



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y  
ARQUITECTURA ZACATENCO**



**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E  
INVESTIGACIÓN**

**PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR  
ARSENICO EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPÁN,  
HIDALGO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA  
AMBIENTAL**

**PRESENTA:**

**I.Q.ANA LILIA MALDONADO ARELLANO**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M.C. RICARDO CONTRERAS  
CONTRERAS**

**MÉXICO D.F. MAYO DE 2012**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de México D. F., siendo las 12:00 horas del día 27 del mes de enero del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A. – U. Z. para examinar la tesis titulada:

“Proceso de tratamiento utilizado para eliminar Arsénico en un pozo de agua ubicado en Zimapán, Hidalgo.”

Presentada por el alumno:

Maldonado  
Apellido paterno

Arellano  
Apellido materno

Ana Lilia  
Nombre(s)

Con registro: 

B	9	6	1	9	2	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISIÓN REVISORA**

Director(a) de tesis

M. en C. Ricardo Contreras Contreras

Dr. Jorge Meléndez Estrada

M. en C. Felipe López Sánchez

M. en C. Javier Avila Moreno

M. en C. Norma Josefina Ruiz Castillejos

**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

M. en C. Pino Durán Escamilla



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México el día 13 del mes Febrero del año 2012, el (la) que suscribe Ana Lilia Maldonado Arellano alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental con número de registro B961928, adscrito a ESIA UNIDAD ZACATENCO, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M.C. Ricardo Contreras Contreras y cede los derechos del trabajo intitulado Proceso de tratamiento utilizado para eliminar arsénico en un pozo de agua ubicado en Zimapán, Hidalgo., al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [ana.liliamaldonado@hotmail.com](mailto:ana.liliamaldonado@hotmail.com) o [iq.analilia@comunidad.unam.mx](mailto:iq.analilia@comunidad.unam.mx) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

Ana Lilia Maldonado Arellano

## **RECONOCIMIENTOS**

### **Ing. José María Lozano Moreno.**

Presidente Constitucional del Municipio de Zimapán, Hidalgo en el período 2009-2011, por hacer posible la construcción de esta planta potabilizadora en beneficio de la comunidad; así mismo por las facilidades otorgadas a instituciones como Instituto Politécnico Nacional para difundir este tipo de trabajos.

### **Dra Ma. Aurora Armienta Hernández**

Investigadora del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, quien desde la década de los 90's impulsó este trabajo con sus investigaciones en el Valle de Zimapán.

### **COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA CNA**

Por aportar los recursos económicos al municipio.

### **Ing. Hermilo Trejo Angeles**

Subdirector de la Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Zimapán, CAPASAZIM, en el periodo 2009-2011, por las facilidades otorgadas para reunir la información pertinente de campo así como de escritorio, además de su valiosa experiencia.

## **Agradecimientos**

A Dios por ayudarme a que esta etapa de mi vida que inició hace casi 12 años llegue a su término.

Al IPN-Unidad Zacatenco, la casa de estudios en donde encontré una oportunidad más de desarrollo profesional y personal. Gracias a mis sinodales M. en C. Ricardo Contreras, M. en C. Norma Josefina Ruiz, M. en C. Jorge Meléndez, M. en C. Javier Avila, M. en C. Felipe López, por sus sugerencias en la realización de este trabajo.

A Teresita porque es mi fuerza, TE AMO HIJA, gracias por estar conmigo.

A mis padres Margarita y Juan por apoyarme incondicionalmente en cada una de las etapas de mi vida.

A mi hermano Juan Carlos por compartir sus experiencias que tanto me han ayudado para tomar decisiones.

A mi hermana Carolina por ser como es, a su esposo José Luis, en una palabra a su familia porque me llenan de paz y tranquilidad, los quiero mucho Monse, Ricky, Dianis, Guicho.

A todos mis primos Maldonado y Arellano, a sus esposos (as) e hijos (as) porque hemos vivido momentos inolvidables, Celia gracias por orientarme en momentos difíciles, María Luisa eres ejemplo de fortaleza.

A todos mis tíos en especial a ti Victorino, porque aunque ya no estás con nosotros te seguimos recordando con mucho amor.

SRA siempre te recordaré por esa convivencia de 3 años

## INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	3
INDICE DE FIGURAS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCION	7
JUSTIFICACION	8
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS PARTICULARES	9
CAPITULO 1. ANTECEDENTES	11
1.1 DATOS GENERALES DE ZIMAPÁN	11
1.2 ASPECTOS HIDROGEOLOGÍCOS	13
1.3 HIDROGEOQUÍMICA	14
1.4 GEOLOGÍA	15
1.5 ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE ZIMAPAN	16
1.5.1 ORIGEN DEL ARSÉNICO	17
1.5.2 QUÍMICA DEL ARSÉNICO EN ZIMAPÁN	17
1.5.3 EXISTENCIA Y MOVILIDAD DE ARSÉNICO	18
1.6 TOXICIDAD DE ARSÉNICO	19
1.7 PROCESOS DE TRATAMIENTO	21
1.7.1 SEDIMENTACIÓN SIMPLE	21
1.7.2 COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN	21
1.7.3 ADSORCIÓN	23
1.7.4 FILTRACIÓN	24
1.8 PRUEBAS DE TRATABILIDAD UTILIZANDO FeCl <sub>3</sub>	24
1.9 MANEJO DE LOS RESIDUOS	26
1.9.1 NEUTRALIZACION	27
1.9.2 PRECIPITACION	27
1.9.3 REDUCCION QUIMICA	27
1.9.4 FIJACION QUIMICA Y SOLIDIFICACION	27
1.10 USOS DE LODOS DE ARSÉNICO	28
CAPITULO 2. NORMATIVIDAD PARA LA CALIDAD DEL AGUA	30
2.1 NORMAS NACIONALES	30
2.1.1 NOM-127-SSA-1994	30
2.1.2 MODIFICACIÓN NOM-127-SSA1-1994	30
2.2 NORMAS INTERNACIONALES	33
2.3 METODOS ANALÍTICOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE ARSENICO	35
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	38
CAPITULO 4. RESULTADOS	41
4.1 AFORO DEL POZO MUHI	41
4.2 TREN DE TRATAMIENTO	46
4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	48
4.2.2 BALANCE DE MASA	52

**PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.**

CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFIA	61
GLOSARIO DE TERMINOS	64

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Propiedades de compuestos inorgánicos de arsénico	18
Tabla 2	Resultados de sedimentación simple	21
Tabla 3	Coagulantes más utilizados en el tratamiento de agua	22
Tabla 4	Pruebas de jarras arras utilizando Cloruro férrico y concentración inicial de Arsénico de 0.908 mg/L y pH de 6.57.	25
Tabla 5.	Efecto de la Oxidación y coagulación en la remoción de arsénico	26
Tabla 6	Límites Permisibles de características microbiológicas	31
Tabla 7	Límites Permisibles de características físicas y organolépticas	31
Tabla 8	Límites Permisibles de características químicas	31
Tabla 9	Cumplimiento gradual para arsénico	32
Tabla 10	Límites Permisibles de características radiactivas	33
Tabla 11	Tabla comparativa de Límites Máximos Permisibles de Arsénico	34
Tabla 12	Balance de Masa Global	54

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de ubicación de Zimapán, Hidalgo.	11
Figura 2.	Diagrama de Flujo de la Metodología.	38
Figura 3.	Oficinas de CAPASAZIM.	42
Figura 4.	Condiciones del pozo el Muhi inhabilitado.	42
Figura 5.	Tuberías utilizadas para limpieza del pozo.	43
Figura 6.	Colocación de tuberías para limpieza y desazolve.	43
Figura 7.	Colocación de tubería a diferentes profundidades.	43
Figura 8.	Grúa utilizada para la colocación de tubería.	44
Figura 9.	Desazolve del pozo.	44
Figura 10.	Continuación de desazolve.	44
Figura 11.	Conexión de bomba.	45
Figura 12.	Inicio de aforo.	45
Figura 13.	Características del agua extraída.	45
Figura 14.	Terminación del proceso de aforo.	46
Figura 15.	Evaluación de las características del agua.	46
Figura 16.	Evaluación de las características del agua ( continuación).	46
Figura 17.	Diagrama de Flujo del tren de tratamiento.	47
Figura 18.	Planta potabilizadora en operación.	52
Figura 19.	Diagrama de bloques para el tren de tratamiento.	53

## RESUMEN

La problemática de contaminación por arsénico de pozos ubicados en el municipio de Zimapán, Hidalgo se hizo evidente en el año 1992. En agosto de 2011 se inicia la construcción de la primera planta potabilizadora de la zona para remover arsénico para tratar agua del pozo el Muhi inhabilitado desde 1998 por exceder la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

El pozo aportará 22 LPS que serán tratados por el proceso coagulación-floculación utilizando  $\text{FeCl}_3$  como coagulante para reducir la concentración de arsénico de una concentración mayor de 1mg/L a 0.025 mg/L establecido en la Norma Oficial Mexicana.

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes acerca de la problemática de contaminación, estudios de caracterización de agua subterránea incluyendo el pozo el Muhi, los procesos de tratamiento para agua contaminada por arsénico y el manejo de los lodos. En el capítulo 2 se presentan las normatividades vigentes para los límites máximos permisibles de arsénico, nacionales e internacionales y la Normas Oficiales Mexicanas utilizadas para la cuantificación de As. En el capítulo 3 se presenta la metodología que se llevó a cabo y finalmente en el capítulo 4, el aforo del pozo y la evaluación técnica del tren de tratamiento.

Como resultados se encontró que la concentración de arsénico en el pozo el Muhi es mayor al Límite Máximo Permissible establecido en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.025 mg/L y al establecido por la Organización Mundial de la Salud que es de 0.010 mg/L, por lo que el agua no es apta para consumo humano; el pozo aportará 22 LPS que serán tratados por el proceso coagulación-floculación. La eficiencia de remoción de As dependerá en buena medida de la dosis del coagulante  $\text{FeCl}_3$ , y de la dosis de cloro utilizado para oxidar el arsénico presente de  $\text{As}^{+3}$  a  $\text{As}^{+5}$ , siendo el proceso de coagulación-Floculación la etapa fundamental del tren de tratamiento. Los lodos serán enviados al relleno sanitario pero pueden ser fuente potencial de contaminación por arsénico cuando no se atiendan las indicaciones para su disposición final.

Siendo el proceso de coagulación-floculación, la etapa determinante en el tren de tratamiento para la remoción de arsénico, es importante vigilar las dosificaciones y calidad del  $\text{FeCl}_3$ . Las agitaciones deben ser enérgicas los primeros minutos después de adicionar los coagulantes y a continuación agitación lenta, para obtener floculaciones óptimas; el pH óptimo debe oscilar entre 6-8. Para garantizar en la toma domiciliaria la concentración de 0.2-1.5 mg/L de cloro establecida en la Norma Oficial Mexicana se sugiere adicionar cloro en el tanque de acumulación de agua potable y por último con el fin de verificar la calidad global del agua potabilizada se recomienda periódicamente analizarla en un laboratorio acreditado.

## ABSTRAC

The problem of arsenic contamination of wells located in the municipality of Zimapán, Hidalgo became evident in 1992. In August 2011 the construction began on the first floor area water treatment to remove arsenic from well water to treat the disabled since 1998 Muhi for exceeding the NOM-127-SSA1-1994.

The well will provide 22 LPS will be treated by coagulation-flocculation process using  $\text{FeCl}_3$  as coagulant to reduce the concentration of arsenic in a higher concentration of 1 mg/L to 0.025 mg/L for the NOM.

Chapter 1 provides background on the problems of pollution, characterization studies including groundwater well on Muhi, treatment processes for arsenic-contaminated water and sludge management. Chapter 2 presents the current normativities for maximum permissible levels of arsenic, national and international and Mexican Official Standards used for quantification of As Chapter 3 presents the methodology to be carried out and finally in Chapter 4, the capacity of the well and the technical evaluation of the treatment train.

As a result it was found that the concentration of arsenic in the well the Muhi is greater than the maximum permissible limit set in changing of the NOM-127-SSA1-1994 which is 0.025 mg/L and that established by the World Health Organization which is 0.010 mg/L, so that the water isn't for human consumption, the well will provide 22 LPS will be treated by coagulation-flocculation process. The removal efficiency of As will depend largely on the dose of coagulant  $\text{FeCl}_3$ , and the dose of chlorine used to oxidize the arsenic in  $\text{As}^{+3}$  to  $\text{As}^{+5}$ , with the coagulation-flocculation process, the crucial step in the train treatment. The sludge will be sent to landfill but can be a potential source of arsenic contamination when not meet the guidelines for disposal.

As the coagulation-flocculation process, the determining step in the treatment train for arsenic removal is important to monitor the doses and amount of  $\text{FeCl}_3$ . The agitation must be strong the first few minutes after adding coagulants and then slow stirring for optimum flocculation, the optimum pH should be between 6-8. To ensure in the taking domiciliary the concentration of 0.2-1.5 mg/L chlorine remaining established in the Mexican Official Norm suggested adding chlorine in the storage tank water and finally to verify the global quality of treated water is recommends periodically analyzed in an accredited laboratory.

## INTRODUCCIÓN

Conocida la problemática de contaminación por arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hidalgo y además que la exposición crónica provoca mal funcionamiento cardiovascular, carcinomas dérmicos, efectos neurológicos y también se le asocia con problemas de cáncer, resulta de interés social la construcción de la primera planta potabilizadora en la zona para remover Arsénico.

La obra se realiza de acuerdo a lo establecido en los Términos de Referencia “Elaboración del proyecto ejecutivo construcción, puesta en marcha y operación durante tiempo definido de la Planta Potabilizadora del Muhi, municipio de Zimapán, Hidalgo 2010”, y es a partir de éstos documentos legales que el Municipio designa a la empresa Tecnología Intercontinental S.A de C.V. (contratista) como la responsable de la ejecución del proyecto. La obra en campo da inicio con el aforo del pozo en agosto de 2010 y la colocación de la primera piedra en agosto del 2011.

