de abatimiento de arsénico en agua, hay una relación directa en cuanto a la recopilación realizada por Lepori. La incidencia sobre la población argentina es notoria, pero aun así no se ha logrado mitigar completamente esta situación. La finalidad de este proyecto esta orientada precisamente a brindar una mejora en la calidad de agua que hoy se reconoce como insegura, a través de un método alternativo.

(Torres, 2018)

En este caso, el objetivo del trabajo realizado por Torres es identificar los principales factores de riesgo toxicológico por exposición prolongada a la contaminación con arsénico presente en agua.

Para ello, se realizó un estudio analítico de corte transversal durante junio de 2012 a julio de 2013, donde se estudiaron a 30 familias en distintas localidades mexicanas, en las cuales el nivel de arsénico excede al límite recomendado.

Para determinar los factores de riesgo que promueven la exposición al arsénico, se aplicó una encuesta con varios ítems, los cuales integraban la evidencia de los principales factores de riesgo que aumentaban la exposición al metaloide, derivados de estudios previos.

Posteriormente, para conocer la seguridad alimentaria de los hogares analizados, se aplicó la Escala Latinoamericana y Caribeña de Seguridad Alimentaria (ELCSA), validada y adaptada para México. Esta escala clasifica a los hogares, según un puntaje preestablecido.

En consecuencia, se procedió a aplicar estadística descriptiva (porcentajes) a las principales variables, y entre los datos arrojados de mayor relevancia se puede identificar que:

El cuatro por ciento de las familias tuvieron falta de acceso a agua en los últimos tres meses, 24 % asociaron haber enfermado con el consumo de agua en el mismo periodo. El 11 % de las familias conocía a través de charlas informativas recibidas por el centro de salud, que el agua contaminada puede transmitir enfermedades, por lo que es necesario desinfectarla o potabilizarla antes de consumirla. El cinco por ciento de las familias tuvo que desviar recursos económicos destinados a alimentos

para comprar agua de bidón comercial, dado que conocían del riesgo de consumir agua contaminada con arsénico.

El 83.3 % de las familias preparaban sus alimentos con agua distribuida por red (26.7 %), pozo (13.3 %) o de distribuidores (43.3 %) y solo un 16.7 % usaba agua de bidones comerciales. En el caso del consumo de agua fresca o para preparación de bebidas de sabor, el 60 % utilizaba agua de bidones, 26.7 % agua de distribuidores, diez por ciento agua de red y 3.3 % agua de pozo. En el aseo personal, el 58.6 % de las familias usaban agua de red, 31 % de distribuidores y 10.3 % de pozo.

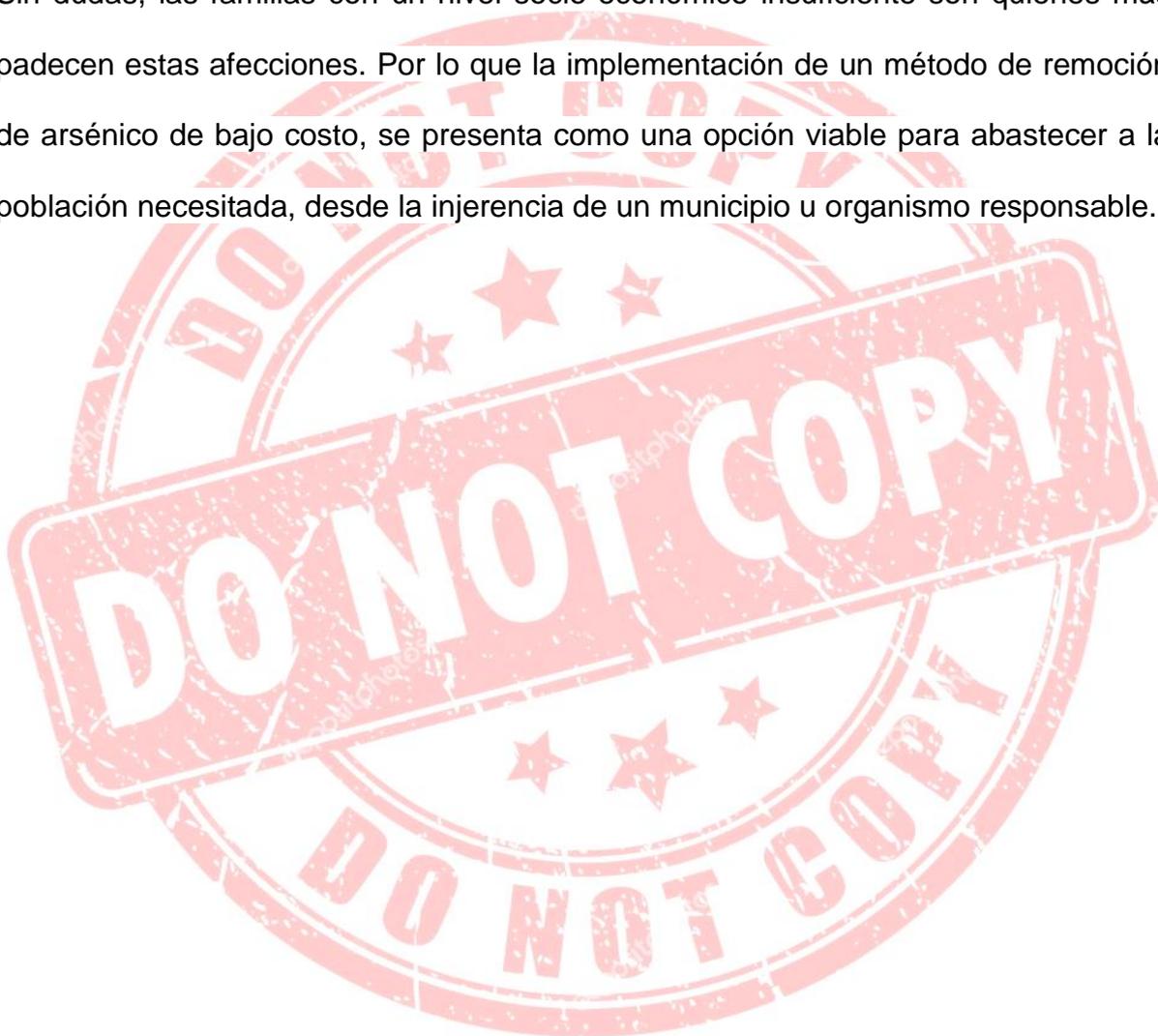
El 70 % de las familias presentaron algún grado de inseguridad alimentaria leve a severa. El 63 % de las jefas de familias presentaron un nivel de escolaridad bajo (primaria), lo cual puede asociarse a condiciones desfavorables socioeconómicas y por ende alimentarias.

Los principales factores de riesgo a la exposición al arsénico en este estudio fueron la falta de servicios públicos (red de abastecimiento de agua, drenaje y alcantarillado) uso de agua de pozos y bajo nivel de escolaridad. La inseguridad alimentaria, presente en el 70 % de los hogares, también resultó un factor de riesgo. El ingreso económico bajo de las familias, implicó que la compra de agua para la preparación de alimentos (16.3 %) y para agua de consumo (60 %), desplazara la compra de alimentos.

Las deficientes condiciones tecnológicas, educativas, económicas, sociales, y dietéticas que viven las familias, aumentan el riesgo a la exposición al arsénico, ya que los mecanismos para aumentar su detoxificación, requiere de insumos nutrimentales para proteger al organismo de las agresiones de este y otros contaminantes.

La mayoría de las familias perciben una mejor protección al agua cuando esta se hierve o se clora, porque estas han sido las medidas que se han dado por años para tratar el agua de bacterias, virus y parásitos, pero eliminar el riesgo por metales tóxicos requiere de otros tratamientos.

Sin dudas, las familias con un nivel socio-económico insuficiente son quienes más padecen estas afecciones. Por lo que la implementación de un método de remoción de arsénico de bajo costo, se presenta como una opción viable para abastecer a la población necesitada, desde la injerencia de un municipio u organismo responsable.



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

JUSTIFICACIÓN

Para el desarrollo de una vida plena uno de los pilares fundamentales es el goce de una buena salud. Por consiguiente, el minimizar el riesgo de todo aquello que atente de una u otra manera, en corto o a largo plazo sobre la salud de las personas es de fundamental importancia.

Principalmente, el conjunto de personas que se pueden agrupar bajo la definición de pertenencia al subdesarrollo social son las más afectadas, y los motivos están supeditados y regidos por un factor de accesibilidad económica.

La sola idea de poder realizar un aporte al área de la salud, el cual no solo tenga un impacto de beneficencia social sino que también vaya de la mano con una aplicación de un coste económico accesible ya sea en pequeñas y grandes escalas, son desde luego, la justificación de este proyecto.

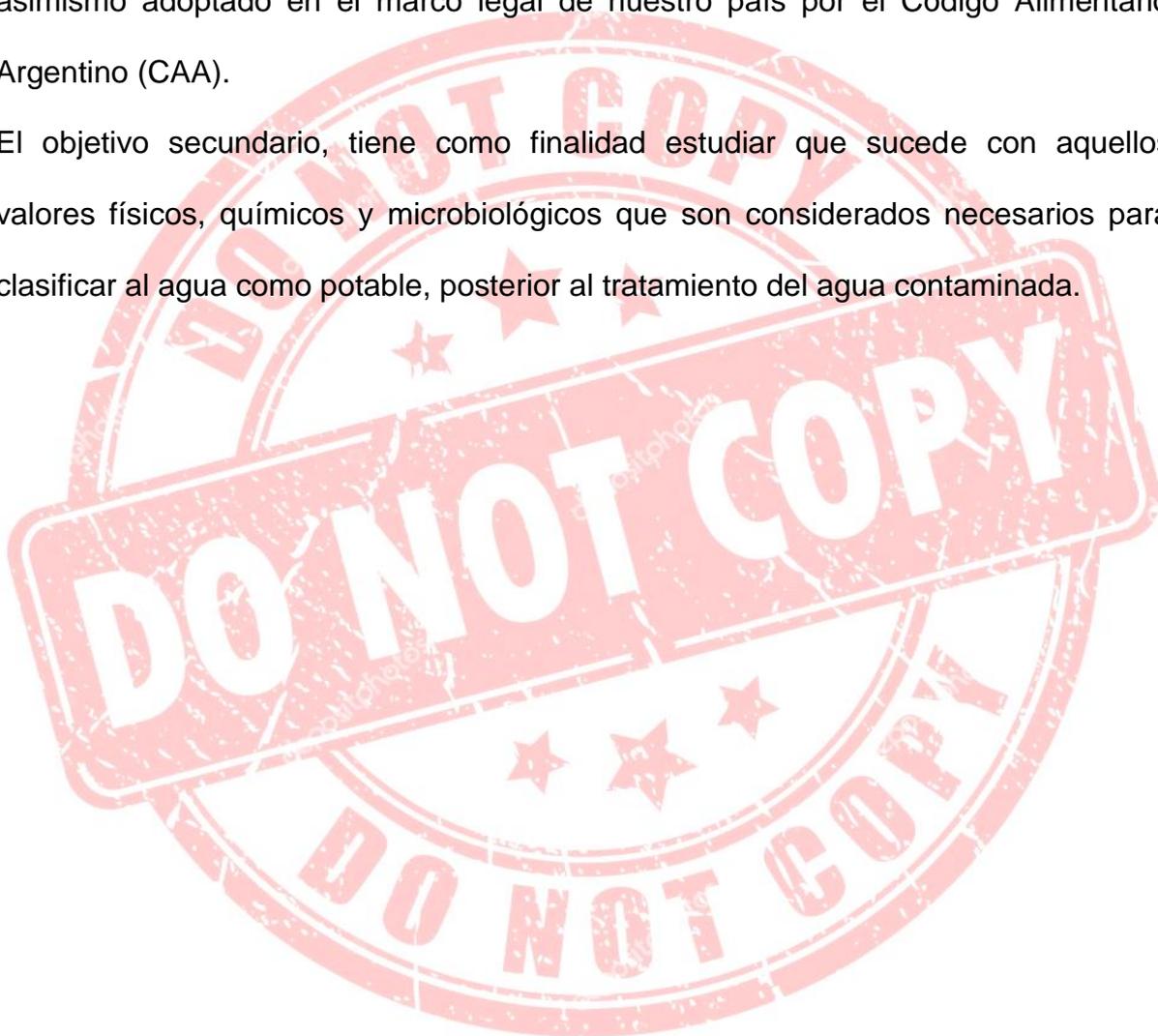
Técnicamente los reportes epidemiológicos conocidos hasta la actualidad, hacen del arsénico un problema de salud pública de interés mundial. La OMS ha establecido como máxima concentración de arsénico en agua para consumo humano de 0.01 mg/L. Por ende, la reducción de los niveles de arsénico en aguas para consumo humano representa uno de los retos ambientales prioritarios a nivel mundial.

En virtud de lo anterior, se llevo a cabo un estudio e investigación con el fin de soslayar los niveles arsenicales en agua de consumo humano, a través de la implementación de una técnica innovadora, sin impacto ecológico y de una gran diferencia económica en comparación a la implementación de métodos mas sofisticados utilizados en la actualidad.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo se centra principalmente en la confección de un método alternativo para la remoción de arsénico en agua, llegando a los niveles permitidos para el consumo humano, recomendado a nivel mundial por la OMS, y asimismo adoptado en el marco legal de nuestro país por el Código Alimentario Argentino (CAA).

El objetivo secundario, tiene como finalidad estudiar que sucede con aquellos valores físicos, químicos y microbiológicos que son considerados necesarios para clasificar al agua como potable, posterior al tratamiento del agua contaminada.



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

HIPÓTESIS

La concentración de arsénico en agua desciende a los niveles permitidos para el consumo humano luego de la aplicación del método desarrollado.



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

TOXICIDAD

Las características organolépticas de las aguas contaminadas con arsénico no son generalmente desagradables, y de consumirse de manera crónica los efectos tóxicos pueden observarse tardíamente. El comienzo de los síntomas puede ocurrir entre los cinco y diez años de exposición, y las lesiones malignizarse décadas después (Asociación Toxicológica Argentina, 2006).

La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, estructura química y solubilidad en el medio. La escala de toxicidad del arsénico decrece en el siguiente orden: Arsina (H_3As) > As (arsénico) $^{+3}$ inorgánico (arsenito) > As^{+3} orgánico > As^{+5} inorgánico (arseniato) > As^{+5} orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental.

La toxicidad del As^{+3} es diez veces mayor que la del As^{+5} (The National Academy of Sciences, 1999).

