

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**“REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA  
COMARCA LAGUNERA”**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADÉMICO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**KHARLA JOVANKA AGUILAR LIMÓN**

**MAYO 2005**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis de la Ing. Kharla Jovanka Aguilar Limón sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

Comité de tesis

---

Ing. José Ignacio Luján Figueroa, M.C.  
ASESOR

---

Ing. Héctor A. de la Cruz Contreras, M.S.  
SINODAL

---

Ing. Rogelio J. Villarreal Bouza, M.C.  
SINODAL

**APROBADO**

---

Dr. Federico Viramontes Brown, Ph. D.  
Director de Programa de Graduados en Ingeniería

Mayo del 2005

## RESUMEN

El suelo en algunos estados de la República Mexicana y algunos otros países como Argentina, Chile, China, y Bangladesh; se encuentra rico en Arsénico, de forma natural. Debido al abatimiento de los mantos freáticos y a que cada vez mas, se está abasteciendo con agua mas profunda, ésta contiene altas concentraciones de Arsénico.

El arsénico al entrar en el organismo, vía ingestión por el agua potable, ocasiona diversas enfermedades características que van desde infecciones cutáneas, hasta la afectación con cáncer en diversos órganos que posteriormente pueden llevar a la amputación o incluso la muerte. Estas enfermedades son conocidas como HACRE, hidroarsenicismo crónico regional endémico.

Una zona que tiene esta problemática es la de la Comarca Lagunera, donde el agua extraída de algunos pozos llega a tener concentraciones de Arsénico superiores al límite máximo permisible, por lo tanto resulta indispensable disminuir o eliminar estas concentraciones para poderse utilizar como agua potable.

Hoy en día, muchas organizaciones nacionales e internacionales, se encuentran lanzando convocatorias que tienen como objetivo, la remoción del Arsénico en forma económica, para que sea factible en pequeñas comunidades.

Las plantas de potabilización de agua, generalmente no cuentan con un sistema que separe el Arsénico, suelen enfocarse únicamente a la remoción de sólidos, biológicos, turbidez etc.

Los sistemas conocidos para la remoción del Arsénico, como ósmosis, intercambio iónico, nanofiltración, pueden proveer un tratamiento efectivo, sin embargo, estos métodos de tratamiento suelen representar altos costos que no se encuentran al alcance de un sistema municipal. En el comercio se pueden encontrar otros sistemas que ofrecen la misma remoción, pero se requiere de utilizar productos o equipos patentados, lo cual terminaría como consecuencia una dependencia del sistema municipal hacia un proveedor único.

Por lo tanto resulta indispensable encontrar una tecnología de bajo costo y a su vez, que no dependa de equipos o productos patentados para poder abastecer de agua potable con concentraciones de Arsénico que se encuentren bajo el límite, para las poblaciones de la comarca lagunera.

Después de realizar la presente investigación, se ha encontrado que la remoción del Arsénico es posible con mecanismos de Oxidación/Precipitación/Filtración, mediante el uso de sales de hierro, en particular del cloruro férrico, y un posterior filtrado. El sistema no requiere mayor instalación que el existente en una planta convencional de coagulación/filtración; y el cloruro férrico es un producto económico, fácil de manejar y de aplicar y por último, se puede encontrar fácilmente en el mercado con diferentes proveedores.

Debido a lo anterior, la remoción de Arsénico resulta factible técnica y económicamente a nivel municipal y es posible que los sistemas municipales, desde pequeñas comunidades cuenten con un agua potable libre de Arsénico.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, Sr. Saúl Aguilar Zamudio y Sra. Julia del Rosario Limón de Aguilar, por darme alas para volar, por ser mi mejor ejemplo.

A mis hermanos, Juan Pablo y Julieta, por mantenerme con los pies en la tierra, por ser mi mejor reto.

Al Ing. Ignacio Luján, por haber sido mi maestro, mi asesor y mi consejero.

Al Ing. Héctor de la Cruz por el interés mostrado en el proyecto y la ayuda otorgada que me facilitó realizarlo.

Al Ing. Rogelio Villarreal, por su total disposición y aportación de ideas que mejoraron el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Jürgen Mahlkecht por haberle dedicado su tiempo y las críticas constructivas que ayudaron a complementar el documento de tesis.

Al Dr. Federico Viramontes, por todas las finas atenciones que tuvo durante mis estudios de maestría.

A mis amigos, quienes al dedicarme su tiempo, no dejaron que me sintiera lejos de casa.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b>	<b>- 5 -</b>
<b>LISTADO DE GRÁFICOS</b>	<b>- 7 -</b>
<b>1 OBJETIVOS, IMPORTANCIA Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>- 9 -</b>
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	- 9 -
1.2 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	- 9 -
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	- 9 -
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	- 9 -
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 10 -
1.4 ANTECEDENTES	- 10 -
1.4.1 SITUACION DE DIFERENTES REGIONES	- 10 -
1.4.2 AGENCIA DE ESTADOS UNIDOS PARA LA PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE (EPA)	- 12 -
<b>2 PROPIEDADES Y REMOCIÓN DEL ARSÉNICO</b>	<b>- 13 -</b>
2.1 PROPIEDADES DEL ARSÉNICO	- 13 -
2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	- 13 -
2.1.2 ESTABILIDAD Y PREDOMINIO DE LAS ESPECIES DE ARSÉNICO, VARIANDO LOS RANGOS DE PH EN EL MEDIO ACUÁTICO	- 13 -
2.2 REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA	- 14 -
2.2.1 MÉTODOS DE TRATAMIENTO PARA REDUCIR EL ARSENICO	- 15 -
2.2.2 CASOS DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO CON MÉTODOS NO CONVENCIONALES	- 16 -
2.2.3 REMOCIÓN DE ARSÉNICO POR MEDIO DE COAGULACIÓN	- 18 -
<b>3 EL ARSÉNICO EN EL ORGANISMO</b>	<b>- 20 -</b>
3.1 VÍAS DE INGRESO	- 20 -
3.1.1 VÍA DIGESTIVA	- 20 -
3.1.2 VÍA INHALATORIA	- 20 -
3.1.3 VÍA CUTÁNEA	- 20 -
3.2 BIOTRANSFORMACION	- 20 -
3.3 METABOLISMO Y DISTRIBUCION	- 20 -
3.4 EFECTOS DE LA EXPOSICION Y EVALUACION DE LOS RIESGOS PARA LA SALUD	- 21 -
3.4.1 COMPUESTOS ARSENICALES INORGÁNICOS	- 21 -
3.5 COMPUESTOS ARSENICALES ORGÁNICOS	- 22 -
3.6 HIDROARSENICISMO CRONICO REGIONAL ENDEMICO (HACRE)	- 23 -
<b>4 FASE EXPERIMENTAL</b>	<b>- 24 -</b>
4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	- 24 -
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS	- 25 -
4.3 FASE 1. OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-PRECIPITACIÓN	- 27 -
4.3.1 RESULTADOS	- 27 -
4.3.2. COMENTARIOS	- 30 -
4.4. FASE 2. COMPARACIÓN DE PRECIPITACIÓN CON FILTRACIÓN	- 30 -
4.4.1. RESULTADOS DE LA TRATABILIDAD	- 30 -
4.4.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD	- 31 -
4.5. FASE 3. OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FILTRACIÓN	- 31 -
4.5.1. RESULTADOS DE LA TRATABILIDAD	- 31 -
4.5.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD	- 32 -
4.6. FASE 4. FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR A LAS TRES MUESTRAS RECOLECTADAS	- 33 -
4.6.1. RESULTADOS DE LA TRATABILIDAD	- 34 -
4.6.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD	- 37 -
4.7. FASE 5. FILTRACIÓN CONTINUA EN MEDIO GRANULAR	- 37 -
4.7.1. RESULTADOS DE LA TRATABILIDAD	- 39 -
4.7.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD	- 40 -
<b>5 PLANTA DE TRATAMIENTO</b>	<b>- 40 -</b>

5.1	DISEÑO	- 40 -
5.2	DIAGRAMA DE FLUJO	- 41 -
5.3	UNIDADES DE TRATAMIENTO	- 42 -
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>- 43 -</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>- 43 -</b>
	<b>APÉNDICE</b>	<b>- 45 -</b>
	<b>MÉTODOS NORMALIZADOS PARA LOS ANÁLISIS REALIZADOS</b>	<b>- 47 -</b>
i.	ALCALINIDAD	- 47 -
ii.	ARSÉNICO	- 47 -
iii.	CLORUROS	- 49 -
iv.	DUREZA POR CALCIO	- 50 -
v.	HIERRO TOTAL	- 50 -
vi.	NITRÓGENO AMONÍACAL	- 51 -
vii.	POTENCIAL HIDRÓGENO	- 52 -
viii.	TEMPERATURA	- 52 -
ix.	SÓLIDOS	- 52 -
	<b>MODIFICACIÓN A LA NOM 127 SSA AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO</b>	<b>- 54 -</b>

## LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico No. 1	<i>Diagrama de pe-pH del Arsenico</i>	- 14 -
Gráfico No. 2	<i>Adsorción del arsenato y arsenito, (por comparación) en el hidróxido de hierro, en función del pH</i>	- 14 -
Gráfico No. 3	<i>Diagrama de flujo de la prueba piloto</i>	- 16 -
Gráfico No. 4	<i>Resultados de remoción de Arsénico durante la prueba piloto</i>	- 17 -
Gráfico No. 6	<i>Resultados de la aplicación del método</i>	- 18 -
Gráfico No. 7	<i>Representación esquemática de la preparación del hidrogel de hidróxido de amonio a escala piloto</i>	- 18 -
Gráfico No. 8	<i>Curvas a diferentes pH, donde se muestra la remoción de Arsénico a cada dosis aplicada.</i>	- 19 -
Gráfico No. 9	<i>Pozo que abastece al Ejido El Porvenir, sitio del muestreo</i>	- 24 -
Gráfico No. 10	<i>Tubería que conduce el agua obtenida del pozo que abastece al Ej. Virginias.</i>	- 25 -
Gráfico No. 11	<i>Tanque Caballo Blanco que almacena el agua que recibe el municipio Francisco I. Madero de Torreón.</i>	- 25 -
Gráfico No. 12	<i>Generación de Arsina. Estándares para Hierro.</i>	- 26 -
Gráfico No. 13	<i>Curva de Dosis de Cloruro Férrico, contra el Arsénico remanente y la remoción obtenida.</i>	- 27 -
Gráfico No. 14	<i>Concentración de Arsénico después del tratamiento con diferentes coagulantes y dosis.</i>	- 28 -
Gráfico No. 15	<i>Concentración de Arsénico después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico a diferentes muestras variando el pH</i>	- 29 -
Gráfico No. 16	<i>Remoción obtenida después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico a diferentes muestras variando el pH</i>	- 29 -
Gráfico No. 17	<i>Filtración en papel</i>	- 30 -
Gráfico No. 18	<i>Comparación del Precipitado y del Filtrado en su concentración de Arsénico.</i>	- 31 -
Gráfico No. 19	<i>Concentración de Arsénico resultante de la aplicación del Cloruro Férrico a diferentes dosis y el porcentaje de remoción correspondiente.</i>	- 32 -
Gráfico No. 20	<i>Concentración de hierro total remanente de la aplicación del Cloruro Férrico a diferentes dosis.</i>	- 32 -
Gráfico No. 21	<i>Filtro de arena sílica utilizado en la prueba</i>	- 33 -
Gráfico No. 22	<i>Concentración de Arsénico y remoción obtenida, después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Ej. Virginias.</i>	- 34 -
Gráfico No. 23	<i>Concentración de hierro después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Ej. Virginias.</i>	- 34 -
Gráfico No. 24	<i>Concentración de Arsénico y remoción obtenida, después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Ej. El Porvenir.</i>	- 35 -
Gráfico No. 25	<i>Concentración de Hierro después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Ej. El Porvenir.</i>	- 35 -
Gráfico No. 26	<i>Concentración de Arsénico y remoción obtenida, después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Tanque Caballo Blanco.</i>	- 36 -
Gráfico No. 27	<i>Concentración de Hierro después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Tanque Caballo Blanco.</i>	- 36 -
Gráfico No. 28	<i>Dosis requerida para que el Arsénico remanente sea de 0.020 mg/L, dependiendo de la Arsénico inicial.</i>	- 37 -
Gráfico No. 29	<i>Regulación del flujo. Agitación. Bombeo. Filtración</i>	- 38 -
Gráfico No. 30	<i>Capa rojiza sobre el lecho filtrante.</i>	- 38 -

Gráfico No. 31 <i>Concentración de Arsénico después de haberse tratado (coagulación, filtración) durante un periodo de 140 min.</i>	- 39 -
Gráfico No. 32 <i>Concentración de Hierro después de haberse tratado (coagulación, filtración) durante un periodo de 140 min.</i>	- 39 -
Gráfico No. 33 <i>Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de agua potable</i>	- 41 -



# **1. OBJETIVOS, IMPORTANCIA Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Las altas concentraciones de Arsénico del agua extraída del subsuelo en algunos pozos de la región conocida como la Comarca Lagunera, sobrepasan la concentración máxima permitida para ser utilizada como agua de abastecimiento público y privado para las diferentes actividades del hombre. Esta situación puede causar daños diversos a la salud de las personas, provocando diversas enfermedades relacionadas con el Hidroarsenicismo a nivel regional endémico. En los esquemas tradicionales de potabilización del agua, no es común incluir la remoción del arsénico, por esta razón no se ha desarrollado una tecnología propia, se le considera como un metal tóxico y generalmente se plantea para su remoción, técnicas generalmente costosas, sobre todo para la operación de plantas potabilizadoras municipales y por lo tanto, resultan no ser factibles económicamente.

## **1.2 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

El problema no es local, en el país se presentan algunas otras regiones en donde la concentración del arsénico en el agua es preocupante; a nivel mundial, también se están generando acciones tendientes a vigilar y controlar esas altas concentraciones de Arsénico en el agua de consumo. Dependencias gubernamentales tales como la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, involucrado en esta situación, principalmente fomentando la investigación. En México, la Secretaría del Medio Ambiente a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, lanzó una convocatoria de apoyo en el estado de San Luis Potosí con la colaboración de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

De manera particular, el gobierno del estado de Coahuila a través de la Comisión Estatal de Aguas, CEAS, está participando, ya que, de ello depende el desarrollo económico de una zona muy importante y su población. Actualmente existen fuentes suficientes de agua para asegurar el desarrollo urbano de la región, pero es necesario remover el arsénico y otros metales tóxicos; esta situación se ha provocado a causa del abatimiento del nivel freático, que es de los más notables en el país, de no encontrarse una solución pronta, es posible que en meses se pueda presentar una carencia en el suministro del agua, principalmente a las poblaciones.

El interés del gobierno de Coahuila para controlar el problema ha sido planeado mediante la construcción de la infraestructura suficiente para poder contar con sistemas de potabilización del agua con capacidad de remover los excedentes de arsénico y que por supuesto, que cumplan con la norma correspondiente en cuanto a la calidad del agua.

Sin embargo, el principal criterio que se ha establecido para lograr lo anterior, es contar con un proceso sencillo, autónomo, es decir, no dependiente de empresas o firmas comerciales de suministro de medios y productos para el tratamiento del agua.

## **1.3 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar tecnología para la purificación de agua de bajo costo e independiente, que permita remover, a nivel municipal, el arsénico que naturalmente está presente en las aguas subterráneas que son utilizadas para el suministro de agua potable en la Comarca Lagunera.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Revisar las diversas alternativas de tratamiento de aguas para lograr la remoción del arsénico y seleccionar la que se considere de mayor viabilidad de acuerdo a criterios de simpleza en la operación y de autonomía en la adquisición de los insumos y reactivos.

Determinar por comparación de resultados, el tipo de producto químico para lograr la precipitación del arsénico y obtener el rango de dosificación requerido para conseguir que el agua cumpla con la normatividad nacional para su uso.

Proponer el tren de tratamiento requerido para implementar la alternativa seleccionada e indicar otras variantes en el estudio para la realización de pruebas a nivel piloto que permitan obtener parámetros para el diseño.

### 1.4 ANTECEDENTES

#### 1.4.1 SITUACION DE DIFERENTES REGIONES

##### SITUACIÓN INTERNACIONAL

Aunque en México la Norma Oficial 127 de la SSA sobre la calidad del agua para consumo humano establece que el máximo permisible es de 0.025 miligramos por litro de agua, en Estados Unidos y Europa la concentración máxima permitida en el agua potable es de 10 microgramos que aún así se considera peligrosa

En un informe presentado en el Boletín de la OMS, menciona que la contaminación con Arsénico, de las aguas subterráneas se encontró también en **Argentina, Chile, El Salvador, China, Taiwán, Tailandia, Estados Unidos e India**, aunque en **Bangladesh** la crisis es sin precedente: entre 35 y 77 de los 125 millones de habitantes están en riesgo de ser expuestos a la intoxicación por agua contaminada de arsénico; de hecho existen ya más de cien mil casos de infecciones cutáneas peligrosas (Avery, 2002).

Hace 90 años que en **Argentina** se describió el HACRE, Hidro Arsenismo Crónico Regional Endémico. Muchos municipios del sur provincial tomaron medidas para evitar que en sus pueblos se consuma agua contaminada. Pero nadie parece preocuparse por los pobladores rurales que toman agua de pozo. Los más altos niveles arsenicales se detectaron en Alejo Ledesma, donde el agua llega a tener 1,700 microgramos de arsénico por litro (Armijos, 2000). Debido a lo anterior, algunas ciudades se han visto en la necesidad de invertir en una doble tubería de agua potable, por un sistema se transporta agua exclusivamente para consumo humano y en el otro para los demás usos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece 10 ppb como contenido máximo permisible. Pero en países como **Chile**, particularmente en ciudades de la zona norte hay gente tomando agua potable con una concentración de 60 ppb de arsénico (CRID).

En otras regiones del mundo como **India, China y Taiwán** el problema es aún mayor. De acuerdo a la información obtenida, en India existen alrededor de 6 millones de personas expuestas a altas concentraciones de arsénico en el agua potable, de las cuales más de 2 millones son niños (Morshed, 2000).

El arsénico es muy común en los suelos de **Estados Unidos**, más de 350,000 personas beben agua cuyo contenido es mayor que 0.5 mg/L de arsénico, y más de 2.5 millones de personas están siendo abastecidas con agua con concentraciones de arsénico mayores a 0.025 mg/L. El nivel

máximo de contaminantes para el arsénico estará reducido desde 50 ppb hasta 10 ppb con fecha efectivo de 23 de enero, 2006 (EPA, 2002).

## **SITUACIÓN EN MÉXICO**

La Secretaría de Salud calcula que al menos 150 mil personas en México, consumen agua con concentraciones de arsénico arriba de lo establecido por la normatividad.

En el reporte "Perfil de la Salud Ambiental en México 2003", elaborado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), se advierte que aproximadamente un millón de mexicanos están expuestos potencialmente al arsénico, vía consumo de agua para beber.

En regiones como **Hidalgo**, la **Comarca Lagunera** y el estado de **Chihuahua** la presencia de arsénico en el agua es real, en estas tres regiones del país la presencia del elemento está por encima de la norma en México (OMS, 1998).