Los reportes históricos de caracterización del agua del pozo y los resultados de la muestra puntual tomada durante el aforo fueron determinantes para la selección del tren de tratamiento. En este trabajo se evalúa el tren de tratamiento con el proceso coagulación-floculación propuesto por la contratista para remover As a un valor de 0.025 mg/L.

## JUSTIFICACIÓN

Las fuentes de suministro de agua potable actualmente en Zimapán, Hidalgo son: el acueducto Zimapán-Tasquillo, pozos profundos, manantiales y norias; estudios realizados a las aguas subterráneas han revelado que se encuentran contaminadas con arsénico Armienta et al., (1995), en concentraciones de hasta 1 mg/L, siendo que Límite Máximo Permisibles es de 0.025 mg/L.

La construcción y operación de la Planta Potabilizadora del Muhi (inhabilitado desde 1998), supervisada por La Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Zimapán CAPASAZIM permitirá cubrir la demanda actual de agua potable que es de 54 LPS ya que se incorporarán 22 LPS a los 34 LPS que actualmente aporta el acueducto Zimapán-Tasquillo.

La eficiencia de remoción de As en esta planta, dependerá de la operación correcta de cada etapa del tren de tratamiento que será utilizado. En este trabajo se realiza la evaluación técnica del tren con el proceso de coagulación-floculación con el fin de identificar aspectos técnicos relevantes que puedan ayudar en caso necesario durante la operación de la planta, así mismo para dar algunas recomendaciones. También se pretende concentrar la información que se está generando en esta obra y que pueda servir en el futuro para consulta.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el proceso coagulación-floculación que se utilizará para el tratamiento del agua proveniente del Pozo el Muhi, municipio de Zimapán, Hidalgo, mediante el análisis de cada etapa del tren de tratamiento propuesto, para determinar la eficiencia en la remoción de arsénico.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Comparar la concentración de arsénico reportada para el pozo el Muhi con los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas e Internacionales para identificar la calidad del agua a tratar.
- Revisar algunos procesos de remoción de arsénico para comparar con la propuesta.
- Cuantificar las materias primas determinantes ( $\text{FeCl}_3$  y  $\text{Cl}_2$ ) en la eficiencia de remoción mediante el balance de masa global.

# CAPITULO 1

## CAPITULO 1. ANTECEDENTES

### 1.1 DATOS GENERALES DE ZIMAPÁN

#### LOCALIZACIÓN

El Municipio de Zimapán se localiza a 144 kilómetros de Pachuca, entre los paralelos 20° 44' de latitud norte y 99° 23' de longitud oeste, a una altura de 1,780 metros sobre el nivel del mar.

Limita al norte con los municipios de Pacula y Jacala; al sur con los de Tecozautla y Tasquillo; al este con los de Nicolás Flores e Ixmiquilpan y al oeste con el Estado de Querétaro, ver figura 1; sus principales comunidades son: Xaha, Aguas Blancas, Xitha, el Cerrote, Morelos, Encarnación y Durango.

De acuerdo al censo 2010 la población actual de Zimapán es de 38,516 de los cuales son 20,568 mujeres y 17,948 hombres. INEGI (2010, julio). Disponible en: <http://www.inegi.org.mx>

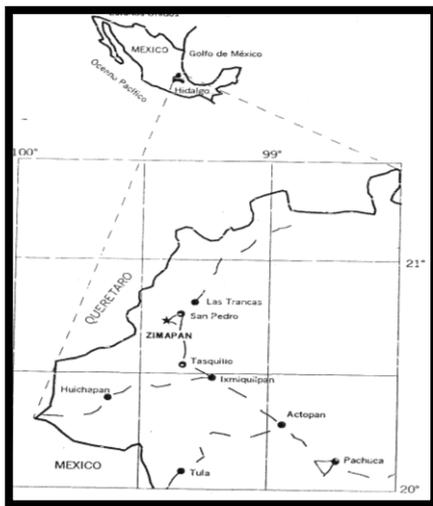


Figura 1. Mapa de ubicación de Zimapán, Hidalgo

#### TOPOGRAFÍA Y RED DE DRENAJE

Zimapán constituye un Valle con una elevación promedio de 1800 msn, hacia el N y NE de éste valle se localizan elevaciones de unos 2600 msnm, pertenecientes a la Sierra Madre Oriental. Hacia el S y SE, se distribuyen elevaciones del orden de los 2300 msnm, los cuales están asociadas al Eje Neo volcánico.

El drenaje general es del tipo detrítico y confluye al río Tolimán, el cual fluye hacia el norte para desembocar en el río Moctezuma, que marca la línea fronteriza entre los estados de Hidalgo y Querétaro, (Martin, 2000, p.12).

## ASPECTOS ECONÓMICOS

El distrito minero de Zimapán se caracteriza por la abundante presencia de cuerpos mineralizados ricos en sulfuros emplazados en formaciones calcáreas fracturadas y distribuidos en un radio de 12 Km alrededor del centro del poblado de Valle de Zimapán. Esta característica ha determinado que la principal actividad económica sea la minería desde el año 1576 explotando los yacimientos de la zona y obteniendo (Ag, Cu, Pb y Zn), (Martin, 2000, p. 2).

Zimapán tiene una gran historia minera por su producción de plata, plomo y zinc. En 1576 se inicio el asentamiento español en los alrededores de las minas de Tolimán y Monse correspondientes a las minas de Carrizal y el Monte, explotando en sus inicios Ag, Pb y Zn principalmente, (Yta y Moreno, 1997).

- Zona minera Santa Gorgonia – San Pascual: Localizada a unos 5 Km de Zimapán, la minería estuvo activa en la zona de Santa Gorgonia hasta la década de los cincuenta, dejando más de 130 obras mineras antiguas. Actualmente la minería se desarrolla a nivel de Gambusinaje, (Martin, 2000). Potencialmente éstas obras estarían permitiendo y acelerando la exposición de sulfuros a las aguas meteóricas y oxígeno atmosférico que son los causantes de la oxidación de los sulfuros y en consecuencia de la generación de acidez y liberación de metales pesados, (Martin, 2000,p.8).

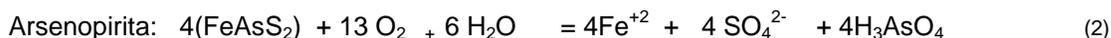
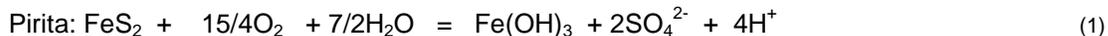
- Zona minera El Carrizal: Las minas del carrizal se encuentran a unos 9-10 Km al NW de Zimapán. La mineralogía está compuesta principalmente por galena y esfalerita, seguida de pirita, calcopirita, arsenopirita, pirrotina, bornita, estibinita. No es posible cuantificar las obras mineras antiguas y activas, pero incluyen socavones, galerías y chimeneas entre otras, (Martin, 2000, p.9).

Las obras mineras actúan como receptores de las aguas subterráneas, obligando al flujo a dirigirse hacia ellas. Estas obras a su vez actúan como conductos de aguas meteóricas y de oxígeno, lo que facilita los procesos de oxidación de los sulfuros, que son abundantes, (Martin, 2000).

- Zona minera El Monte: se encuentra a unos 8-9 Km al norte de Zimapán, el yacimiento El Monte se divide en tres áreas: Dolores-chiquihuites, Tecomate-La Escondida y Concordia. La mineralogía de las minas en orden de abundancia es de: arsenopirita, pirrotina, esfalerita, calcopirita, pirita, glena, etc. Es importante señalar que la arsenopirita y pirrotina se encuentran en grandes concentraciones sobre todos los niveles inferiores, debido a esto y a la existencia de fallas Concordia, coincidente con el drenaje de las aguas superficiales y subterráneas, la actividad minera representaría una contribución sustancial en la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de la zona de el Barrón (al municipio de Zimapán), sin embargo la ubicación topográfica de éstas minas no permite la interconexión entre las aguas que estuvieran en contacto con las obras mineras y las aguas de la zona del Barrón, (Martin, 2000, p. 9).

Cualquier material geológico que contiene sulfuros es una fuente potencial de drenaje ácido (DA). El DA se forma al estar en contacto el material que contiene sulfuros con aguas subterráneas o superficiales en presencia de oxígeno. La oxidación de los sulfuros, provoca la generación de acidez y la liberación de metales pesados que originalmente se encuentran inmóviles en la estructura cristalina de los sulfuros tales como: pirita ( $\text{FeS}_2$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}_2$ ), bornita ( $\text{CuFeS}_4$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), etc., (Martin, 2000, p. 2).

Los procesos de oxidación de los sulfuros como la pirita y arsenopirita, ocurren en condiciones normales de presión y temperatura, mediante las reacciones 1 y 2



La acidez generada por las reacciones de oxidación de los sulfuros 1 y 2 es controlada por la abundante presencia de rocas carbonatadas, sin embargo quedan liberados en el ambiente los metales y sulfatos (Armienta, 1995), provocando la presencia de altas concentraciones de arsénico y sulfatos en las aguas subterráneas del Valle de Zimapán que es la única fuente de abastecimiento de agua potable para la población, (Martin, 2000, p. 2).

## DEPÓSITOS DE DESECHOS MINEROS

Martín (2000, p.10) refiere que al sur del poblado de Zimapán se ubican los desechos mineros San Miguel Viejo, Preisser, Pal; San Antonio y Reforestación (Armienta et al.,1997) los cuales presentan un estado de oxidación avanzado. En algunos de estos como Reforestación y San Antonio se llevaron a cabo acciones como construcción de muros de contención, reforestación y tratamiento con cal con el fin de controlar la presencia de lixiviados. Al este se localiza el depósito más grande de desechos, que además está en actividad llamado San Miguel Nuevo. La presencia de estos depósitos de desechos mineros, son los responsables de que en los alrededores de ellos las aguas subterráneas sean de tipo sulfatadas cálcicas (Armienta et al., 1997) y de la presencia de altas concentraciones de arsénico en las mismas. Por otro lado frente a éstos desechos, se encuentran sedimentos fluviales con las más altas concentraciones de arsénico, (García, 1997).

## 1.2 ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

Martín (2000, p. 21) refiere que de los informes técnicos reportados por la Comisión Nacional del Agua (Escolero, Domínguez, González y León, 1992) así como de los trabajos de investigación del Instituto de Geofísica de la UNAM (Armienta et al.,1997; Ramos, 1996) permitieron hacer una caracterización general del acuífero en el Valle de Zimapán.

Se acepta la existencia de dos sistemas acuíferos en el área de estudio, que han sido determinadas por las condiciones estructurales y litológicas:

- Acuífero asociado a rocas carbonatadas. Está desarrollado en rocas carbonatadas fracturadas constituido por calizas de la Formación Tamaulipas y Soyatal y es considerado el más importante en el área de estudio. Los pozos perforados en éste sistema tienen profundidades entre 100 - 180 m, hasta 1993 representó la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la población. Entre los pozos que destacaron por su producción están el Detzaní, Zim 2, Batallón y el Muhi.

Las aguas subterráneas del acuífero parecen tener una dirección contraria al drenaje del Río Toliman, (Armienta, Rodríguez, Aguayo, Cisneros, Villaseñor y Cruz, 1997) lo que puede ser causado por los volúmenes de extracción en los pozos de abastecimiento.

- Acuífero asociado a rocas volcánicas. Se caracteriza por estar constituido de rocas volcánicas tanto en medio poroso como fracturado. Se considera un acuífero pobre con una profundidad muy irregular y caudales generalmente bajos. Las profundidades de los pozos perforados son mayores de 100-130 m.

La presencia de una gran cantidad de norias (5 – 15 m de profundidad) y manantiales, asociados a rocas sedimentarias y volcánicas, indica la existencia de un acuífero somero que bien podría estar o no interconectado hidráulicamente con los sistemas acuíferos relativamente profundos que se desarrolla en las rocas carbonatadas y en las rocas volcánicas.

### **1.3 HIDROGEOQUÍMICA.**

Martin (2000, p. 23) refiere que los estudios realizados a las aguas subterráneas del Valle de Zimapán estudiados por Armienta et al.(1993;1997) han permitido identificar la presencia de por lo menos 3 tipos de aguas:

- Bicarbonatadas- cálcicas: Son predominantes lo que se explica por la amplia distribución de rocas calizas.
- Sulfatadas – cálcicas: Son producto de la influencia de los desechos acumulados de la minería ya que éste tipo de aguas se observa en las cercanías de los jales mineros.
- Bicarbonatadas – mixtas: Están relacionadas con las aguas de captaciones en rocas volcánicas.

También menciona Martín (2000, p. 24) que los resultados de los análisis de arsénico en las aguas subterráneas de Zimapán indican que:

- La mayoría de las muestras de aguas de los pozos con altos caudales y relacionados con aguas relativamente profundas en rocas carbonatadas, presentan altas concentraciones de arsénico (Detzaní, Muhi, Zim 2, Batallón).

- Las muestras de aguas de norias de bajos caudales y relacionados con aguas someras en rocas carbonatadas presentan bajas concentraciones de arsénico en relación con los pozos de altos caudales.
- Las muestras de agua de los pozos y norias relacionadas con rocas volcánicas, en general presentan bajas concentraciones de arsénico o están abajo del límite de detección.
- La mayoría de las aguas de los manantiales muestreados (en cualquier tipo de roca) no contienen arsénico o está presente en bajas concentraciones.
- Las muestras de agua que presentan contenidos de sulfatos de orden de 1000mg/L contienen arsénico y podrían estar relacionadas con fuentes puntuales de contaminación.

Los resultados de arsénico indicaron que las aguas de los tres pozos más importantes en el área de estudio son similares: Detzaní, Muhi y Zim 2 lo que indica que pueden estar interconectados hidráulicamente.