En el agua de bebida, por lo general el arsénico se encuentra en la forma de arseniato (As^{+5} inorgánico) y puede ser absorbido con facilidad en el tracto gastrointestinal en una proporción entre 40 y 100% (Frederick, 1994). El arsénico inorgánico ingerido pasa al torrente sanguíneo, donde se enlaza a la hemoglobina y en 24 horas puede encontrarse en el hígado, riñones, pulmones, bazo y piel. Los órganos de mayor almacenamiento son la piel, el hueso y el músculo. Su acumulación en la piel tiene relación con su fácil reacción con los grupos sulfhidrilos de las proteínas (Health Canada, 1992).

Los cambios metabólicos del arsénico ocurren esencialmente en el hígado, donde los tioles endógenos tienen un papel crítico en la conversión del As^{+3} y As^{+5} . Al parecer, el glutatión (GSH) actúa como agente reductor.

Las formas de As⁺³ resultantes pueden metilarse (oxidación y formación de metilarsénico - As⁺⁵) al aceptar este grupo funcional de la S-adenosilmetionina (ASM). El probable producto final de la metilación continua es el dimetilarsenato (DMA). Las especies de metilarsénico (As⁺³) y As⁺⁵ intermedias en el proceso pueden ser tóxicas e inhibir por ejemplo a la glutatióna reductasa (GR), enzima clave en el metabolismo del GSH y cuya acción (GR) es crítica para mantener las reacciones redox propias de las células (The National Academy of Sciences, 1999).

En el organismo humano el As⁺³ y As⁺⁵ tienen diferentes mecanismos de acción. El As⁺⁵ muestra un comportamiento parecido al del fosfato, pero difiere con este en la estabilidad de sus ésteres. Los ésteres del ácido fosfórico son estables lo que permite la existencia del ácido desoxirribonucleico (ADN) y la adenosina 5-trifosfato (ATP), en cambio los ésteres ácidos de As⁺⁵ son hidrolizables.

Las enzimas pueden aceptar al arseniato ($[AsO_4]^{3-}$) e incorporarlo en compuestos como el ATP, pero los compuestos análogos formados se hidrolizan inmediatamente. Por ello, el arseniato puede inactivar el metabolismo oxidativo de la síntesis del ATP.

En contraste, el As⁺³ tiene alta afinidad con los grupos tioles de las proteínas, lo cual puede inactivar una variedad de enzimas, como la piruvato deshidrogenasa y 2-oxoglutarato deshidrogenasa (Frederick, 1994; The National Academy of Sciences, 1999).

En cambio, el monometilarsenato (MMA) y el dimetilarsenato (DMA) no forman enlaces fuertes con las moléculas biológicas humanas. Esto explica por qué su toxicidad aguda es menor que la del arsénico inorgánico.

El arsénico inorgánico ingerido es absorbido por los tejidos y luego se elimina

progresivamente por metilación. Su excreción ocurre en la orina a través de los riñones.

Cuando la ingestión es mayor que la excreción, tiende a acumularse en el cabello y en las uñas. Los niveles normales de arsénico en la orina, el cabello y las uñas son 5-40 $\mu\text{g}/\text{día}$ (microgramo/día), 80-250 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (microgramo/kilogramo) y 430-1080 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectivamente (The National Academy of Sciences, 1999).

La sensibilidad de las personas a los efectos tóxicos del arsénico inorgánico varía, dependiendo entre otros de la genética, metabolismo, dieta, estado de salud y sexo. Estos factores deben considerarse en la evaluación de riesgos a la exposición de arsénico. Las personas con mayor riesgo son las que tienen poca capacidad para metilar arsénico y por lo tanto lo retienen más. En este caso, los más vulnerables son los niños y las personas con un estado nutricional deficiente.

La ingestión de agua con arsénico puede llevar a un incremento de abortos espontáneos y de recién nacidos muertos (*Carabantes, 2003*).

Además, se ha demostrado recientemente que en las poblaciones infantil expuesta a arsénico en agua de bebida durante el período prenatal y posnatal pueden tener menor desempeño neurológico que los niños no expuestos (Asociación Toxicológica Argentina, 2006).

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

ESTADIOS DEL HIDROARCENICISMO

El consumo de agua con arsénico no conlleva generalmente a casos con efectos agudos, sino más bien crónicos, porque se ingieren pequeñas cantidades a largo plazo.

Se reconocen cuatro etapas en los cuadros de hidroarsenicismo:

- Etapa preclínica: el paciente no muestra síntomas, pero el arsénico puede detectarse en muestras de tejido y orina.

- Etapa clínica: etapa con efectos en la piel. Oscurecimiento de la piel (melanosis) comúnmente en la palma de la mano. También se pueden presentar manchas oscuras en el pecho, espalda, miembros y encías. Un síntoma más serio es la queratosis o endurecimiento de la piel en forma de nódulos sobre las palmas y las plantas de las manos y los pies. La OMS estima que cuando se ha llegado a esta etapa, significa que ha habido una exposición al arsénico de cinco a diez años.

- Etapa de complicaciones: presenta síntomas clínicos más pronunciados y afección de los órganos internos.

Los reportes más frecuentes suelen ser dilatación del hígado, los riñones y el bazo. También hay información de vinculación en esta etapa con conjuntivitis, bronquitis y diabetes.

- Etapa de malignidad: desarrollo de tumores o cánceres que afectan la piel u otros órganos. En esta etapa, la persona afectada puede desarrollar gangrena o cáncer de piel, pulmón o vejiga.

En las dos primeras etapas, si el paciente reemplaza la fuente de agua de bebida por una libre de arsénico, su recuperación es casi completa. En la tercera etapa puede ser reversible, pero en la cuarta ya no lo es (BCAS, 1997).

HIDROARSENICISMO CRÓNICO REGIONAL ENDÉMICO EN ARGENTINA

El área afectada por la presencia de arsénico en Argentina se extiende en un continuo noroeste-sureste desde el altiplano hacia la costa atlántica. El límite meridional corresponde a los cursos de los ríos Desaguadero y Colorado, y el límite septentrional provisoriamente se ha fijado en el borde norte del altiplano, y en los cursos de los ríos Bermejo y Paraná. A excepción de algunos pocos casos, el origen del arsénico es natural y se remonta a miles de millones de años atrás, relacionándose con el vulcanismo y la actividad hidrotermal asociada a la cordillera de los Andes entre las latitudes 14° y 28° S. Dichos fenómenos se encontraban muy activos en su momento, dejando como consecuencia la dispersión de cenizas volcánicas ricas en minerales de arsénico en gran parte del país. Este mecanismo de dispersión se ha visto favorecido por fenómenos naturales, involucrando el movimiento del contaminante a través de acciones hídricas y eólicas que ayudaron ciertamente a la deposición del arsénico por el territorio argentino, incluso llegando a la zona este del país, en la costa atlántica. (Ministerio de Salud de la República Argentina, 2011) (Figura 2).

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

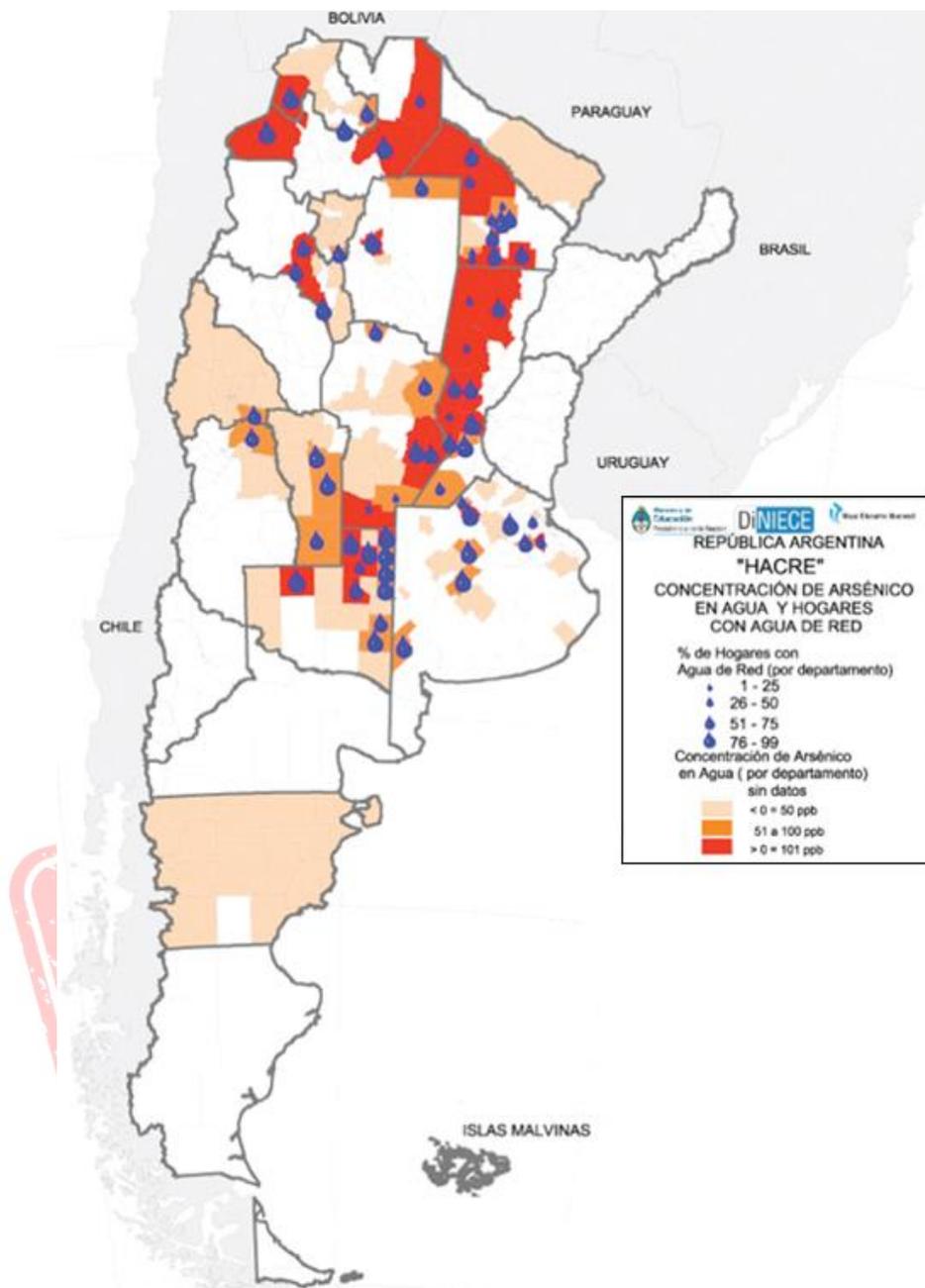


FIGURA 2. RUTA DEL ARSÉNICO EN ARGENTINA

(Ministerio de Salud de la República Argentina, 2012)

El arsénico inorgánico fue clasificado por la International Agency for Research on Cancer (IARC) como un agente carcinogénico para humanos en base a estudios epidemiológicos que relacionan la ingestión de arsénico en el agua de bebida y el desarrollo de cáncer (IARC, 2004).

El riesgo para la salud humana tras la exposición crónica al consumo de arsénico

por encima de los niveles permitidos provoca HACRE, la cual es una patología frecuente en la Argentina (*Curto, 2007*) y (*Ravenscroft, 2009*).

Los efectos en la salud ocasionados por el arsénico están bien documentados en Argentina ya desde principios del siglo XX. El caso más conocido de la patología provocada por la presencia del arsénico en el agua de bebida, es el de Belle Ville en la provincia Córdoba.

El alto número de casos de HACRE en la ciudad de Belle Ville determinó que esta afectación se conociera como “enfermedad de Belle Ville” en 1913, año en que *Goyenechea* y *Pusso* la relacionaron con el consumo de agua con arsénico (*Goyenechea, 1917*).

El conocimiento de la contaminación natural del agua de consumo humano con arsénico en Argentina lleva más de 100 años de antigüedad (*Astolfi, 1981*) y (*Ayerza 1917*) aun no se ha logrado un fuerte impacto desde la prevención. Existe suficiente evidencia científica que indica que gran parte del territorio argentino presenta agua con niveles de arsénico perjudiciales para la salud y son comparables a los niveles reportados en regiones asiáticas como Bangladesh, India.

Por otra parte, restan muchas regiones que aun no han sido exploradas, siendo importante la incertidumbre existente sobre la real magnitud de la problemática del HACRE en el país (*Navoni, 2012*).

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

MATERIALES Y MÉTODOS

La toma de muestra del agua contaminada con arsénico se llevo a cabo en la ciudad de Venado Tuerto (Provincia de Santa Fe), el día 29 de agosto de 2018.

El lugar geográfico elegido dentro de la ciudad, fue precisamente donde funciona actualmente la planta potabilizadora de ósmosis inversa, ubicada en la calle Lola Mora al 500.

Dicha planta, obtiene los recursos hídricos del acuífero semi-confinado del pampeano, con perforaciones que oscilan los 30 metros de profundidad.

Este acuífero, se encuentra disponible en gran parte de la zona sur de la provincia de Santa Fe, en este caso, involucrando la totalidad del departamento General López y siendo catalogada su calidad hídrica en una escala de mediana a mala calidad, por el Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ENRESS).

Entre las características de este acuífero, presenta altas concentraciones de sales, sulfatos, silicatos y tóxicos como arsénico y flúor, que en muchos casos superan los valores máximos admisibles por la norma de aplicación (Ley N°11.220 de la Provincia de Santa Fe) (CONICET, 2013).

Los muestreos extraídos fueron los necesarios para realizar un análisis físico, químico y bacteriológico del agua contaminada, y otra cantidad adicional de agua para ser utilizada en la puesta en práctica del método desarrollado.

El instructivo recomendado y tenido en cuenta para realizar una toma de muestra en carácter de análisis microbiológico de agua se compone de:

- La recolección de la muestra deberá hacerse en un colector perfectamente esterilizado.

- La canilla desde donde se va a extraer la muestra deberá ser preferentemente metálica y la misma debe estar completamente limpia.
- No se deberían tomar muestras si la canilla presenta fugas y deja correr el agua por encima de su superficie externa.
- Flamear el extremo de la canilla con un hisopo con alcohol.
- Dejar correr el agua durante diez minutos.
- Extraer la muestra llenando el recipiente en forma casi completa.
- La cantidad de muestra deberá ser como mínimo 250 ml (mililitros).
- Rotular el recipiente con los siguientes datos:
 - Fecha.
 - Lugar.
 - Hora de muestreo.
 - Sector de muestreo.
 - Observaciones: cualquier dato que se considere relevante para el análisis microbiológico.
- Mantener la muestra refrigerada hasta la llegada al laboratorio.
- Si la muestra no puede ser remitida inmediatamente al laboratorio, deberá conservarse refrigerada a cuatro grados centígrados (°C), como máximo hasta 24 horas posteriores a la toma de la muestra.