La prolongada sequía en **Chihuahua** ha provocado el cierre emergente de nueve pozos de abastecimiento de agua potable y se anuncia que 20 más serán clausurados por tener una alta concentración de arsénico. En 29 comunidades se ha presentado alta concentración de arsénico en los pozos de abastecimiento. Este problema ha afectado a 11 municipios chihuahuenses. En algunos puntos de Ciudad Juárez, **Chihuahua**, donde se extrae el agua, se ha detectado un alto contenido de sales e inclusive en los puntos más críticos la presencia de arsénico. En el poblado llamado La Casita, en el estado de **Chihuahua** se han registrado casos de queratosis arsenicales por ingerir agua contaminada con arsénico (Rodríguez, 2004).

En Salamanca, **Guanajuato**, el agua extraída de pozos artesianos está contaminada con arsénico, hidrocarburos, benceno, azufre, mercurio, toxateno, ddt, malatión, paratión, etc. Esta agua se utiliza para consumo doméstico. Salamanca tiene los primeros lugares estatal y nacional en casos de diferentes tipos de cáncer: en hígado y pulmón, en la sangre y en la piel, de pecho y otras enfermedades, como la poliglobulina (aumento excesivo de glóbulos rojos por falta de oxigenación suficiente) (OMS, 1998).

Las investigaciones dirigidas a la calidad del agua en el estado de **Hidalgo** se han encontrado altas concentraciones de arsénico. En Zimapán, Hidalgo, la concentración en el agua potable se encuentra entre 0.37 y 1.0 mg/L. Actualmente, dos plantas potabilizadoras para la eliminación del arsénico, instaladas en 1997 por la CNA y la Secretaría de Salud, se encuentran paradas por los altos costos de operación. Los daños en la salud ya se han hecho presentes, se han registrado casos de dermatitis, principalmente en los niños y los adolescentes, posiblemente provocados por el consumo de agua con arsénico (Castro, 2005).

La concentración de arsénico en el agua que toman los habitantes de los norteños municipios de Matehuala y Villa de la Paz, **San Luis Potosí**, llega a los 6 mg/L. es una cantidad exageradamente grave que es sinónimo de "veneno puro". En **San Luis Potosí**, se realizaron estudios para evaluar los riesgos en la salud en sitios contaminados. En todos los casos, la población infantil fue considerada como la población susceptible ya que se encontraron claras evidencias de efectos en salud. Por ejemplo, en el área metalúrgica se registró una correlación significativa entre efectos neuropsicológicos y la presencia de arsénico en orina y de plomo en sangre; así mismo, se han reportado diversos casos de niños que presentan arsenicismo en Villa de la Paz y Matehuala, **San Luis Potosí** (Díaz-Barriga, 2005).

Las aguas subterráneas de la Cuenca Lerma-Santiago presentan metales pesados, hidrocarburos, arsénico, cromo, por fertilizantes, nitratos, sulfatos de cobre y flúor (Blesa y Litter, 2004).

## **SITUACIÓN EN LA COMARCA LAGUNERA**

Muchas de las fuentes de agua de nuestro país se encuentran contaminadas de manera natural por Arsénico. Un sitio clásico es la **Comarca Lagunera**, sin embargo, también se ha reportado agua con este metaloide en **Chihuahua, Hidalgo, Coahuila, Durango, Guanajuato y Zacatecas**.

Estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) revelan que el agua que consume la población de la **Comarca Lagunera**, ubicada entre Coahuila y Durango, contiene altas concentraciones de arsénico, producto del abatimiento de los mantos freáticos (CNA, 2001), originado por la sobreexplotación que realiza la industria lechera (entre otros).

Especialistas hidráulicos aseguran que anualmente se extraen del subsuelo de la **Comarca Lagunera** alrededor de 1,200 millones de metros cúbicos por sólo 600 de recarga, cuando mucho (Ramírez, 2002). Por este desequilibrio se ha visto afectada la calidad del agua de la región, con fenómenos como el hidroarsenicismo y acumulación de metales pesados, sales y nitratos, con lo que se afecta la salud de gran parte de la población, sobre todo de las comunidades rurales (Céspedes, 1998).

La baja de los niveles de agua en los mantos aumenta la concentración de minerales como el arsénico: "Se tomaron medidas desde 1986, cuando se descubrió que había 12 mil personas con arseniasis" (Ramírez, 2002). Entonces se cerraron pozos de San Pedro y Francisco I. Madero. Pero la sobreexplotación de los mantos provocó que la contaminación se extendiera a Viesca y a **Matamoros**.

El problema se ha hecho crítico y en el monitoreo de los pozos que abastecen a la Comarca Lagunera se encontró que 80 por ciento de ellos exceden la norma de la OMS, que es de 0.01 partes por millón de arsénico, ya que se registrados con valores entre 0.09 y 0.59 ppm (Enríquez, 1993).

Los casi 50 mil habitantes del municipio Francisco I. Madero, en la **Comarca Lagunera**, sin duda son los más expuestos a diversos problemas de salud, como cáncer en la piel, por el elevado índice de arsénico presente en el agua que consumen. También afecta en menor grado a otros municipios, como San Pedro de las Colonias. Esta situación incide en quienes viven en Torreón, debido al abatimiento de los mantos acuíferos.

### **1.4.2 AGENCIA DE ESTADOS UNIDOS PARA LA PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE (EPA)**

La EPA está por proponer un nuevo límite para el arsénico en el agua de bebida. Se está esperando que el Límite Máximo de Contaminante (MCL en inglés) sea de 5 µg/l. Esta propuesta estará sujeta a discusión pública por lo que finalmente el MCL puede resultar menor (3µg/l) o mayor (10 µg/l). La opinión de la EPA es que el límite de 5 µg/l está justificado en virtud de los efectos sobre la salud que se ven en los EEUU y el costo de tratamiento.

La EPA ha realizado estudios e importantes discusiones sobre los diferentes aspectos de la cuestión. En marzo de 1999 el National Compliance Report, NCR (Informe de Cumplimiento Nacional), difundió un reporte estimando el riesgo de cáncer de vejiga en los hombres con el MCL actual de 1 a 1.5 en 1,000. Otros estudios muestran que el arsénico puede producir de 2 a 5 veces más muertes por cáncer de pulmón. Como resultado, la mayoría de los miembros del comité del NCR predijeron que el riesgo combinado para todo tipo de cáncer con la actual MCL podría estar en el orden de 1 en 100. (EPA, 2002).

## **2 PROPIEDADES Y REMOCIÓN DEL ARSÉNICO**

### **2.1 PROPIEDADES DEL ARSÉNICO**

#### **2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES**

El arsénico es un elemento químico no metálico del Grupo V del Sistema Periódico. De color gris y apariencia metálica y brillante, el arsénico posee escasas propiedades metálicas y se encuentra ampliamente distribuido en el universo. Su comportamiento químico es complejo y forma numerosos compuestos arsenicales, tanto orgánicos como inorgánicos.

Los estados de oxidación en que el arsénico se encuentra comúnmente en el agua son los estados +5 y +3. El arsenito, o arsénico trivalente ( $\text{As}^{+3}$ ) se encuentra en solución como  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$  en aguas naturales con pH entre 5 a 9, y el arsenato, o arsénico pentavalente ( $\text{As}^{+5}$ ) se encuentra en forma estable en aguas con altos niveles de oxígeno como  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  en un rango de pH de 2 a 13.

Su principal vía de dispersión en el ambiente es el agua. Aun si se considera la sedimentación, la solubilidad de los arsenatos y arsenitos es suficiente para que este elemento se transporte en los sistemas acuáticos. La concentración del arsénico en aguas naturales frescas es muy variable y probablemente depende de las formas de arsénico en el suelo local.

En el agua natural de pH de 5 a 9, el arsénico se encuentra fundamentalmente como arsenito ( $\text{As}_2\text{O}_4^-$ ) o arseniato ( $\text{AsO}_3^-$ ). Los compuestos arsenicales metilados se encuentran naturalmente en el ambiente como resultado de la actividad biológica del suelo. El compuesto arsenical de mayor importancia económica es el óxido de arsénico (+3) ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ).

La toxicidad de un arsenical se relaciona con su índice de clearance, que es la depuración o eliminación de un elemento en el organismo por unidad de tiempo y, por consiguiente, por su grado de acumulación en los tejidos. En general, la toxicidad aumenta en la secuencia de los arsenicales orgánicos, es decir:  $\text{As}^{+5} < \text{As}^{+3} < \text{As}^{-3}$ . Los compuestos arsenicales inorgánicos solubles en agua como el arsenito de sodio ( $\text{Na}_2\text{As}_2\text{O}_4$ ) y ácido arsenioso ( $\text{H}_2\text{As}_2\text{O}_4$ ) son compuestos que presentan una conocida y elevada toxicidad.

#### **2.1.2 ESTABILIDAD Y PREDOMINIO DE LAS ESPECIES DE ARSÉNICO, VARIANDO LOS RANGOS DE PH EN EL MEDIO ACUÁTICO.**

No se encuentra disponible un modelo termodinámico que incluya todos los estados de equilibrio químicos importantes y que permita predecir la distribución de las diferentes especies de Arsénico, en aguas naturales. Los diagramas pe-pH son utilizados frecuentemente para predecir la estabilidad de varias especies oxidadas y reducidas.

Bajo condiciones de oxidación, la forma dominante del Arsénico es el estado de oxidación (+V), el cual está presente como arsenato. Conforme las condiciones son de reducción, As(V) es reducido a As(III). Cuando ocurre la reducción del sulfato, As se precipita como un sulfito. El Arsénico elemental debe ser una especie estable bajo altas condiciones de reducción, pero esto no ocurre normalmente en la naturaleza. El Arsénico puede ser incorporado en sulfato de hierro bajo condiciones de reducción. La cinética de las transformaciones redox que involucran arsénico son lentas, por lo tanto el desequilibrio es común (Kent et. al., 1994; Runnells and Lindberg, 1990).

Especies de Arsenato forman esferas internas complejas en la superficie de hidróxido de hierro y son fuertemente adsorbidos en los pH cercanos a la neutralidad. A altos niveles de pH la fuerte carga negativa en la superficie del óxido decrece la adsorción de los aniones. Arsénico (III)

aparentemente no forma esferas internas complejas en la superficie del oxido. Este no es fuertemente adsorbido a cualquier valor de PH.

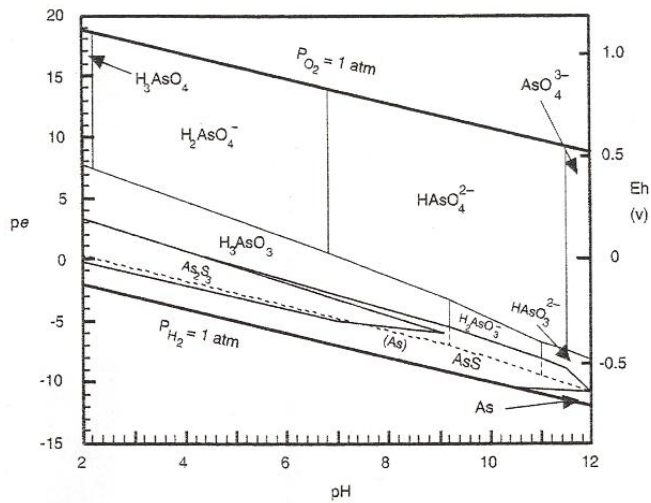


Gráfico No. 1 Diagrama de pe-pH del Arsenico

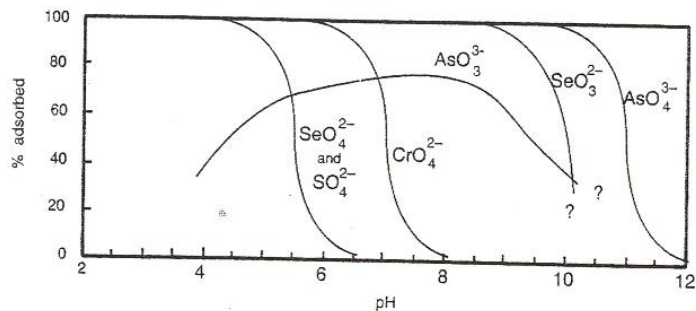


Gráfico No. 2 Adsorción del arsenato y arsenito, (por comparación) en el hidróxido de hierro, en función del pH

## 2.2 REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA

En general, el tratamiento de agua potable está orientado a remover color, turbiedad y microorganismos de origen fecal. Esta remoción se logra a través de una combinación adecuada de procesos: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Pero cuando se desea remover elementos químicos del agua, como el arsénico, es necesario recurrir a métodos más complejos:

- Adsorción-coprecipitación usando sales de hierro y aluminio
- Adsorción en alúmina activada / carbón activado / bauxita activada
- Osmosis inversa
- Intercambio iónico
- Oxidación seguida de filtración
- Ablandamiento con cal

## 2.2.1 MÉTODOS DE TRATAMIENTO PARA REDUCIR EL ARSENICO

Existen diferentes métodos de tratamiento para reducir el arsénico presente en el agua y alcanzar los niveles de los valores guía de agua para consumo humano.

Debido a que el  $\text{As}^{+5}$  es más fácil de remover que el  $\text{As}^{+3}$ , el tratamiento se inicia con la oxidación del  $\text{As}^{+3}$  a  $\text{As}^{+5}$ . Los oxidantes más utilizados son: cloro, hipoclorito de calcio y permanganato de potasio.

Las técnicas que pueden ser empleadas para la remoción de arsénico se mencionan a continuación:

### COAGULACIÓN/FILTRACIÓN

Es un proceso de tratamiento por el cual las cargas eléctricas de las sustancias coloidales disueltas o suspendidas son neutralizadas con la adición de sustancias insolubles en el agua, lo que permite la formación de partículas mayores o aglomerados que pueden ser eliminadas por sedimentación o filtración.

El tipo y la dosis del coagulante y el pH influyen en la eficiencia del proceso. El rendimiento del sulfato de aluminio es ligeramente menor que el del sulfato férrico. A un pH de 7.6 o menor, ambos coagulantes tienen la misma eficiencia de remoción, sin embargo el sulfato férrico remueve mejor a un pH menor de 7.6. Se ha determinado que a dosis mayores de 20 mg/L de Cloruro Férrico ó 40 mg/L de sulfato de aluminio se alcanza una remoción de  $\text{As}^{+5}$  de más del 90 %. A bajas dosis de coagulantes la remoción de  $\text{As}^{+5}$  es menor.

### ALUMINA ACTIVADA

Es un tipo de intercambio iónico, donde los iones presentes en el agua son adsorbidas por la superficie oxidada de la alúmina activada.

Es altamente selectiva para remover el  $\text{As}^{+5}$  y efectiva para tratar agua con alto contenido de sólidos disueltos totales. En la superficie de adsorción de la alúmina activada pueden interferir el selenio, fluoruro, cloruro y sulfato. Este método tiene alta remoción de arsénico a pH 8.2.

La alúmina activada adsorbe preferentemente  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  ( $\text{As}^{+5}$ ) más que  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  ( $\text{As}^{+3}$ ) además de otros iones competitivos, tal como se muestra en la siguiente relación:

$\text{OH}^- > \text{H}_2\text{AsO}_4^- > \text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^- > \text{F}^- > \text{HSeO}_3^- > \text{TOC} > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_3\text{AsO}_3$

### ÓSMOSIS INVERSA

Es un proceso para eliminar las sustancias disueltas presentes en el agua, forzando la circulación del agua por una membrana semipermeable bajo una presión superior a la osmótica.

Tiene una eficiencia de más de 95 % de remoción de arsénico disuelto. Este método es efectivo para remover arsénico de aguas subterráneas. El rendimiento del proceso con ósmosis inversa es afectado principalmente por la turbiedad, hierro, manganeso y sílice.

### INTERCAMBIO IÓNICO

Es un proceso físico y químico, en el cual los iones de una especie dada son desplazados de un material insoluble de intercambio (resina) por otros iones que se encuentran en solución.

Remueve efectivamente el arsénico en el rango de pH entre 8 y 9. No obstante, el selenio, fluoruro, nitrato y sólidos disueltos totales compiten con el arsénico y afectan la duración del proceso. Las consideraciones que se tiene en este proceso comprenden el pH, iones competitivos, tipo de resina, alcalinidad, concentración de arsénico en el afluente, disposición de la resina y los regenerantes usados, efectos secundarios de la calidad del agua y los parámetros de diseño de la operación.

La resina básica de intercambio iónico adsorbe los iones con la siguiente preferencia:

$\text{HCrO}_4^- > \text{CrO}_4^{2-} > \text{ClO}_4^- > \text{SeO}_4^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Br}^- > (\text{HPO}_4^{2-}, \text{HAsO}_4^{2-}, \text{SeO}_3^{2-}, \text{CO}_3^{2-}) > \text{CN}^- > \text{NO}_2^- > \text{Cl}^- > (\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}, \text{H}_2\text{AsO}_4^-, \text{HCO}_3^-) > \text{OH}^- > \text{CH}_3\text{COO}^- > \text{F}^-$



## NANOFILTRACIÓN

Es un proceso de separación líquida mediante membranas operadas bajo presión que permite el paso de solventes y sales monovalentes, iones metálicos y pequeñas moléculas orgánicas de peso molecular en el rango de 200 a 1000.

Se puede remover el  $As^{+5}$  y el  $As^{+3}$  disueltos en el agua. Con este método se alcanza hasta una remoción de 90% de arsénico disuelto en aguas subterráneas. Este proceso no es tan apropiado para tratar aguas superficiales debido al extensivo pretratamiento que se requiere para remover partículas sólidas o coloidales del agua. La remoción depende de los parámetros de operación, propiedades de la membrana y el estado de oxidación del arsénico

## ABLANDAMIENTO CON CAL

Es un método usado para remover la dureza del agua y consiste en adicionar cal ( $Ca(OH)_2$ ) al agua. Este método es efectivo para remover  $As^{+3}$  ó  $As^{+5}$  y la eficiencia de la remoción está en función del pH. Este método tiene un alto rendimiento para remover concentraciones de arsénico de 50  $\mu g/L$ ; sin embargo para reducir a 1  $\mu g/L$  se necesita de un tratamiento secundario. La remoción de  $As^{+5}$  es mayor al 90 % a un pH de 10.5 o más, siendo el pH óptimo de operación mayor que 10.5. Por debajo del rango del pH óptimo la remoción disminuye a menos del 20%. En el sistema de ablandamiento con cal se produce una considerable cantidad de lodo.

### 2.2.2 CASOS DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO CON MÉTODOS NO CONVENCIONALES

#### ZIMAPÁN, HIDALGO

Algunos estudios identifican los minerales que contienen óxidos de Hierro como absorbentes alternativos de As. Algunos logran, incluso, una eficiencia de hasta 100 % (Simeonova, 2000).

Mediante un estudio piloto realizado en uno de las fuentes subterráneas de Zimapán, Hidalgo fue evaluada la remoción de As por filtración a través de un lecho de dicho material, seguido de otro filtro empacado con zeolita recubierta con óxidos de manganeso.