En los experimentos realizados por Martin (2000, p. 86), determina a nivel laboratorio la dependencia directamente proporcional entre el valor de la adsorción de arseniatos y la cantidad de roca, lo que le permite explicar los resultados anteriores:

- En los pozos de mayor caudal (en teoría porosidad alta) hay menor adsorción de arseniatos en las rocas (calizas), lo que es congruente con los mayores niveles de contaminación por As reportados en los pozos de mayor caudal en el Valle de Zimapán, Muhi, Detzaní, Batallón, Zim 2.
- En las norias que generalmente tienen caudales pobres (en teoría porosidad media) aumenta la adsorción de arseniatos en las rocas, lo que es congruente con los niveles, relativamente bajos, de contaminación por As reportados en las norias del Valle de Zimapán.
- En los manantiales con caudales muy pobres (en teoría porosidad baja) la adsorción de arseniatos en las rocas alcanza los valores mínimos, lo que es congruente con los niveles nulos o muy bajos, de contaminación por As reportados en los manantiales del Valle de Zimapán.

#### **1.4 GEOLOGIA**

El valle de Zimapán comprende gran parte de un abanico aluvial de espesor variable, el fanglomerado Zimapán, está presente en la mitad norte de la zona urbana y en el flanco occidental. Entre el material detrítico de fanglomerados encuentran diseminados fragmentos de los diques y de las aureolas de mineralización que contienen minerales de arsenopirita. La parte central de la mancha urbana se encuentra sobre rocas volcánicas terciarias. La porción oriental de la ciudad se caracteriza por la presencia de aluviones cuaternarios de escaso espesor, más desarrollados en los cauces de las escurrentías, los cuales en algunos casos cubren el fanglomerado. Al norte del Valle se localiza la falla El Malacate, que delimita a las calizas cretácicas del fanglomerado, que,

juega un papel importante en la dinámica subterránea, al igual que la falla El Muhi, localizada al noroeste, (Armienta, Rodriguez, 1993, p.36).

## 1.5 ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE ZIMAPAN

Actualmente las principales fuentes de suministro de agua en el municipio de Zimapán son el acueducto Zimapan-Tasquillo, pozos profundos, manantiales y norias (Términos de Referencia CAPASAZIM, 2010).

La presencia de compuestos de arsénico en el valle de Zimapán, en el Edo, de Hidalgo, se hizo evidente en el año de 1992, al realizar determinaciones analíticas de muestras de agua potable, en una campaña emprendida en la zona para conocer el avance del cólera en el país. Anterior a esta fecha, no se cuenta con datos de la presencia de este elemento en el agua subterránea de la región, ya que su determinación no se realiza de manera rutinaria en la mayoría de los laboratorios que se ocupan de aspectos relacionados con la calidad del agua entre las principales razones se puede citar que el procedimiento analítico no es simple (Armienta, et al., 1996, p. 33).

En el año de 1994, se analizaron 34 obras entre pozos, norias y manantiales en el Valle de Zimapán, se encontró que las concentraciones de arsénico en agua subterránea variaron desde 0,014 mg/L, hasta 1,12 mg/L, quince presentaron cantidades mayores a 0,014 mg/L, y de éstas, 9 presentaron arsénico en concentraciones superiores a la NOM-127-SSA1-1994. Todas las muestras tomadas de pozos o norias localizados en la zona de rocas volcánicas no presentaron concentraciones de arsénico por encima del límite de detección analítico.

En este estudio se detectaron contenidos de As para el pozo El Muhi que oscilan alrededor de 1,0 mg/L y para el Detzaní de 0,5 mg/L (Armienta, et al., 1996, p. 38); cabe destacar que el Muhi era el principal abastecedor de la red de agua potable de Zimapán hasta el año de 1998 que fue inhabilitado.

Pérez (1996, pp.62-70) reporta para el pozo el Muhi los siguientes resultados de arsénico:

- 8 de diciembre de 1993;  $1.153 \pm 0.2$  mg/L As
- 6 de junio de 1994;  $1.2865 \pm 0.3$  mg/L As
- 28 de julio de 1994;  $1.2305 \pm 0.2$  mg/L As

Durante el proceso de aforo del pozo el Muhi en agosto de 2010 se tomó una muestra puntual a la cual se analizó arsénico y fluoruros obteniéndose un valor de 1.3 mg/L y 2.5 mg/L respectivamente; comprobándose que la concentración de As y F en el agua del pozo excede los límites máximos permisibles establecidos en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994.

### 1.5.1 ORIGEN DEL ARSÉNICO

Martín (2000, p. 2) menciona que en el trabajo de Armienta et al. (1995) se establece el origen de la contaminación de las aguas subterráneas de Zimapán y puede ser explicado por los siguientes aspectos:

- La naturaleza geológica y estructural en el área han favorecido los procesos de oxidación de cuerpos mineralizados ricos en sulfuros.
- La actividad minera que produjo una gran cantidad (no cuantificada) de desechos mineros tales como jales, terreros y escorias de fundición, los que han estado expuestos a la intemperie favoreciendo los procesos de oxidación en los sulfuros presentes en los desechos.
- Una gran cantidad (no cuantificada) de obras mineras de exploración y explotación, que han facilitado y acelerado el contacto de los sulfuros de los cuerpos mineralizados con aguas meteóricas y oxígeno para favorecer los procesos de oxidación de dichos sulfuros.

Los diferentes estudios acerca de la contaminación de las aguas subterráneas en Zimapán, (Martín, 2000, p. 8) indican que la fuente de contaminación es de origen natural, manifestaciones ricas en sulfuros y antrópica (actividad minera). La particularidad de existir fuentes dispersas de contaminación, unido a las condiciones estructurales propias del área en estudio hace que la distribución de arsénico en las aguas subterráneas no siga un patrón definido, lo que obliga a pensar que su distribución debe estar controlada por diversos mecanismos entre los que se pueden destacar las condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas.

### 1.5.2 QUÍMICA DEL ARSÉNICO

El arsénico puede existir como especies con diferentes estados de oxidación +V (arseniato) +III (arsenito), 0 (arsénico) y -III (arsina). Las especies disueltas en agua más importantes son los arseniatos con estados de oxidación +V ( $H_nAsO_4^{-3n}$ ) y los arsenitos, con estado de oxidación +III ( $H_nAsO_4^{-2n}$ ), ambas especies pueden existir en un amplio rango de pH, pero en condiciones oxidantes la especie que predomina es la de los arseniatos, mientras que en ambientes reductores, predominan los arsenitos, (Armienta et al., 1995)

En la tabla 1 se presentan los compuestos más comunes de arsénico encontrados en la naturaleza

Tabla 1. Propiedades de compuestos inorgánicos de arsénico.

Propiedad	Arsénico	Trióxido de arsénico	Arsenato de sodio	Arsenito de sodio
<b>Sinónimo</b>	Arsénico negro, arsénico coloidal	Óxido de arsénico, óxido arsenoso, arsénico blanco	Arsenato disódico, biarsenato de sodio, sal disódica del ácido arsénico	Metaarsenico de sodio, sal sódica del ácido arsenioso
<b>Formula química</b>	As	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (As <sub>4</sub> O <sub>6</sub> )	Na <sub>2</sub> HAsO <sub>4</sub>	NaAsO <sub>2</sub>
<b>Peso molecular</b>	74.9216	197.84	185.91	129.91
<b>Valencia</b>	0	+III	+V	+III
<b>Solubilidad en agua</b>	Insoluble	37g/L a 20° C 101g/L a 100° C	Soluble	Muy soluble

Fuente: (Riancho, 1998)

Como puede observarse en la tabla 1, el arsénico con valencia 0 es insoluble a diferencia del resto de las especies.

Martín (2000, p. 4) refiere que en el Valle de Zimapán las condiciones predominantes de oxidación-reducción y acidez son pH entre 6 y 8 y voltaje 0.4-0.6 V (Armienta et al., 1993; 1997), por lo que la especie de arsénico soluble en las aguas subterráneas, que predomina, es la de arseniatos en sus formas (H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup>) (HAsO<sub>4</sub><sup>-2</sup>).

### 1.5.3 EXISTENCIA Y MOVILIDAD DE ARSÉNICO

Las especies de arsénico disueltas en las aguas subterráneas del Valle de Zimapán son los arseniatos (AsO<sub>4</sub>)<sup>-3</sup> cuya existencia y movilidad pueden estar controlados por diferentes procesos hidrogeoquímicos entre los que se pueden mencionar, (Martín, 2000, p. 4).

- **Reacciones de óxido-reducción:** las condiciones dominantes en el Valle de Zimapán son oxidantes, lo que hace posible la oxidación del mineral que contiene el arsénico, arsenopirita (FeAsS<sub>2</sub>) de acuerdo a la ecuación 2. El arsénico contenido dentro de la estructura cristalina de la arsenopirita, es liberado al ambiente en forma arseniatos de arsénico los cuales son solubles en agua, provocando de ésta manera altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas del Valle de Zimapán, (Martín, 2000).

- **Precipitación:** el proceso de precipitación, probablemente no tiene ningún efecto en el control hidrogeoquímico de la contaminación si se toma en cuenta lo siguiente: las calcitas minerales predominantes en las rocas calizas de amplia distribución en la zona de estudio, poseen una

superficie muy dinámica y se están disolviendo y precipitando continuamente, no se puede descartar que los arseniatos disueltos en las aguas sean retenidos en este proceso y coprecipitación en la superficie de las calcitas, (Martín, 2000).

- **Fenómenos de sorción:** estos fenómenos incluyen la adsorción, la absorción y el intercambio iónico. La adsorción indica que los solutos se adhieren a la superficie de los sólidos, la absorción en cambio sugiere que los solutos se introducen dentro de las superficies de los sólidos y el intercambio iónico involucra la sustitución de un soluto por otro en la superficie del sólido.

El fenómeno de adsorción es considerado el proceso químico más importante que afecta el movimiento de contaminantes en las aguas subterráneas (Drever, 1997), mediante éste proceso los arseniatos pueden ser arrancados de la fase líquida y retenidos en superficies minerales, cargadas positivamente por enlaces químicos que permiten la formación de nuevos compuestos conocidos como complejos de superficie. En la literatura se reporta que la presencia de la calcita reduce considerablemente la cantidad de arsénico disuelto en agua (Satish, 1998) las rocas calcitas distribuidas ≈60% en el área de estudio (Armienta et al., 1995) pueden desempeñar un papel importante en el control y movilidad del arsénico disuelto (arseniatos), (Martín, 2000).

Por lo anterior se considera que la absorción del arsénico en las superficies minerales de oxihidróxidos de Fe, calcita, compuestos identificados experimentalmente a nivel laboratorio (Martín, 2000, p.6) es el principal control hidrogeoquímico que puede influir en la presencia y movilidad del arsénico en las aguas subterráneas del Valle de Zimapán.

## 1.6 TOXICIDAD DEL ARSÉNICO

El arsénico es un elemento tóxico y la vía de exposición para los humanos es por agua y aire, (Fergusson, 1990). Comúnmente se encuentra presente en concentraciones a nivel de trazas en alimentos y agua (Martín, 2000, p.3).

Los diferentes compuestos de arsénico varían significativamente en su toxicidad para los mamíferos, el más tóxico es el hidruro arsenioso, seguido en grado de toxicidad por los componentes inorgánicos y orgánicos trivalentes, inorgánicos y orgánicos pentavalentes, (Gorby, 1994).

El arsénico se absorbe a través de la piel, pulmones y aparato gastrointestinal, se distribuye desde la sangre hasta el hígado, riñón, pulmón y bazo en un plazo de 24 horas después de la ingestión, y a la piel, pelo y hueso en el plazo de 2 semanas, (Riancho, 1998).

La exposición crónica provoca mal funcionamiento cardiovascular, carcinomas dermatológicos y efectos neurológicos. Entre los órganos más afectados están la piel, las membranas mucosas y

sistema nerviosos periférico. En la piel se manifiesta como dermatitis, ocasionalmente erupciones vesiculares, melanosis, hiperqueratosis, e hiperhidrosis. Las membranas mucosas presentan irritación, en los ojos se manifiesta con conjuntivitis y en la nariz con rinitis y hasta perforación del tabique nasal. En el sistema nervioso se producen alteraciones en las extremidades con dolor, punzadas y picazón, debilidad muscular cercana a la parálisis, encefalopatía y cefaleas crónica, (Gorby, 1994).

En México se calcula que 16 millones de individuos beben agua con arsénico y se han reportado casos de hidroarsenicismo en la Comarca Lagunera, en Zimapán, Hidalgo, en Chihuahua y Durango, Biomédicas UNAM (2010, julio). Disponible en: <http://www.biomedicas.unam.mx/html/period97/sep5.htm>.

Los requerimientos especificados por la modificación de la NOM 127-SSA1-1994 son de 0.025 mg/L y el recomendado por la OMS es de 0.01 mg/L As.

Armienta et al, (1996, p.35) establece que a partir de diversos estudios epidemiológicos se ha llegado a la conclusión de que se requiere la ingestión de más de 400 µg de arsénico al día para que se produzcan enfermedades debidas al mismo (Stöhrer, 1991). Esto equivaldría a ingerir dos litros de agua con 0,2 mg/L de arsénico al día, sin considerar ninguna otra vía de entrada del contaminante al organismo.

Las sales de arsénico también se han utilizado ampliamente en la preparación de insecticidas, principalmente como arsenato de plomo. Estas sales sean aplicadas también como herbicidas, fungicidas, rodenticidas e insecticidas. El arsénico también se utiliza en la industria del vidrio, en la electrónica, industria textil, curtiduría, en la manufactura de cosméticos y en la industria cerámica. Los compuestos de arsénico se han utilizado con fines curativos desde hace dos milenios; los usos más conocidos son en el tratamiento de dermatosis, sífilis y como antiparasitario (Crason, Elis III y Mccann, 1986). Se ha demostrado la asociación entre el arsenicismo crónico y el cáncer de piel y pulmón. Aunque el papel del arsénico en el desarrollo del cáncer en otros órganos, tales como el hígado y los nódulos linfáticos, está todavía en estudio, hay muchas posibilidades de que lo produzca. La carcinogenicidad toxicidad del arsénico es resultado principalmente de la exposición a arsénico trivalente más que a arsénico pentavalente o a compuestos orgánicos de arsénico, (Bahmra y Costa, 1992, pp. 575-631). El arsenicismo crónico tiene un período largó durante el cual las afectaciones son reversibles y desaparecen sí cesa la ingestión de arsénico. Sea estimado en tres años la latencia del arsenicismo y en veinticuatro la del cáncer arsenical.