Del mismo modo, el instructivo que corresponde a un análisis físico-químico de agua son:

- Utilizar frascos o botellas de vidrio o plástico preferentemente incoloros de una capacidad de dos litros como mínimo.
- El recipiente debe estar perfectamente limpio y seco.

- Enjuagar el recipiente varias veces con el agua cuya muestra se quiere tomar.
- Llenar completamente el recipiente y tapar con tapón recubriendo este con una sobretapa de polietileno o papel impermeable a fin de evitar la interposición o migración de materias extrañas entre el tapón y el cuello del frasco.
- Rotular el recipiente con los siguientes datos:
 - Fecha.
 - Lugar.
 - Hora de muestreo.
 - Sector de muestreo.
 - Observaciones: cualquier dato que se considere relevante para el análisis físico-químico.

Los instructivos fueron realizados según el protocolo de toma de muestra del Código Alimentario Argentino en combinación con los requisitos del laboratorio en cuestión, garantizando de esta manera no inferir sobre los valores que luego arrojará cada determinación analítica.

Los envases que se utilizaron para la toma de muestra correspondiente a los análisis físico-químicos, fueron botellas de PET (tereftalato de polietileno) de primer uso. En tanto, los envases recolectores utilizados para los análisis microbiológicos fueron de PP (polipropileno) esterilizados.

Las muestras obtenidas se han etiquetado como: Muestra número uno (agua tratada) y Muestra número dos (agua contaminada).

Como se menciona anteriormente, el agua catalogada como agua tratada fue sometida previamente a la aplicación del método desarrollado.

La metodología aplicada consta de tres etapas: afinidad, filtrado y post-filtrado.

En la etapa de afinidad, se busca hacer interactuar al arsénico con distintas estructuras químicas, preferentemente con la de distintos óxidos de hierro, lo cual guarda un fin benéfico que se va a ver reflejado luego al finalizar el tratamiento.

Para ello, se deposita el agua contaminada en un contenedor adaptado especialmente para ir complementando distintas acciones, en esta ocasión la capacidad del mismo es de diez litros y se grafica a continuación (Figura 3).

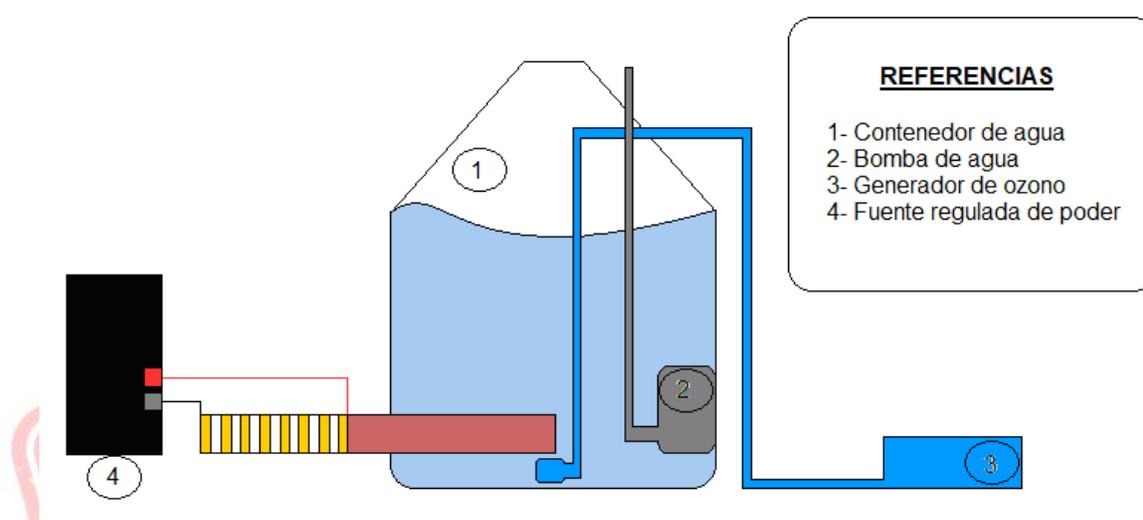


FIGURA 3. ESQUEMA VISTA LATERAL METODOLOGÍA

Una vez que el agua contaminada se encuentra dentro del contenedor (1), se procede a añadir 100 g (gramos) de limadura de hierro y 15 rollitos de lana de acero tipo comercial. Ya con este agregado, comienza la oxidación de todo el conjunto, a través de la aplicación de ozono por burbujeo proveniente del generador de ozono (3), y en paralelo se pone en funcionamiento una bomba de agua (2), la cual recoge líquido desde el fondo del contenedor y lo devuelve a través de una manguera a la parte superior. En efecto, la acción continua de la bomba de agua y el ozonizador, provoca que en el interior del contenedor haya un movimiento constante similar al de un mezclado.

El conjunto de acciones mencionadas anteriormente se va a extender por 45

minutos. A partir de entonces, se va a adicionar al sistema la puesta en marcha de una fuente regulada de poder (4), la cual va a modificar la corriente alterna para primero, transformarla en corriente continua y luego ofrecerle a un electroimán conformado por un solenoide, ocho amperios y dos voltios de poder, dando como resultado un campo electromagnético que se va a mantener en las condiciones mencionadas de corriente durante 15 minutos. De esta manera se van a completar 60 minutos de tratamiento que corresponden a la etapa de afinidad.

Posteriormente, tiene lugar la etapa de filtrado. En esta etapa, la bomba de agua va a modificar su acción final que ya no va a ser la de reingresar el agua al contenedor a modo de mezcla, sino que va a seguir recogiendo agua desde la parte inferior del contenedor, pero esta vez para dirigirla hacia los filtros.

Durante todo el proceso de filtración, la fuente regulada de poder debe estar seteada en diez amperios y 2,5 voltios.

Los filtros involucrados en el proceso son tres, y todos ellos tienen la misma conformación de materiales, pero están diseñados de distintas maneras, variando el orden y la cantidad de sus componentes.

Todos ellos están realizados dentro de botellas de PET de 2,5 litros.

El diseño de los mismos se conforma de la siguiente manera (Figura 4).

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY



FIGURA 4. FILTROS UTILIZADOS

El filtro ilustrado en el lado izquierdo de la figura cuatro es el de primera instancia. El filtro del lado derecho se encuentra por duplicado y corresponde al filtrado de segundo y tercer orden.

Los tres filtros se disponen de manera vertical y consecutiva, teniendo como fuerza impulsora la ejercida por la gravedad. La cantidad de filtros y el cambio en su conformación hacen que el sistema resulte eficiente en cuanto a la retención de sustancias y materias no deseadas.

La eficiencia aproximada de filtrado teniendo en cuenta la totalidad de los filtros es de entre 150 y 200 litros de agua.

El agua resultante en esta etapa es recolectada en un contenedor totalmente limpio.

La calidad del filtrado se refleja en la siguiente imagen (Figura 5).

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY



FIGURA 5. RESULTADOS FILTRACIÓN

Agua proveniente de la etapa de afinidad vs agua resultante de la etapa de filtrado.

En última instancia se realiza la etapa de post-filtrado, en la que toda el agua recolectada se acondiciona a través de un proceso de ozonización y cloración para lograr una calidad microbiológica apropiada.

En dicho proceso se inyecta ozono por burbujeo durante cinco minutos por litro de agua y se consolida el tratamiento agregando solo un cuarto del hipoclorito de sodio recomendado para potabilizar agua.

El tiempo estimado para realizar las tres etapas del tratamiento es de 90 minutos, dentro de los cuales se obtienen 9,5 litros de agua tratada y medio litro de agua de “desperdicio” (agua con limadura de hierro que puede ser reutilizada para una próxima etapa de afinidad).

Especificación de materiales utilizados durante las etapas de afinidad, filtrado y post-filtrado:

- Bidón contenedor de agua

Capacidad: diez litros.

Material: PET.

- Limadura de hierro proveniente del subproducto del corte de hierro galvanizado, particulado casi picado a polvo y pre-filtrado por imantación.

- Lana de acero en rollitos

Marca: Romyl ®.

Grosor: 0000.

- Equipo generador de ozono por burbujeo

Marca: Ozono del sur ®.

Concentración de ozono en agua: 25 mg de o3/h (miligramos de ozono por hora).

Potencia: 15 w (watt).

Voltaje: 220 v (voltios).

Manguera de PVC: 1,5m x 4mm (milímetro).

Piedra difusora terminal cilíndrica: 2,5 x 1,5 cm (centímetro).

- Bomba de agua

Marca: Atma ® AT-301.

Medidas: 45 x 35 x 30 mm.

Alimentación de bomba: 2,5w.

Voltaje: 220v.

Frecuencia: 50Hz (Hertz).

Bombeo máximo: 300 l/h (litros/hora).

Manguera de PVC (policloruro de vinilo) de 1,5 m x 8 mm.

- Fuente regulada de poder

Marca: Flexzion ® 3010D - DC Power Supply.

Voltaje de entrada: 220V, \pm diez por ciento 60Hz.

Voltaje de salida: DC 0-30V continuamente ajustable.

Corriente de salida: DC 0-10A continuamente ajustable.

Resolución de pantalla: voltaje: 0.1V, corriente: 0.1A (ampere).

Precisión de pantalla: \pm uno por ciento \pm un dígito.

Voltaje estabilización: $\leq 0.05\%$ + un mV (milivoltio).

Estabilización de corriente: $\leq 0.1\%$ + diez mA (miliampere).

Estabilización de carga: CV $\leq 0.1\%$ + un mV / CC $\leq 0.1\%$ + diez mA.

Ondulaciones y ruidos: CV \leq diez mV (RMS) / CC \leq veinte mA (RMS)

(Root Mean Square).

Temperatura de trabajo : - diez °C (grados centígrados) ~ 40 °C.

Dimensión: 10.2 x 4.9 x 6.1 (pulgadas).

Pinzas conectoras tipo cocodrilo con cableado de cuatro mm de diámetro.

- Solenoide

Cilindro de hierro macizo: 30 x 2,54 cm.

Bobinado: un Kg de alambre de cobre esmaltado de dos mm de diámetro.

- Envases utilizados para filtros

Material: PET.

Capacidad: 2,5 l.

- Materiales que conforman los filtros:

Arena fina.

Piedras de tamaño mediano.

Carbón vegetal.

Algodón.

- Hipoclorito de sodio al 0.5% (Proporción recomendada para potabilizar agua en dicha concentración: 4 gotas por litro).



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las pruebas analíticas se presentan a continuación.

Muestra número uno: Agua tratada

- Análisis físico-químico

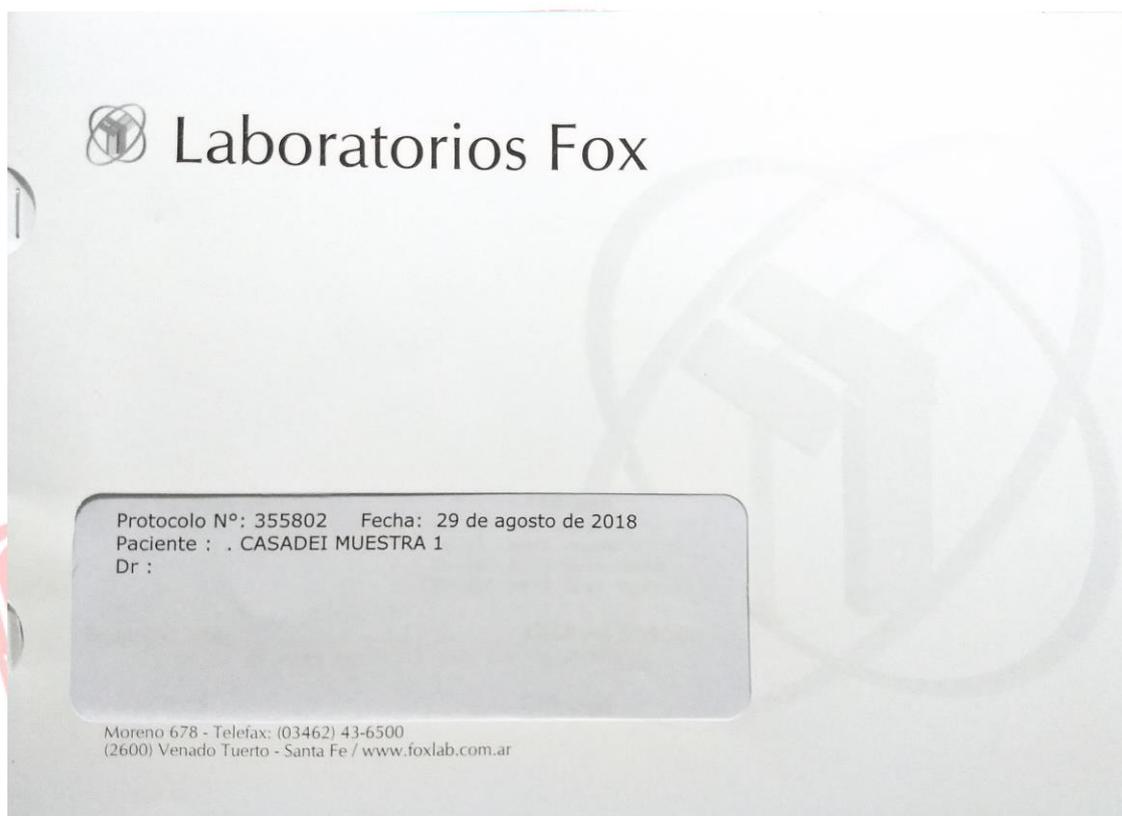


FIGURA 6. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (1/6)