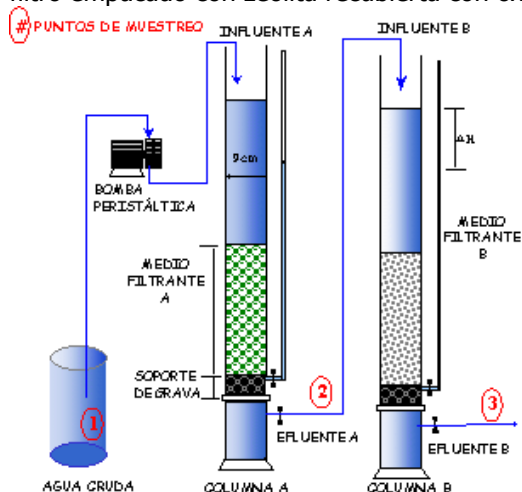
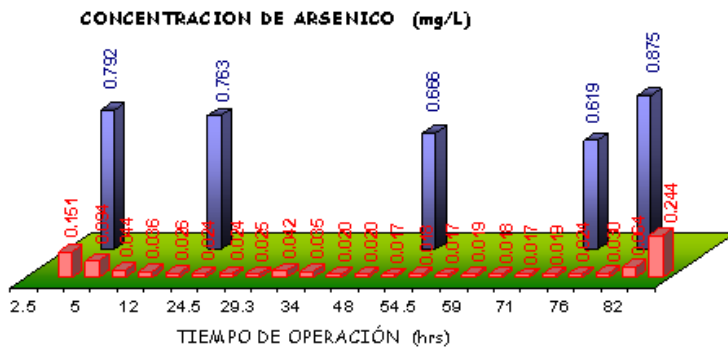


Gráfico No. 3 Diagrama de flujo de la prueba piloto





**Gráfico No. 4 Resultados de remoción de Arsénico durante la prueba piloto**

La prueba piloto consistió en una filtración a través de un lecho de material mineral que contiene óxido de hierro, seguido de otro filtro empacado con zeolita recubierta con óxidos de manganeso. El grado de remoción del arsénico se puede apreciar por la diferencia de su concentración en el influente y el efluente del sistema.

## ARGENTINA

Procedimiento utilizado:

- Oxidación: hipoclorito de calcio y Arcillas naturales y activadas
- Coagulación: sulfato de aluminio y el Cloruro Férrico
- Floculación: mezclado
- Decantación

Resultados obtenidos:

- Tratamiento con arcilla/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{Cl}_2$  0.48mg/L As, remoción = 76 %
- Tratamiento con arcilla/ $\text{FeCl}_3/\text{Cl}_2$  0.05mg/L As, remoción = 97 % (Castro, 1999)

## NORTE DE CHILE

RAOS (Remoción de Arsénico por Oxidación Solar) utiliza citrato de Fe, y permite la oxidación de  $\text{As}^{+3}$  a  $\text{As}^{+5}$  a través de especies activas formadas por irradiación con luz en presencia de oxígeno. El  $\text{As}^{+5}$  se adsorbe fuertemente sobre el precipitado de hidróxido de hierro que se forma en esas condiciones, y flocula.

El citrato puede agregarse al agua a tratar (que generalmente ya contiene Fe) en forma de jugo de limón. Las botellas plásticas son expuestas al sol por algunas horas y, al llegar la noche, se colocan en posición vertical, para que el agua purificada se decante de las partículas de hidróxido de hierro precipitado. También es posible filtrar el agua a través de paños textiles (Arnijos, 2000).

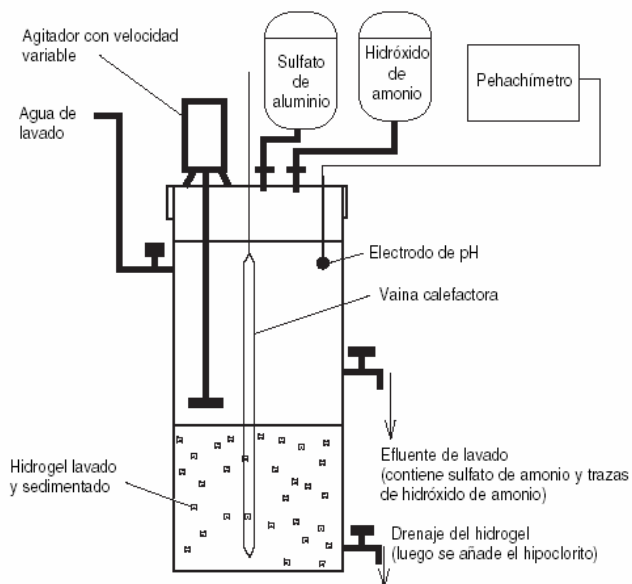
## TUCUMÁN, ARGENTINA

Aplicación de Hidrogel de hidróxido de aluminio, que contiene: Sulfato de aluminio hidratado, hipoclorito de calcio, hidróxido de amonio y agua. Este polvo es agregado al agua que contiene Arsénico y produce la coagulación y posteriormente la sedimentación de los flóculos, de esta forma, elimina el arsénico con una eficiencia variable que depende de las características fisicoquímicas del agua (Luján, 2001).

Resultados:

Muestras de agua <sup>a</sup>	Concentración de arsénico (partes por millón)	
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Agua artificial	0,1	< 0,01
Agua artificial	0,5	< 0,01
Agua artificial	1,0	< 0,01
Agua artificial	5,0	< 0,01
Aguas naturales	0,04 a 0,10	< 0,01
Aguas naturales	0,10 a 0,45	< 0,01
Aguas naturales	0,45 a 0,60	< 0,01
Aguas naturales	0,60 a 0,80	< 0,01

**Gráfico No. 5 Resultados de la aplicación del método**

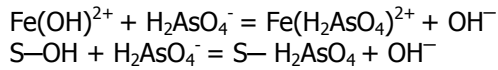


**Gráfico No. 6 Representación esquemática de la preparación del hidrogel de hidróxido de amonio a escala piloto**

### 2.2.3 REMOCIÓN DE ARSÉNICO POR MEDIO DE COAGULACIÓN

Se ha demostrado que la tecnología para la remoción de Arsénico vía adsorción en sales metálicas hidrolizadas es suficientemente efectiva. Típicamente el Cloruro Férrico, o de aluminio, se agrega al agua que contiene Arsénico. El Cloruro Férrico se hidroliza y precipita como un hidróxido férrico insoluble, el cual es filtrado posteriormente. En general, la remoción de contaminantes por la vía de adición de coagulantes ocurre a través de los siguientes mecanismos: adsorción, por efecto de neutralización de la carga de la superficie; la adsorción que permite el enlace entre partículas y la precipitación. La adsorción es el mecanismo dominante para la remoción de Arsénico por hidróxido férrico. La Adsorción de Arsénico V en hidróxido férrico ha sido descrita en términos de una reacción de intercambio de enlaces de Arsenato.

La adsorción de protones o iones de hidróxido es interpretada en términos de una reacción ácido-base en la superficie del óxido, es decir, la superficie del grupo hidroxil gana o pierde protones. La adsorción de enlaces (aniones o ácidos débiles) en una superficie metal-óxido puede también ser comparada con las reacciones de formación compleja en solución por ejemplo.



Donde S-OH corresponde a  $\equiv \text{Fe}-\text{OH}$ . En la reacción superior el átomo central de la superficie metálica actúa como un ácido Lewis e intercambia su estructura  $\text{OH}^-$  por otros enlaces.

### EFFECTO DEL PH

La remoción de As es mucho más eficiente para el Arsénico V que para el Arsénico III; sin embargo en la siguiente figura se muestra la remoción del Arsénico V y III como una función del pH. La remoción del As V depende fuertemente del pH. Para una dosis de 2 mg de  $\text{Fe}(\text{III})/\text{L}$  se removió casi el 100% a un pH de 5.5, mientras no ocurrió alguna remoción a un pH de 9.6. La siguiente figura también muestra que se remueve más Arsénico V a bajos niveles de pH que a altos niveles de pH, aún cuando las dosis de coagulante son iguales, es decir, mientras más bajo es el pH es mayor la remoción de As 5.

La remoción de Arsénico III fue extremadamente baja a pH de 5.5 y cambió muy poco con un rango de 7.5 a 9.6. Esto es porque el As III existe predominantemente como una especie neutral de  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  cuando el pH del agua está por debajo de 9.23 y es un pobre enlace comparado con el Arsénico V. Sin embargo, conforme el pH se incrementa, la mayor concentración de hidróxido, la cual es un excelente enlace, complementa el anión  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ . Por lo tanto, el Arsénico V fue removido de manera más eficiente que el Arsénico III. Sin embargo, a pH de 9.6 la competición del hidróxido fue significativa y tanto el Arsénico V como el III fueron afectados adversamente, es decir, no ocurrió una remoción significativa.

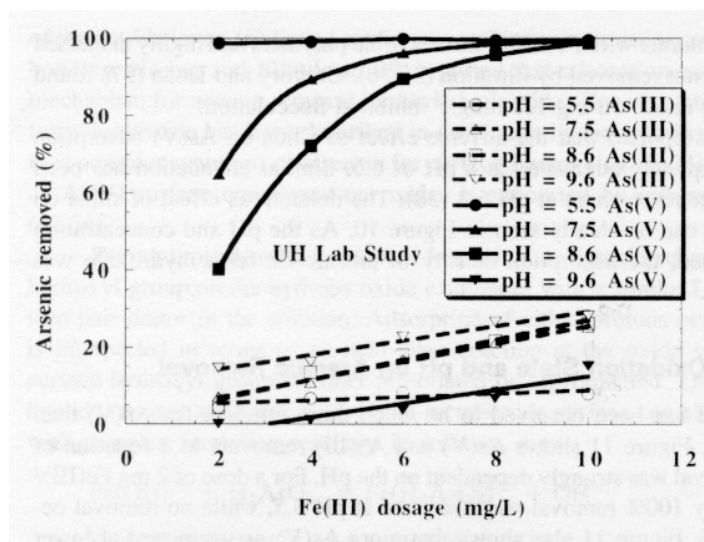


Gráfico No. 7 Curvas a diferentes pH, donde se muestra la remoción de Arsénico a cada dosis aplicada.

## **3 EL ARSÉNICO EN EL ORGANISMO**

### **3.1 VÍAS DE INGRESO**

#### **3.1.1. VÍA DIGESTIVA**

Es la vía de entrada del arsénico inorgánico en caso de ingestión criminal o accidental y en el medio laboral en sujetos cuyas manos están contaminadas con arsénico. Es vía de entrada también, para arsénico orgánico de origen alimentario o de alimentos contaminados por pesticidas organoarsenicales.

#### **3.1.2. VÍA INHALATORIA**

Es esencialmente la vía de exposición laboral, debido a la inhalación de polvo y vapores de arsénico inorgánico.

#### **3.1.3. VÍA CUTÁNEA**

Existen reportes de casos de intoxicación sistémica cuando la exposición ha sido dérmica. En particular, el cloruro de arsénico ( $\text{AsCl}_3$ ), se absorbe rápidamente a través de la piel sana.

### **3.2. BIOTRANSFORMACION**

Estudios en animales han mostrado que las soluciones, tanto de compuestos arsenicales penta como trivalentes, son rápidamente absorbidas por ingestión. Por su parte, la inhalación usualmente es la vía de ingreso al organismo para compuestos arsenicales inorgánicos.

Los datos en animales muestran que se produce una mayor retención de arsénico en algunos órganos, cuando la exposición ha sido a arsénico trivalente, que cuando ha sido a arsénico pentavalente. Estas diferencias aumentan en forma proporcional a la dosis.

Se ha demostrado que el arsénico inorgánico es transferido a través de la placenta, en ratas y hámster, así como también en humanos.

Hay pocos datos, en relación con la acumulación a largo plazo, de arsénico en poblaciones en áreas industriales o donde se consume agua con altos niveles de arsénico. Sin embargo, existen algunos datos de trabajadores de fundiciones (muestreados varios años después de la exposición), cuyos niveles de arsénico en pulmón era hasta 6 veces mayor que el de los sujetos control.

Las mayores concentraciones de arsénico en tejidos humanos, se pueden encontrar en el cabello, la piel y las uñas.

### **3.3. METABOLISMO Y DISTRIBUCION**

La distribución del arsénico depende de la duración de su administración y del tipo de compuesto arsenical. El arsénico se almacena principalmente en hígado, riñón, corazón y pulmón. Cantidades mucho menores se encuentran en músculo y tejido neural. Dado el alto contenido de grupos sulfhidrilo (SH) de la queratina y el elevado grado de afinidad de  $\text{As(III)}$  por los grupos tioles, se encuentran altas concentraciones de arsénico depositado en pelo y uñas. El depósito en pelo comienza unas dos semanas después de la exposición y queda fijado durante años. También se deposita en hueso y dientes y se retiene allí durante mucho tiempo. El arsénico atraviesa la barrera

placentaria con facilidad y las concentraciones de arsénico en la sangre del cordón umbilical humano son equivalentes a las concentraciones sanguíneas maternas.

### **3.4. EFECTOS DE LA EXPOSICION Y EVALUACION DE LOS RIESGOS PARA LA SALUD**

#### **3.4.1. COMPUESTOS ARSENICALES INORGÁNICOS**

Los efectos agudos y subagudos del arsénico pueden comprometer varios sistemas orgánicos, incluyendo el sistema respiratorio, gastrointestinal, cardiovascular, nervioso y hematopoyético. Desgraciadamente, en muchos casos de intoxicación humana, las dosis y la valencia del arsénico no son conocidas. Ingestas de 70-180 mg de óxido arsenioso ( $As_2O_3$ ), han sido reportadas como fatales.

En el sistema gastrointestinal, las dosis pequeñas de arsenicales trivalentes inorgánicos producen una ligera hiperemia esplácnica. A dosis mayores se producen vesículas por debajo de la mucosa gastrointestinal, que eventualmente se rompen con descarga al intestino. Los daños, producen aumento del peristaltismo y las características heces "agua de arroz". Luego las heces se hacen sanguinolentas, puede provocarse hematemesis y estomatitis. El inicio de estos síntomas puede ser tan gradual que no se tenga en cuenta la posibilidad de envenenamiento por arsénico.

En el sistema respiratorio se producen lesiones en el tracto respiratorio superior, incluidas perforación del tabique nasal, laringitis, faringitis y bronquitis, las cuales han sido frecuentemente detectadas en trabajadores expuestos a altos niveles ambientales de arsénico. En general, tales lesiones se producen en instancias de exposición prolongada a concentraciones de varios cientos de microgramos de arsénico trivalente por metro cúbico de aire.

En forma aguda muchos arsenicales tienen un efecto en la piel que ocasiona necrosis. La ingesta de pequeñas dosis de arsenicales inorgánicos causan vasodilatación cutánea y un "cutis de leche y rosas". El uso prolongado de arsenicales puede provocar daños y lesiones en la piel, especialmente hiperqueratosis palmo-pantar. Esto se observó masivamente en pacientes que recibieron dosis de arsénico superiores a 10 mg/día. La hiperqueratosis, también ha sido reportada luego de la ingestión de agua potable contaminada con arsénico (estado de oxidación desconocido) en algunas partes del mundo, incluidos Argentina, China (provincia de Taiwán) y México. Otros síntomas dermatológicos de la exposición aguda a arsénico, incluyen hiperpigmentación del tronco y extremidades, así como erupciones cutáneas.

Se han observado trastornos en la función hepática en humanos y en animales expuestos en forma crónica a arsénico. La acción del arsénico sobre los capilares, túbulos y glomérulos renales puede causar severos daños renales que puede llegar a necrosis y degeneración tubular en diverso grado.

Pequeñas dosis de arsénico inorgánico inducen a una ligera vasodilatación, esto puede dar origen a edema oculto, especialmente en el rostro. Los arsenicales inorgánicos afectan la médula ósea y alteran la composición celular de la sangre. Algunos efectos hematológicos pueden deberse al deterioro de la absorción del ácido fólico. Los arsenitos interfieren también la síntesis de porfirinas.

Se reportaron trastornos a nivel del sistema nervioso central en jóvenes japoneses, 15 años después de la exposición (como infantes) a arsénico inorgánico en dosis de 3.5 mg/ día, por aproximadamente 1 mes. Estos efectos incluyeron severas pérdidas de la audición y anomalías en el registro de la actividad cerebral por medio de electroencefalogramas.

La exposición crónica a arsenicales inorgánicos, puede causar neuritis periférica. En casos severos, la médula espinal también puede verse afectada. Después de la ingestión aguda de dosis tóxicas de arsenicales inorgánicos el 5% de los pacientes sufre depresión central sin síntomas gastrointestinales. Los síntomas neurológicos comprenden cefalea intensa, somnolencia, confusión,

fiebre, convulsiones. También se produce debilidad muscular en las extremidades y de continuar la exposición, atrofia muscular.

Las lesiones cerebrales son generalmente de tipo vascular y se producen en la sustancia gris y blanca. Aparecen característicos focos múltiples simétricos de necrosis hemorrágica.

## **EFFECTOS CARCINOGENICOS**

Existe evidencia epidemiológica sustancial de carcinogenicidad respiratoria asociada a exposición por manejo de arsénico en la manufactura de pesticidas arsenicales. Sin embargo, no hay claridad acerca de cual de las dos formas de arsénico inorgánico (pentavalente, trivalente o ambas) son las responsables. Sin embargo, se ha registrado una posible relación entre el uso de pesticidas que contienen arseniatos en viñedos y cultivos de orquídeas, con el aumento de riesgo de cáncer pulmonar.

El potencial carcinogénico del arsénico inorgánico en el ambiente laboral de las fundiciones ha sido demostrado en numerosos estudios epidemiológicos. Uno de estos reportes revela una relación lineal entre la exposición acumulativa a arsénico y el riesgo de cáncer pulmonar. A partir de estos estudios se ha podido determinar que la exposición a concentraciones de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (principalmente de óxido de arsénico (III)), durante un período de 25 años, triplica la tasa de mortalidad por cáncer del tracto respiratorio para mayores de 65 años.

Existen antecedentes que han permitido postular la posibilidad que la exposición a  $\text{SO}_2$  favorecería la acción cancerígena del arsénico inhalado sobre los pulmones. Como para el asbesto, se ha demostrado una relación entre el arsénico y el humo de tabaco en la incidencia de cáncer al pulmón. Tienen mayor riesgo, en este sentido, los trabajadores de las fundiciones de cobre. Según EPA, la exposición durante la vida profesional a  $1 \text{ mg de As}/\text{m}^3$  significa un incremento de 4.29 casos de cáncer pulmonar por cada 1000 sujetos.

El cáncer puede sobrevenir después de la ingesta prolongada o tras contactos cutáneos con arsénico y se ha postulado una relación directamente proporcional entre la exposición a compuestos arsenicales y el desarrollo de cáncer en órganos como el hígado, en los sistemas linfático (linfoma), hematopoyético (leucemia por aplasia medular) y diversos cánceres internos (vejiga, riñón, próstata). En el caso del cáncer de órganos internos, parecen deberse a la ingesta de preparados arsenicales, más que a la exposición profesional a arsénico. La duración del tratamiento puede haber sido muy corta y el período de latencia, muy prolongado. Existen reportes de casos de desarrollo de angiosarcoma del hígado, 33 años después de recibir un tratamiento para la psoriasis, de 6 meses de duración con arsenicales.

## **OTROS EFECTOS**

En Chile personas expuestas a agua potable con concentraciones elevadas de arsénico, han mostrado una disminución de la resistencia a enfermedades virales y aumento de la incidencia de herpes labial.

Por otra parte, datos en animales sugieren que la exposición a arsénico puede tener efectos crónicos a nivel renal, pero no existen estudios en humanos al respecto. Tanto estudios in vivo, como in vitro indican que la exposición a arsénico trivalente, en forma de terapias medicamentosas, aumentan la frecuencia de aberraciones cromosómicas en humanos. Así también, numerosos estudios indican que el arsénico inorgánico afecta los mecanismos de reparación del ADN.

### **3.5. COMPUESTOS ARSENICALES ORGÁNICOS**

La medicación con algunos compuestos arsenicales orgánicos, tales como la triparsamida, tienen efectos secundarios a nivel sistema nervioso central, los que incluyen encefalopatía y atrofia óptica. Raramente se provocan neuritis periféricas por exposición a arsenicales orgánicos.