## 1.7 PROCESOS DE TRATAMIENTO

Las opciones tecnológicas de tratamiento utilizadas actualmente para la remoción de arsénico, incluyen la sedimentación, coagulación-floculación, adsorción, filtración, intercambio iónico, electrodiálisis y ósmosis inversa, (Riancho, 1998, p.39).

### 1.7.1 SEDIMENTACIÓN SIMPLE

Se ha demostrado que la sedimentación simple tiene algunos efectos en la remoción del As en el agua, aparentemente se puede remover solo la mitad del contenido de arsénico y esto después de un periodo prolongado de tiempo.

En la tabla 2 se muestran resultados de sedimentación simple.

**Tabla 2. Resultados de sedimentación simple**

Tiempo de sedimentación (días)	Contenido de As en el sobrenadante, (mg/L)	Porcentaje de As removido (%)
1	0.8	0
2	0.73	8.7
3	0.66	17.5
4	0.60	35.0
5	0.55	31.3
6	0.53	33.7
7	0.50	37.5
8	0.48	40.0
9	0.40	50.0
10	0.45	43.7
11	0.44	45.0
12	0.43	46.2
13	0.42	47.5
14	0.42	47.5
15	0.41	48.7

Fuente: (Cheng, 1994)

En la tabla 2 se puede observar en los primeros días el porcentaje de remoción es alta, llegando al valor máximo de 50% en el día 9 y manteniéndose prácticamente constante hasta el día 15 en un rango de 48 % a 50 %.

### 1.7.2 COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

El tratamiento de agua potable por medio de coagulantes se ha utilizado para reducir la turbidez removiendo sólidos que no sedimentan o que lo hacen lentamente. La coagulación de As (V) con sales de aluminio (III) y de hierro (III) es un método reconocido como uno de los más eficientes para la remoción de As, además se ha visto que la remoción de As (III) durante la coagulación con

la alúmina, cloruro férrico y sulfato férrico es menos eficiente que la remoción de As (V) bajo condiciones similares, (Riancho, 1998, pp.40-41). En la tabla 3 se presentan los coagulantes químicos más utilizados.

**Tabla 3. Coagulantes más utilizados en el tratamiento de agua**

Químico	Fórmula	Peso molecular	Densidad lb/ft <sup>3</sup>	
			Seco	Líquido
Alúmina	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 18H <sub>2</sub> O*	666.7	60 - 75	78 – 80 (49%)
	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 14H <sub>2</sub> O*	594.3	60 - 75	83 – 85 (49%)
Cloruro Férrico	FeCl <sub>3</sub>	162.1	----	84-93
Cal	Ca(OH) <sub>2</sub>	64.0	35 - 40	----
Sulfato férrico	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	400	----	----
	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 3H <sub>2</sub> O	454	----	70 – 72

\*El número de moléculas de agua unidas varía de 13 a 18 Fuente: (Metcalf & Eddy, 1991)

En la tabla 3 se observa que los coagulantes se encuentran disponibles como sólidos y en solución.

Si se trabaja con bajas dosis de coagulantes como cloruro férrico y alúmina (5 mg/L), la neutralización de cargas por hidrólisis de las especies metálicas coagulante provoca la formación de flóculos mediante la agregación de partículas coloidales desestabilizadas, pero por si el contrario, se manejan altas dosis de éstos, el metal constituyente del coagulante precipita como un flóculo del hidróxido del metal en forma amorfa en el cual las partículas coloidales quedan atrapadas, aquí la adsorción del arsénico en los sólidos precipitados del metal parece ser el mecanismo predominante para la remoción de arsénico, es decir las sales de hierro y aluminio se hidrolizan formando hidróxidos sobre los cuales el As (V) se adsorbe y coprecipita.

La coprecipitación es definida como la incorporación de especies solubles de arsénico en una fase creciente de hidróxido vía inclusión, oclusión o adsorción.

La adsorción se refiere a la formación de complejas superficies entre arsénico soluble y los sitios superficiales de oxidrilos sólidos como se puede ver en las siguientes reacciones:



En la que el FeOH es un sitio superficial de hidróxido.

El tratamiento por coagulación por sí solo es muy efectivo en la remoción de arsénico del agua, pero no lo disminuye a niveles por debajo del estándar sugerido por la Organización Mundial de la salud, debido a esto, el agua generalmente se somete primero a un proceso de oxidación para oxidar al arsénico de (+3) a Arsénico (+5) y posteriormente el proceso de coagulación lo anterior debido a que el As (+5) se remueve con mayor eficiencia que el As (+3).

Riancho (1998, p.42) cita a Hering, Ghen, Wilkie, Elimilech, Liang, (1996), quienes observaron que con el cloruro férrico  $FeCl_3$  se han obtenido mejores resultados que el sulfato de aluminio en cuanto a la formación del Flóculo, pero resultados pobres en cuanto a la remoción de arsénico por lo cual puede hacernos suponer que la remoción se ve favorecida por enlaces químicos (por ejemplo con el ión Hierro) además del fenómeno de adsorción física

En resumen los arsenatos se adsorben o co-precipitan sobre hidróxidos de hierro involucrando reacciones superficiales altamente específicos y la mejor adsorción de As (V) sobre  $Al(OH)_3$  y  $Fe(OH)_3$  tiene lugar entre un pH de 4 y 7. (Riancho, 1998, p. 52)

### 1.7.3 ADSORCIÓN

La adsorción del arsénico (Riancho, 1998, p. 47) se lleva a cabo normalmente al filtrar el agua contaminada con arsénico a través de una columna de material granular con capacidad de adsorberlo. Un material apropiado para este fin es aquel que:

- a) Tiene afinidad química por el arsénico y sus formas hidrolizadas en el agua natural es decir puede formar complejos superficiales con el mismo.
- b) Propicia interacciones electrostáticas con el arsénico

Algunos materiales utilizados en la remoción de As por adsorción son la alúmina, carbón activado, bauxita.. Se ha observado en todos los casos que la velocidad de adsorción es exponencial y que el As (V) es removido de la solución mucho más rápido por la alúmina activada que por cualquier otro adsorbente, además la velocidad de absorción de As (III) en la alúmina activada y bauxita son mucho más bajas que aquella para el As (V).

El As (V) es adsorbido efectivamente en el intervalo de pH entre 4 y 7 por la alúmina activa y la bauxita y se ve disminuida a un pH por arriba de 7.

Por su parte el carbón activado adsorbe As (V) preferentemente en el intervalo ácido de pH entre 3 y 5, pero muestra una pobre capacidad de adsorción en comparación con la alúmina activada y la bauxita aún trabajando a pH 4.

El resumen la especie mejor removida por el carbón activado es  $H_2AsO_4^-$  (Arsenato), (Riancho, 1998).

#### 1.7.4 FILTRACIÓN

Este proceso es utilizado como un paso adicional al tratamiento de coagulación-floculación del agua, el cual a su vez es precedido por sedimentación, si se dosifica la cantidad adecuada de  $\text{FeCl}_3$  y de cloro (si es necesario), se puede obtener una calidad de agua adecuada durante un periodo de 31 días antes de que se deba regenerar el medio filtrante, (Riancho, 1998, p. 54)

De acuerdo a pruebas de planta piloto realizadas en Taiwán, (Shen, 1973), para evaluar el desempeño del proceso de filtración en la remoción de As, se ha observado que la filtración lenta es más efectiva que la rápida en filtro de arena, siendo superior a la antracita. La arena puede ser regenerada tratándola con NaOH y posteriormente lavada con agua libre de arsénico.

En resumen este proceso proporciona una calidad de efluente adecuada si se implementa después de una etapa de coagulación-floculación, además de llevarse a cabo preferentemente a razones de filtración baja a próximamente de  $4.5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ , (Riancho, 1998).

#### 1.8 PRUEBAS DE JARRAS CON $\text{FeCl}_3$

El método de coagulación empleando sales de hierro es el más adecuado en virtud de la elevada eficiencia que se puede lograr (>90%), por su aplicación a gran escala, la fácil adquisición y manejo del sulfato férrico y el cloruro férrico (sustancias coagulantes) y debido a que las pruebas de tratabilidad requeridas para determinar el tipo de coagulante, dosis óptima y eficiencia de remoción de arsénico se pueden realizar apropiadamente a nivel laboratorio mediante “pruebas de jarras” (Morales, 1995).

Morales (1995) realiza pruebas de jarras para evaluar la eficiencia de sulfato férrico y cloruro férrico como coagulantes empleados en la remoción de arsénico en base a un tratamiento convencional (coagulación-floculación-sedimentación-filtración) de agua subterránea contaminada con arsénico procedente del pozo el Muhi ubicado en Zimapán. Hidalgo, con una concentración promedio medida de 0.908 mg/L.

El equipo utilizado con 6 unidades de agitación se accionó a una velocidad de 100 rpm al momento de adicionar el coagulante y se esperó 30 minutos para favorecer el mezclado; en el proceso de floculación la velocidad se disminuyó a 40 rpm durante 10 minutos y después a 20 rpm por 5 minutos; la sedimentación de los flóculos se llevó a cabo durante 15 minutos siguientes al término del cual se tomó agua sobrenadante para determinar el arsénico remanente y el pH. Las pruebas realizadas se efectuaron al pH natural de la muestra de agua, (Morales, 1995).

Para la prueba utilizando  $\text{FeCl}_3$  consistió en ensayar con cuatro dosis: 40, 80, 160 y 220 mg/L de cloruro férrico utilizando  $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ . Los resultados de eficiencias de remoción de arsénico se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4. Pruebas de jarras utilizando Cloruro férrico y concentración inicial de Arsénico de 0.908 mg/L y pH de 6.57.**

No. Prueba	Dosis de $\text{FeCl}_3$	mg/l As en el efluente	% de remoción	pH
1	40	0.042	95.4	6.53
2	80	0.011	98.8	6.57
3	160	0.011	98.8	6.41
4	220	0.011	98.8	6.33

Fuente: (Morales, 1995)

De la tabla 4 se observa que se obtiene un 95.4% de remoción con la dosis de 40mg/L de  $\text{FeCl}_3$  y se mantiene constante a 98.8% con dosis mayores a 80 mg/L; respecto al pH prácticamente no hay cambios, el valor baja de 6.57 a 6.33 unidades de pH.

Riancho (1998,pp.42-43) cita a Shen (1973) quién experimentó para encontrar dosis óptimas de oxidante y coagulante, realizando pruebas de jarras en el laboratorio; algunos resultados para cloruro férrico se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5. Efecto de la oxidación y coagulación en la remoción de arsénico**

FeCl <sub>3</sub> mg/L	Dosis del agente oxidante mg/L		Arsénico en sobrenadante mg/l	Arsénico removido %
	Permanganato de potasio	Cloro		
40	0		0.61	23.8
40	1		0.35	56.3
40	1.5		0.32	60.0
40	2		0.22	72.5
70	3		0.12	85.0
70	5		0.09	88.8
100	0		0.29	63.8
100	5		0.05	93.7
100	8		0.04	95.0
150	5		0.02	97.4
200	5		0.01	98.7
50		1.5	0.13	53.7
50		5	0.12	85.0
50		8	0.09	88.8
50		15	0.05	93.7
50		20	0.01	98.7
100		5	0.07	91.2
100		8	0.05	93.7

Concentración inicial de arsénico 1mg/L

Fuente: (Shen, 1973)

De tabla 5 se observa que los mejores resultados para las condiciones especificadas se obtienen agregando 20 mg/l de cloro y 50 mg/L de FeCl<sub>3</sub>, el agua al final tiene solamente trazas de arsénico y corresponde al 98.7% de remoción.

### 1.9 MANEJO DE LOS RESIDUOS

Actualmente existen diferentes tecnologías para remover arsénico del agua, que producen a su vez residuos con altas concentraciones de este metaloide. Esto hace necesario establecer un proceso para estabilizar y minimizar la peligrosidad de estos residuos.

Las tecnologías utilizadas para remover arsénico son excelentes para la especie de As (V), por lo que el As (III) debe ser oxidado a As (V) para poder ser eliminado. Los residuos que se generan

pueden ser agrupados en semisólidos y líquidos; esto sugiere el empleo de diferentes tratamientos para estabilizarlos.

Dentro de los procesos de recuperación y estabilización de residuos metálicos destacan la neutralización, la reducción química, la precipitación, la fijación química y solidificación que se describen brevemente.

### **1.9.1 Neutralización**

Consiste en un ajuste ácido o alcalino del residuo en un rango de pH entre 6 y 9, para que éste pueda ser desechado. Sin embargo, si se requiere realizar una precipitación de iones metálicos o clarificar la descarga es necesario elevar aun más el pH realizando una titulación potenciométrica de residuo para determinar la cantidad del reactivo que se requiere para que éste alcance el pH deseado.

### **1.9.2 Precipitación**

Todos los procesos de precipitación operan bajo un mismo principio químico y utilizan los mismos Equipos y configuraciones similares. Adicionalmente, se requiere de un pretratamiento. El mecanismo de precipitación involucra la alteración del equilibrio iónico del compuesto metálico para producir un precipitado insoluble. En general, las reacciones de precipitación forman una sal y un complejo metálico insoluble.

### **1.9.3 Reducción química**

Es una reacción química en la cual uno o más electrones son transferidos entre dos elementos o es el cambio del estado de oxidación, donde el oxidante es un donador de electrones. El esquema típico del proceso incluye, un tanque para ajuste de pH y reducción, medidor de potencial óxido reducción y pH, agitador mecánico y tanques de precipitación y sedimentación. Además, se requiere que el equipo este localizado en un área con buena ventilación. Los tiempos de retención pueden llegar a ser hasta cuatro veces más que lo establecido teóricamente.