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

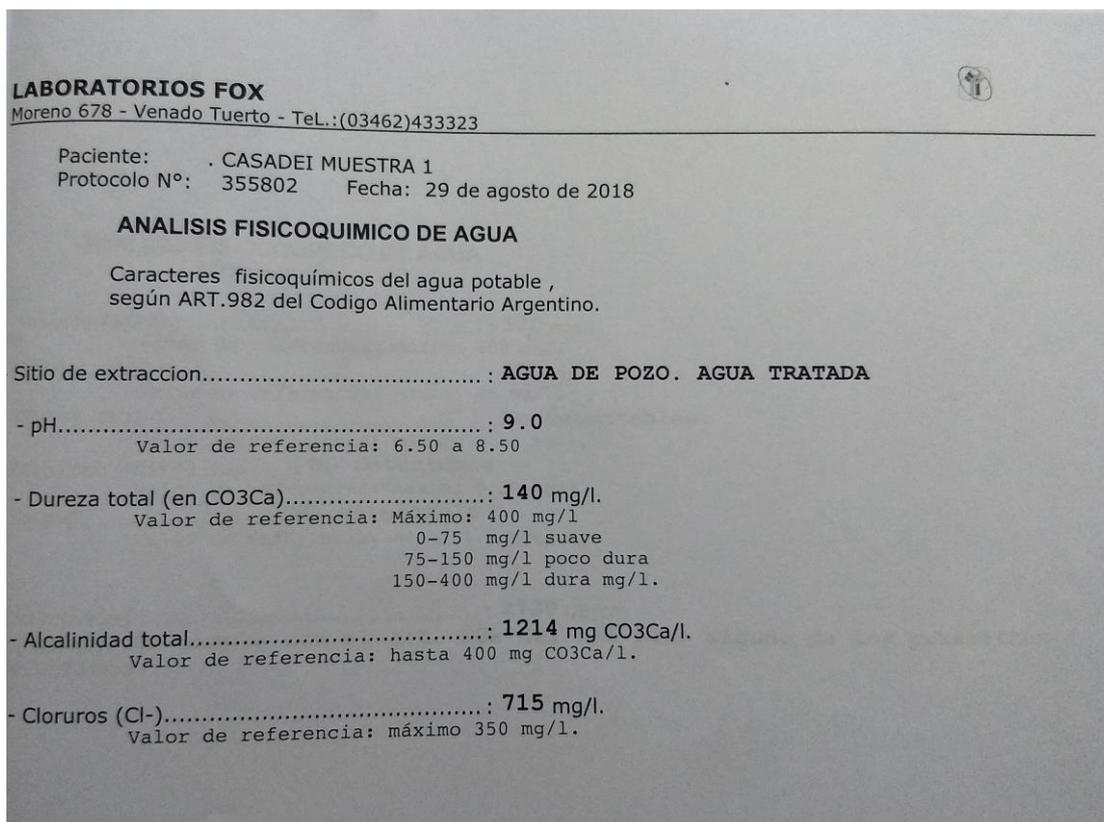


FIGURA 7. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (2/6)

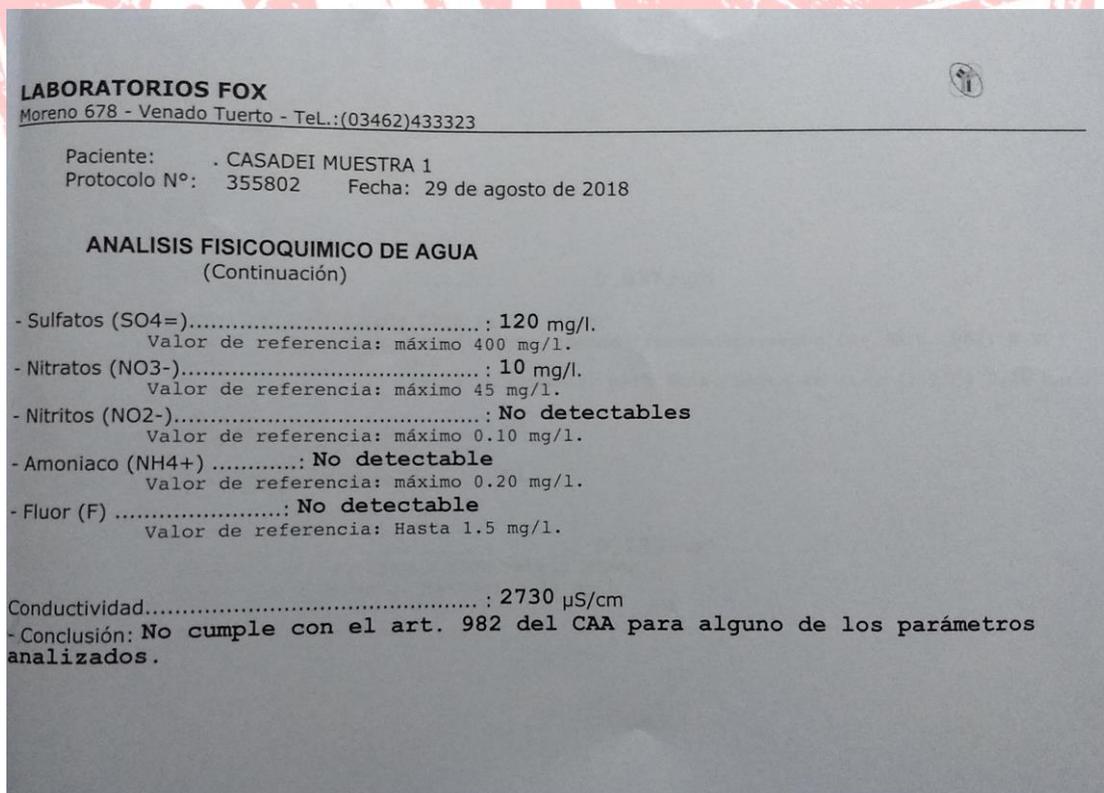


FIGURA 8. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (3/6)

LABORATORIOS FOX
Moreno 678 - Venado Tuerto - Tel.: (03462)433323

Paciente: . CASADEI MUESTRA 1
Protocolo N°: 355802 Fecha: 29 de agosto de 2018

Arsénico : 0,037 mg/l

Método: ICP OES Optima 8000 Perkin Elmer
Valor de referencia: Concentración máxima recomendada según CAA (Art. 982) 0,01 mg/l
Límite recomendado para Pcia. Santa Fe (Ley 11.220) 0,05 mg/l

Cumple Art. 982 del CAA..... : **No**

Cumple Ley 11.220 Provincia de Santa Fe..... : **Sí**

Hierro : 0,137 mg/l

Método: ICP OES Optima 8000 Perkin Elmer
Valor de referencia: Máximo: 0,30 mg/l

FIGURA 9. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (4/6)

- Análisis bacteriológico

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

LABORATORIOS FOX
 Moreno 678 - Venado Tuerto - Tel.:(03462)433323

Paciente: . CASADEI MUESTRA 1
 Protocolo N°: 355802 Fecha: 29 de agosto de 2018

ANALISIS BACTERIOLOGICO DE AGUA
 Método de G.S.WILSON propuesto por O.S.N.

Procedencia: **Muestra 1**

Recuento de colonias aerobicas.....: **5 UFC/ml.**
 Valor de referencia: Máximo 500 UFC/ml.

Número más probable de bacterias coliformes... : **<3 NMP/100 ml**
 Valor de referencia: Menor a 3 NMP/100 ml

Pseudomonas aeruginosa.....: **Ausencia** en 100 ml
 Valor de referencia: Ausencia en 100 ml

E. coli.....: **Ausencia** en 100 ml
 Valor de referencia: Ausencia en 100 ml

FIGURA 10. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (5/6)

LABORATORIOS FOX
 Moreno 678 - Venado Tuerto - Tel.:(03462)433323

Paciente: . CASADEI MUESTRA 1
 Protocolo N°: 355802 Fecha: 29 de agosto de 2018

Conclusión: **Agua bacteriológicamente apta para consumo.**

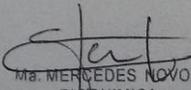

 Ma. MERCEDES NOVOA
 BIQUÍMICA
 M.A.T. N° 2414

FIGURA 11. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°1 (6/6)

Muestra número dos: Agua contaminada

- Análisis físico-químico

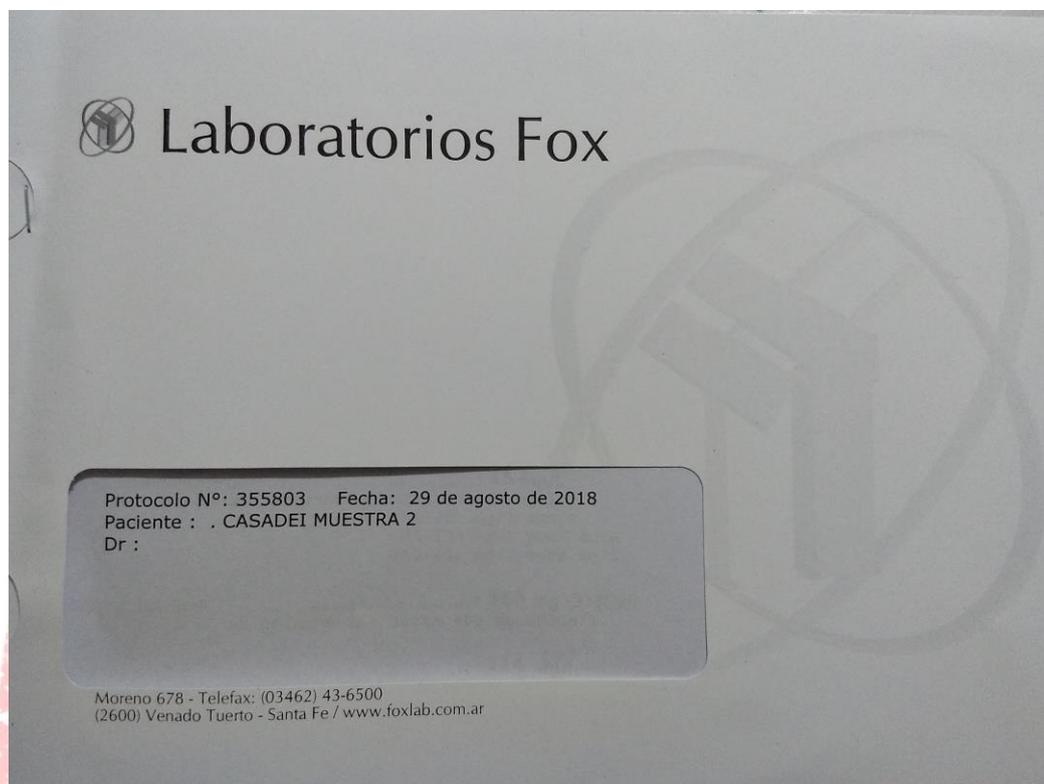


FIGURA 12. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (1/6)

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

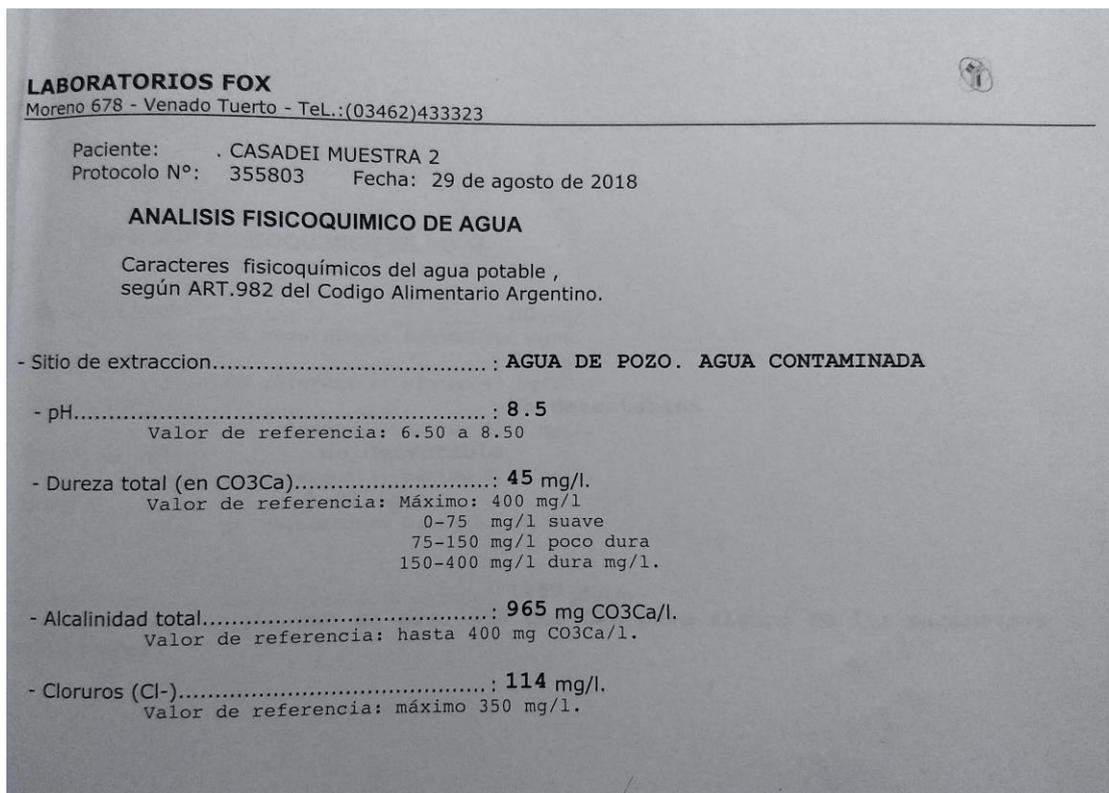


FIGURA 13. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (2/6)