A nivel hepático, estos arsenicales comparten los efectos de los arsenicales inorgánicos, siendo particularmente tóxicos para el hígado. Un arsenical orgánico, la triparsamida (un agente tripanosomicida), puede inducir daños hepáticos a dosis terapéuticas.

Los trastornos sanguíneos y de la médula ósea, provocados por los arsenicales orgánicos, son graves e irreversibles, pero también muy poco frecuentes. Se han atribuido a glicobiarsol algunos casos de agranulocitosis.

### **3.6. HIDROARSENICISMO CRONICO REGIONAL ENDEMICO (HACRE)**

Se produce por la ingestión permanente de agua contaminada con arsénico. Estas aguas arsenicales provienen de fuentes subterráneas naturales que geológicamente aportan arsénico, aguas que a su vez contaminan todas las zonas freáticas de la región, por lo tanto todas son arsenicales. El arsénico origina aquí una enfermedad particular, insidiosa y tórpida, eminentemente dermatológica en su forma de presentarse. Los adultos consumidores de larga data de estas aguas, obligados por el excesivo calor de estas zonas del país, contraen lesiones irreversibles que los incapacitan para el trabajo, causándoles ocasionalmente la muerte. Dentro de las medidas preventivas se encuentra el inestimable recurso de la adecuada potabilización del agua para consumo. La Modificación de la Norma Oficial 127 de la Ssa sobre la calidad del agua para consumo humano establece que el máximo permisible es de 0.025 miligramos por litro de agua.

En esta enfermedad está relacionado todo el cuerpo, principalmente la piel, quien funciona como agente parcial para su eliminación. Los primeros síntomas suelen aparecer entre la pubertad y la edad adulta, aunque puede aparecer en edad escolar.

Su diagnóstico se realiza en base al examen del enfermo y del agua de la zona en que vive. Un análisis de orina, cabello o uñas mostrará una cantidad elevada de arsénico. Actualmente es frecuente encontrar casos de HACRE en otras regiones del país por las migraciones.

Niveles de arsénico menores a los letales, pero continuos pueden causar náusea y vómitos, reducción de la producción de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, daño de los vasos sanguíneos y una sensación de hormigueo en las manos y los pies. Ingerir o respirar niveles bajos de arsénico por largo tiempo puede producir oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeños callos o verrugas en las palmas de las manos, las plantas de los pies y el torso. Varios estudios han demostrado que el arsénico inorgánico puede aumentar el riesgo de cáncer del pulmón, la piel, la vejiga, el hígado, el riñón y la próstata. La Organización Mundial de la Salud (WHO), el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) y la EPA han determinado que el arsénico inorgánico es carcinógeno en seres humanos.



## 4 FASE EXPERIMENTAL

### 4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

El lunes 17 de Enero, se asistió al municipio de Francisco I. Madero, con el objetivo de conocer el sistema de abastecimiento de agua potable y realizar un muestreo en los principales pozos, los cuales fueron elegidos con anterioridad tomando en cuenta su alta concentración de arsénico. El volumen de cada una de estas muestras fue de 20 litros.

Las observaciones realizadas en la visita fueron las siguientes:

- a) No se cuenta con un tanque de regulación, el agua de cada pozo se suministra a los usuarios directamente, después de una desinfección con cloro.
- b) No se le proporciona un tratamiento de potabilización al agua, únicamente se desinfecta con cloro, ya sea en forma gas o hipoclorito.

Durante el muestreo se registró la temperatura y el pH de la muestra, así como las siguientes observaciones:

#### EJIDO "EL PORVENIR"

Hora: 12:01 pm

Coordenadas: 25°46.364' N, 103°19.511' W, 1,121msnm.

El pozo de este ejido no pertenece al Sistema de Francisco I. Madero, es del ejido con el mismo nombre. La bomba no funcionaba y el tanque estaba vacío, por lo anterior, no fue posible realizar el muestreo directamente. Un vecino proporcionó la muestra de su tinaco, del cual estaba abasteciendo a otros habitantes del ejido. El agua del pozo no cuenta con alguna unidad de desinfección.



**Gráfico No. 8** Pozo que abastece al Ejido El Porvenir, sitio del muestreo

#### EJIDO "VIRGINIAS"

Hora: 12:38 pm

Coordenadas: 25°48.446' N, 103°16.436' W, 1,116msnm.

Al agua de este pozo se le aplica cloro en la línea.





**Gráfico No. 9** *Tubería que conduce el agua obtenida del pozo que abastece al Ej. Virginias.*

### **TANQUE "CABALLO BLANCO"**

Hora: 12:59 pm

Coordenadas: 25°45.715' N, 103°15.019' W, 1,124msnm.

Este tanque almacena el agua que se envía de Torreón, el agua se utiliza para abastecer San Pedro. Se proporciona un tratamiento de desinfección.



**Gráfico No. 10** *Tanque Caballo Blanco que almacena el agua que recibe el municipio Francisco I. Madero de Torreón.*

### **4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS**

Las muestras recolectadas fueron analizadas con métodos de campo (temperatura y pH) y métodos analíticos, cuyos procedimientos se muestran en el apéndice. Cada parámetro se midió por duplicado, para confirmar resultados, los cuales fueron los siguientes:

	Caballo Blanco	Ejido El Porvenir	Ejido Virginias	Norma 127 SSa
Alcalinidad (mg/L)	118	376	100	---
Arsénico (mg/L)	0.050	0.264	0.182	0.025
Cloruros (mg/L)	13.53	12.40	9.02	250
Dureza por calcio (mg/L)	110	156	60	500 (total)
Hierro total (mg/L)	0.018	0.018	0.072	0.300

Nitrógeno amoniacal (mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	0.5
Potencial de hidrógeno (upH)	7.27	7.10	7.68	6.50-8.50
Temperatura (°C)	27	26	26	---
Sólidos disueltos totales (mg/L)	300	670	343	1000

Es necesario cuantificar otros parámetros además del Arsénico, ya que se puede alterar el agua en tal cantidad que no cumpla con la norma establecida. Debido a que se le estará adicionando productos químicos se corre el riesgo de incrementar la conductividad. Uno de estos coagulantes es el Cloruro Férrico, por lo tanto será necesario registrar tanto la concentración cloruros como la del Hierro Total.

Las muestras se encuentran dentro de los límites permisibles de calidad de agua potable, únicamente el Arsénico medido es superior a lo que indica la norma.



**Gráfico No. 11 Generación de Arsina. Estándares para Hierro.**

#### **4.3 FASE 1. OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-PRECIPITACIÓN**

Se seleccionó la muestra del Ejido El Porvenir para iniciar las pruebas de tratabilidad, debido a que ésta es la que contiene mayor concentración de Arsénico, 0.264 mg/L.

Con el objetivo de conocer la eficiencia que tienen algunos coagulantes en la remoción del Arsénico, se probaron diferentes productos, en dosis ascendentes, y además se les dejó precipitar durante 20 minutos.

La prueba de tratabilidad consistió en:

1. Se tomó una muestra de 200 ml, sin alterarla, es decir, se conservó el mismo pH.
2. Se le aplicó una dosis definida de un oxidante-coagulante.
  - a. Cloruro Férrico
  - b. Sulfato Ferroso
  - c. Sulfato Férrico
3. Se agitó durante 20 minutos.
4. Se dejó precipitar durante 20 min.
5. Se les midió la concentración de Arsénico.
6. Se realizaron otras pruebas con la misma muestra del Ejido El Porvenir, bajando el pH a 6.0 y a 5.0
  - a. Para bajar el pH a 6.0 se le agregó a la muestra ácido acético, 1 Normal en una concentración de 20.0 ml  $\text{CH}_3\text{COOH}$  1N / L de muestra.
  - b. Para bajar el pH a 5.0 se le agregó a la muestra ácido acético, 1 Normal en una concentración de 35.0 ml  $\text{CH}_3\text{COOH}$  1N / L de muestra.

#### 4.3.1 RESULTADOS

1. Muestra sin alterar el pH

Cloruro Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %
12	0.271	0.00
24	0.308	0.00
36	0.122	53.79
42	0.161	39.02
48	0.017	93.56
60	0.000	100.00

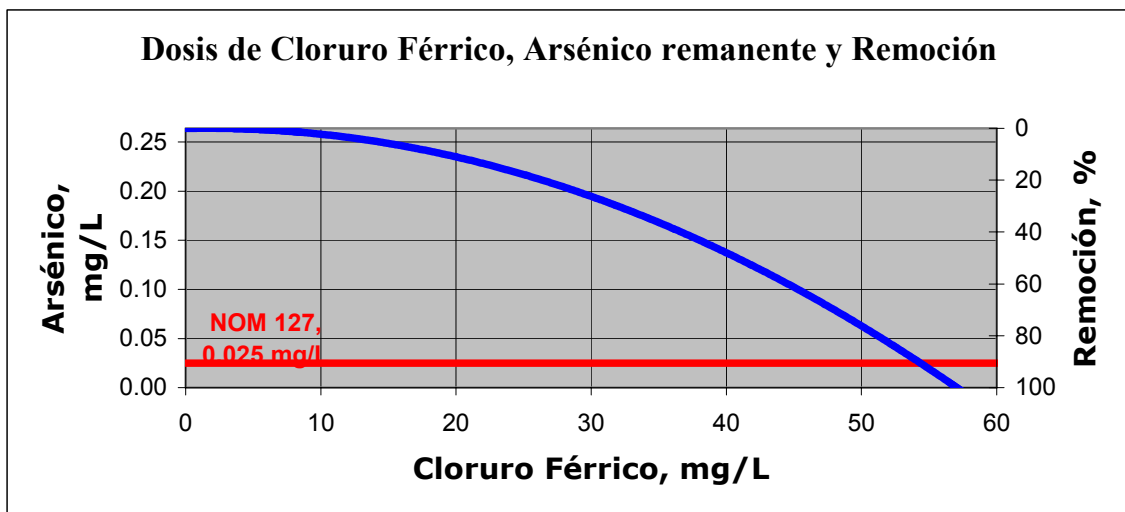
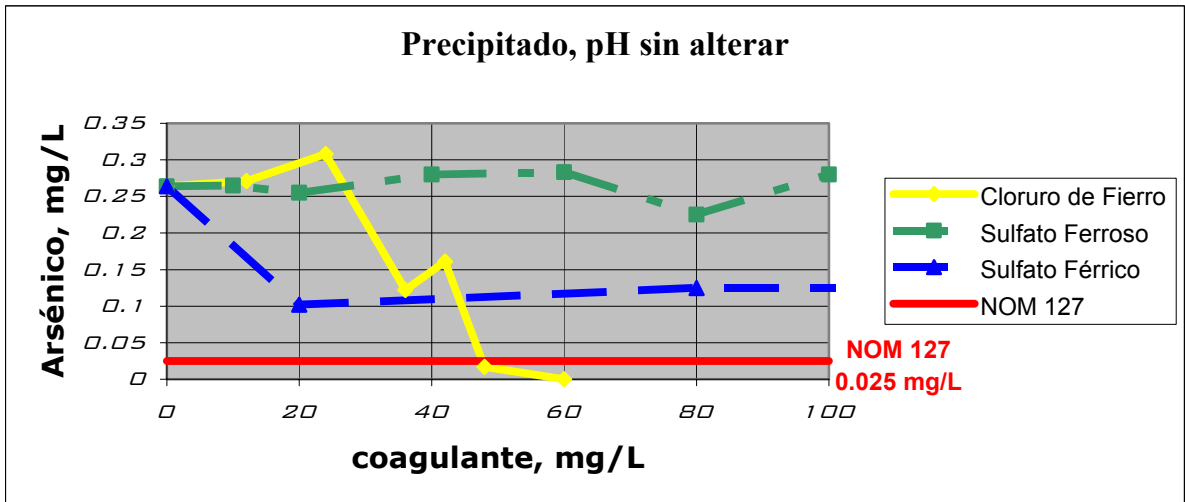


Gráfico No. 12 Curva de Dosis de Cloruro Férrico, contra el Arsénico remanente y la remoción obtenida.

Sulfato Ferroso, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %
10	0.265	0.00
20	0.255	3.41
40	0.280	0.00
60	0.283	0.00
80	0.225	14.77
100	0.280	0.00

Sulfato Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %
20	0.102	61.36
80	0.125	52.65
200	0.125	52.65



**Gráfico No. 13** *Concentración de Arsénico después del tratamiento con diferentes coagulantes y dosis.*

2. Los resultados con el pH = 6.0 son los siguientes:

Cloruro Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %
12	0.257	2.65
24	0.252	4.55
36	0.266	0.00
42	0.250	5.30
48	0.014	94.70

Sulfato Ferroso, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %
40	0.229	13.26
60	0.257	2.65
80	0.229	13.26

Sulfato Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %
60	0.262	0.76
80	0.243	7.95

3. Los resultados con el pH = 5.0 son los siguientes:

Cloruro Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %
12	0.252	4.55
24	0.248	6.06
36	0.054	79.55

Sulfato Ferroso, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %
60	0.011	95.83

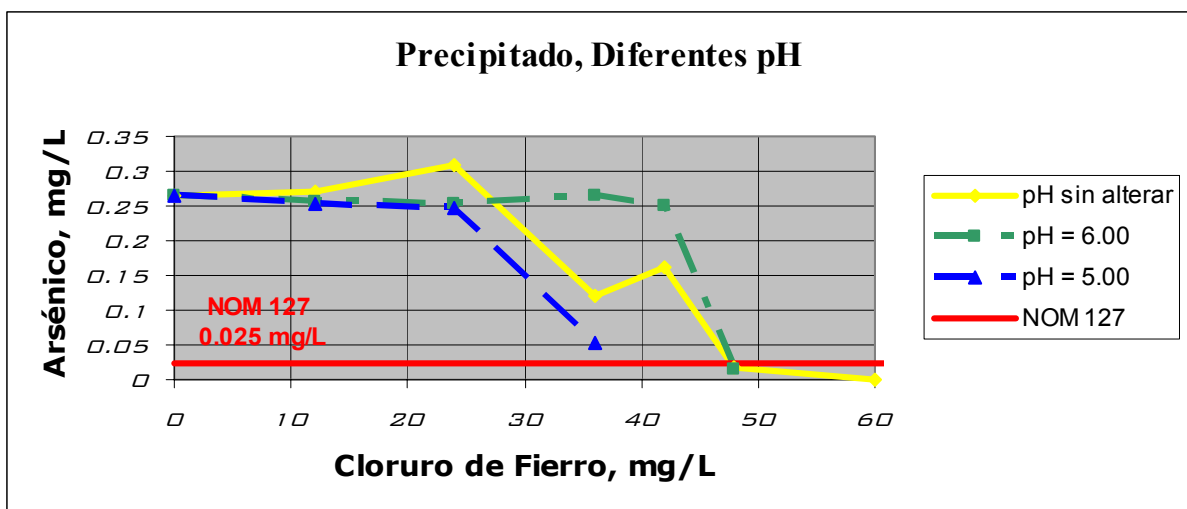


Gráfico No. 14 Concentración de Arsénico después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico a diferentes muestras variando el pH

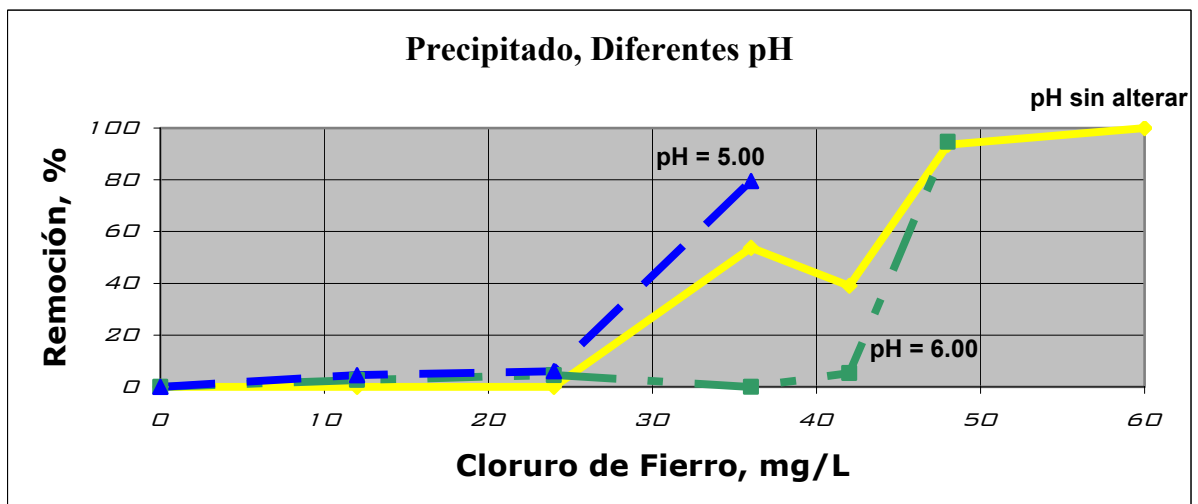


Gráfico No. 15 Remoción obtenida después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico a diferentes muestras variando el pH

### 4.3.2. COMENTARIOS

- El sulfato ferroso y el sulfato férrico no lograron una remoción de Arsénico importante, ni bajando el pH de la muestra, únicamente el Cloruro Férrico.
- Bajar el pH del agua no favoreció el obtener un agua con menor concentración de Arsénico, por lo tanto resulta innecesario adicionar ácido al agua para lograr una mayor eficiencia de remoción.
- De la curva que muestra el comportamiento del Arsénico remanente y su remoción, dependiendo de la dosis aplicada, se puede predecir una tendencia parabólica, que facilita el cálculo de la remoción, aplicando la ecuación:  
**Remoción = 0.0325Dosis<sup>2</sup> - 0.0988Dosis** (coeficiente de regresión = 0.90)
- No se realizó la prueba con el pH = 5.0 y una dosis de 48 mg/L de Cloruro Férrico, debido a que con esta dosis ya se logra remover el Arsénico al límite permisible sin tener que bajar el pH.
- La dosis que logró remover en su totalidad al arsénico fue la de 60 mg/L de Cloruro Férrico, sin embargo, no es necesario una dosis tan alta, ya que la de 48 mg/L ya logra el límite máximo permitido por la Modificación a la NOM 127 SSa, que es de 0.025 mg/L de Arsénico

### 4.4 FASE 2. COMPARACIÓN DE PRECIPITACIÓN CON FILTRACIÓN

A una muestra de 1,000 ml, sin alterar el pH, se le aplicó una dosis de 48 mg/L de Cloruro Férrico, al 50% se le dejó precipitar y al otro 50% se le sustituyó el precipitado por filtrado. A estas muestras se les midió además de la concentración de Arsénico, el pH, Cloruros, Alcalinidad, y Conductividad.