### **1.9.4 Fijación química y solidificación**

Esta tecnología se emplea para hacer al residuo menos peligroso para el ambiente. El uso de la fijación química ofrece varias ventajas, tales como mejorar las características de manejo, produciendo un material sólido lo suficientemente fuerte para su disposición. Casi todos los procesos de fijación química involucran reacciones entre el residuo y aditivos que promueven la precipitación de los metales como hidróxidos. Estos aditivos pueden aumentar la reacción de solidificación y disminuir el espacio entre el residuo y los agentes solidificantes. Así, las características del producto sólido obtenido dependerán de:

a) Las características del residuo.

- b) Tipos de aditivos y reactivos de solidificación empleados.
- c) Condiciones de secado.
- d) Tiempo de reacción.

Una desventaja de este tipo de solidificación es que se incrementa el peso y volumen del residuo a disponer incrementando los costos de transportación y disposición. Otro problema, es que algunos residuos deben ser pretratados antes de su solidificación con cemento, IMTA (2010, julio). Disponible en: <http://www.lenntech.es/tratamiento-lodos-general.htm>

### **1.10 USOS DE LODOS DE ARSÉNICO**

Los lodos de arsénico se pueden utilizar en la elaboración de tabiques para la construcción de casas habitación como una alternativa de disposición de estos residuos; Sandoval, y Jauregui, (2010) estudiaron la estabilización y solidificación de lodos de hidróxido provenientes de un proceso de tratamiento de coagulación floculación; se valoró el contenido de arsénico, la cantidad de material (cemento Portland, arenilla y gravilla) necesario para elaborar un tabique, y la estabilización del arsénico; llegando a la conclusión que la elaboración de tabiques con lodos de arsénico es un proceso alternativo de tratamiento de residuos conteniendo este contaminante; pero tomando en cuenta que la liberación del arsénico se ve favorecida si su concentración es alta en el tabique y el pH del agua de lluvia es bajo; por lo que en comunidades o ciudades donde no existan problemas de contaminación, el empleo de tabiques que contienen arsénico, como material de construcción, es muy factible, es necesario que las paredes construidas con estos tabiques sean cubiertas con una capa de concreto para evitar desprendimientos que puedan contener arsénico, IMTA (2010, julio). Disponible en: <http://www.lenntech.es/tratamiento-lodos-general.htm>

## **CAPITULO 2**

## **CAPITULO 2. NORMATIVIDAD PARA LA CALIDAD DEL AGUA**

En este capítulo se presentan las normatividades vigentes respecto a los límites máximos permisibles para arsénico, nacionales e internacionales con el fin de comparar los valores reportados para el pozo el Muhi y así tener una idea global de lo que puede representar las concentraciones de As presentes en esta fuente de agua, sin embargo cabe señalar que cada país establece sus límites en base a características regionales y que además la regulación del arsénico presenta diferentes retos tanto técnicos como políticos para las diferentes instituciones de protección al ambiente; el problema en cuanto al riesgo de salud (incluyendo el cuestionamiento respecto a que si el arsénico es un nutriente esencial para la salud humana, mecanismos de desintoxicación y la extrapolación en los riesgos del cáncer) ha persistido a través del desarrollo de las normas para el arsénico (Riancho, 1998).

### **2.1 NORMAS NACIONALES**

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

#### **2.1.1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994**

Esta norma fue publicada 3 de febrero de 1995 y estuvo vigente hasta el 22 de noviembre de 2000 fecha en que se publica en el diario oficial la modificación; se observan actualizaciones en los límites máximos permisibles de los contaminantes.

#### **2.1.2 Modificación 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"**

Norma que está vigente y que a la letra dice:

1.1 Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización de agua para uso y consumo humano.

1.2 Esta Norma Oficial Mexicana es aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya en todo el territorio nacional.

En las tablas 6 a la 10 se presentan los límites máximos permisibles de los cuatro grupos de compuestos.

**Tabla 6. Límites permisibles de características microbiológicas**

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

Fuente: Modificación de la NOM-127-SSA1-1994

Se observa en la tabla 6 que límites permisibles para los microbiológicos fueron modificados con respecto a la versión anterior, actualmente es ausencia.

**Tabla 7. Límites permisibles de características Físicas y organolépticas**

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
<b>Color</b>	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
<b>Olor y sabor</b>	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).
<b>Turbiedad</b>	5 unidades de turbiedad nefelometrías (UTN) o su equivalente en otro método.

Fuente: Modificación de la NOM-127-SSA1-1994

Se observa en la tabla 7 que se mantienen los LMP para este grupo de características comparados con la versión de 1994.

**Tabla 8. Límites permisibles de Características Químicas**

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
<b>Aluminio</b>	0,20
<b>Arsénico (Nota 2)</b>	0,05
<b>Bario</b>	0,70
<b>Cadmio</b>	0,005
<b>Cianuros (como CN-)</b>	0,07
<b>Cloro residual libre</b>	0,2-1,50
<b>Cloruros (como Cl-)</b>	250,00
<b>Cobre</b>	2,00
<b>Cromo total</b>	0,05
<b>Dureza total (como CaCO<sub>3</sub>)</b>	500,00
<b>Fenoles o compuestos fenólicos</b>	0,3
<b>Fierro</b>	0,30
<b>Fluoruros (como F-)</b>	1,50
<b>Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:</b>	
<b>Benceno</b>	10,00
<b>Etilbenceno</b>	300,00
<b>Tolueno</b>	700,00
<b>Xileno (tres isómeros)</b>	500,00
<b>Manganeso</b>	0,15
<b>Mercurio</b>	0,001
<b>Nitratos (como N)</b>	10,00
<b>Nitritos (como N)</b>	1,00
<b>Nitrógeno amoniacal (como N)</b>	0,50

**PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.**

<b>pH (potencial de hidrógeno) en unidades de Ph</b>	6,5-8,5
<b>Plaguicidas en microgramos/l:</b>	
<b>Aldrín y dieldrín (separados o combinados)</b>	0,03
<b>Clordano (total de isómeros)</b>	0,20
<b>DDT (total de isómeros)</b>	1,00
<b>Gamma-HCH (lindano)</b>	2,00
<b>Hexaclorobenceno</b>	1,00
<b>Heptacloro y epóxido de heptacloro</b>	0,03
<b>Metoxicloro</b>	20,00
<b>2,4 – D</b>	30,00
<b>Plomo</b>	0,01
<b>Sodio</b>	200,00
<b>Sólidos disueltos totales</b>	1000,00
<b>Sulfatos (como SO<sub>4</sub>=)</b>	400,00
<b>Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)</b>	0,50
<b>Trihalometanos totales</b>	0,20
<b>Yodo residual libre</b>	0,2-0,5
<b>Zinc</b>	5,00

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

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

Fuente: Modificación de la NOM-127-SSA1-1994

En la tabla 8 se observa que para el grupo de los compuestos químicos los límites máximos permisibles aumentan para fenoles, nitritos y plomo entre otros.

**Tabla 9. Tabla de cumplimiento gradual para arsénico**

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

Fuente: Modificación de la NOM-127-SSA1-1994

Para el caso del arsénico se observa en la tabla 9, que la norma establece disminución gradual llegando a 0.025 mg/L para 2005, por lo que de acuerdo a esto el Límite Máximo Permisible para el año 2012 es de 0.025 mg/L.

**Tabla 10. Límites permisibles de características radiactivas.**

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

Fuente: Modificación de la NOM-127-SSA1-1994

Finalmente para las características radiactivas se observa en la tabla 10 que los Límites Máximos Permisibles también incrementaron con respecto a la versión anterior.

## 2.2 NORMAS INTERNACIONALES

Actualmente no existe un nivel meta máximo de contaminación permitido para el arsénico, por lo pronto la USEPA Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, clasifica al arsénico como un carcinógeno humano basado en la asociación existente entre la exposición al arsénico por inhalación y el cáncer en pulmón, así como la exposición por ingestión y el cáncer en piel y órganos internos, (Riancho,1998).

La USEPA estimó el riesgo de contraer cáncer de piel a partir de un importante estudio epidemiológico realizado en Taiwán donde se observaron más de 40 000 personas que consumían agua proveniente de pozos artesanos con altos contenidos de arsénico, en un rango de 10 a 1820  $\mu$  g/l, estando los valores más frecuentes entre 400 a 600  $\mu$  g/ L.

La Organización Mundial de la Salud OMS establece un límite recomendable de 0.01 mg /L As en agua potable, por su parte la USEPA y la NOM 127- SSA1 - 1994 fijan como límite máximo 0.025 mg As/L, (Riancho,1998).

De acuerdo a la política seguida por USEPA se esperaría un nivel máximo meta de contaminación por arsénico de cero, sin embargo esto resultaría tanto técnico como económicamente poco factible, (Riancho,1998).

Se espera que la USEPA baje el límite de 0.05 mg /L, As se especula que quede en 2  $\mu$ g /L As el valor mínimo y el más alto en 20  $\mu$ g /L As por lo tanto las instalaciones de tratamiento deben iniciar su preparación para cumplir con la nueva disposición, (Riancho,1998).

La OMS en las Guías de Calidad para el Agua Potable (1993) reduce el valor guía de arsénico en agua de 50  $\mu$ g/ l a un valor provisional de 10  $\mu$  g/ l, basándose en un estudio realizado por el Foro de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) en 1986 sobre evaluación de riesgo.

En la tabla 11 se muestran los valores guía para arsénico establecido por varias agencias reguladoras.

**Tabla 11. Tabla comparativa de Límites Máximos Permisibles de Arsénico**

País / Organización	Nivel de contaminación máximo ( $\mu$ g/l)
Argentina (Código Alimentario)	50
Canadá	25
USA (USEPA, Agencia de Protección Ambiental de USA)	Nivel Máximo de Contaminación 50 *
Francia	50
República Federal de Alemania	40 **
Organización Mundial de la Salud (OMS)	Valor Guía Provisional 10
Unión Europea	Concentración Máxima Admisible (MAC) 10
India	50
China	50
Taiwán	50
México NOM-127-SSA1-1994	25

\*USEPA ha estado considerando disminuir los valores a 0,002 - 0,020 mg/l.

\*\* Este valor disminuyó a 0,010 mg/l en 1996

De la tabla 11 se observa OMS y la Unión Europea presentan el valor más bajo de todos las agencias reguladoras.

Algunos estudios de toxicidad del arsénico indican que muchas de las normas actuales basadas en las guías de la OMS son muy altas, y plantean la necesidad de reevaluar los valores límites basándose en estudios epidemiológicos; por ejemplo, en Taiwán estiman que el límite se debe reducir de 0,02 mg/L a 0,0005 mg/L. En otros casos, podrían aumentarse dichos valores de acuerdo a las condiciones regionales. En América Latina ha podido apreciarse que a niveles similares de arsénico en diferentes condiciones (climatológicas, de nutrición y otros) el nivel de afectación es diferente.

El Centro Internacional de Investigaciones sobre cáncer ha clasificado al arsénico en el grupo I porque tienen pruebas suficientes de la carcinogenicidad para seres humanos.

El primer valor límite de arsénico en el agua potable fue de 108  $\mu$ g/l, el cual fue establecido en 1903 por la Royal Comisión of London en Gran Bretaña. Quince años antes, en 1888, Sir Jonathan Hutchinson identificó al arsénico como un cancerígeno, (Armienta et al., 1996, p.35).

### 2.3 METODOS ANALITICOS PARA CUANTIFICACIÓN DE ARSENICO

Las normas oficiales mexicanas que pueden ser utilizadas para la determinación experimental de la concentración de arsénico en agua potable son:

- NMX-AA-051-SCFI-2001 ANÁLISIS DE AGUA - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-051-1981).
- NOM-117-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.

El método es por espectrofotometría de absorción atómica, se basa en la generación de átomos en estado basal y en la medición de la cantidad de energía absorbida por estos, la cual es directamente proporcional a la concentración del elemento en la muestra analizada.

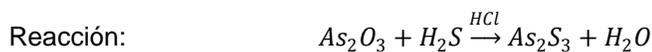
En ambas normas se establece el procedimiento para cuantificar el arsénico total; para la determinación de As total, todas las formas de arsénico orgánico e inorgánico presentes en la muestras, son oxidadas a As (+5) por digestión ácida. El As (+5) es entonces reducido a As (+3) con yoduro de sodio para después reaccionar con el borohidruro de sodio.

Cabe mencionar que la modificación a la NOM-127-SSA1-1994 refiere únicamente a la NOM-117-SSA1-1994 como método de prueba.

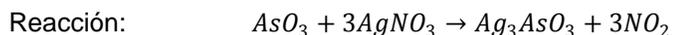
Se reportan algunos ensayos químicos cualitativos para la detección de arsénico trivalente y pentavalente, (Solis,1990).

Para arsénico trivalente hay 4 reacciones que indican la presencia del elemento:

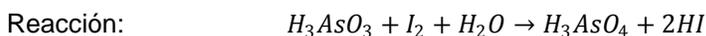
1) Con sulfuro de hidrógeno: se tiene un precipitado amarillo de trisulfuro en solución clorhídrica



2) Con solución de nitrato de plata: da un precipitado amarillo de arsenito de plata en solución neutra y este precipitado es soluble en ácido nítrico o hidróxido de amonio.

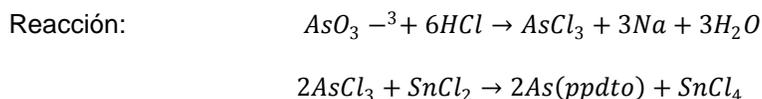


3) Con una solución de yodo en yoduro de potasio: se decolora la solución con la formación de HI y oxidación del As.



4) Reacción de Betendorff: se adiciona 1 ml de muestra a 1 ml de solución saturada de cloruro de estaño II con HCl y se calienta, se toma un color pardo o negro es debido a la formación del arsénico elemental.

PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.