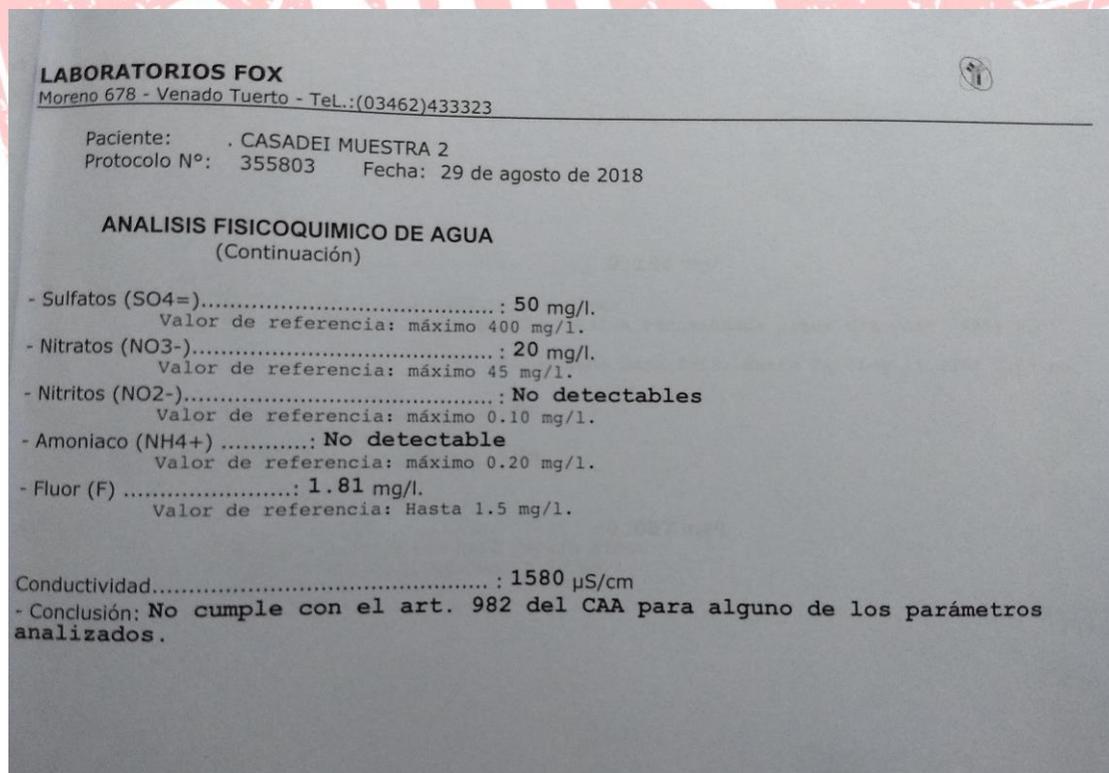


FIGURA 14. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2(3/6)

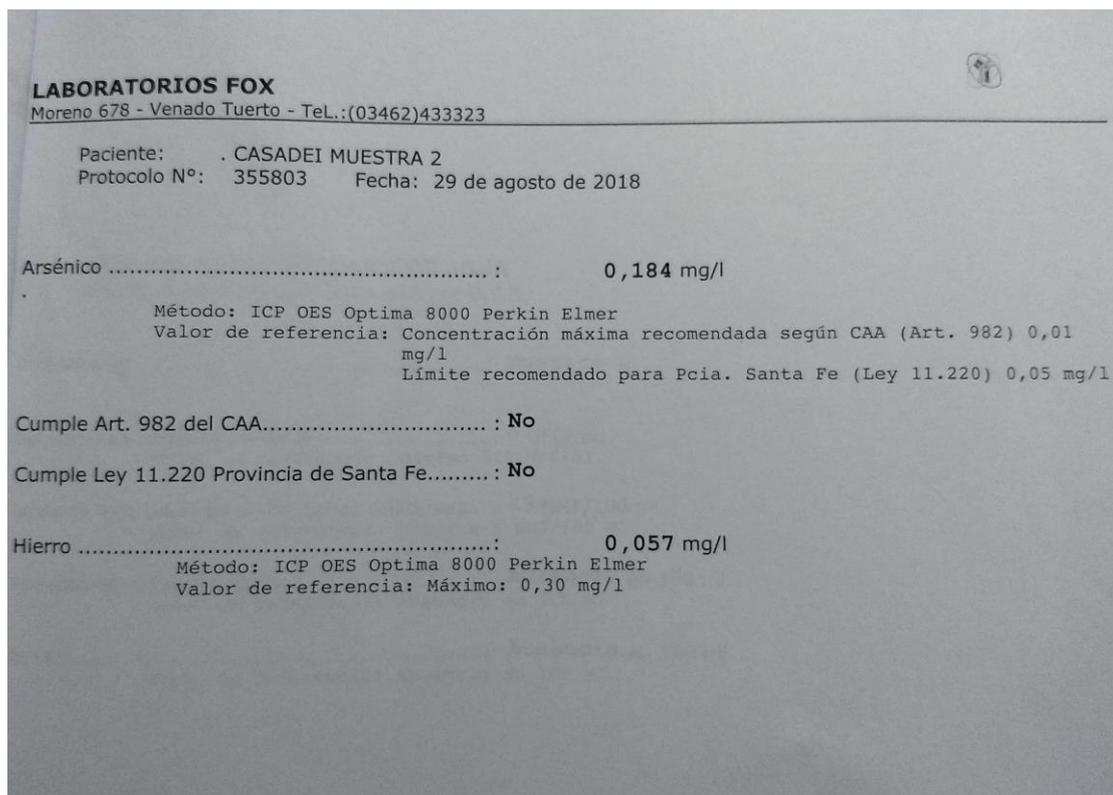
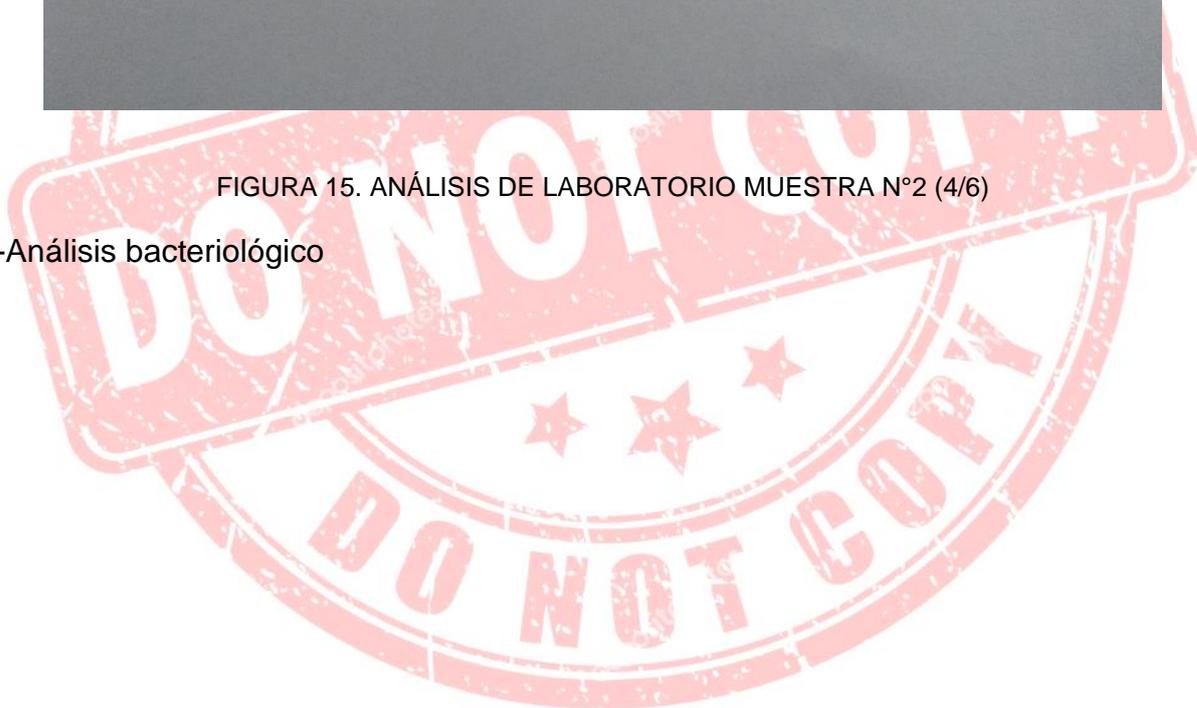


FIGURA 15. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (4/6)

-Análisis bacteriológico



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

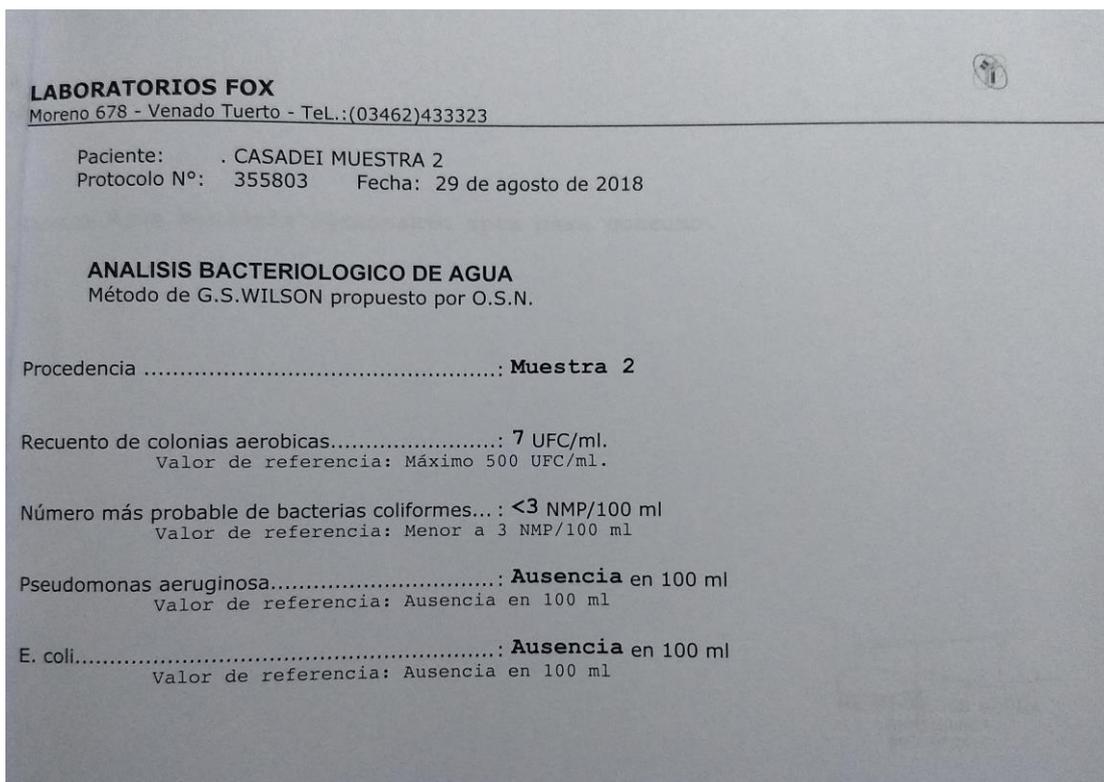


FIGURA 16. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (5/6)

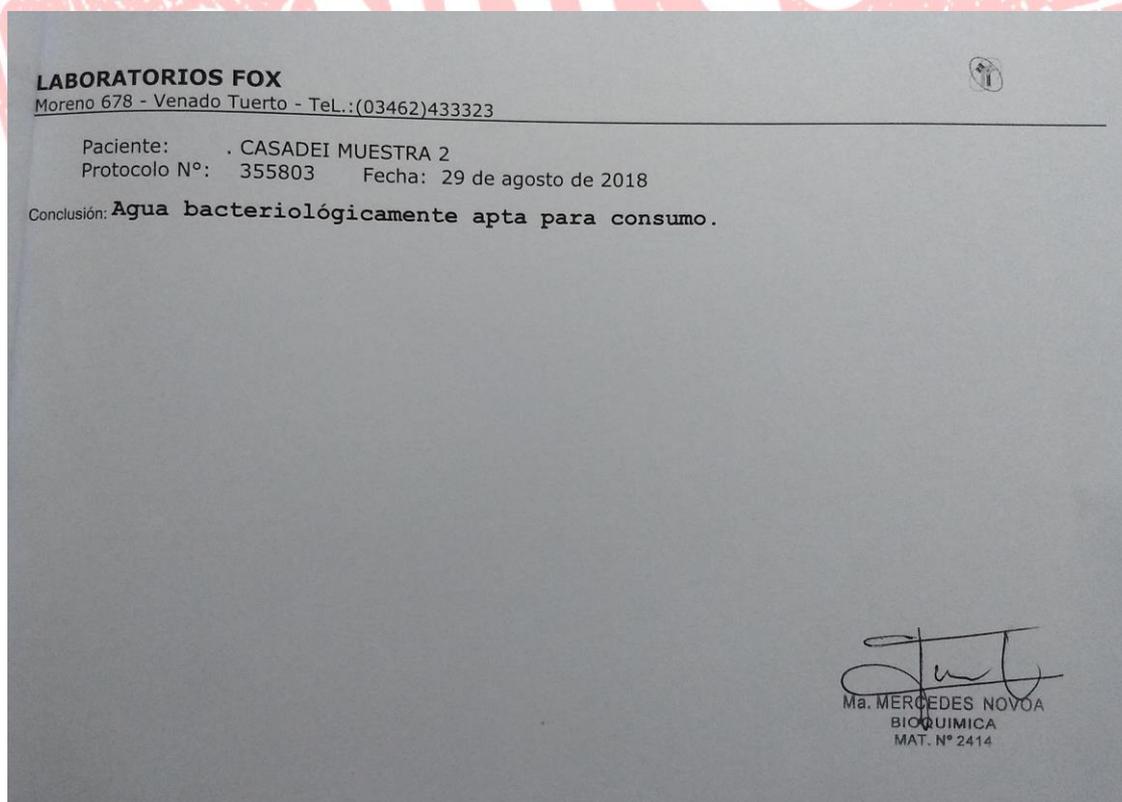


FIGURA 17. ANÁLISIS DE LABORATORIO MUESTRA N°2 (6/6)

DISCUSIÓN

- La remoción de arsénico tiene una eficiencia del 80%, se paso de una concentración de 0,184 mg/l a 0.037 mg/l, la cual se encuentra dentro del marco legal que rige actualmente en la provincia de Santa Fe (Ley 11.220), que fija el máximo permitido de arsénico en agua en 0.05 mg/l. De esta manera, no se logra llegar al límite recomendado por la OMS de 0.01 mg/l, que también rige en el artículo 982 del CAA.
- La remoción del flúor es casi total, se paso de una concentración de 1.81 mg/l a no ser detectable analíticamente. Los valores de flúor en agua están fijados con un límite de concentración máxima permitida de 1.5 mg/l y un mínimo de 0,8 mg/l según el artículo 982 del CAA.
- Los valores de dureza total, sulfatos, nitratos, nitritos, amoníaco y hierro son adecuados según el artículo 982 del CAA.
- Los valores de alcalinidad total y conductividad no son reglamentados por el artículo 982 del CAA, por ende también son adecuados.
- Los resultados bacteriológicos para la conformidad de agua apta para consumo se encuentran dentro de los parámetros exigidos por el artículo 982 del CAA.
- Los valores que están por fuera de conformidad según el artículo 982 del CAA son pH 9 (máximo 8,5) y cloruros 715 mg/l (máximo 350 mg/l).