Gráfico No. 16 *Filtración en papel*

#### 4.4.1 RESULTADOS DE LA TRATABILIDAD

	pH	Arsénico	Cloruros	Alcalinidad	Conductividad
	upH	mg/L	mg/L	mg/L	μS
Muestra inicial	8.01	0.264	12.40	376	896
Precipitado	8.01	0.037	31.33	332	872
Filtrado	7.99	0.002	30.96	314	844

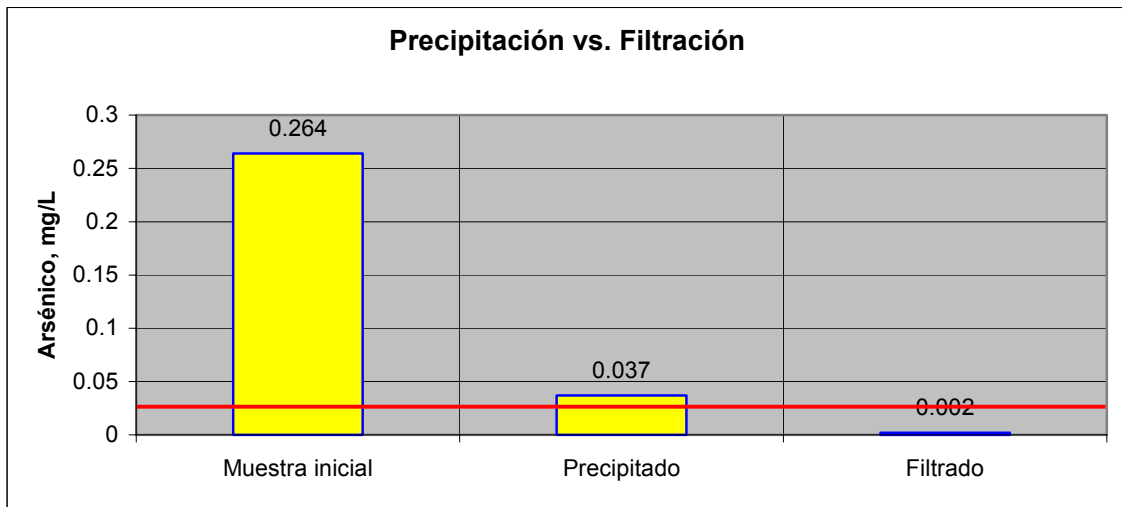


Gráfico No. 17 Comparación del Precipitado y del Filtrado en su concentración de Arsénico.

#### 4.4.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD

- El adicionarle el Cloruro Férrico no altera la muestra en gran medida, ya que los parámetros de calidad de agua, se mantienen constantes.
- El pH, la alcalinidad y la conductividad no varían, los cloruros sí aumentan al 250% de lo que se tenía originalmente, sin embargo, aún se encuentra muy por debajo de la norma que indica 250 mg/L como límite máximo permisible.
- La concentración de arsénico resultante del tratamiento sí presenta gran variación, ya que al filtrarlo, se alcanzó a remover el 99%

#### 4.5 FASE 3. OXIDACIÓN-COAGULACIÓN-FILTRACIÓN

Nuevamente, se realizaron varias pruebas con diferentes dosis de Cloruro Férrico, éstas fueron filtradas (en un filtro de papel) y además de medirse la concentración de arsénico, se midió la de hierro total.

##### 4.5.1 RESULTADOS DE LA TRATABILIDAD

Cloruro Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %	Hierro total, mg/L
12	0.036	86.36%	0.249
18	0.017	93.75%	0.258
24	0.007	97.54%	0.244
30	0.005	98.30%	0.285
36	0.000	100.00%	0.312
48	0.000	100.00%	

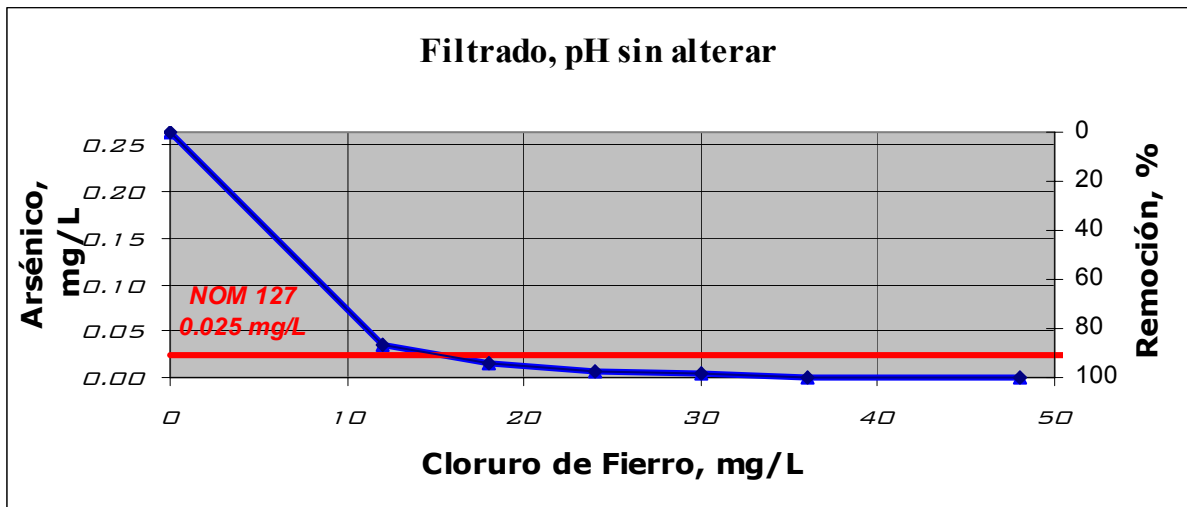


Gráfico No. 18 Concentración de Arsénico resultante de la aplicación del Cloruro Férrico a diferentes dosis y el porcentaje de remoción correspondiente.

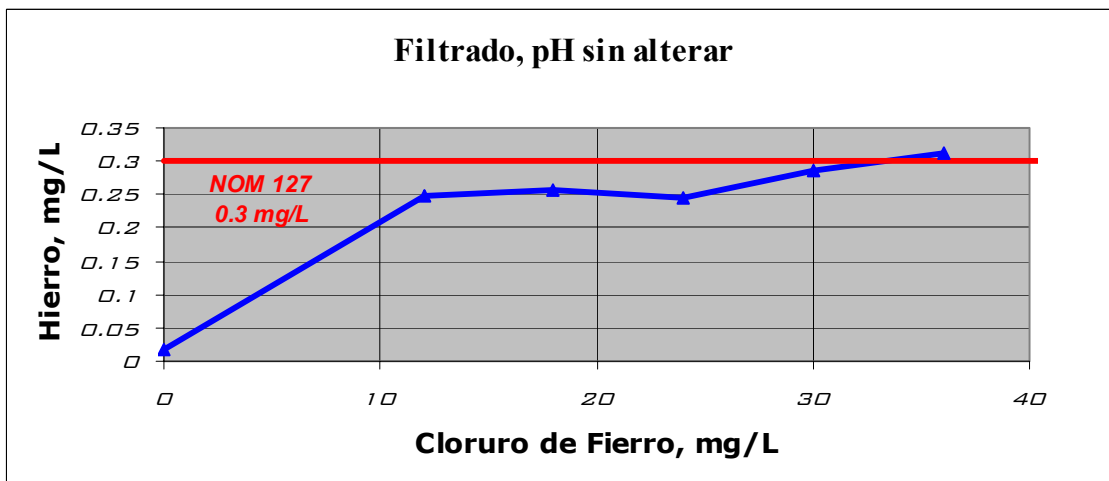


Gráfico No. 19 Concentración de hierro total remanente de la aplicación del Cloruro Férrico a diferentes dosis.

#### 4.5.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD

- La dosis óptima de Cloruro Férrico es la de 24 mg/L, ya que con esta cantidad es suficiente para alcanzar una concentración de Arsénico menor al límite máximo de 0.025 mg/L.
- Al realizar los análisis de Hierro Total, se le puede agregar hasta 30 mg/L de Cloruro Férrico y se cumplirá con la Norma que indica un límite máximo de 0.3 mg/L.
- En las gráficas se puede observar un comportamiento inverso entre el Arsénico y el Hierro, es decir, al aumentar la dosis de Cloruro Férrico, la curva del Arsénico disminuye mientras que la del Hierro asciende. Esto se debe a que a mayor dosis agregada de Cloruro Férrico se obtiene una mayor remoción del Arsénico, sin embargo, queda una mayor cantidad de Hierro residual.



#### 4.6 FASE 4. FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR A LAS TRES MUESTRAS RECOLECTADAS

En las pruebas anteriores, la filtración se realizó con un filtro de papel, en la presente fase, se utilizó un filtro de un solo medio, descendente por gravedad, el cual tenía las siguientes características:

- Del medio filtrante , (solo un estrato)  
Arena sílica  
Forma del grano: angular  
Esfericidad,  $\phi = 0.81$   
Factor de forma,  $S = 7.40$   
Porosidad,  $n = 0.40$   
Pasa la malla No. 50 y se retiene en la 55  
Diámetro promedio = 0.284 mm
- Del filtro  
Espesor del estrato: 21 cm  
Diámetro interno: 1.00 plg  
Área = 5.067 cm<sup>2</sup>.  
Flujo = 20 ml/min  
Razón de filtración = 3.95 ml/min·cm<sup>2</sup> = 0.969 gal/min·ft<sup>2</sup>.

Con el filtro descrito se realizaron diferentes pruebas, a las tres muestras que fueron recolectadas, El porvenir, que es la que se ha estado utilizando, Ej. Virginias y Tanque Caballo Blanco.



Gráfico No. 20 *Filtro de arena sílica utilizado en la prueba*

#### 4.6.1 RESULTADOS DE LA TRATABILIDAD

Muestra Ej. Virginias.

Cloruro Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %	Hierro total, mg/L
6	0.029	84.07	0.077
12	0.019	89.56	0.081
18	0.012	93.41	0.249
24	0.009	95.05	0.312

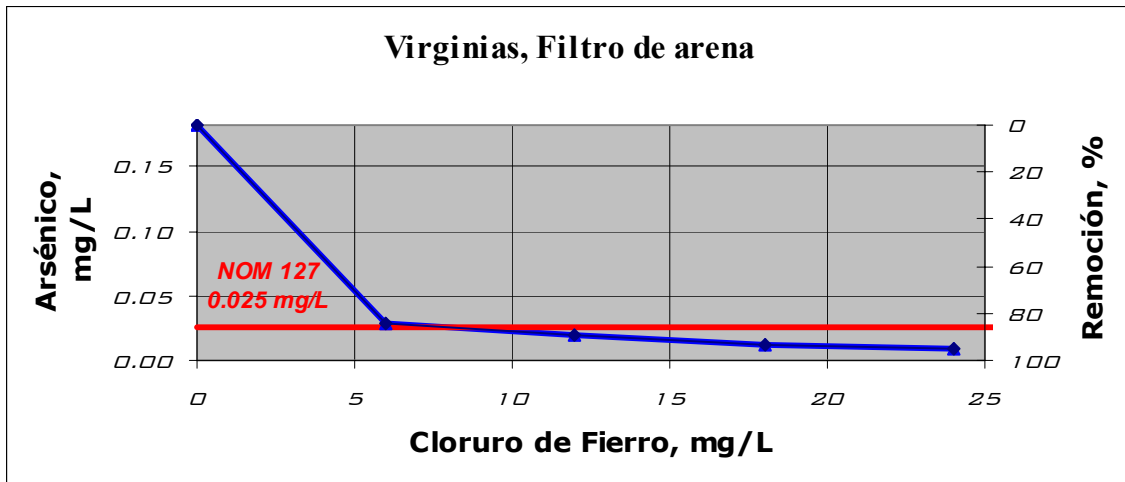


Gráfico No. 21 Concentración de Arsénico y remoción obtenida, después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Ej. Virginias.

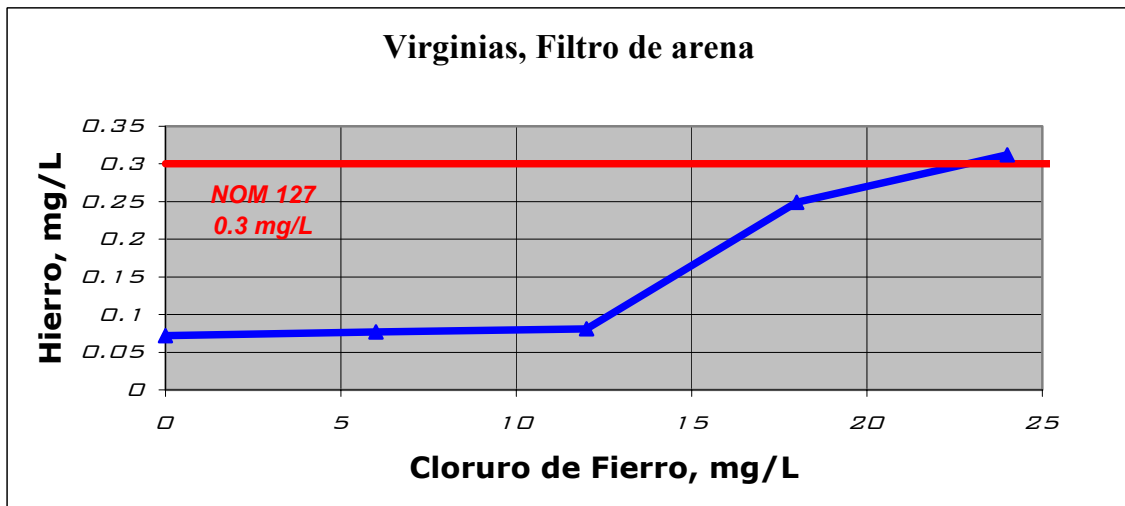
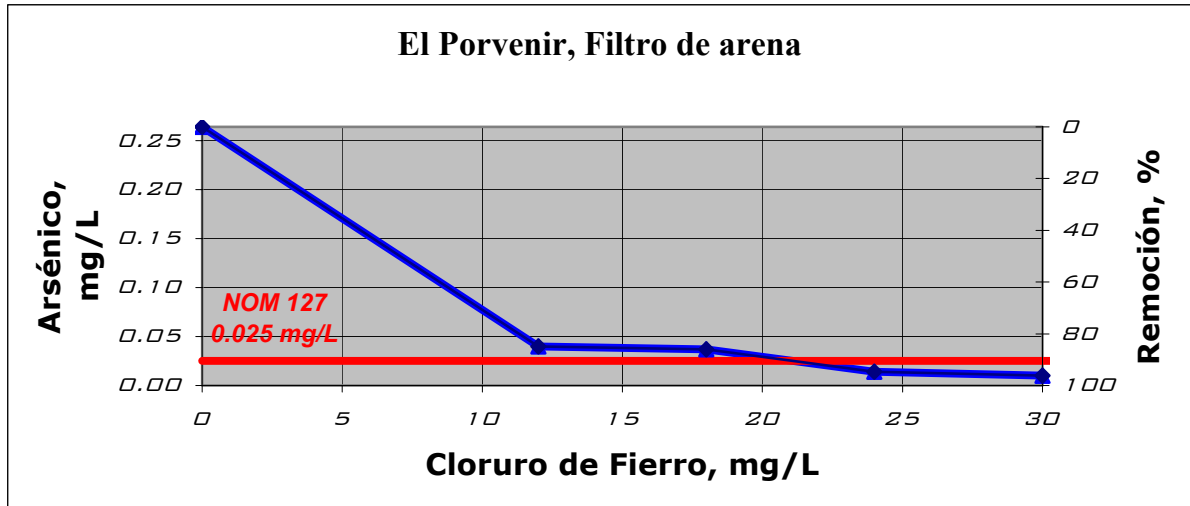


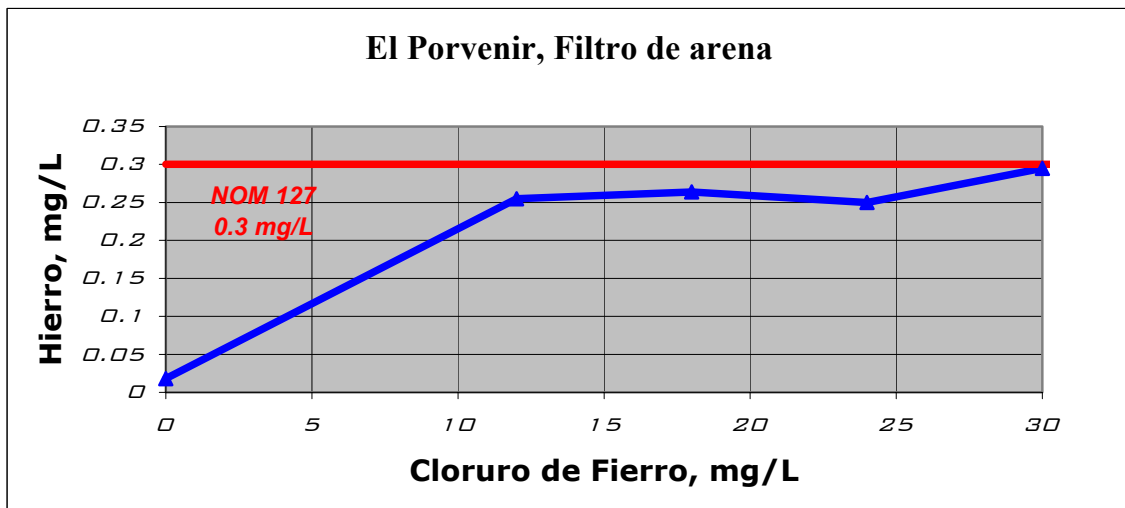
Gráfico No. 22 Concentración de hierro después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Ej. Virginias.

Muestra El Porvenir

Cloruro Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %	Hierro total, mg/L
12	0.040	84.85	0.255
18	0.037	85.98	0.264
24	0.014	94.70	0.250
30	0.010	96.21	0.295



**Gráfico No. 23** Concentración de Arsénico y remoción obtenida, después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Ej. El Porvenir.



**Gráfico No. 24** Concentración de Hierro después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Ej. El Porvenir.

Muestra Caballo Blanco.

Cloruro Férrico, mg/L	Arsénico, mg/L	Remoción, %	Hierro total, mg/L
3	0.020	60.00	0.063
6	0.013	74.00	0.086
9	0.008	84.00	0.086
12	0.002	96.00	0.172

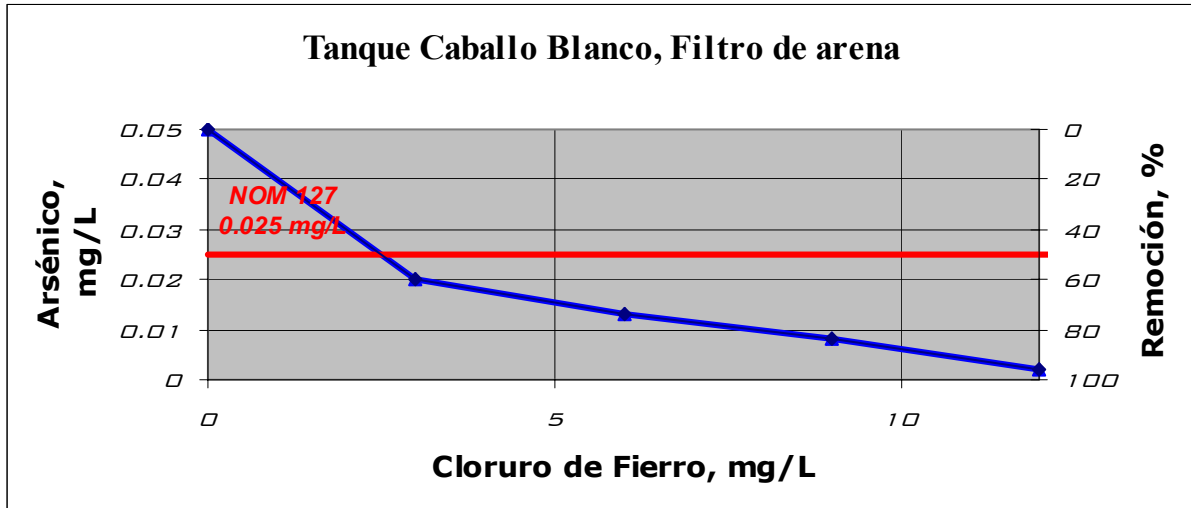


Gráfico No. 25 Concentración de Arsénico y remoción obtenida, después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Tanque Caballo Blanco.