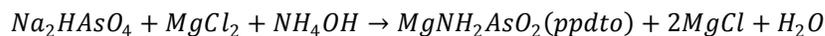
Para arsénico pentavalente son 3 las reacciones utilizadas:

- 1) Con una solución de nitrato de plata. En solución neutra se produce un precipitado rojo pardo de arseniato de plata

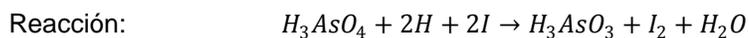


- 2) Con una mezcla de compuestos de magnesio (mezcla magnesiana): se produce un precipitado blanco cristalino con una mezcla de cloruro de magnesio ( $MgCl_2$ ), cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ) e hidróxido de amonio ( $NH_4OH$ ).

Reacción:



- 3) Con una solución de yoduro de potasio KI: si se efectúa antes la presencia de HCl se obtiene yodo ( $I_2$ ), si se agita con 1 ml de cloroformo, este se tiñe de violeta ante la presencia de yodo.



## **CAPITULO 3**

### CAPITULO 3. METODOLOGIA

La evaluación del tren de tratamiento con el proceso de coagulación-floculación, se llevó a cabo de acuerdo a la metodología establecida en la figura 2.

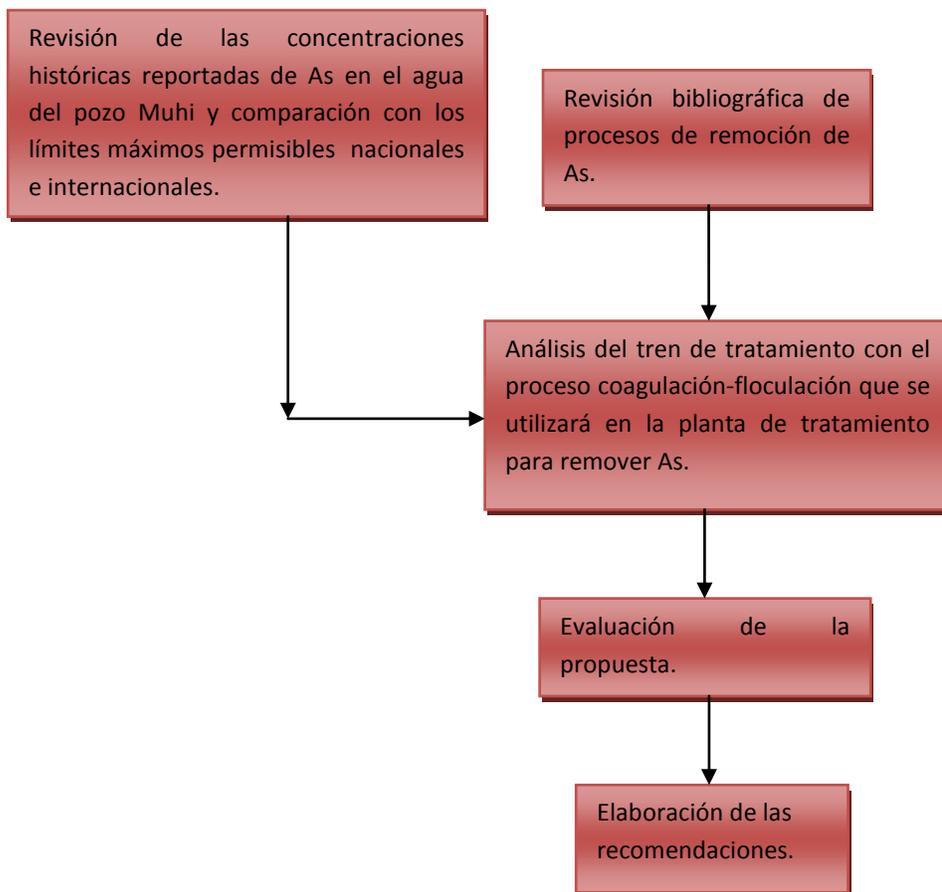


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología.

#### Descripción de la metodología

1. Revisión de las concentraciones de As del agua del pozo el Muhi. Se recopiló e identificó en la información disponible, principalmente en reportes de investigación, la calidad del agua de la fuente (pozo Muhi) en lo referente a las concentraciones de arsénico.
2. Comparar concentraciones de arsénico. Se realizó con respecto a lo establecido en la modificación de la 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 Potabilización" así con lo establecido en la Organización Mundial de la Salud.

3. Revisión bibliográfica de procesos químicos de tratamiento de As. Principalmente en bibliografía y reportes de investigación.
4. Análisis y Evaluación de la propuesta. Se realizó en base a la revisión a detalle de cada una de las etapas de la propuesta junto con el balance de masa global y a partir de este se hicieron recomendaciones.

Como parte de la metodología también se realizaron visitas en campo para obtener la evidencia mediante fotografías de:

- a) Ubicación y condiciones actuales de las instalaciones del pozo el Muhi.
- b) Proceso del aforo del pozo para identificar gastos reales.
- c) Ubicación del predio donde se instalará la planta potabilizadora.

## CAPITULO 4

## **CAPITULO 4. RESULTADOS.**

El pozo el Muhi inhabilitado desde 1998, abasteció a la población de Zimapán con agua de calidad no apta para consumo humano por exceder los límites permisibles de arsénico establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas vigentes, ahora con la puesta en marcha de la planta potabilizadora “Dra. María Aurora Armienta Hernández” que tratará 22 LPS de agua, utilizando el proceso de coagulación-floculación para remover arsénico y Fluoruros se contribuirá junto con el actual abastecedor principal: el Acueducto Tasquillo que aporta un caudal de 34 LPS, para cubrir la demanda actual de los habitantes que es de 56 LPS.

### **4.1 AFORO DEL POZO MUHI**

El aforo de un pozo es la determinación experimental del gasto de agua que se obtendrá en el proceso continuo; la importancia de los ensayos de aforo radica en que a través de ellos se puede determinar la disponibilidad del agua del subsuelo, la calidad del agua subterránea, las características y eficiencia de funcionamiento de los elementos del pozo, la utilidad y eficiencia de uso del agua extraída, entre otros atributos hidrogeológicos.

El aforo del pozo Muhi se realizó en agosto de 2010, bajo la supervisión de La Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Zimapán, CAPASAZIM, ver figura 3. El proceso consistió básicamente en la limpieza y desazolve de la tubería, en la figura 4 se muestra la tubería oxidada del pozo inhabilitado desde 1998, por lo que fue necesario acondicionarlo para iniciar el proceso.

La limpieza y desazolve de la tubería se realizó durante 48 horas siendo responsable la contratista Tecnología Intercontinental S.A. de C.V.; se fueron insertando tubos con diámetro menor al de la tubería de 6 pulgadas, adaptados con un tipo de cepillos en los exteriores ver figura 5, hasta alcanzar la profundidad de 160 m, ver figura 6, 7 y 8; conforme se insertaba la tubería se fue extrayendo agua mezclada con óxido, ver figura 9 y 10. El nivel dinámico óptimo del pozo, es decir, el nivel para el cual se puede extraer el agua y el pozo recupera el nivel, se encontró a 130 m, con desazolve y limpieza se alcanzó hasta 160 m.

Para la extracción del agua se instaló una bomba centrífuga ubicada a pie de pozo, ver figura 11; como era de esperarse, las primeras muestras de agua fueron de color café, indicativo de la presencia de sólidos suspendidos y además con un caudal escaso que fue incrementado paulatinamente, ver figura 12 y 13; al final se logró obtener un caudal máximo de 38 LPS de característica incolora ver figura 14; sin embargo solamente se potabilizará 22 LPS a petición de CAPASAZIM, los cuales serán enviados a la planta potabilizadora ubicada a 3 1/2 km del pozo el Muhi.

**PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.**

Con el fin de cuantificar arsénico y fluoruros (en el laboratorio) se tomó 2 L de la corriente de agua, la contratista Tecnología Intercontinental S.A. de C.V. reportó 1.3 mg/L y 2.5 mg/L respectivamente, los cuales están por arriba de los límites máximos permisibles establecidos en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994, ver figura 15 y 16.



**Figura 3. Oficinas de CAPASAZIM.**



**Figura 4. Condiciones del pozo el Muhi inhabilitado.**

**PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.**



**Figura 5. Tuberías utilizadas, para limpieza del pozo.**



**Figura 6. Colocación de tuberías para limpieza y desazolve.**



**Figura 7. Colocación de tuberías a diferentes profundidades.**

**PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.**



**Figura 8. Grúa utilizada para la instalación de la tubería.**



**Figura 9. Desazolve del pozo.**



**Figura 10. Continuación de desazolve.**

**PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.**



**Figura 11. Conexión de bomba.**



**Figura 12. Inicio de aforo**



**Figura 13. Características del agua extraída.**



Figura 14. Terminación del proceso de aforo.



Figuras 15 y 16 Evaluación de las características del agua.

#### 4.2 TREN DE TRATAMIENTO.

El tren de tratamiento propuesto consiste en la dosificación de cloro para oxidar  $As^{+3}$  a  $As^{+5}$  presente en el agua, a continuación también se adiciona  $FeCl_3$  y un polímero como coagulantes los que permitirán la formación de flóculos en el tanque floculador que serán separados en el clarificador o sedimentador; el agua procedente del clarificador con baja concentración de flóculos de arsénico pasará a un tanque de homogenización y posteriormente a un filtro electromedia con carga de arena para eliminar los flóculos restantes. La corriente libre de flóculos se enviará a dos filtros de alúmina que ayudarán a reducir la concentración de fluoruros a 1.5 mg/L que es otro compuesto presente en concentraciones por arriba de lo establecido en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994. Como etapa final del proceso el agua tratada y procedente del filtro de alúmina será enviada a un tanque de almacenamiento para su distribución.

Los lodos generados en el clarificador o sedimentador así como el agua de retrolavado del filtro de arena serán enviados a un tanque de lodos para deshidratarlos utilizando un filtro prensa y disposición final en relleno sanitario.

En la figura 17 se presenta el diagrama de flujo de proceso (DFP) el cual muestra el tren de tratamiento, representando cada equipo como el floculador, el clarificador, las bombas así como las

PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.

válvulas, con simbología estándar, las líneas que unen los equipos representan la tubería de conducción; es un trazo sin escala.

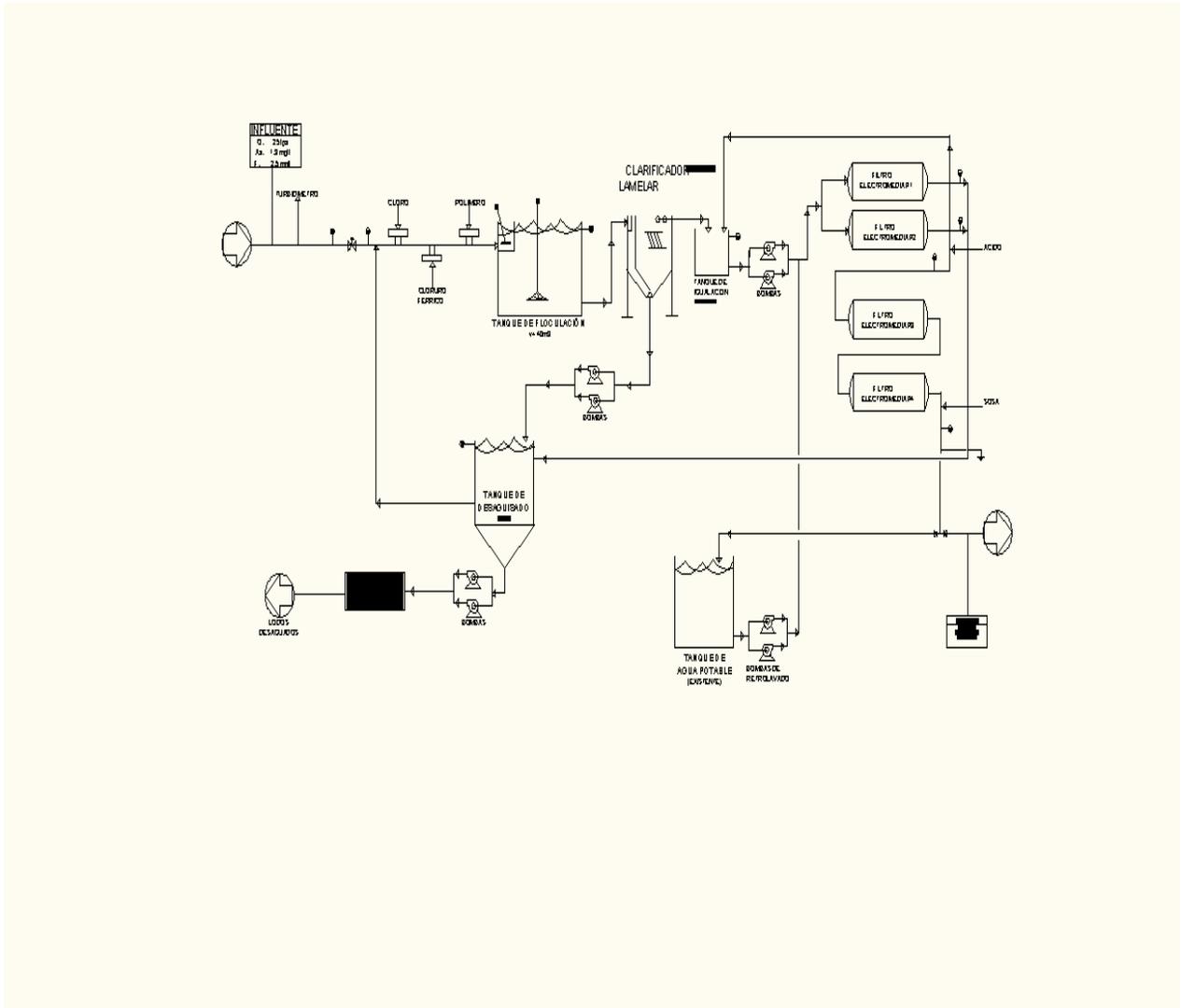


Figura 17 Diagrama de flujo del tren de tratamiento.