La etapa de filtrado tiene gran incidencia en ciertos resultados analíticos. La conformación de un filtro útil pero ciertamente rudimentario, que además trabaja con un filtrado por fuerzas de gravedad (sin presión), hacen que el buen resultado logrado en la fase de afinidad (puntualmente entre el arsénico y el los óxidos de

hierro) no se reflejen con total eficiencia en los resultados analíticos.

Por lo que un método de filtrado más eficiente lograría bajar aún más la concentración final de hierro en agua y con ello, disminuir la concentración de arsénico y pH.

Dentro del estudio del resultado obtenido en cuando a todas las variables analizadas, se destaca fundamentalmente la posibilidad de remover el flúor del agua tras la aplicación del método desarrollado, siendo este elemento otro tóxico de importancia presente en el acuífero semi-confinado del pampeano. Si bien la concentración resultante no excede el límite de fluor en agua, tampoco se halla dentro del valor óptimo recomendado en el CAA, el cual hace hincapié en que dichos valores son favorables en la prevención de caries y en una mejora dental para los consumidores, habiendo aquí una incompatibilidad con respecto a la opinión científica, quien abre un marco de discusión entorno a los riesgo de salud que conllevaría un consumo prolongado de esta sustancia, motivo por el cual varios países y entre ellos Alemania, Bélgica, Finlandia, Holanda y Japón en la actualidad dejaron de fluorar el agua potable.

Otras de las características de este acuífero es la presencia de altos contenidos de sales y silicatos, que se evidencian claramente en los resultados elevados obtenidos en cuando a la alcalinidad total, otro condicionante sustancial del pH.

El contar con parámetros bacteriológicos adecuados es de gran importancia, más si se tiene en cuenta que los materiales utilizados para filtrar son de índole natural y no tienen tratamiento previo de desinfección antes de su utilización.

CONCLUSIÓN

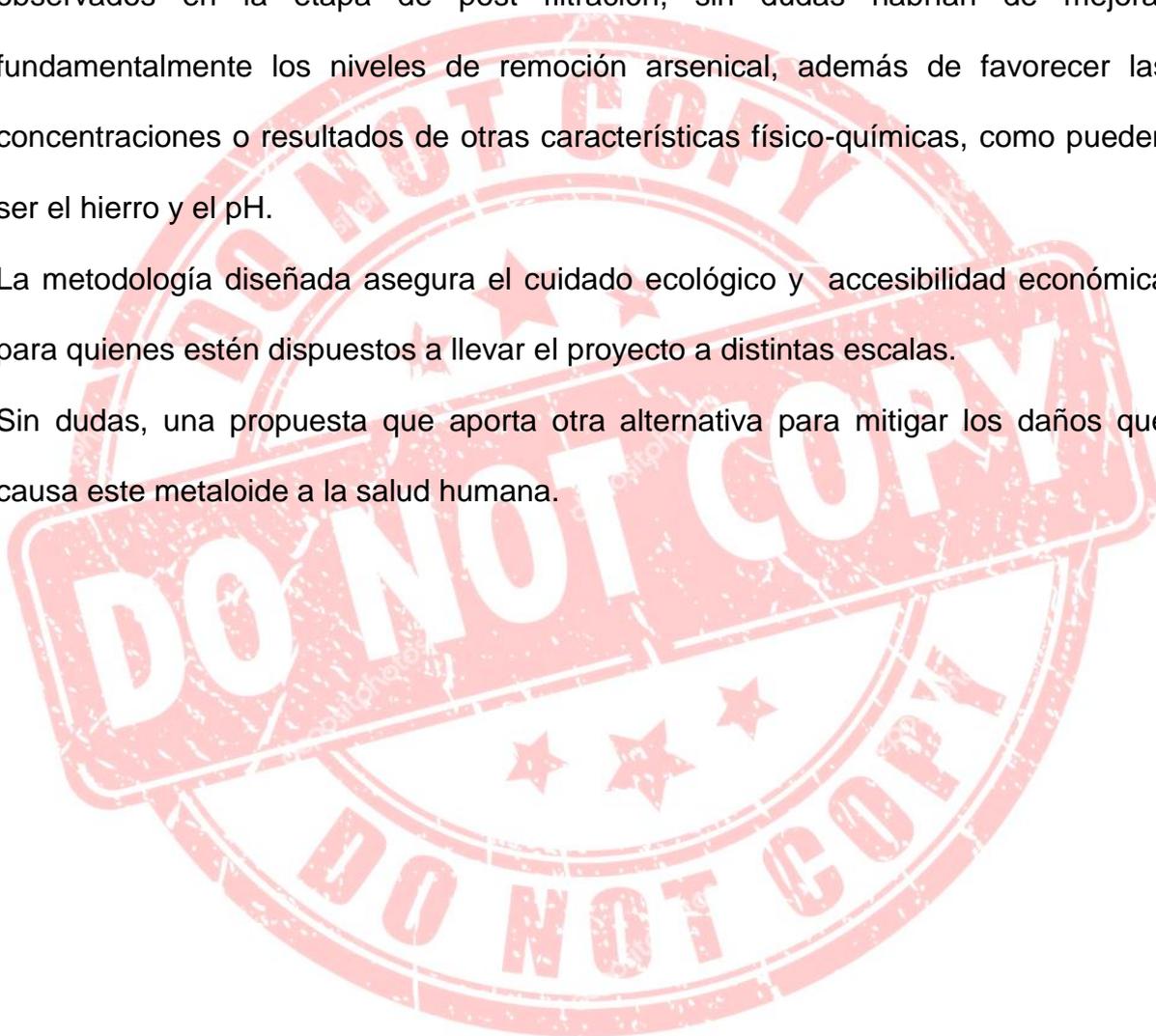
Los resultados analíticos obtenidos permiten concluir que la eficiencia de remoción de arsénico del método desarrollado no cumple con el objetivo planteado inicialmente, en donde se estipula llegar a concentraciones menores de 0,01 mg/l, recomendadas por la OMS. A pesar de esta circunstancia, los resultados obtenidos son sumamente alentadores. Se logró una concentración de arsénico en el agua de tratamiento de 0.037 mg/l, la cual no solo se encuentra muy cercana a los niveles de concentración recomendados por la OMS, sino que está dentro de los parámetros que hoy rigen en la provincia de Santa Fe, según la ley 11.220, que estipula un máximo de concentración de arsénico en agua de 0.05 mg/l, ya que según la OMS, cuando hay problemas para respetar el valor guía, los estados miembros pueden establecer límites más elevados teniendo en cuenta las circunstancias locales, los recursos disponibles y los riesgos asociados a fuentes con bajos niveles de arsénico contaminadas microbiológicamente.

Dentro de los resultados de laboratorio conseguidos, sin dudas el de segundo orden de importancia es el haber logrado la remoción de flúor del agua. Tal elemento conjunto al arsénico, son dos tóxicos de suma importancia en cuanto a la preocupación sanitaria por su presencia en agua de consumo. Si bien desde el marco legal del CAA se recomiendan valores óptimos para la fluoración del agua potable, gran parte de la comunidad científica (entre ellos *James Summer*, premio Nobel sobre química enzimática) pone en discusión el riesgo que conlleva su consumo prolongado, independientemente de una dosificación mínima, la fluoración podría generar daños graves en la salud. Por ello, la alta remoción de dichas sustancias dentro de un mismo método es sumamente positivo.

Luego de cotejar resultados empíricos y analíticos, se plantea una mejora sustancial en la etapa de filtración, la cual tuvo una incidencia directa sobre el resultado analítico de los distintos parámetros. En caso de lograrse eliminar completamente un dejo de color amarillento correspondiente a la presencia de óxidos de hierro observados en la etapa de post filtración, sin dudas habrían de mejorar fundamentalmente los niveles de remoción arsenical, además de favorecer las concentraciones o resultados de otras características físico-químicas, como pueden ser el hierro y el pH.

La metodología diseñada asegura el cuidado ecológico y accesibilidad económica para quienes estén dispuestos a llevar el proyecto a distintas escalas.

Sin dudas, una propuesta que aporta otra alternativa para mitigar los daños que causa este metaloide a la salud humana.



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

ANEXOS

De alguna manera, el profundizar sobre los componentes de la metodología aplicada en el proyecto permite ahondar sobre las ingerencias de los mismos y a su vez tener una apertura más abarcativa.

De este modo, a continuación se presenta una descripción técnica más detallada sobre los métodos utilizados.

SOLENOIDE

En general, hasta la segunda década del siglo XIX se consideraba que no existía relación entre la electricidad y el magnetismo. En 1820 el danés *Hans Christian Oersted* observó que, la aguja de una brújula perturbaba su orientación cuando se aproximaba a un alambre conductor por cuyo interior circulaba corriente eléctrica. Posteriormente, el inglés *Michael Faraday* en 1831 mostró que, al mover rítmicamente una barra de imán permanente en el interior del cilindro hueco que forman las N vueltas de alambre enrollado y conectado en sus extremos a un instrumento de medición (de la corriente eléctrica), en éste se detectó la presencia de una corriente eléctrica.

Un conductor eléctrico simple, enrollado en forma de hélice o espiral formando una bobina, se llama solenoide, y tiene la propiedad de producir un campo magnético mucho más intenso que un solo conductor circular.

En la siguiente figura (Figura 18) se muestra un solenoide bobinado con mucha separación entre las espiras, y se puede ver cómo se combina la acción electromagnética de las distintas espiras, formando un polo norte y otro sur, perfectamente definidos según el sentido de la corriente.



FIGURA 18. POLARIZACIÓN DE UN SOLENOIDE

El efecto magnético de cada espira se suma al efecto de las otras, y por este medio es posible crear un campo magnético muy intenso con una corriente de intensidad relativamente pequeña. Cuanto mayor número de espiras tiene el solenoide y más juntas están, mayores son los efectos magnéticos que se obtienen (Figura 19).

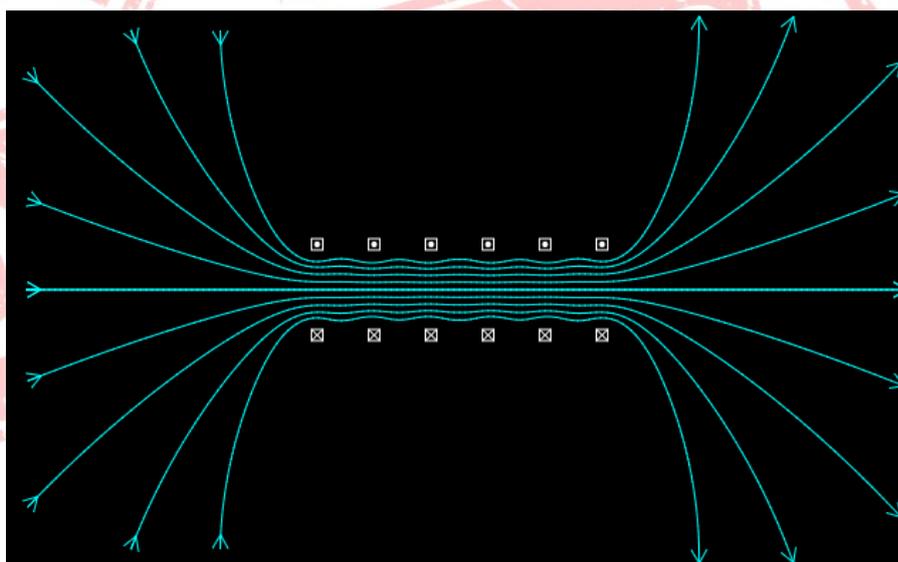


FIGURA 19. CAMPO MAGNETICO DE UN SOLENOIDE

Si la corriente eléctrica fuera invertida, de modo que circulara por las espiras en sentido contrario, el campo de cada espira también se invertirá y, por lo tanto, el campo resultante tendrá sentido opuesto, cambiando de signo los polos (*Tippens, 2009*).

Cuando un solenoide no tiene núcleo se dice que tiene núcleo de aire, pero este

punto es de fundamental importancia, debido que esta directamente relacionado con la inductancia del sistema, es por ello que la inductancia del sistema depende de cuatro factores: el número de vueltas de alambre enrollado, el área de la sección transversal del solenoide, la permeabilidad de los materiales de su núcleo y la longitud del solenoide. De todos estos factores, los más importantes para aumentar el rendimiento del solenoide son: a mayor cantidad y diámetro de espiras, mayor es la inductancia, y la misma regla guarda relación entorno al núcleo que presente el solenoide, por lo que un núcleo de hierro o de otro material magnético favorece ampliamente a la inductancia del sistema si se lo compara con un núcleo de aire (Cheng, 1997).

Además, la presencia de un núcleo de hierro no solo tiene relación directa con la inductancia del sistema sino también con la permeabilidad magnética del mismo.

El sistema se fabrica generalmente con alambre de cobre esmaltado, debido que la capa de esmalte que lo recubre le proporciona al sistema un aislamiento eléctrico, de manera que el alambre de cobre no se cortocircuita cuando se enrolla en una bobina (Coulomb, 1890).

SATURACIÓN MAGNÉTICA DEL HIERRO

La acción del solenoide esta intensificada por la presencia de un núcleo de hierro, con la finalidad de aprovechar su permeabilidad y susceptibilidad magnética, haciendo que el campo magnético resultante sea mayor al campo magnético aplicado.

Precisamente la utilización de este material es debido a su caracterización ferromagnética por excelencia. No obstante, si no se tienen en cuenta ciertos recaudos entorno a la saturación magnética, se ve directamente influenciado el

rendimiento esperado, llegándose a provocar reacciones no favorables en la aplicación del método.

Los materiales ferromagnéticos que muestran saturación, como el hierro, están compuestos de regiones microscópicas llamadas dominios magnéticos que actúan como pequeños imanes permanentes. Antes de que un campo magnético externo sea aplicado al material, los dominios se encuentran orientados al azar. Sus pequeños campos magnéticos apuntan en direcciones aleatorias y se cancelan entre sí, de modo que el material no produce un campo magnético global neto. Cuando se aplica un campo de magnetización externo H al material, lo penetra y causa la alineación de los dominios, provocando que sus pequeños campos magnéticos roten y se alineen paralelamente al campo externo, sumándose para crear un gran campo magnético que se extiende hacia fuera del material. Esto es llamado magnetización. Cuanto más fuerte sea el campo magnético externo, mayor será la alineación de los dominios. El efecto de saturación ocurre cuando ya prácticamente todos los dominios se encuentran alineados, por lo que cualquier incremento posterior en el campo aplicado no puede causar una mayor alineación.