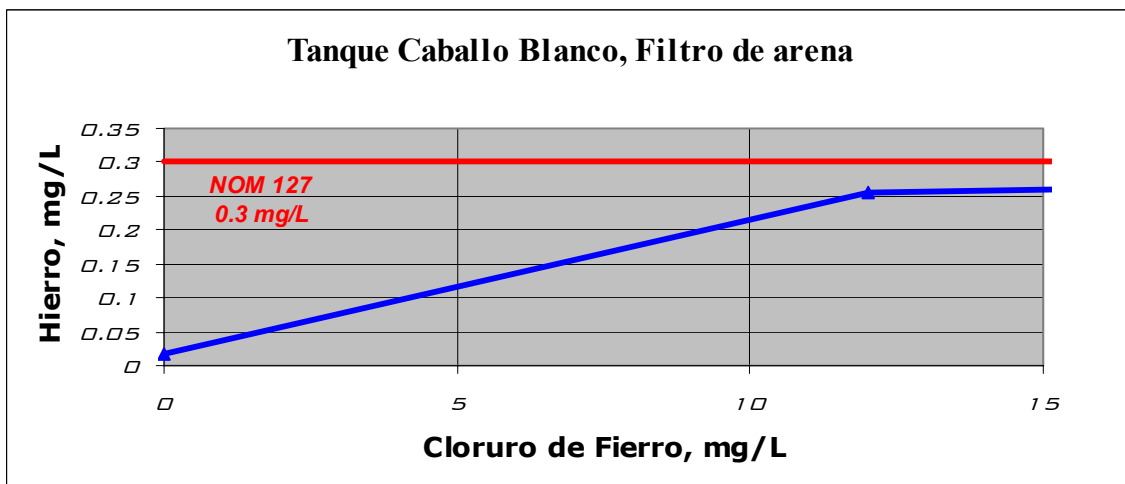


Gráfico No. 26 Concentración de Hierro después de la aplicación de diferentes dosis de Cloruro Férrico y un filtrado en un medio granular, para la muestra tomada en el Tanque Caballo Blanco.

#### 4.6.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD

- La eficiencia en remoción de Arsénico, con la filtración en un medio granular disminuyó aproximadamente un 12% a la obtenida por el filtro de papel.
- La eficiencia del filtro de arena puede ser mejorada aumentando el tamaño del lecho filtrante, sin embargo esto disminuiría el la razón de filtración que ya se encuentra muy baja, (1 gal/min-ft<sup>2</sup>)
- Las dosis requeridas para cumplir con las Normas y tener una concentración de Arsénico remanente de 0.020 mg/L son las siguientes:

Muestra	As. Inicial, (mg/L)	Dosis, (mg/L)	As. Final, (mg/L)	Remoción, %
El Porvenir	0.264	22.63	0.020	92.42
Ej. Virginias	0.182	11.18	0.020	89.01
Caballo Blanco	0.050	3.00	0.020	60.00

- Al analizar el comportamiento de la curva Dosis-Arsénico, se puede determinar la dosis requerida dependiendo de la concentración de Arsénico del influente con la siguiente ecuación:

$$\text{Dosis} = 223.41 \text{ As}_0^2 + 25.385 \text{ As}_0 \text{ (coeficiente de regresión} = 0.99)$$

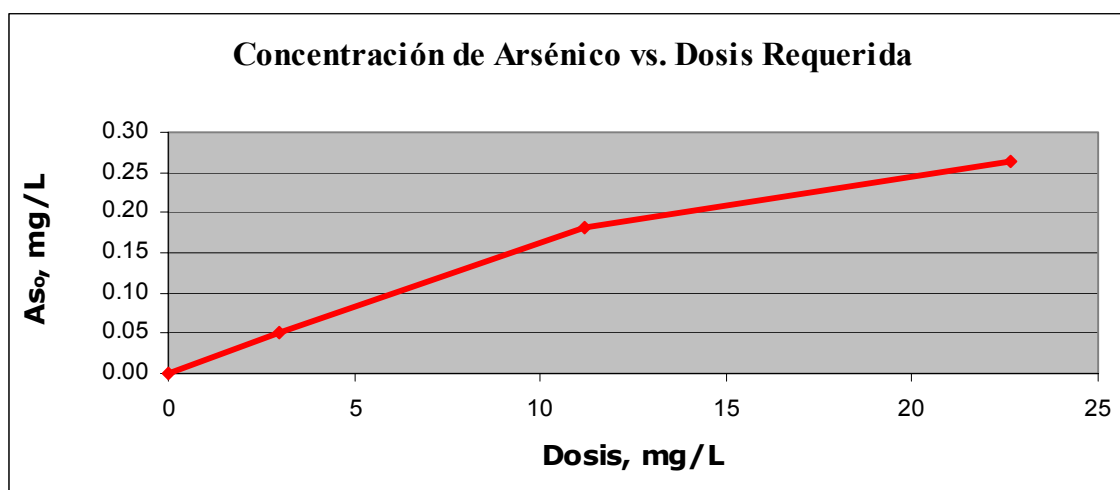


Gráfico No. 27 Dosis requerida para que el Arsénico remanente sea de 0.020 mg/L, dependiendo de la Arsénico inicial.

#### 4.7 FASE 5. FILTRACIÓN CONTINUA EN MEDIO GRANULAR

En esta fase se realizó una prueba de tratabilidad en el mismo filtro expuesto en la fase anterior. Se tomó una muestra del Ej. Virginias de un volumen de 2,000 ml, se le agregó la dosis obtenida como la ideal para remover la cantidad de Arsénico suficiente para que se cumpla la Norma, que fue de 12 mg/L. Esta muestra se mantuvo en agitación, mientras que un equipo de bombeo la conducía a la parte superior del filtro para su tratamiento en el lecho de arena.

Mientras tanto, se realizaba un muestreo de un volumen de 100 ml, a estas muestras se les realizaron análisis de Concentración de Arsénico y de Hierro.

Los 2,000 ml se filtraron en 140 min, como el área que se tiene es de  $5.07 \text{ cm}^2$ , la razón de filtración fue de  $2.82 \text{ ml/min}\cdot\text{cm}^2$  ( $0.69 \text{ gal/min}\cdot\text{ft}^2$ ).



**Gráfico No. 28 Regulación del flujo. Agitación. Bombeo. Filtración**

Al cumplirse los 120 min de la filtración, se podía observar una pequeña capa rojiza de Cloruro Férrico, sobre el lecho filtrante.



**Gráfico No. 29 Capa rojiza sobre el lecho filtrante.**

#### 4.7.1 RESULTADOS DE LA TRATABILIDAD

t, min	Arsénico, mg/L	Fierro, mg/L
0	0.007	0.186
15	0.010	0.113
30	0.013	0.095
45	0.018	0.091
60	0.019	0.104
80	0.018	0.113
100	0.019	0.122
120	0.018	0.136
140	0.021	0.158

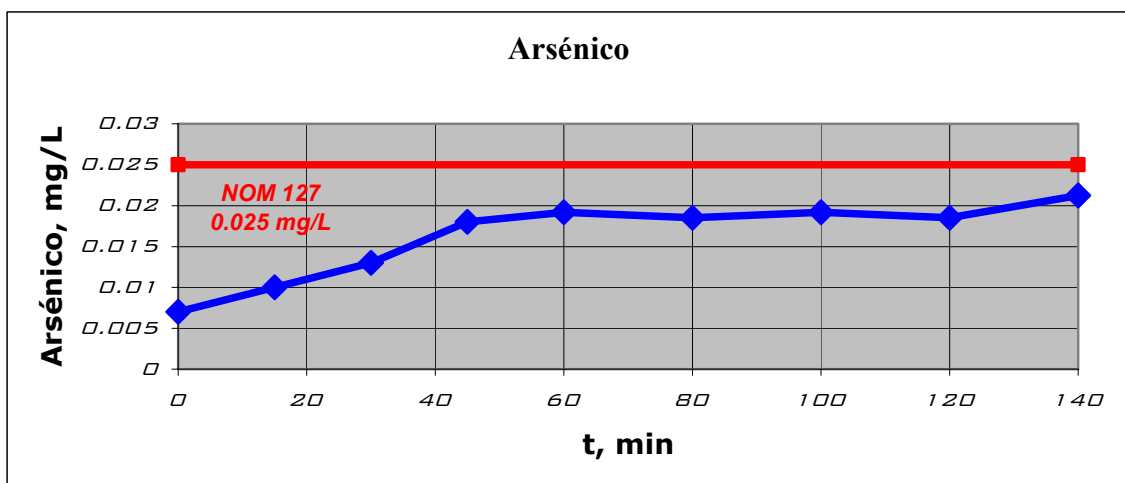


Gráfico No. 30 Concentración de Arsénico después de haberse tratado (coagulación, filtración) durante un periodo de 140 min.

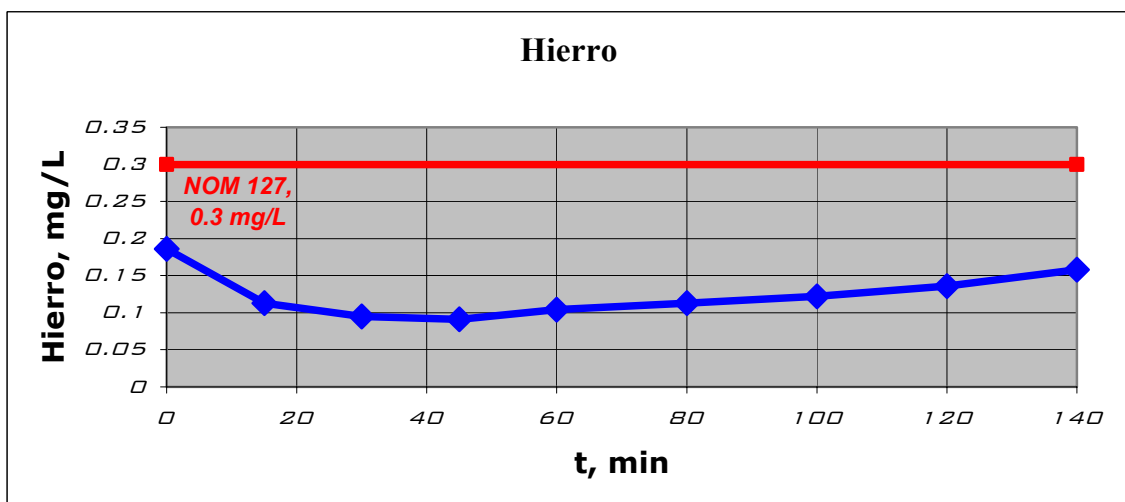


Gráfico No. 31 Concentración de Hierro después de haberse tratado (coagulación, filtración) durante un periodo de 140 min.

## 4.7.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD

La concentración de Arsénico promedio durante la totalidad del periodo filtrado fue de 0.016 mg/L, ya que la concentración inicial era de 0.182 mg/L, la remoción fue del 91%, ésta es suficiente para cumplir con la Norma correspondiente.

En cuanto al Hierro, la muestra del Ej. Virginias tiene una concentración inicial de 0.072 mg/L, con la adición del Cloruro Férrico, aumenta a 0.119 mg/L, este incremento corresponde al 65 %, sin embargo, no se considera ningún riesgo, ya que aún se encuentra por debajo del límite máximo permisible, que es de 0.300 mg/L.

En la gráfica se observa que al inicio del muestreo el Hierro tiene una concentración mayor, ésta hasta el minuto 30, a una concentración de 0.091 mg/L, y posteriormente asciende, con una pendiente baja, esto puede deberse a que en el filtro se encontraba muestra anterior y ésta fue la primera en salir del mismo.

Este mismo comportamiento se tiene también en el Arsénico, solo que inverso, lo cual es lógico y es lo que se ha venido observando en las pruebas anteriores. A mayor dosis de Cloruro Férrico se obtiene una mayor remoción del Arsénico y el Hierro remanente es mayor.

Aún así, la pendiente de ambas gráficas, es positiva, lo cual nos indica el momento en el que se requerirá el retrolavado, para este filtro, tomando en cuenta tanto el Arsénico como el Hierro, que son los parámetros mas críticos para el estudio. El retrolavado será necesario aproximadamente a los 340 minutos, que es cuando se pronostica, a juzgar por el comportamiento de la gráfica que se llegará al Límite máximo permisible de Hierro; para el límite del Arsénico, se llegará a los 390 min.

## 5. PLANTA DE TRATAMIENTO

### 5.1 DISEÑO

Parámetros de diseño:

- Se considera la máxima concentración de Arsénico encontrada en el muestreo, que fue de 0.264 mg/L.
- Dosis requerida: 24 mg/L
- Flujo de diseño 100Lps. Se considera flujo modular.
- Solución de Cloruro Férrico al 20%
- Jornada de trabajo, 8 hr.
- Carga de superficie para tanque de sedimentación,  $20m^3/m^2 \cdot d$

Requerimientos máximos para tratar los 100 Lps

- Tolva pesadora

$$Qm = \frac{100L}{s} \times \frac{24mg}{L} \times \frac{1kg}{10^6 mg} \times \frac{86,400s}{1d} = 207.36 \text{ kg/d}$$

- Tanque de preparación

$$Q = \frac{24mg}{L} \times \frac{ml}{200mg} \times \frac{100L}{s} \times \frac{60s}{min} = 720 \text{ ml/min}$$

$$V = \frac{720ml}{min} \times \frac{60min}{hr} \times 8hr \times \frac{m^3}{10^6 ml} = 0.34m^3$$



## 4.7.2. COMENTARIOS A LA TRATABILIDAD

La concentración de Arsénico promedio durante la totalidad del periodo filtrado fue de 0.016 mg/L, ya que la concentración inicial era de 0.182 mg/L, la remoción fue del 91%, ésta es suficiente para cumplir con la Norma correspondiente.

En cuanto al Hierro, la muestra del Ej. Virginias tiene una concentración inicial de 0.072 mg/L, con la adición del Cloruro Férrico, aumenta a 0.119 mg/L, este incremento corresponde al 65 %, sin embargo, no se considera ningún riesgo, ya que aún se encuentra por debajo del límite máximo permisible, que es de 0.300 mg/L.

En la gráfica se observa que al inicio del muestreo el Hierro tiene una concentración mayor, ésta hasta el minuto 30, a una concentración de 0.091 mg/L, y posteriormente asciende, con una pendiente baja, esto puede deberse a que en el filtro se encontraba muestra anterior y ésta fue la primera en salir del mismo.

Este mismo comportamiento se tiene también en el Arsénico, solo que inverso, lo cual es lógico y es lo que se ha venido observando en las pruebas anteriores. A mayor dosis de Cloruro Férrico se obtiene una mayor remoción del Arsénico y el Hierro remanente es mayor.

Aún así, la pendiente de ambas gráficas, es positiva, lo cual nos indica el momento en el que se requerirá el retrolavado, para este filtro, tomando en cuenta tanto el Arsénico como el Hierro, que son los parámetros mas críticos para el estudio. El retrolavado será necesario aproximadamente a los 340 minutos, que es cuando se pronostica, a juzgar por el comportamiento de la gráfica que se llegará al Límite máximo permisible de Hierro; para el límite del Arsénico, se llegará a los 390 min.

## 5. PLANTA DE TRATAMIENTO

### 5.1 DISEÑO

Parámetros de diseño:

- Se considera la máxima concentración de Arsénico encontrada en el muestreo, que fue de 0.264 mg/L.
- Dosis requerida: 24 mg/L
- Flujo de diseño 100Lps. Se considera flujo modular.
- Solución de Cloruro Férrico al 20%
- Jornada de trabajo, 8 hr.
- Carga de superficie para tanque de sedimentación,  $20m^3/m^2 \cdot d$

Requerimientos máximos para tratar los 100 Lps

- Tolva pesadora

$$Qm = \frac{100L}{s} \times \frac{24mg}{L} \times \frac{1kg}{10^6 mg} \times \frac{86,400s}{1d} = 207.36 \text{ kg/d}$$

- Tanque de preparación

$$Q = \frac{24mg}{L} \times \frac{ml}{200mg} \times \frac{100L}{s} \times \frac{60s}{min} = 720 \text{ ml/min}$$

$$V = \frac{720ml}{min} \times \frac{60min}{hr} \times 8hr \times \frac{m^3}{10^6 ml} = 0.34m^3$$

- Tanque de precipitación

$$V = \frac{100L}{s} \times 20 \text{ min} \times \frac{60s}{\text{min}} \times \frac{m^3}{1,000L} = 120m^3$$

$$A = \frac{100L}{s} \times \frac{m^2 \cdot d}{20m^3} \times \frac{86,400s}{d} \times \frac{m^3}{1,000L} = 432m^2$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \times 432m^2}{\pi}} = 23.5m = 76.9ft$$

- Filtro

$$\frac{100L}{s} \times \frac{gal}{3.78L} \times \frac{60s}{\text{min}} \times \frac{\text{min} \cdot ft^2}{1gal} = 1585.2ft^2 = 148m^2$$

## 5.2 DIAGRAMA DE FLUJO

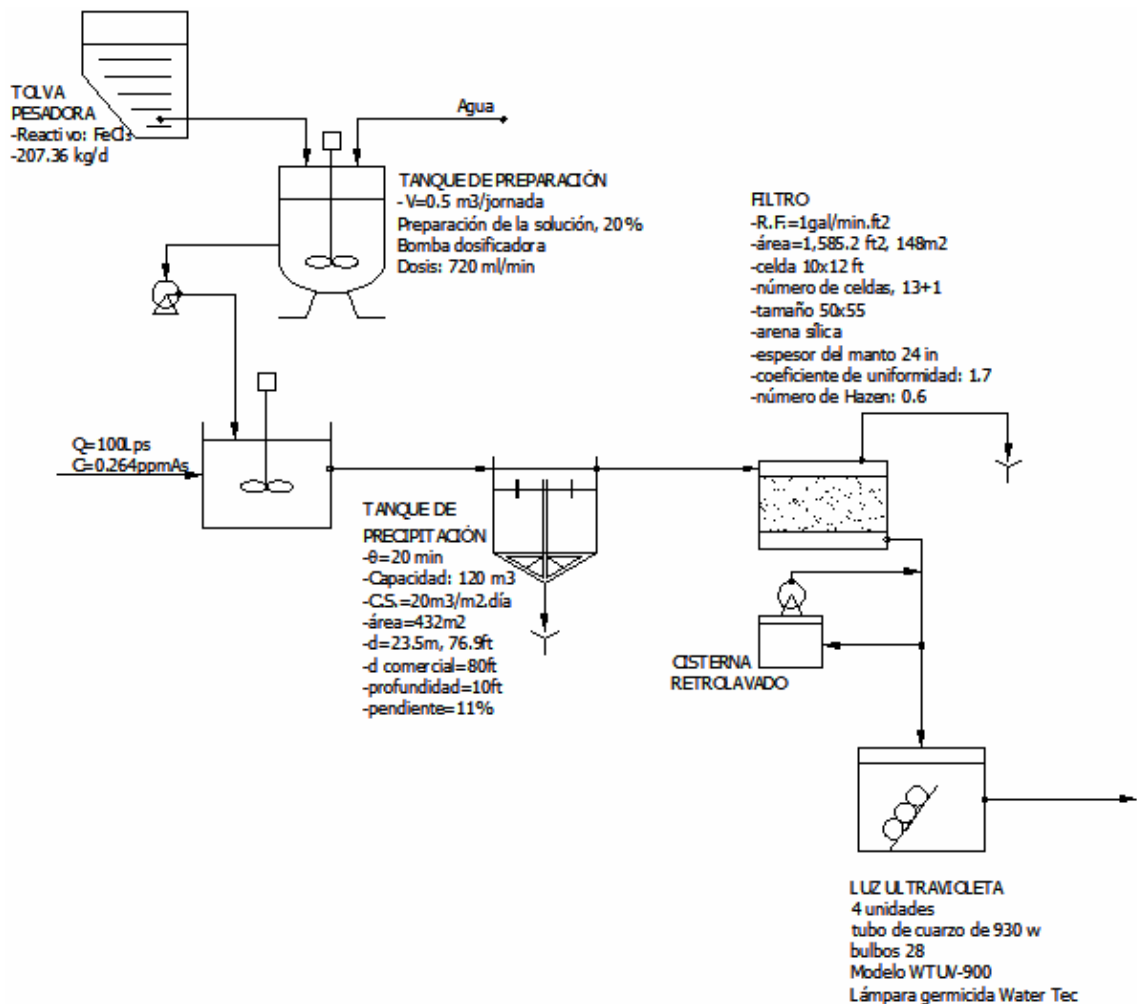


Gráfico No. 32 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de agua potable

### 5.3 UNIDADES DE TRATAMIENTO

- Tolva pesadora. Equipo para dosificar automáticamente la cantidad de Cloruro Férrico requerida, que es de 207.36 kg/d, que para un turno de 8 horas, equivalen a 69.12 kg.
- Tanque de preparación. Con una capacidad de 0.5 m<sup>3</sup>, en este tanque se realiza la mezcla del Cloruro Férrico con el agua para obtener la solución de Cloruro Férrico al 20% que se aplicará al agua a tratar.
- Tanque de agitación, coagulación. Se realiza la aplicación de la solución de Cloruro Férrico al agua procurándose una completa agitación, con un tiempo de residencia de 20 min, y una capacidad de 120 m<sup>3</sup>.
- Tanque de precipitación. Para una carga se superficie de 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, se requiere de un tanque circular con 76.9 pies, ajustándose a un diámetro comercial de 80 pies, una profundidad de 10 pies, con una pendiente en el fondo del 11%
- Filtro. Se propone un filtro de arena sílica para la remoción de los sólidos suspendidos en el agua y de esta forma obtener una mayor remoción del Arsénico y del Hierro aplicado. Se requiere de una razón de filtración de 1 gal/min·ft<sup>2</sup>.
- Cisterna de retrolavado. Se tendrá un tanque de almacenamiento de la misma agua tratada, para utilizarse en el retrolavado.
- Luz ultravioleta. Las lámparas de luz ultravioleta proporcionan la desinfección requerida para destruir microorganismos, con mínimo mantenimiento y costos de operación, no requiere productos químicos ni grandes tanques de contacto.