#### 4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En este apartado se presenta la propuesta del tren de tratamiento con el proceso coagulación-floculación por etapas y a continuación se analiza cada una y se evalúa.

##### **Dosificación de cloro, cloruro férrico y polímero.**

---

Se inyecta cloro en concentración de 1 mg/L para oxidar  $As^{+3}$  a  $As^{+5}$  con un tiempo de contacto de 5 segundos. Con la adición de  $FeCl_3$  y un polímero apropiado, se presentará la floculación del  $As^{+5}$  en el tanque de floculación. El flujo de entrada será de 22 LPS.

**Análisis:** De acuerdo a los reportes de calidad del agua en Zimapán el arsénico se encuentra presente principalmente en la forma  $As^{+5}$ , así el cloro que se utilizará será para oxidar la escasa presencia de  $As^{+3}$  a  $As^{+5}$ . En la propuesta no se reporta dosis de  $FeCl_3$  y tampoco del polímero a utilizar; estos valores se obtienen experimentalmente en las pruebas de jarras; en la literatura se reportan dosis de 50 mg/L de  $FeCl_3$  y 20 mg/L de cloro para obtener 98% de eficiencia de remoción de arsénico, (Riancho, 1998) y 80 mg/L de  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  para remover 98.8% (Morales, 1995).

---

##### **Floculación.**

---

El mezclado rápido y floculación se llevarán a cabo en un tanque de floculación que es de concreto de  $40m^3$  equipado con un mezclador de 1 HP, para obtener una floculación óptima, se requiere dar un tiempo de contacto razonable.

**Análisis:** Los tiempos de contacto para la formación de flóculos y las velocidades de agitación también se obtienen de pruebas de jarras, para una floculación óptima se recomienda en los primeros minutos agitaciones enérgicas en el momento de la introducción de los reactivos, con el objeto de que estos se mezclen con el agua, y a continuación se procede a una agitación lenta durante 5 minutos que puede tener lugar en el clarificador, (Pérez, 1996). Es importante vigilar el pH ya que se reportan las mayores eficiencias de separación usando  $FeCl_3$  con valores entre 8 y 9, (Solís, 1990).

---

##### **Clarificación o sedimentación.**

---

El tanque clarificador diseñado con una geometría que facilita la precipitación de los flóculos tiene un volumen de  $46.5 m^3$ . Los lodos sedimentarán en el fondo y serán succionados y enviados a un tanque de lodos.

**Análisis:** La eficiencia de separación de sólidos sedimentables reportadas para éstos equipos es de 85% por lo tanto serán separados la mayor parte de flóculos en forma de lodos con concentraciones altas del arsénico removido en esta etapa del proceso.

---

### Homogenización del agua.

---

Se incorpora al sistema un tanque de igualación construido en concreto de volumen interno 30 m<sup>3</sup>, que permitirá homogenizar el agua procedente del tanque de clarificación con el fin de asegurar la correcta operación de los filtros de electromedia con carga de arena.

**Análisis:** Para alcanzar la homogenización requerida es importante realmente asegurar que la concentración de flóculos será baja y esto se logrará vigilando la buena operación del clarificador.

---

### Filtración para eliminar flóculos.

---

Para eliminar los flóculos restantes y cumplir con la calidad deseada de arsénico en el efluente, se instalará un sistema de remoción con filtros electromedia cargados con arena, son dos unidades filtrantes, cada una para tratar 13 LPS. Los filtros electromedia son de acero al carbón de 1.5 m de diámetro y 1.40 m de altura, con carga de arena electromedia.

El medio filtrante propuesto no requiere regeneración química o de cualquier otro tipo. Solo requiere de cortos intervalos de retrolavado que duran 4 minutos que se efectuarán automáticamente 1 a 2 veces al día al registrarse una diferencial de presión de 10 psi. El agua de retrolavado que tiene una alta concentración de arsénico será enviado también al tanque de lodos.

**Análisis:** La propuesta establece realizar el retrolavado cuando se registre una presión diferencial de 10 psi; la literatura reporta que los filtros de arena pueden utilizarse hasta por 31 días obteniendo calidad de agua adecuada (Riancho, 1998), así la periodicidad de retrolavado se definirá hasta el momento en que opere la planta, también se recomienda filtraciones lentas ya que son más efectivas, Se reporta el uso de NaOH en el retrolavado; una solución de 10 g/L de NaOH con 24 horas de tiempo de contacto con la arena ha retenido 2.5 mg As /Kg de arena obteniendo eficiencias de 85%; para retener 4 mg As/ Kg son necesarias 5 horas de tiempo de contacto (Riancho, 1998).

Utilizar dos filtros asegura la remoción de flóculos de arsénico para alcanzar la concentración requerida en el efluente, además será posible trabajarlos en relevo durante el retrolavado, evitando parar el proceso.

---

### **Filtración para eliminar Fluoruros.**

---

Para remover los fluoruros al valor establecido en la NOM-127-SSA1-1994 de 1.5 mg/L, se optó por el proceso empleando filtros con alúmina activados que absorben selectivamente el flúor. También esta etapa consta de dos unidades filtrantes. El medio se regenera con sosa cáustica al 1% durante 90 minutos cada 3 a 4 meses. El medio de pH básico permite que el flúor atrapado en la alúmina se desprenda. Al final del ciclo de regeneración se enjuagan los filtros con agua limpia por unos 80 minutos y luego se pasa por otro ciclo de 90 minutos con una solución ácida de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0.5% para reactivar la alúmina. Este proceso de regeneración podrá repetirse 4-5 veces, luego deberá sustituir la alúmina activada en cuanto va perdiendo sus propiedades de absorción. La alúmina podrá disponerse a un relleno sanitario. La solución alcalina y ácida empleada para la regeneración se juntan para obtener una solución con pH entre 5 y 10 para descargar a la alcantarilla. Para la descarga a la alcantarilla la NOM-002- SEMARNAT-1994 no regula el Flúor y éste se va diluyendo conforme se van integrando otras descargas.

Los filtros están contruidos de acero al carbón de 1.5 cm de diámetro y 1.4 m de altura con su respectiva carga de alúmina.

**Análisis:** Utilizar dos filtros de alúmina al igual que los de arena, pueden garantizar la remoción de Fluoruros al valor de 1.5 mg/L y el trabajo en relevo cuando sea necesario la regeneración de la alúmina; ocasionalmente al agua procedente de la regeneración de los filtros deberá realizarse análisis de laboratorio en fluoruros y así conocer la concentración antes de enviarla a la alcantarilla. La sustitución de la alúmina es un gasto que deberá programarse una vez determinada el período de vida útil.

---

### **Tanque de lodos.**

---

Los lodos provenientes del clarificador y del retrolavado de los filtros electromedia, se enviarán a un tanque de desaguado de concreto, volumen interno de 30m<sup>3</sup>, para su posterior deshidratación en un filtro prensa; el agua de rechazo se regresará a la línea de entrada del sistema y el lodo deshidratado se mandará a un contenedor para su eventual disposición final a relleno sanitario. Para poderlo enviar deberá estar acompañado del certificado de análisis CRETIB (corrosivo, reactivo, explosivo, toxico, inflamable, biológico-infecciosos) emitido por un laboratorio certificado por la Entidad Mexicana de Acreditación EMA que demuestre que la concentración de arsénico en el extracto es menor a 5 mg/L de acuerdo a lo establecido en la NOM-052-SEMARNAT-2005. Se espera obtener en la prueba CRETIB arsénico muy por debajo del valor de la norma, debido a que adsorción que ocurrirá durante la coagulación entre los hidróxidos de fierro y el arsénico los mantiene fuertemente unidos, sin embargo es necesario cuidar no modificar las condiciones de pH o que ocurran otras reacciones si se mezcla el lodo con materia orgánica.

Al día se proyectan remover 2.76 Kg de As y 2.16 Kg de Fluoruros. Se estima una producción de lodo de aproximadamente 1 m<sup>3</sup> por mes, con un contenido de 30% de sólidos.

**Análisis:** Al lodo deshidratado se le deberá asignar un lugar de almacenamiento temporal dentro de la planta en zonas donde se reduzcan posibles riesgos, los recipientes deberán ser identificados; una vez ubicado en relleno sanitario por considerarse residuo no peligrosos existe el riesgo de transformarse en peligrosos por la exposición a la intemperie por lo que es más conveniente enviarlo a confinamiento como residuo peligroso.

La propuesta estima generación de lodos mínima en relación a los criterios generales reportados en la literatura los cuales consideran que por cada 20 L de agua tratada se producen 80 ml de lodos. La producción de lodos depende de las condiciones del proceso y de las dosis de coagulantes principalmente, por lo que será necesario esperar las primeras pruebas para comprobar el dato real.

#### **Almacenamiento de agua potable.**

---

La capacidad del tanque de almacenamiento será de 20 m<sup>3</sup>, en este se almacenará el agua que cumple con los límites máximos permisibles de arsénico 0.025 mg/L, Fluoruros de 1.5 mg/L.

**Análisis:** No se considera la adición de cloro en este tanque, sin embargo debido a que en algunos domicilios no se cuenta con sistemas de almacenamiento adecuado para el agua potable (tinacos nuevos, limpios, tapados, etc).debe medirse la concentración de cloro residual y dosificar para tener valores mayores a lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 de 0.2 a 1.5 mg/L y así asegurar la concentración en la toma del usuario.

---

**Plan de contingencia en caso de incumplimiento.** La contratista sugiere las siguientes medidas que pueden realizarse en caso necesario; durante el proceso en continuo; el operador podrá tomar muestras del agua en el tanque de desaguado de lodos y realizar pruebas CRETIB al lixiviado para verificar que la concentración de arsénico no sobrepase el límite máximo permisible para el análisis. Si se identifican niveles mayores a 5mg/L se podrán hacer las siguientes acciones correctivas.

- a) Aumentar la dosificación de FeCl<sub>3</sub>
- b) Reducir pH con adición de ácido ya que el hidróxido de fierro exhibe mejores propiedades
- c) Se podrá adicionar en el tanque de lodos una tierra diatomácea para diluir el efecto del arsénico en el lixiviado de la prueba CRETIB

En el caso de que por una mala operación de la planta el lodo no cumpla con la prueba CRETIB impidiendo disponerlo en relleno sanitario, éste se clasificará como residuo peligroso y se deberá enviar a confinamiento; costo aproximado es de \$2000/m<sup>3</sup> y \$5000 por el transporte de un camión de 8 toneladas.

En la figura 18 se muestra la imagen de la planta potabilizadora terminada y operando.



**Figura 18. Planta potabilizadora en operación.**

En la figura 18 se observan el floculador, clarificador, homogenizador están ubicados de manera contigua excepto los filtros de arena y alúmina (en color rojo) y el tanque de almacenamiento en negro ubicado atrás de los filtros (en color negro).

#### **4.2.2 BALANCE DE MASA**

Para realizar el balance de masa global se generó un diagrama de bloques con el fin de identificar las corrientes de proceso y los componentes de interés, en la figura 19 se muestran los datos.

El balance es parte de la evaluación del tren de tratamiento y tiene como objetivo cuantificar Cloro y FeCl<sub>3</sub> los cuales son la materia prima principal en la remoción de arsénico en el proceso coagulación-floculación así mismo estos datos pueden ser útiles para estimar los costos de adquisición por el responsable de la planta; en la tabla 12 se muestran los resultados.

Para el cálculo, se parte del flujo real a tratar de 2160 m<sup>3</sup>/día (22LPS) y que es menor al valor máximo obtenido durante el aforo de 38 LPS, concentración de 1.5 mg/L As y 2.5 mg/L F; en el floculador se consideraron los criterios reportados en las pruebas de jarras por Morales (1995) quien

PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.

utilizó agua procedente del pozo el Muhi y concentraciones de 80 mg/L de  $\text{FeCl}_3$  para obtener 98.8% de eficiencia de remoción de arsénico con pH de 6.57.

No sería real realizar con datos de escritorio un balance por componente presente en el agua ya que para ello se requieren evaluaciones experimentales.