Dicho efecto se puede observar más claramente en una curva de magnetización o curva de histéresis de una sustancia (Figura 20), en concreto en la región superior derecha de la curva. Mientras que el campo H se incrementa, el campo B se aproxima a un valor máximo de manera asintótica. Este valor al cual tiende asintóticamente el campo B es el nivel de saturación de esa sustancia (Choudhury, 2005).

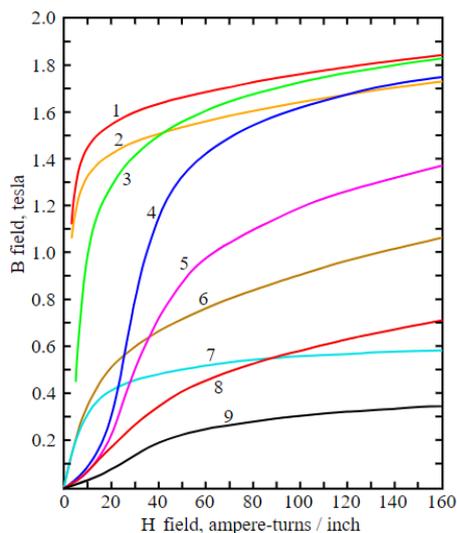


FIGURA 20. CURVA DE MAGNETIZACIÓN DE UNA SUSTANCIA

Curvas de magnetización de materiales ferromagnéticos, mostrando el efecto de saturación. 1.Hoja de acero, 2.Acero al silicio, 3.Acero de crisol, 4.Acero al tungsteno, 5.Acero magnético, 6.Hierro, 7.Níquel, 8.Cobalto, 9.Magnetita.

Estrictamente hablando, por sobre el nivel de saturación, el campo B continúa aumentando pero de manera paramagnética, la cual es tres órdenes de magnitud más pequeña que la tasa de aumento ferromagnética observada por debajo del nivel de saturación.

La permeabilidad de los materiales ferromagnéticos no es constante, sino que depende de H. En los materiales saturables la permeabilidad relativa se incrementa con H hasta un máximo, y luego mientras el material se aproxima a saturación, el efecto se invierte y la curva decrece hasta uno (Figura 21). (Steinmetz, 1917).

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

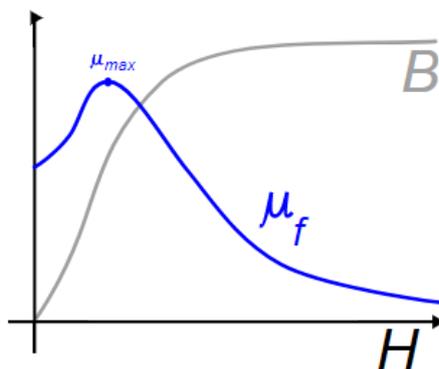


FIGURA 21. SATURACIÓN MAGNETICA EN EL HIERRO

Debido al efecto de saturación, la permeabilidad magnética (μ_f) de una sustancia ferromagnética alcanza un máximo y luego declina.

El ferromagnetismo es un fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido. Un material ferromagnético es aquel que puede presentar ferromagnetismo. La interacción ferromagnética es la interacción magnética que hace que los momentos magnéticos tiendan a disponerse en la misma dirección y sentido. Ha de extenderse por todo un sólido para alcanzar el ferromagnetismo.

Los ferromagnetos están divididos en los mencionados dominios magnéticos, separados por superficies conocidas como paredes de *Bloch*. En cada uno de estos dominios, todos los momentos magnéticos están alineados. En las fronteras entre dominios hay cierta energía potencial, pero la formación de dominios está compensada por la ganancia en entropía (*Bozorth, 1993*).

Al someter un material ferromagnético a un campo magnético intenso, los dominios tienden a alinearse con éste, de forma que aquellos dominios en los que los dipolos están orientados con el mismo sentido y dirección que el campo magnético inductor aumentan su tamaño. Este aumento de tamaño se explica por las características de las paredes de *Bloch*, que avanzan en dirección a los dominios

cuya dirección de los dipolos no coincide; dando lugar a un monodominio (Figura 22). Al eliminar el campo, el dominio permanece solo durante cierto tiempo (Chikazumi, 1997).

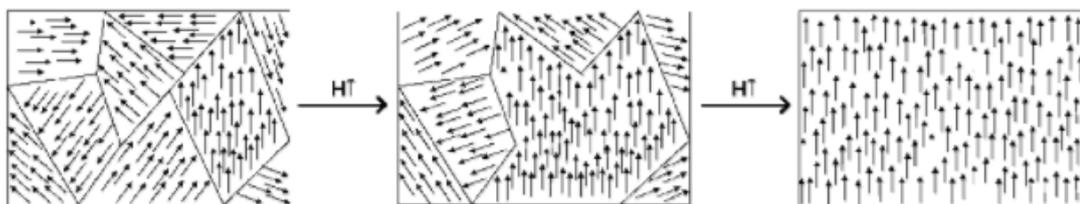
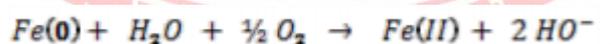


FIGURA 22. ALINEACIÓN DE DOMINIOS: MONODOMINIO

HIERRO CERO-VALENTE

El agregado al sistema de hierro cero-valente en forma de limadura de hierro (Fe) tiene un papel fundamental, debido a que el arsénico tiene mucha afinidad con los óxidos de hierro. Teniendo en cuenta esta premisa, si se agrega hierro metálico en una sección de agua con un alto grado de poder oxidativo y que a su vez esta contaminada con arsénico, el hierro se oxida rápidamente dando lugar a la formación de óxido de hierro, el cual captura al arsénico debido a su afinidad.

Este mecanismo involucra complejos procesos fisicoquímicos relacionados con los productos de corrosión del hierro. En presencia de oxígeno el hierro metálico es oxidado a Fe (II) a través de la siguiente reacción



Posteriormente el Fe (II) es oxidado a especies de Fe (III) mediante la siguiente reacción



En estas condiciones las especies férricas producidas en el medio participan en la formación de fases coloidales capaces de remover el arsénico III y V (Martinez,

2009).

OZONO

La oxidación es el principal objetivo del empleo de ozono en el proceso. En este caso, la utilización de este agente puede involucrar también una doble función: la desinfección. Este gas presenta un elevado poder oxidante respecto a otros agentes, especialmente si se lo compara con el cloro, el agente más utilizado para oxidar y desinfectar el agua (Figura 23).

Agente oxidante	Potencial de oxidación (V)
Flúor	3.06
Radical OH [*]	2.80
Oxígeno atómico	2.42
Ozono	2.07
Peróxido de hidrógeno	1.77
Iones de permanganato	1.55
Cloro	1.36

FIGURA 23. POTENCIAL DE OXIDACIÓN DEL OZONO

El proceso de ozonización descrito por *Hoigné y Staehelin (1983)* involucra dos especies: el ozono y los radicales hidroxilo (OH^{*}). Estos autores puntualizan que el ozono en agua puede reaccionar directamente con sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas (por vía molecular) a través de una reacción muy selectiva, aunque también puede reaccionar indirectamente debido a su descomposición en radicales OH^{*}, los cuales reaccionan inmediatamente con los solutos presentes (*Hoigné, 1983*), (*Staehelin, 1985*). Esta segunda vía es precisamente la que ocurre en los llamados Procesos de Oxidación Avanzada (POA).

Estas dos vías de reacción conducen a diferentes productos de oxidación controlados por diferentes cinéticas. En la práctica de tratamiento de agua con

ozono, el pH oscila entre 6.8 y 7.2, valor alrededor de la neutralidad, condiciones en que el mecanismo de acción del ozono es fundamentalmente molecular y la reacción se lleva a cabo entonces por vía directa.

Teniendo en cuenta las potencialidades de las aplicaciones de la ozonización, puede ser introducida en diferentes etapas del proceso de potabilización, según el objetivo que se persiga o el problema que presente el agua de abasto en cuestión.

La pre-ozonización generalmente se ubica al inicio del proceso; el ozono, como agente oxidante, garantiza el control de la formación de trihalometano (THM), dada su eficiencia en la remoción de la materia orgánica y los precursores de los THM. Asimismo, oxida contaminantes orgánicos (fenoles, detergentes, pesticidas), cianuros, sulfuros y nitritos, así como el carbono orgánico disuelto. Por otro lado, incrementa la biodegradabilidad de la materia orgánica al posibilitar la conversión de los compuestos de alto peso molecular en otros de menor peso, más polares y oxigenados, a la vez que inocuos y biodegradables. También permite la remoción de hierro y manganeso; en este sentido, facilita el desacomplejamiento de estos metales con sus matrices respectivas.

Si se lo aplica en etapas de coagulación-floculación, el ozono tiene un efecto especial, ya que actúa sobre la superficie de los coloides en suspensión (que están estabilizados), cambiando la carga de la superficie. Por lo tanto, favorece la atracción entre los coloides y el incremento del volumen de los floculos, lo que permite que sean separados por filtración, acción que a su vez disminuye la turbidez y los sólidos en suspensión (*Jeckel, 1994*).

La pos-ozonización se sitúa preferentemente después de la filtración; garantiza la desinfección y la eliminación del olor, sabor y color, por lo que incide en la calidad

organoléptica del agua. Además, se reduce en 25 % la pos-cloración antes de la distribución del agua por la red (Bohme, 1999), (Rice, 1999).

En cuanto al poder desinfectante del ozono existe un consenso general de su amplio espectro de aplicación. Respecto a las cinéticas de inactivación, se dispone de un gran número de trabajos que refieren algunas discrepancias debido al procedimiento empleado en la determinación de las constantes y las condiciones experimentales utilizadas, tales como el medio acuoso, la dosis de ozono aplicada, la concentración de ozono disuelto, el tiempo de inactivación, entre otras (Langlais, 1991), (Zhou, 1994), (Finch, 2001).

En el siguiente cuadro se presentan valores de parámetros cinéticos para diferentes microorganismos (Figura 24), (Von Gunten, 2003).

	k_{O_3} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	Energía de activación (kJ mol ⁻¹)	Referencia
Bacterias			
<i>Escherichia coli</i>	130	37	Hunt y Mariñas (1997)
<i>Bacillus subtilis</i> (esporas)	2.9	42	Drieger <i>et al.</i> (2001)
Virus			
Rotavirus	76	-	Langlais <i>et al.</i> (1991)
Protozoos			
<i>Cryptosporidium parvum</i> (quistes)	0.84	80	Rennecker (1999)
<i>Giardia muris</i> (quistes)	15	81	Wickramanayane (1984)
<i>Giardia lamblia</i> (quistes)	29	-	

FIGURA 24. PARÁMETROS CINÉTICOS DE INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS CON OZONO

La energía de activación del proceso de inactivación de las bacterias con ozono es similar al intervalo de energía de activación correspondiente a las reacciones químicas con ozono, en el orden de 35-50 kJ mol⁻¹ (kilo joules); el proceso de inactivación de los protozoos arroja valores mayores, en el orden de 80 kJ mol⁻¹. Como la energía de activación de la descomposición de ozono en diferentes matrices está en el intervalo de 60 a 70 kJ mol⁻¹, para una misma dosis de ozono la

inactivación de las bacterias y esporas bacterianas será mayor a menor temperatura, mientras que para los protozoos la efectividad de la inactivación será menor (*Finch, 2001*), (*Von Gunten, 2003*). *Finch*, observó que para *Cryptosporidium* este efecto es más marcado en aguas naturales. Asimismo, el pH entre seis y ocho no afecta la inactivación en estudios de laboratorio, mientras que en aguas naturales la inactivación incrementa a pH seis (*Finch, 2001*).

Se reconoce la existencia de una relación entre las características morfológicas de los microorganismos y su resistencia al ozono (*Finch, 2001*). Se plantea el siguiente orden descendente de resistencia: hongos > bacterias esporuladas > bacterias no esporuladas > virus (*Pérez-Rey, 1995*).

Los estudios realizados por *Lezcano (1999, 2001)* en bacterias gram positivas revelaron que presenta mayor resistencia *Staphylococcus aureus* respecto a *Candida albicans* y *Streptococcus faecali*; en el caso de las bacterias gram negativas presenta mayor resistencia *Pseudomonas aeruginosa* respecto a *Shigella sonnei*, *Samonella thyphimurium* y *Escherichia coli*. Ambos estudios demostraron que la inactivación de las bacterias cumple con una ley cinética de segundo orden dependiendo de la concentración de ozono disuelto y de microorganismos.

Sin embargo, sobre los mecanismos de inactivación de los microorganismos por el ozono se han reportado pocos estudios. Existe evidencia de que el gas reacciona con los constituyentes de la membrana (*Chevrier, 1992*), (*Finch, 2001*).

Chevier plantea la ocurrencia de un desbalance energético en el microorganismo que acelera su muerte.

Aunque los mecanismos de acción del ozono sobre los microorganismos no están aún completamente dilucidados, se reconoce que entre las ventajas con respecto al

cloro se destaca su acción rápida. Se plantea que en las bacterias inactivadas con ozono se produce la lisis celular y por lo tanto su muerte inmediata, mientras que el cloro y otros desinfectantes necesitan difundirse a través de la membrana para llevar a cabo la inactivación.

Las potencialidades analizadas del ozono como oxidante y desinfectante junto a su producción in situ, que excluye la transportación y almacenamiento, permiten asegurar que la ozonización compite con la cloración en todos los aspectos, inclusive cuando más deteriorada esté el agua de abasto.

A continuación se muestran valores de CT (concentración de ozono disuelto/tiempo de contacto) para diferentes microorganismos y desinfectantes (Figura 25).

Microorganismo	CT (mg/min/L)			
	pH			
	6-7	8-9	6-7	6-7
	Cloro libre	Cloramina	Dióxido de cloro	Ozono
<i>E. coli</i>	0.034-0.05	95-180	0.4-0.75	0.02
Polio virus	1.1-2.5	768-3740	0.2-6.7	0.1-0.2
Rotavirus	0.01-0.05	3800-6500	0.2-2.1	0.006-0.06
<i>Giardia lamblia</i> (quistes)	47-150	2200	26	0.5-0.6
<i>Giardia muris</i> (quistes)	30-630	1400	7.2-18.5	1.8-2.0
<i>Cryptosporidium parvum</i>	7200	7200*	78*	5-10*
<i>Cryptosporidium parvum</i> (1 °C)			200	10
<i>Cryptosporidium parvum</i> (22 °C)			120**	7**

Nota: temperatura: 25 °C; * 1 log; ** 3.5 log

FIGURA 25. VALORES DE CT PARA LA INACTIVACIÓN DE 2 LOG.