## 6. CONCLUSIONES

Es posible el uso de una tecnología de bajo costo, tanto en su instalación como en su mantenimiento, para la remoción del Arsénico del agua extraída de pozo de la Comarca Lagunera.

Esta tecnología se logra, mediante el uso de sales de hierro, en particular, del Cloruro férrico; con otras sales, como el sulfato ferroso y el sulfato férrico no se logra una remoción considerable.

Un pH ácido del agua no favoreció el obtener un agua con menor concentración de Arsénico, por lo tanto resulta innecesario adicionar ácido al agua para lograr una mayor eficiencia de remoción.

El adicionarle Cloruro Férrico y posteriormente Filtrar, no altera la muestra en gran medida, ya que los parámetros de calidad de agua, se mantienen constantes. El pH, la alcalinidad y la conductividad no varían, los cloruros sí aumentan un porcentaje considerable de lo que se tenía originalmente, sin embargo, aún se encuentra muy por debajo de la norma.

Es importante considerar al adicionarle Cloruro Férrico, la concentración de Hierro total, ya que es indispensable no dejar una cantidad remanente que no cumpla con la Norma.

En la siguiente tabla se muestra la dosis requerida que remueve la cantidad suficiente de Arsénico para que concentración al final del tratamiento se encuentre por debajo de la Norma, 0.020 mg/L; dependiendo de la concentración inicial; además se incluye el porcentaje de eficiencia y la concentración de Hierro remanente.

Muestra	As. Inicial, (mg/L)	Dosis, (mg/L)	As. Final, (mg/L)	Remoción, %
El porvenir	0.264	22.63	0.020	92.42
Ej. Virginias	0.182	11.18	0.020	89.01
Caballo Blanco	0.050	3.00	0.020	60.00

Es importante tomar en cuenta que cada dosis corresponde a una muestra en particular, y para aplicarlo a otras aguas diferentes se requiere de un estudio previo, con la muestra de agua a tratar, e incluso variando las condiciones del tratamiento para acercarse a las reales.

Otra consideración importante es que en la presente investigación solo se tomaron en cuenta los parámetros que podrían afectar a la coagulación o podrían variar de tal forma que disminuya la calidad del agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección del Medio Ambiente. 2002. Arsénico en el Agua para Beber. [www.epa.gov/safewater/arsenic.html](http://www.epa.gov/safewater/arsenic.html)
- Agencia de Protección del Medio Ambiente. Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water. [www.epa.gov/safewater/ars/techcosts.pdf](http://www.epa.gov/safewater/ars/techcosts.pdf)
- Arnijos, Efraín. 2000. Agencia Interamericana para la Cooperación y el desarrollo. "Tecnologías económicas para la desinfección y descontaminación de aguas". <http://www.iacd.oas.org/>
- Arnijos, Efraín. 2000. Asociación Argentina de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (AIDIS ARGENTINA). Arsénico: ¿cuál debe ser el límite?. <http://www.aidisar.org/>
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. "Standard Methods, for the examination of water and wastewater" ISBN: 087553-078-8
- Avery, Desmond. 2002. Organización Mundial de la Salud. "Un estudio sobre el Arsénico brinda la oportunidad de mitigar la crisis de abastecimiento de agua en Bangladesh" <http://www.who.int/bulletin/releases/2002/09/es/>
- Blesa, A. y Litter, Martha. SETAC Globe, Sociedad de Toxicología y Química Ambiental, Vol. 5, Número 2. 2004. "Low-Cost Technologies for Desinfection and Decontamination of Water in Rural Zones of Latin America, an OAS-Funded Project".
- Castro de Esparza, María Luisa. 1999. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, CEPIS. "Remoción de Arsénico a nivel domiciliario" <http://www.cepis.ops-oms.org/>
- Castro de Esparza, María Luisa. 2005. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, CEPIS. "Remoción de Arsénico en el agua de bebida y biorremediación de suelos" <http://www.cepis.ops-oms.org/>
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, CEPIS. 2003. "Remoción de Arsénico asistida por luz solar en comunidades rurales de América Latina, " <http://www.cepis.ops-oms.org/>
- Centro Regional de Información sobre desastres, América Latina y El Caribe, CRID. "Arsénico, normativas y efectos en la salud" [http://www.crid.or.cr/crid/CD\\_Agua/pdf/spa/doc14586/doc14586.pdf](http://www.crid.or.cr/crid/CD_Agua/pdf/spa/doc14586/doc14586.pdf)
- Comisión de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable, México, CESPEDS. 1998. "Eficiencia y uso sustentable del agua en México" <http://www.cce.org.mx/céspedes>
- Comisión Nacional de Agua, CNA. "Compendio Básico del Agua en México, 2001"
- Departamento de Salud Pública y Medio Ambiente de Colorado, Sección de Epidemiología del Medio Ambiente. Recurso de Colorado para la Evaluación y Protección del Agua. [www.cdphe.state.co.us/wq/sw/swaphom.html](http://www.cdphe.state.co.us/wq/sw/swaphom.html)
- Díaz-Barriga, Fernando. 2005. Organización mundial de la salud. "Unidad pediátrica ambiental de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí" <http://www.who.int/heca/infomaterials/hecanetesfr/en/index.html>
- Drever, James I. "The Geochemistry of Natural Waters" ISBN: 0-13-272790-0
- Enríquez Sánchez, Miguel. 1993. "Variabilidad espacial del hidroarsenicismo en la región lagunera".
- Frankenberger, Jr. William T. "Environmental chemistry of arsenic" ISBN: 0-8247-0676-5
- Integrated Risk Information System. Arsenic, inorganic (CASRN 7440-38-2). [www.epa.gov/iris/quickview.cfm?substance\\_nmbr=0278](http://www.epa.gov/iris/quickview.cfm?substance_nmbr=0278)
- Lujan, Juan Carlos. 2001. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, CEPIS. "Un hidrogel de hidróxido de aluminio para eliminar el arsénico del agua" <http://www.cepis.ops-oms.org/>
- Morshed, Syed Marghub. SOS-arsenic.net. 2000. "Contaminación por Arsénico" <http://www.sos-arsenic.net/espanol/>
- Nriagu, Jerome O. "Arsenic in the environment, Part I: cycling and characterization" ISBN: 0-471-57929-7
- Organización mundial de la salud, OMS. 1998. "La salud en las Américas" [www.paho.org/spanish/HIA1998/SaludVol2.pdf](http://www.paho.org/spanish/HIA1998/SaludVol2.pdf)
- Ramírez Cuevas, Jesús. 2002. La Jornada. Universidad Nacional de México.

- Rodríguez Pineda, J. Alfredo; Reyes Cortés, Ignacio; Hernández, Oscar M; y Muñoz Calos. 2004. Centro de Investigaciones Sobre Sequía, Instituto de Ecología, A.C. Universidad Autónoma de Chihuahua. "Caracterización hidrogeoquímica de la contaminación de agua subterránea por Arsénico en Chihuahua" <http://www.sequia.edu.mx/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. 2000. "Programa Nacional Hidráulico, 2001-2006"
- Secretaría de Salud. Modificación a la Norma Oficial Mexicana 127. <http://www.salud.gob.mx/>
- Simeonova, Verguinia Petkova. 2000. Water Supply, Vol 18
- Weber, Walter J. 1972. " Physicochemical processes for water quality control" ISBN: 0-471-92435-0

## APÉNDICE

### MÉTODOS NORMALIZADOS PARA LOS ANÁLISIS REALIZADOS

#### i. ALCALINIDAD

##### Método: Titulación potenciométrica a pH de punto final

###### Discusión general

- Principio:* Los iones hidróxilo presentes en una muestra como resultado de la disociación o hidrólisis de los solutos reaccionan con las adiciones de ácido estándar. Por lo tanto la alcalinidad depende del pH de punto final utilizado.
- Puntos finales:* Como punto de equivalencia de las concentraciones de alcalinidad correspondientes en mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , se sugiere un valor de pH equivalente a 4.5.
- Interferencia:* Los jabones, las materias oleosas y los sólidos en suspensión o precipitados pueden recubrir el electrodo de vidrio y causar una respuesta retardada. Déjese un tiempo adicional entre las adiciones del reactivo para permitir que el electrodo recupere su equilibrio. No se debe filtrar, diluir, concentrar o alterar la muestra.

###### Reactivo

- Ácido sulfúrico estándar, 0.02N:* Tome 28 de ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado aforado a 1.00 l, para preparar  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1N. De la solución anterior tome 20 ml, aforado a 1.00 l para preparar  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.02N.

###### Procedimiento

- Los electrodos y el vaso de titulación se enjuagan con agua destilada y se drenan.
- Aplíquese una muestra de 50 ml o una dilución.
- Titúlese a pH de punto final sin registrar valores intermedios y sin provoca retrasos indebidos. A medida que se alcanza el punto final, realícense adiciones de ácido mas pequeñas, comprobando que el pH alcance el equilibrio antes de añadir mas reactivo.

###### Cálculos

Alcalinidad, mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  =  $A \times N \times 50,000/\text{ml}$  de muestra

A = ml utilizados de ácido estándar, y

B = normalidad del ácido estándar

#### ii. ARSÉNICO

##### Método: Dietilditiocarbamato de plata

###### Discusión general

- Principio:* El arsénico inorgánico se reduce a arsina,  $\text{AsH}_3$ , utilizando solución ácida de zinc en un generador Gutzeit. Se hace pasar entonces la arsina a un frasco lavador que contiene lana de vidrio impregnada en solución de acetato de plomo, a un tubo de absorción que contiene dietilditiocarbamato de plata disuelto en piridina. En el tubo de absorción, el arsénico reacciona con la sal de plata, formando un complejo rojo soluble adecuado para medida fotométrica.
- Interferencia:* Aunque ciertos metales –cromo, cobalto, cobre, mercurio, molibdeno, níquel, platino y plata– interfieren en la generación de arsina, las concentraciones de estos metales, que normalmente se encuentran en el agua, no interfieren significativamente.
- Cantidad mínima detectable:*  $1\mu\text{g As}$ .

## Instrumental

- a) Generador de arsina y tubo de absorción
- b) Equipo fotométrico:
  - a. Espectrofotómetro para usarlo a 535nm con células de 1cm.
  - b. Fotómetro de filtro, con filtro verde que tiene una transmitancia máxima e el intervalo de 530 a 540, con células de 1cm.

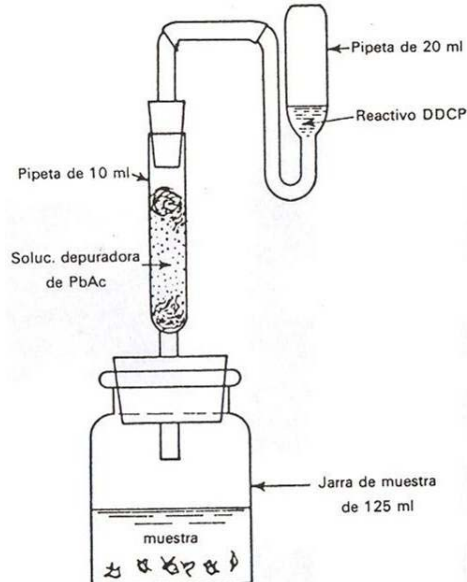


Figura 3500-As:1. Generador de arsina y ensamblaje del absorbedor.

## Reactivos

- a) *Ácido clorhídrico*, HCl concentrado
- b) *Solución de yoduro potásico*: disuélvase 15 g de KI en 100 ml de agua destilada. Consérvese en frasco topacio.
- c) *Reactivo cloruro estañoso*: disuélvase 40 g de  $\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  libre de arsénico en 100 ml de HCl concentrado
- d) *Solución de acetato de plomo*: disuélvase 10 g de  $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  en 100 ml de agua destilada.
- e) *Reactivo dietilditiocarbamato de plata*: disuélvase 1g de  $\text{AgSCSN}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$  en 200 ml de piridina. Consérvese en frasco topacio.
- f) *Zinc*, 20 a 30 mallas, libre de arsénico.

## Procedimiento

- a) *Tratamiento de la muestra*: Llévase con la pipeta 35.0 ml de muestra a un frasco generador limpio. Añádanse sucesivamente, cuidando de mezclar después de cada adición, 5 ml de HCl concentrado, 2ml de solución de KI y 0.40 ml de reactivo  $\text{SnCl}_2$ . Déjese 15 minutos para que se reduzca el arsénico al estado trivalente
- b) *Preparación del frasco lavador y del absorbedor*: Impréguese la lana de vidrio del frasco lavador con la solución de acetato de plomo. No humedecer demasiado para que el agua no rezume dentro de la solución de reactivo. Llévase con la pipeta 4.00 ml del reactivo dietilditiocarbamato de plata al tubo absorbedor.
- c) *Generación y medida de arsina*: Añádanse 3 g de zinc al generador y conéctese la estructura de lavador-absorbedor inmediatamente. Compruébese que todas las uniones están herméticamente ajustadas.



Déjese 30 minutos para un desprendimiento completo de la arsina. Caliéntese ligeramente el generador para asegurarse de que se ha desprendido toda la arsina. Viértase la solución directamente desde el absorbedor a una célula de 1 cm y médase la absorbancia a 535 nm utilizando el blanco de reactivo como referencia.

- d) *Preparación de la curva estándar*: Trátense porciones de solución patrón que contienen 0, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 mg/l de arsénico. Trácese el gráfico de absorbancia en función de la concentración de arsénico en el patrón.

#### Cálculos

mg As/l =  $\mu\text{g As}$  (en 4.00 ml de volumen final)/ml de muestra

### iii. CLORUROS

#### **Método: Argentométrico**

##### Discusión general

- a) *Principio*: En una solución neutra o ligeramente alcalina, el cromato potásico puede indicar el punto final de la titulación de cloruros con nitrato de plata. Se precipita cloruro de plata cuantitativamente antes de formarse el cromato de plata rojo.
- b) *Interferencia*: No interfieren las sustancias en las cantidades encontradas normalmente en el agua potable.

##### Instrumental

- a) *Erlenmeyer*, 250ml  
b) *Bureta*, 50ml

##### Reactivos

- a) *Solución indicadora de cromato potásico*: Disuélvanse 50 gr de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  en un poco de agua destilada. Añádase solución de  $\text{AgNO}_3$  hasta que se forme un claro precipitado rojo. Déjese reposar 12 horas, fíltrese y dilúyase a 1,000 ml con agua destilada.
- b) *Titulante de nitrato de plata patrón, 0.0141 M (0.0141N)*: Disuélvanse 2.395 g de  $\text{AgNO}_3$  en agua destilada y dilúyase a 1,000 ml. Estandarícese frente a  $\text{NaCl}$  por el procedimiento de titulación; 1.00ml = 500  $\mu\text{g Cl}^-$ . Consérvese en frasco topacio.
- c) *Cloruro de sodio patrón, 0.0141 M (0.0141N)*: Disuélvanse 824.0 mg de  $\text{NaCl}$  (secado a 140 °C) en agua destilada y dilúyase a 1,000 ml; 1.00ml = 500  $\mu\text{g Cl}^-$ .

##### Procedimiento

- a) *Preparación de la muestra*: Utilícese una muestra de 100 ml o una porción adecuada diluida a 100 ml.
- b) *Titulación*: Añádase 1.0 ml de solución indicadora de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ . Titúlese con  $\text{AgNO}_3$  patrón hasta un punto final amarillo rosado, con un criterio constante relativo al punto final. El volumen requerido será "A".
- c) *Titulación de blanco*: Realice el paso anterior a un blanco o testigo. El volumen requerido será "B".
- d) *Titulación para Normalidad*: Realice el paso anterior a una porción de 5 ml de  $\text{NaCl}$  0.0141N. El volumen requerido será "N".

#### Cálculos

Normalidad,  $N = (5 \text{ ml de NaCl} / N) \times 0.0141N$

mg  $\text{Cl}^-$ /l =  $(A - B) \times \text{Normalidad} \times 35,450 / \text{ml de muestra}$

A = ml de titulación en muestra.

B = ml de titulación en blanco.

#### iv. DUREZA POR CALCIO

##### Método: Titulométrico de EDTA

###### Discusión general

- Principio:* Si se añade ácido etilendiaminotetraacético y sus sales de sodio (abreviatura EDTA) como reactivo de titulación, los iones calcio y magnesio formaran un complejo, y, cuando todos estos iones estén incluidos en dicho complejo, la solución cambiará del rojo vino al azul, señalando el punto final de la titulación.

###### Reactivos

- Solución amortiguadora:* Hidróxido de sodio, NaOH, 1N
- Indicador:* Azul de hidroxinaftol.
- Titulante EDTA estándar, 0.1M:* Se pesan 3.723 g de etilendiaminotetracetato disódico trihidrato, (EDTA), a continuación se disuelve en agua destilada hasta 1l.