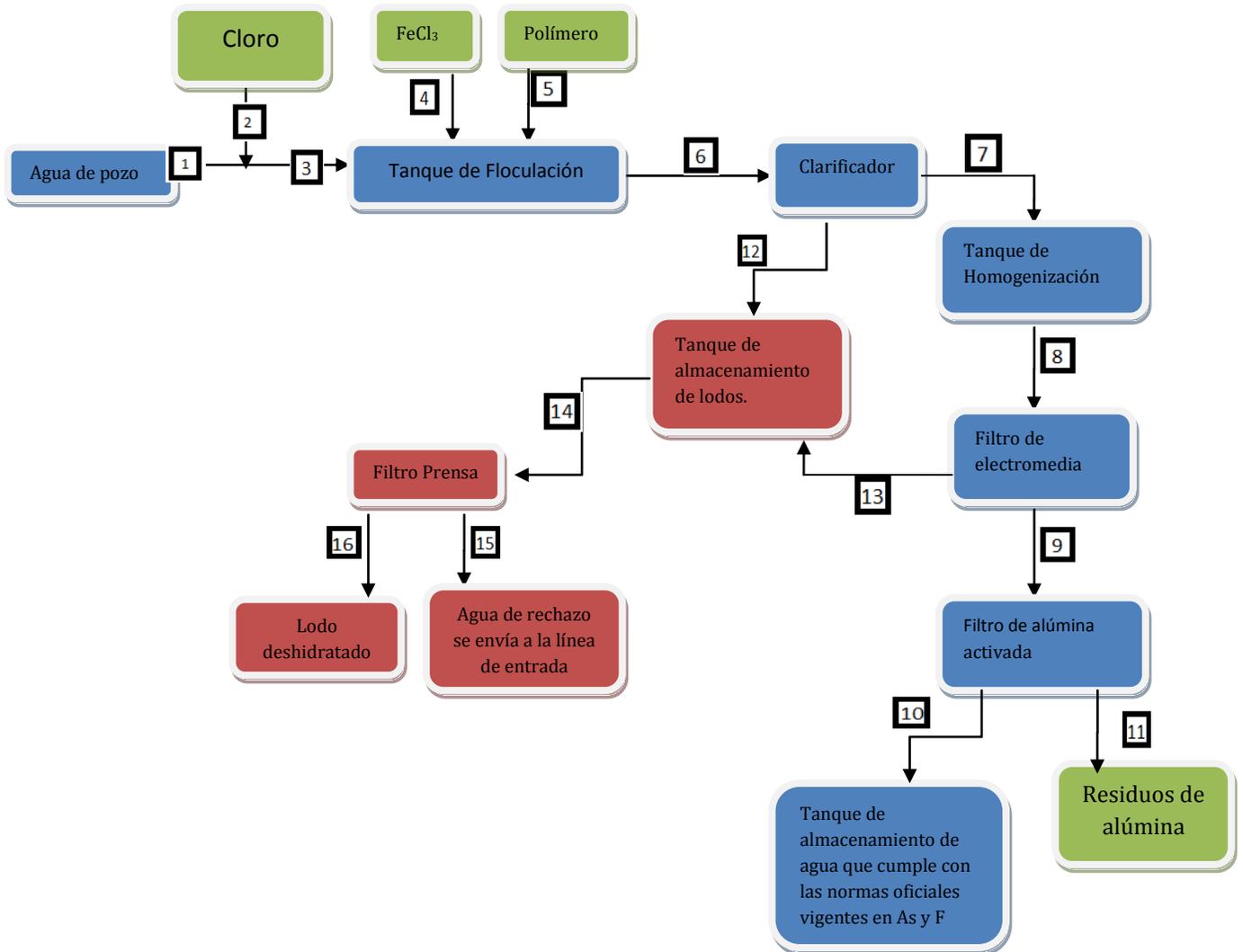


Figura 19. Diagrama de bloques del tren de Tratamiento.

Tabla 12. Balance de Masa Global.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
As <sup>+3</sup>	X															
As <sup>+5</sup>	X		X			X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
H <sub>2</sub> O	X		X			X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
FeCl <sub>3</sub>				X		X	X	X				X	X	X	X	X
Fluoruros	X		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Polímero					X	X	X	X					X	X	X	X
Cloro		X	X			X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Flujo	89730	1.8	89731.8	7.2	0.27	89739.27	89703.20	89703.20	89649.26	76201.87	13447.38	306.02	54.00	360.02	Agua	Lodos
	Kg/h	Kg/h	Kg/h	Kg/h	Kg/h	Kg/h	L/h	L/h	L/h	L/h	L/h	L/h	L/h	L/h	de	25-30 %
						90009.29									rechazo	humedad
						L/h										

En la tabla 12 se identifican 16 corrientes principales del proceso y 7 componentes de interés. Debido a que se requieren datos experimentales de densidades de lodo y volúmenes generados, no es posible expresar en las mismas unidades todas las corrientes.

La demanda de Cloro (corriente 3) se calcula a partir del 20 mg/L reportado por Shen (1973), la función es oxidar As<sup>+3</sup> a As<sup>+5</sup>, cabe señalar que Armienta (1993 y 1997) reporta que la especie predominante en aguas subterráneas de Zimapán es A<sup>+5</sup>.

Los requerimientos del polímero (corriente 5) se estiman en base a los datos sugeridos por proveedores pues se desconoce la composición.

Las salidas del clarificador 7 y 12 se calculan con eficiencias de separación del equipo de 85%. La corriente 7 deberá tener escasa presencia de flóculos de arsénico; el volumen de lodos con la mayor concentración de lodos de As (corriente 12) se estima en base al criterio: por cada 20 L de agua tratada se generan 80 ml de lodo.

**PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO PARA ELIMINAR ARSÉNICO  
EN UN POZO DE AGUA UBICADO EN ZIMAPAN, HIDALGO.**

En el tanque de lodos la corriente 14 tendrá la mayor concentración de arsénico, removiendo 2.76 Kg de As y 2.16 Kg de Fluoruros por día. Las corrientes 15 y 16 solo se pueden cuantificar experimentalmente ya que depende de los volúmenes reales de lodos generados en el proceso y del agua utilizada para el proceso de retrolavado de los filtros de arena.

Las concentraciones de As y F del agua deben disminuir a los valores establecidos en la modificación de la NOM-127-SSA-1994 después de los filtros de arena y alúmina respectivamente, corriente 10.

De acuerdo al balance de masa la dosis de cloro (corriente 2) deberá ser de 1.80 Kg/h, si se utilizará hipoclorito de sodio en solución al 15% como fuente de cloro se requieren 238 L al día; para el  $\text{FeCl}_3$  se necesitan 7.2 Kg/h (corriente 4), algunos precios disponibles en noviembre de 2011 para el cloruro férrico eran \$500, garrafón de 60 L al 40%.

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

- El procesos coagulación-floculación comparado con otros tratamientos como ósmosis inversa, resulta más simple e igualmente eficiente para remover arsénico.
- El proceso de coagulación-floculación utilizando  $\text{FeCl}_3$  como coagulante y  $\text{Cl}_2$  para oxidar  $\text{As}^{+3}$  a  $\text{As}^{+5}$  remueve arsénico en concentraciones mayores a 98.8% prácticamente sin modificarse pH del agua; si la concentración de arsénico actual en el pozo es de 1.3 mg/L entonces la concentración esperada al final del tratamiento será de alrededor de 0.0156 mg/L, valor inferior a límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.025 mg/L
- El agua obtenida con la propuesta de tratamiento dejará de ser no apta para consumo humano, de tal manera que los 2160 LPS de agua tratada cumplirán con los límites máximos permisibles para arsénico y Fluoruros establecidos en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 de 0.025 mg/L y 1.5 mg/L respectivamente.
- El  $\text{FeCl}_3$  y el  $\text{Cl}_2$  a partir de hipoclorito de sodio son especies químicas muy comunes y fáciles de adquirir a precios accesibles, por lo que esto puede asegurar la operación continua de la planta.

## **RECOMENDACIONES**

## RECOMENDACIONES

1. Debido a que en algunos domicilios no se cuenta con sistemas adecuados de almacenamiento para el agua potable (tinacos nuevos, limpios, tapados, etc), se recomienda dosificar cloro en el tanque de almacenamiento al final del tratamiento, en un cantidad superior a lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.2 a 1.5 mg/L para asegurar la calidad del agua en el usuario.
2. Se recomienda analizar al menos cada 6 meses en un laboratorio acreditado la calidad del efluente de acuerdo a la modificación de la NOM-127-SSA1-1994.

## **BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFÍA

- Armienta, M. A., Rodríguez, R. (1995). *Evaluación del riesgo ambiental debido a la presencia de arsénico en Zimapán Hidalgo*. Instituto de Geofísica, UNAM, Informe a la fundación Mapfre. pp. 42.
- Armienta, M. A., Rodríguez, R., (1996). *Arsénico en el valle de Zimapán (México) Problemática ambiental*. Instituto de Geofísica, UNAM: Informa a la fundación Mapfre.
- Armienta, M. A., Rodríguez, R., Aguayo, A., Cisneros, N., Villaseñor, G., Cruz. O., (1997). *Arsenic contamination of Groundwater at Zimapán, México*. Hydrogeology Journal, v. 5, N° 2, pp39-46.
- Armienta, M. A., Rodríguez, R., Villaseñor, G., (1993). *Estudio de Reconocimiento de la Contaminación por As en la zona de Zimapán Hidalgo*. Rep. Tec., Instituto de Geofísica. UNAM. México D.F.
- Bahmra, R. K., y Costa, M. (1992). *Trace Elements Aluminium, Arsenic, Cadmium, Mercury and Nickel*. En LIPPMAN, M. (editor): *Environmental Toxicants: Human Exposure and Their Health Effects*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 575-631.
- Carson, B. L.; Elis III H. V., y Mccann, J.L. (1986). *Toxicology and Biological Monitoring of Metals in Humans*. Lewis Publishers Inc., Chelsea, pp. 27-33.
- Cheng, R. y Liang, S.(1994). *Enhanced coagulation for Arsenic Removal*. Journal Of American Water Works Association.
- Drever, J.L., (1997). *The geochemistry of natural waters*. Prentice Hall, New Jersey. Dzombak, D.A., Morel. F. M., 1990. Surface complexation modeling (hydrous ferric oxide). Wiley Interscience publications, N.Y.
- Escolero, O., Domínguez, E., Gonzales, M., León, O., (1992). *Informe preliminar del estudio hidrogeoquímico en la zona de Zimapán Hidalgo*. Reporte interno COA-2. Comisión Nacional del Agua, México, D.F.
- Fergusson, J. F., (1990). *The heavy elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Pergamon Press, New York.
- García, A., (1997). *Distribución y especiación de arsénico en sedimentos fluviales del río Toliman en Zimapán Hidalgo*. Tesis de Maestría en Ciencias, UACP y P del CCH. UNAM.
- Gorby, M. S., (1994). *Arsenic in human medicine*. In J.O. Nriagu (Ed.), *Arsenic in the Environment, Part II: Human and Ecosystem Effects*. J. Wiley y sons, Inc. New York.
- Hering J., Ghen, P., Wilkie, J., Elimilech, M., Liang, S.(1996). *Arsenic Removal by Ferric Chloride*. Journal of American Water Works Association.
- Martín, F., (2000). *Interacción de aguas contaminadas con arsénico con rocas calizas de Zimapán, Hidalgo*. Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto de Geofísica, UNAM.
- Metcalf & Eddy, (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 3a Edición. Mc Graw Hill.

- Morales, F., (1995). *Coagulación con sales de Hierro y su eficiencia en la remoción de arsénico del agua subterránea destinada al consumo humano en Zimapán, Hidalgo*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.
- Pérez, F., (1996). *Estudio Químico de la Remoción de Arsénico en Aguas Potables contaminadas el Distrito Minero de Zimapán*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química: UNAM
- Riancho, F. J., (1998). *Evaluación de Procesos para la Eliminación de As en el agua de Abastecimiento*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química: UNAM.
- Sandoval, L. y Jauregui, L. (2010). *Tratamiento de residuos de arsénico provenientes del tratamiento del agua*. IMTA
- Satish, C.B., Traina, S.J., Waychunas, G.A., Logan, T.J., (1998). *Experimental and theoretical vibrational spectroscopic evaluation of arsenate coordination in aqueous solutions, solids, and at mineral-water interfaces*. *Geochim. Cosmochim. Acta* vol.62, Nº 19/20. Pp. 3285-3300.
- Shen Y.S., (1973.). *Study of Arsenic Removal from Drinking Water*. Journal of American Water Works Association, August
- Solis, B.,(1990). *Diseño de una planta piloto para la remoción de arsénico del agua de pozos mediante el procesos de coagulación-floculación*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química: UNAM
- Storer, G., (1991). *Arsenic, opportunity for risk assessment*. *Arch. Toxicol.* vol. 65, pp. 525-531.
- Yta, M., Moreno-Tovar, R., (1997). *La mineralización de los distritos mineros Pachuca-Real del Monte y Zimapán- su papel en la evolución metalogenética del Estado de Hidalgo, México*. II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados. Libro-Guía de las excursiones Geológicas, Excursión 3, pp. 73-87.
- Zimapán, Hidalgo, Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Zimapán, CAPASAZIM. (2010). *Términos de referencia para la elaboración del proyecto ejecutivo, construcción, puesta en marcha y operación durante tiempo definido de la planta potabilizadora del Muhi, municipio de Zimapán, Hidalgo 2010*.

#### **Bibliografía electrónica**

- INEGI. (2010). Consultado el 15 de julio de 2010, página web <http://www.inegi.org.mx>
- Biomédicas UNAM. (2010). Consultado el 30 de julio, página web <http://www.biomedicas.unam.mx/html/period97/sep5.htm>.
- IMTA (2010). Consultado el 3 de julio, página web <http://www.lenntech.es/tratamiento-lodos-general.htm>
- ZIMAPAN (2010). Consultado el 15 de mayo, página web <http://www.planetaazul.com.mx/site/2011/02/24/pobladores-de-zimapan-tendran-agua-entubada/>

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Adsorción:** La adsorción se refiere a la formación de complejas superficies entre arsénico soluble y los sitios superficiales de oxidrilos.

**Antropogénico:** El término antropogénico se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana.

**Arsenicismo:** Envenenamiento por los compuestos del arsénico.

**Coagulación:** El proceso de coagulación es la agregación de partículas en agregados de mayor tamaño y más fácilmente decantables con el fin de obtener una separación satisfactoria por sedimentación.

**Coprecipitación:** La coprecipitación es definida como la incorporación de especies solubles de arsénico en una fase creciente de hidróxido vía inclusión, oclusión o adsorción.

**Drenaje Acido DA :** El DA se forma al estar en contacto el material que contiene sulfuros con aguas subterráneas o superficiales en presencia de oxígeno.

**Floculación:** Es el fenómeno por el cual las partículas desestabilizadas chocan unas contra otras para formar coágulos mayores.

**Hidrogeológico:** estudio del origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas.

**Hidrogeoquímico:** estudios que permite identificar tipos de aguas subterráneas

**Hidroarsenismo:** es una enfermedad ambiental crónica cuya etiología está asociada al consumo de aguas contaminadas con sales de arsénico y que en algunas regiones del mundo es de carácter endémico. En algunos estudios se le llama por su acrónimo HACRE o HACER.

**Hidrolización:** proceso que sufren las sustancias cuando interactúan con el agua, bien descomponiéndose, disolviéndose o modificando su estructura.

**Jales:** Residuos sólidos como resultado de las actividades mineras.

**Sorción:** Retención de una sustancia por otra cuando están en contacto; incluye las operaciones de absorción, adsorción, intercambio iónico y diálisis.

**Términos de referencia:** Estos documentos describen los alcances del proyecto y por lo tanto las responsabilidades que adquiere el contratista.