El poder de desinfección del ozono se estima en 3.000 veces superior al del cloro y no presenta problemas de originar trihalometanos. Sin embargo presenta el inconveniente de su mayor coste y de que su efectividad desaparece a los 30 minutos, mientras el cloro permanece durante 72 horas, tiempo suficiente para que el agua llegue desde la red de abastecimiento a los hogares de la ciudad y sea

consumida.

Por otro lado, aunque el cloro es el agente más usado en la desinfección del agua potable, el uso del ozono para este menester ha sido continuo en Francia durante los últimos cien años, y posteriormente se ha extendido a Alemania, Holanda, Suiza y otros países de Europa, y más recientemente en Canadá y EE.UU. Especialmente estos últimos años se viene cuestionando la validez del cloro como desinfectante de aguas potables, no por su reconocido poder bactericida, sino debido a la formación de compuestos indeseables en las aguas cloradas:

- Si las aguas a tratar contienen nitrógeno orgánico o amoníaco libre, se forman cloraminas que no solo producen olores en el agua sino que también se está investigando sobre la posibilidad de que sean agentes cancerígenos.
- Si las aguas contienen pequeñas cantidades de fenoles se forman, por adición de cloro los denominados clorofenoles que producen en el agua olores y sabores desagradables, que a concentración de 0,01 mg/l la hacen inaceptable para el consumo.

Pero sin duda, el mayor inconveniente que se le achaca al cloro es la formación, si el agua es portadora de materia orgánica adecuada, de componentes clorados tales como los PCB'S (bifenilos policlorados) que tienen un probado carácter cancerígeno, y cada vez son más frecuentes.

Mención especial merecen los trihalometanos (THM) que últimamente están preocupando a las autoridades sanitarias de la mayoría de los países. Son compuestos orgánicos potencialmente cancerígenos y que aparecen en el agua potable tras ser sometida cloración.

En España, son muchas las ciudades con límites de THM tolerables pero

preocupantes. El ozono, al actuar sobre los productos que originan los THM, realiza la función desinfectante sin este inconveniente y no existen THM como producto de la desinfección. Frente a estos inconvenientes del cloro, el ozono no forma productos que pueden considerarse como cancerígenos, ni produce sabores u olores al agua, además elimina las posibilidades carcinógenas, los sabores y olores del agua.

En resumen, se puede concluir que el ozono, en el tratamiento de agua en general, tiene las siguientes ventajas:

- Elimina el color causado por el hierro o manganeso o la materia carbonosa, los sabores y olores debido a la presencia de materia orgánica.
- Reduce la turbiedad, el contenido en sólidos en suspensión y las demandas químicas (DQO) y biológicas (DBO) de oxígeno.
- El ozono es un poderoso desinfectante. No sólo mata las bacterias patógenas sino que, además, inactiva los virus y otros microorganismos que no son sensibles a la desinfección ordinaria con cloro.
- Si no hay posterior recontaminación, el ozono residual es suficiente para efectuar una desinfección común.
- El ozono puede ser detectado por el hombre mucho antes de que llegue al nivel tóxico.
- No produce en el agua aumento en el contenido de sales inorgánicas ni subproductos nocivos (*Wuhrmann, 1955*).

El empleo del ozono en la potabilización tiene un impacto favorable, dada su eficiencia y potencialidades, por lo que contribuye al desarrollo sostenible. El acelerado incremento de la aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas,

junto a las consideraciones sobre los nuevos requerimientos de CT para el diseño de los sistemas de ozonización, el control adecuado de la formación de iones bromato, la baja incidencia de este subproducto en las plantas potabilizadoras y la posibilidad de evaluar el alcance real de su toxicidad, consolidan ese criterio.



PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

BIBLIOGRAFÍA

- A.I. Martínez, M.A. García-Lobato, D.L. Perry. Study of the properties of iron oxides nanostructures. Research in Nanotechnology Developments. A. Barrañón Editor. Nova Science, 2009 New York. [En línea] - Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2018, disponible en: http://www.razonypalabra.org.mx/N/n68/Monotematico/PDF/11_GarciaLobato_68.pdf
- Alexandra Galetovic Carabantes, 2003. Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. [En línea] - Fecha de consulta: 15 de junio de 2017, disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-93322003000400003
- Asociación Toxicológica Argentina, 2006. Epidemiología del HACRE en la República Argentina. [En línea] - Fecha de consulta: 05 de marzo de 2017, disponible en: http://www.toxicologia.org.ar/wp-content/uploads/2016/03/libro_hidroarsenicismo_completo.pdf
- Astolfi E, Maccagno A, Fernández JC, Vaccara R, Stimola R, 1981. Relation between arsenic in drinking water and skin cancer. Biolog Trace Elem Res 1981; 3:133-43. [En línea] - Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2017, disponible en: <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=3556>
- Ayerza A, 1917. Arsenicismo regional endémico. Conferencia en la Academia de Medicina, La Prensa Médica Argentina (Buenos Aires) 1917; IV: 170-1. [En línea] - Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2017, disponible en:

http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0325-29572015000100010

- BCAS, 1997. Bangladesh Centre for Advanced Studies. Arsenic special issue. BCAS, Newsletter, 8(1): 1-8, Jan.-Mar. [En línea] - Fecha de consulta: 20 de junio de 2017, disponible en: <http://bvssper.paho.org/bvsacd/cd51/arsenic-presence.pdf>
- Bohme A. (1999). Ozone technology of German industrial enterprises. Ozone Sci. Eng. 21, 163-176. [En línea] - Fecha de consulta: 3 de septiembre de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100007
- Bozorth, Richard M. (1993) [Reissue of 1951 publication]. Ferromagnetism. AN IEEE Press Classic Reissue. Wiley-IEEE Press. ISBN 0-7803-1032-2.
- Cheng D. K., (1997) Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, Addison Wesley I.
- Chevrier N. y Sarhan F. (1992). Effect of ozone on energy metabolism and its relation to carbon dioxide fixation in *Euglena gracilis*. J. Plant. Physiol. 140, 521-527. [En línea] - Fecha de consulta: 20 de abril de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-4999201000010000
- Chikazumi, Soshin (1997). Physics of Ferromagnetism. Clarendon Press. ISBN 0-19-851776-9.
- Choudhury, D. Roy (2005). Modern Control Engineering. Nueva Delhi: Prentice-Hall of India. ISBN 81-203-2196-0.

- Código Alimentario Argentino (2012). Artículos: 982 al 1079 - Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificadas - Actualización al 10/2012. [En línea] - Fecha de consulta: 3 de abril de 2017, disponible en: http://www.anmat.gov.ar/alimentos/codigoa/CAPITULO_XII.pdf
- Coulomb C. A., (1890) ELEKTRICITT UND MAGNETISMUS (1785-1786), reprint: Leipzig Alemania Verlang von Wilhelm Engelmann.
- Curto SI, Mendiburo NA, Plastina R, Boffi R, 2007. Arsénico en acuíferos: influencia sobre la salud de la población; [6pages]. [En línea] - Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2017, disponible en: www.ambiente.gov.ar/archivos/web/salud_ambiente/File/2001%20Ars%20nic%20en%20Acuferos%20y%20Salud.pdf
- Diario El Mundo, 2007. Arsénico en el agua, un riesgo para 140 millones de personas. [En línea] - Fecha de consulta: 23 de mayo de 2017, disponible en: <http://www.elmundo.es/elmundosalud/2007/08/30/biociencia/1188467875.html>
- Diario La Nación, 2016. Cuatro millones de argentinos viven en áreas contaminadas con arsénico. [En línea] - Fecha de consulta: 23 de mayo de 2017, disponible en: <http://www.lanacion.com.ar/1968733-cuatro-millones-de-argentinos-viven-en-areas-contaminadas-con-arsenico>
- Finch G.R., Haas C.N., Oppenheimer J.A., Gordon G., Trussell R.R. (2001). Design criteria for inactivation of *Cryptosporidium* by ozone in drinking water, Ozone Sci. Eng. 23, 259-84. [En línea] - Fecha de consulta: 20 de abril de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-4999201000010000

- Frederick; Kenneth; Chien-Jen, 1994. Frederick, P.; Kenneth, B.; Chien-Jen, C. Health implications of arsenic in drinking water. Journal AWWA, 86(9):52-63. [En línea] - Fecha de consulta: 28 de mayo de 2017, disponible en: <http://www.scielo.sa.cr/pdf/amc/v52n2/art07v52n2.pdf>
- Goyenechea M, 1917. Sobre la nueva enfermedad descubierta en Bell-Ville. Rev Med Rosario 1917; 7: 485-9. [En línea] - Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2017, disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0325-29572015000100010
- Greenpeace, 2017. Disponibilidad del agua. [En línea] - Fecha de consulta: 10 de marzo de 2017, disponible en: <http://www.greenpeace.org/argentina/es/campanas/contaminacion/agua/>
- Health Canada, Ottawa, 1992. Environmental Health Directorate of Health Canada. Arsenic guidelines for Canadian drinking quality. Ottawa, p. 1-9. [En línea] - Fecha de consulta: 15 de junio de 2017, disponible en: https://www.ccme.ca/files/Resources/supporting_scientific_documents/cwqg_p_n_1040.pdf
- Hoigné J. y Bader H. (1983). Rate constants of direct reaction with organic and inorganic compounds in water. Dissociating organic compounds. Water Res. 17, 184-191. [En línea] - Fecha de consulta: 29 de agosto de 2018, disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v26n1/v26n1a7.pdf>
- IARC, 2004. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some Drinking-water Disinfectants and Contaminants, including Arsenic.; 84, p. 1-19. [En línea] - Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2017, disponible

- en: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol84/volumen84.pdf>
- Jeckel M.R. (1994). Flocculation Effects of Ozone. *Ozone Sci. Eng.* 16, 55-59. [En línea] - Fecha de consulta: 3 de septiembre de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100007
 - Langlais B., Reckhow D.A. y Brind D.R. (1991). *Ozone in water treatment: application and engineering*. Lewis Publishers, Washington DC, 569 p. [En línea] - Fecha de consulta: 3 de septiembre de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100007
 - Lepori, Edda Cristina. Hidroarsenicismo crónico regional endémico en Argentina. *Acta bioquím. clín. latinoam.* 2015, vol.49, n.1. [En línea] - Fecha de consulta: 1 de septiembre de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0325-29572015000100010&lang=pt
 - Lezcano I., Pérez Rey, R., Baluja C. y Sánchez E. (1999). Ozone inactivation of *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Shigella sonnei* and *Salmonella thyphimurium* in water. *Ozone Sci. Eng.* 21, 293-299. [En línea] - Fecha de consulta: 20 de abril de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-4999201000010000
 - Lezcano I., Pérez Rey, R., Baluja C. y Sánchez E. (2001). Ozone inactivation of microorganisms in water. Gram positive bacteria and yeast. *Ozone Sci. Eng.* 23, 183-187. [En línea] - Fecha de consulta: 20 de abril de 2018,

disponible

en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-4999201000010000

- Ministerio de Salud de la República Argentina, 2011. Epidemiología del hidroarsenicismo crónico regional endémico en la República Argentina, estudio colaborativo multicentro. *[En línea]* - Fecha de consulta: 08 de abril de 2017, disponible en: <http://www.msal.gob.ar/images/stories/ministerio/intoxicaciones/hacre/libro-hidroarsenicismo.pdf>
- Navoni JA, De Pietri D, García S, Villaamil Lepori EC. Riesgo sanitario de la población vulnerable expuesta al arsénico en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Rev Panam Salud Publica.* 2012;31(1):1–8. *[En línea]* - Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2017, disponible en: <https://www.scielosp.org/article/rpsp/2012.v31n1/1-8/>
- Pérez Rey R., Sánchez H. y Baluja C. (1995). Ozone inactivation of biologically-risky wastewaters. *Ozone Sci. Eng.* 17, 409-512. *[En línea]* - Fecha de consulta: 20 de abril de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-4999201000010000
- Ravenscroft P, Brammer H, Richards KS, 2009. Health effects of arsenic in drinking water and food in arsenic pollution: A global synthesis. London: Wiley-Blackwel; p. 157-212. *[En línea]* - Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2017, disponible en: <https://www.ucl.ac.uk/lag/docstorage/ECG2009byJMM.pdf>

- Rice R.G. (1999). Ozone in the United States of America-State of the art. Ozone Sci. Eng. 21, 99-118. [En línea] - Fecha de consulta: 3 de septiembre de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100007
- Staehelin J. y Hoigné J. (1985). Decomposition of ozone in water in the presence of organic solutes acting as promoters and inhibitors of radical chain reactions. Environ. Sci.Technol. 19, 1206-1211. [En línea] - Fecha de consulta: 29 de agosto de 2018, disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v26n1/v26n1a7.pdf>
- Steinmetz, Charles (1917). Theory and Calculation of Electric Circuits. McGraw-Hill.
- The National Academy of Sciences, 1999. Arsenic in drinking water. National Academy Press, Washington. [En línea] - Fecha de consulta: 28 de mayo de 2017, disponible en: <http://books.nap.edu/books/0309063337/html/1.html#Fsdof>
- Tippens P.E., (2009) Física conceptos y aplicaciones, Mc Graw Hill, séptima edición.
- Torres R; Espinoza JA. Factores que intensifican el riesgo toxicológico en comunidades expuestas al arsénico en agua. 2018. aUAT. vol.12, n.2 pp.148-157. [En línea] - Fecha de consulta: 1 de septiembre de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582018000100148&lang=ptFsdof
- von Gunten U. (2003) .Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and

by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. Water Res. 37, 1469-1484. [En línea] - Fecha de consulta: 20 de abril de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-4999201000010000

- Wuhrmann M. (1955). Ozone in water treatment. [En línea] - Fecha de consulta: 25 de abril de 2018, disponible en: <https://es.scribd.com/document/378057757/Tratamiento-agua-Ozono-pdf>
- Zacarías J; Zimmermann E (CONICET). Potencialidad hídrica de la región santafesina: el acuífero guaraní en el territorio provincial. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 19, 2013. [En línea] - Fecha de consulta: 1 de septiembre de 2018, disponible en: <https://rehip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/7147/Potencialidad%20H%C3%ADdrica%20de%20la%20Regi%C3%B3n%20Santafesina.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Zhou H. y Smith D. (1994). Kinetics of ozone disinfection in completely mixed system. J. Environ. Eng. 120, 841-846. [En línea] - Fecha de consulta: 3 de septiembre de 2018, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100007

PROPIEDAD INTELECTUAL: NICOLÁS CASADEI
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN DEL URUGUAY