###### Procedimiento

- Selección de la muestra:* Seleccíonese un volumen de muestra que requiera menos de 15 ml de reactivo EDTA y realícese la titulación en cinco minutos, medidos a partir del momento de la adición de la solución amortiguadora.
- Preparación de la muestra:* Dilúyase la muestra en 50 ml de agua destilada.
- Preparación de la muestra:* Añádase 1 ml de la solución amortiguadora, NaOH.
- Aplicación de indicador:* Añádase de 100 mg del indicador, azul de hidroxinaftol, cantidad suficiente para teñir a color rosa.
- Titulación:* Titúlese suavemente con la solución EDTA, agitando continuamente, hasta que desaparezcan los últimos matices rojizos. Añádanse las últimas gotas con intervalos de 3-5 segundos. En el punto final la solución suele ser azul.

###### Cálculo

Dureza (EDTA) como mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l} = A \times B \times 1,000 / \text{ml muestra}$

A = ml de titulación para la muestra, y

B = mg  $\text{CaCO}_3$  equivalente a 1.0 l de titulante EDTA.

#### v. HIERRO TOTAL

##### Método: de fenantrolina

###### Discusión general

- Principio.* Se disuelve el hierro, se reduce al estado ferroso por ebullición con ácido e hidroxilamina y se trata con 1,10-fenantrolina a pH de 3.2 a 3.3. Se forma un complejo rojo-naranja, con intensidad proporcional a la concentración de hierro total, es independiente del pH entre 3 y 9. Este patrón de color es estable durante al menos 6 mese.
- Interferencia.* Entre las sustancias que interfieren están los oxidantes fuertes, cianuro, nitrito, y fosfatos, cromo, zinc (en concentraciones 10 veces superior a la del hierro), cobalto y cobre (mayor a 5 mg/l) y níquel (mayor a 2 mg/l).
- Concentración mínima detectable.* 10  $\mu\text{g/L}$

###### Instrumental

- Espectrofotómetro,* para utilizarlo a 510nm con células de 1cm

- b) *Material de vidrio lavado con ácido*: Lávese todo el material de vidrio con ácido clorhídrico concentrado (HCl) y enjuáguese con agua destilada antes de utilizarlo, con objeto de eliminar depósitos de óxido de hierro.

#### Reactivos

- a) *Ácido clorhídrico*, HCl concentrado (HCl) con menos de 0.00005 % de hierro.
- b) *Solución de hidroxilamina*. Disuélvase 10 g de  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  en 100 ml de agua destilada.
- c) *Solución tampón de acetato de amonio*: disuélvase 250 g de  $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$  en 150 ml de agua destilada. Añádase 700 ml de ácido acético concentrado (glacial). Como incluso el  $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$  de buena calidad contiene una cantidad significativa de hierro, prepárense nuevos patrones de referencia con cada preparación del tampón.
- d) *Solución de fenantrolina*. Disuélvase 100 mg de monohidrato de 1,10-fenantrolina,  $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ , en 100 ml de agua destilada por agitación y calentamiento a 80°C. No hervir. Descártese la solución si se oscurece. El calentamiento es innecesario si se añaden al agua 2 gotas de HCl concentrado.
- e) *Solución de hierro de reserva*. Utilícese alambre de hierro electrolítico o alambre de hierro para estandarización en la preparación de la solución. Si es necesario, límpiase el alambre con papel de lija fino al objeto de eliminar cualquier capa de óxido y producir una superficie brillante. Pése 200 mg de alambre e introdúzcanse en un matraz volumétrico de 1,000 ml. Disuélvase en 20 ml de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 6N y dilúyase con agua destilada hasta la señal. 1.00 ml = 200  $\mu\text{g}$  Fe.

#### Procedimiento

- a) *Preparación de patrones*. Preparar solución estándar con 5.00 ml de Solución de reserva aforados a 1,000 ml de agua destilada. Mídase 10, 20, 30, 40 y 50 ml de solución estándar y colóquense en matraces (realícese también una prueba de testigo). Añádase 1.00 de hidroxilamina y 1.00 ml de acetato de amonio. Afore a 75 ml con agua destilada. Agréguese 10 ml de fenantrolina y afore a 100 ml con agua destilada. Mézclese vigorosamente. Espere 10 minutos antes de medir su absorbancia, para que el color se desarrolle al máximo.
- b) Mézclese cuidadosamente la muestra y méndase 50.0 ml en un erlenmeyer de 125 ml. Añádase 2.00 ml de HCl concentrado y 1.00 de solución de hidroxilamina. Añádase unas bolas de vidrio y caliéntese a ebullición. Para asegurar la disolución de todo el hierro, continúese la ebullición hasta que el volumen se reduzca a 15-20 ml. Enfríese hasta temperatura ambiente y pásese a un matraz volumétrico de 50 ó 100 ml. Añádase 10.00 de acetato de amonio y 2.00 ml de solución de fenantrolina y dilúyase con agua destilada hasta la señal. Mézclese cuidadosamente y déjese al menos durante 10 a 15 minutos para que se desarrolle el color al máximo.
- c) *Preparación de la curva estándar*: Trátense porciones de solución patrón que contienen 0, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 mg/l de hierro. Trácese el gráfico de absorbancia en función de la concentración de hierro.

## **vi. NITRÓGENO AMONICAL**

### **Método: de nesslerización**

Utilícese la nesslerización directa únicamente para aguas potables purificadas, agua natural y diluyentes residuales muy depurados, todos con poco color y concentraciones de  $\text{NH}_3\text{-N}$  superiores a 20  $\mu\text{g/l}$ .

El color amarillo característico de la concentración baja de nitrógeno amoniacal se puede medir con sensibilidad aceptable.

Un reactivo Nessler preparado cuidadosamente puede responder, en condiciones óptimas, a cantidades de hasta 1 $\mu\text{g}$   $\text{NH}_3\text{-N}/50$  ml.

#### Instrumental

- a) *Equipo colorimétrico.*
- b) *Tubos Nessler, de 50 ml y forma alta.*

#### Reactivo

- a) *Reactivo Nessler: Disuélvanse 100 g de HgI<sub>2</sub> y 70 g de KI en una pequeña cantidad de agua y añádase esta mezcla lentamente, con agitación, a una solución fría de 160 g NaOH en 500 ml de agua. Dilúyase a 1 l. Consérvese en material de vidrio de borosilicato con tapón de goma y protegido de la luz solar, para mantener la estabilidad del reactivo durante un año, en condiciones normales de laboratorio.*

#### Procedimiento

- a) *Tratamiento de la muestra: Aplíquese 3 gotas de Reactivo Nessler en 5 ml de muestra.*
- b) *Determinación de NH<sub>3</sub>-N: Compare con el disco colorímetro. Gire hasta obtener la misma tonalidad de amarillo y observe la concentración indicada en la escala.*

### **vii. POTENCIAL HIDRÓGENO**

#### **Método: electrométrico**

#### Discusión general

- a) *Principio: El principio básico de la determinación electrométrica de pH es la medida de la actividad de los iones hidrógeno por mediciones potenciométricas utilizando un electrodo patrón de hidrógeno. El electrodo de hidrógeno consiste en un electrodo de vidrio.*
- b) *Interferencias: El electrodo de vidrio está relativamente libre de interferencias debidas al color, turbidez, material coloidal, oxidantes, reductores o salinidad elevada.*

#### Instrumental

- a) *Medidor de pH: que conste de un potenciómetro.*
- b) *Vasos de precipitado.*

#### Procedimiento

- a) *Calibrado del aparato: Síganse las instrucciones del fabricante.*
- b) *Análisis de la muestra: Establézcase el equilibrio entre electrodos y muestra agitando ésta para asegurar su homogeneidad.*

### **viii. TEMPERATURA**

#### **Método: de campo**

Normalmente, las medidas de temperatura pueden realizarse con cualquier termómetro Celsius de mercurio, que, como mínimo, deberá tener una escala con marcas cada 0.1 °C sobre el tubo capilar y una capacidad térmica mínima que permita un equilibrado rápido.

### **ix. SÓLIDOS**

#### Discusión general

- a) *Principio: Se evapora una muestra correctamente mezclada en una placa pesada y secada a peso constante en un horno a 103-105 °C. El aumento de peso sobre el de la placa vacía representa los sólidos.*
- b) *Interferencias: En el análisis de agua potable no se presentan interferencias.*

### Instrumental

- a) *Placas de evaporación*: cápsula de evaporación fabricada con porcelana.
- b) *Desecador*: provisto de un desecante que contiene un indicador colorimétrico de concentración de humedad.
- c) *Horno de secado*: para operaciones a 103-105 °C.
- d) *Balanza de análisis*: capaz de pesar hasta 0.1 mg

### Procedimiento

- a) *Preparación de la placa de evaporación*: Caliéntese la placa limpia a 103-105 °C durante una hora. Consérvese la placa en el desecador hasta que se necesite. Pesar inmediatamente antes de usar.
- b) *Análisis de la muestra*: Elíjase un volumen de muestra que proporcione un residuo entre 2.5 y 200 mg. Transfírase un volumen medido de muestra bien mezclada a la placa pesada previamente y evapórese hasta que se seque en un horno de secado. Enfriar la placa en desecador para equilibrar la temperatura y pesar.

### Cálculo

Mg de sólidos totales/l = (A-B)/vol de la muestra en ml

A = Peso de la cápsula después de la evaporación, gr

B = Peso de la cápsula antes de la aplicación de muestra., gr

## APÉNDICE

### MODIFICACIÓN A LA NOM 127 SSA, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO

**MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Salud.

MODIFICACION A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION.

JAVIER CASTELLANOS COUTIÑO, Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en los artículos 39 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 4o. y 69-H de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo; 13, apartado A) fracción I, 118, fracción II y 119, fracción II de la Ley General de Salud; 41, 43, 45, 46, fracción II, y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 28 y 34 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 214, fracción IV y 225 del Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios, y 7, fracciones V y XIX y 25, fracción IV del Reglamento Interior de la Secretaría de Salud, y

#### CONSIDERANDO

Que con fecha 16 de diciembre de 1999, en cumplimiento del acuerdo del Comité y de lo previsto en el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó en el **Diario Oficial de la Federación** el proyecto de la presente Norma Oficial Mexicana a efecto que dentro de los sesenta días naturales posteriores a dicha publicación, los interesados presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario.

Que con fecha 20 de junio de 2000, fueron publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** las respuestas a los comentarios recibidos por el mencionado Comité, en términos del artículo 47 fracción III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Que en atención a las anteriores consideraciones, contando con la aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, se expide la siguiente:

**MODIFICACION A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION**

#### INDICE

0. Introducción
  1. Objetivo y campo de aplicación
  2. Referencias
  3. Definiciones
  4. Límites permisibles de calidad del agua
  5. Tratamientos para la potabilización del agua
  6. Métodos de prueba
  7. Concordancia con normas internacionales y mexicanas
  8. Bibliografía
  9. Observancia de la Norma
  10. Vigencia
- 4. Límites permisibles de calidad del agua**

#### 4.1 Límites permisibles de características microbiológicas.

4.1.1 El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 1.

**TABLA 1**

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Ausencia o no detectables

4.1.2 Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes podrán establecer los agentes biológicos nocivos a la salud que se deban investigar.

4.1.3 Las unidades de medida deberán reportarse de acuerdo a la metodología empleada.

4.1.4 El agua abastecida por el sistema de distribución no debe contener *E. coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes en ninguna muestra de 100 ml. Los organismos coliformes totales no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml; en sistemas de abastecimiento de localidades con una población mayor de 50 000 habitantes; estos organismos deberán estar ausentes en el 95% de las muestras tomadas en un mismo sitio de la red de distribución, durante un periodo de doce meses de un mismo año.

#### 4.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

4.2.1 Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.

**TABLA 2**

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

#### 4.3 Límites permisibles de características químicas.

4.3.1 El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

**TABLA 3**

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0,20
<b>Arsénico (Nota 2)</b>	<b>0,05</b>
Bario	0,70
Cadmio	0,005
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250,00
Cobre	2,00
Cromo total	0,05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500,00
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fierro	0,30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1,50

Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:	
Benceno	10,00
Etilbenceno	300,00
Tolueno	700,00
Xileno (tres isómeros)	500,00
Manganeso	0,15
Mercurio	0,001
Nitratos (como N)	10,00
Nitritos (como N)	1,00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6,5-8,5
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0,03
Clordano (total de isómeros)	0,20
DDT (total de isómeros)	1,00
Gamma-HCH (lindano)	2,00
Hexaclorobenceno	1,00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0,03
Metoxicloro	20,00
2,4 – D	30,00
Plomo	0,01
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1000,00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	400,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,50
Trihalometanos totales	0,20
Yodo residual libre	0,2-0,5
Zinc	5,00

**Nota 1.** Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

**Nota 2.** El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente, de conformidad con la siguiente tabla de cumplimiento gradual:

**TABLA DE CUMPLIMIENTO GRADUAL**

Límite permisible mg/l	Año
0,045	2001
0,040	2002
0,035	2003
0,030	2004
<b>0,025</b>	<b>2005</b>

**4.3.2** En caso de que en el sistema de abastecimiento se utilicen para la desinfección del agua, métodos que no incluyan cloro o sus derivados, la autoridad sanitaria determinará los casos en que adicionalmente deberá dosificarse cloro al agua distribuida, para mantener la concentración de cloro residual libre dentro del límite permisible establecido en la Tabla 3 de esta Norma.

**4.4** Límites permisibles de características radiactivas.

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).



**TABLA 4**

<b>CARACTERISTICA</b>	<b>LIMITE PERMISIBLE Bq/l</b>
Radiactividad alfa global	0,56
Radiactividad beta global	1,85

## **5. Tratamientos para la potabilización del agua**

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe justificarse con estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes microbiológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua listados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4 de esta Norma.

### **5.1 Contaminación microbiológica.**

**5.1.1** Bacterias, helmintos, protozoarios y virus. Deben desinfectarse con cloro, compuestos de cloro, yodo<sup>1</sup>, ozono, luz ultravioleta; plata iónica o coloidal; coagulación-sedimentación-filtración; filtración en múltiples etapas.

### **5.2 Características físicas y organolépticas.**

**5.2.1** Color, olor, sabor y turbiedad.- Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado.

### **5.3 Constituyentes químicos.**

**5.3.1** Arsénico. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.

**5.3.2** Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.

**5.3.3** Cloruros. Intercambio iónico, ósmosis inversa o evaporación.

**5.3.4** Dureza. Ablandamiento químico o intercambio iónico.

**5.3.5** Fenoles o compuestos fenólicos. Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.

**5.3.6** Hierro y/o manganeso. Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

**5.3.7** Fluoruros. Alúmina activada, carbón de hueso u ósmosis inversa.

**5.3.8** Hidrocarburos aromáticos. Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.

**5.3.9** Mercurio. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado granular u ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l. Adsorción en carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 microgramos/l.

**5.3.10** Nitratos y nitritos. Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración.

**5.3.11** Nitrógeno amoniacal. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.

**5.3.12** pH (potencial de hidrógeno). Neutralización.

**5.3.13** Plaguicidas. Adsorción en carbón activado granular.

**5.3.14** Sodio. Intercambio iónico.

**5.3.15** Sólidos disueltos totales. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.

---

<sup>1</sup> El cumplimiento del límite permisible de yodo residual libre, es de observancia obligatoria para los responsables de los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, en los que se utilice yodo como método de desinfección. La aplicación de yodo como alternativa de desinfección, deberá ser aprobada por la autoridad sanitaria correspondiente.

**5.3.16** Sulfatos. Intercambio iónico u ósmosis inversa.

**5.3.17** Sustancias activas al azul de metileno. Adsorción en carbón activado.

**5.3.18** Trihalometanos. Oxidación con aireación u ozono y adsorción en carbón activado granular.

**5.3.19** Zinc. Evaporación o intercambio iónico.

**5.4** En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias especificadas o no especificadas en el apartado 4, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas, involucrados en la contingencia, deben coordinarse con la autoridad sanitaria competente, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

## **6. Métodos de prueba**

La selección de los métodos de prueba para la determinación de los parámetros definidos en esta Norma, es responsabilidad de los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, y serán aprobados por la Secretaría de Salud a través del área correspondiente. Deben establecerse en un Programa de Control de Calidad Analítica del Agua, y estar a disposición de la autoridad competente, cuando ésta lo solicite, para su evaluación correspondiente.

## **7. Concordancia con normas internacionales y nacionales**

Esta Norma Oficial Mexicana no es equivalente a ninguna norma internacional.

## **8. Bibliografía**

**8.1** Directrices Canadienses para la Calidad del Agua Potable. 6ta. edición. Ministerio de Salud. 1996.

**8.2** Desinfección del Agua. Oscar Cáceres López. Lima, Perú. Ministerio de Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1990.

**8.3** Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1985.

**8.4** Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1995.

**8.5** Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 2. Criterios relativos a la salud y otra información de base. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1987.

**8.6** Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas. Proyecto de Revisión. SECOFI. 1992.

**8.7** Guías para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1995.

**8.8** Guide to Selection of Water Treatment Processes. Carl L. Hamann Jr., P.E. J. Brock Mc. Ewen, P.E. Anthony G. Meyers, P.E.

**8.9** Ingeniería Ambiental. Revista No. 23. Año 7. 1994.

**8.10** Ingeniería Sanitaria Aplicada a la Salud Pública. Francisco Unda Opazo. UTEHA 1969.

**8.11** Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Gordon M. Fair, John C. Geyer, Daniel A. Okun. Limusa Wiley. 1971.

**8.12** Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano. Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupacional. Secretaría de Salud 1987.

**8.13** Importancia para la Salud Pública de los Indicadores Bacterianos que se Encuentran en el Agua Potable. Martin J. Allen. Organización Panamericana de la Salud. OMS. Lima Perú, 1996.

**8.14** Integrated Design of Water Treatment Facilities. Susumu Kawamura. John Willey and Sons, Inc. 1991.

**8.15** Manual de Normas de Calidad para Agua Potable. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1982.

**8.16** Manual de Normas Técnicas para el Proyecto de Plantas Potabilizadoras. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1979.

**8.17** Manual de Técnicas Analíticas del Laboratorio Nacional de Salud Pública. Secretaría de Salud.

**8.18** Método de Tecnología de Substrato Definida para el Conteo Simultáneo Rápido y Específico de los Coliformes Totales y la *Escherichia coli* del agua. Stephen C. Edberg, Martin J. Allen & Darrell B. Smith. Journal Association Official Analytical Chemists (Vol. 74 No. 3, 1991).

**8.19** Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-SSA1-1996 Vigilancia y evaluación del control de la calidad del agua para uso y consumo humano, distribuidas por sistemas de abastecimiento público.

**8.20** Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios. **Diario Oficial de la Federación**. 18 de enero de 1988.

**8.21** Regulaciones Nacionales Primarias del Agua Potable, Técnicas Analíticas: bacteria coliforme. Agencia de Protección Ambiental (USA). 1992.

**8.22** Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. IPS. International Programme on Chemical Safety. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1991.

**8.23** WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 1. Recommendations. World Health Organization. 1992.

**8.24** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th. Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 1995.

**8.25** WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information. Chapter 1: Microbiological Aspects. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1992.

## **9. Observancia de la Norma**

La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, el Gobierno del Distrito Federal, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

## **10. Vigencia**

La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor a los noventa días de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**.

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F., a 20 de octubre de 2000.- El Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, **Javier Castellanos Coutiño**.- Rúbrica.