



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍAS

**ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
MATERIALES**

**Evaluación de Propiedades Físicoquímicas del Agua de la
Presa de Mata, Estado de Guanajuato, México.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LOS MATERIALES**

PRESENTA

ING. GEO ARTEMIZ JUÁREZ GUZMÁN

DIRECTOR: DR. FIDEL PÉREZ MORENO

CO-DIRECTOR: DR. RAÚL MORENO TOVAR

Mineral de la Reforma, Hidalgo. Junio 2013

DEDICATORIA

A mi padre *José Luis Juárez Villar*, por haberme guiado en el camino y hacer de mi lo que hoy soy, por tu apoyo y cariño a pesar de los obstáculos y diferencias.

A mi madre *Martha Guzmán Ruiz*, por ser mi incondicional amiga y compañera en este arduo camino, por tu gran apoyo, sinceridad y enorme cariño.

Con cariño y respeto a ustedes dos...padre y madre.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al *Dr. Fidel Pérez Moreno* por los conocimientos y lecciones que ha brindado en este trabajo de investigación.

Al *Dr. Raúl Moreno Tovar* por su apoyo en este trabajo de investigación.

A mis sinodales: *Dra. Marissa Vargas Ramírez* y el *Dr. Oscar Coreño Alonso*.

A cada persona que contribuyo a la realización de este trabajo, directa o indirectamente.

INDICE

| | PÁGINA |
|---|---------------|
| RESUMEN | I |
| ABSTRACT | II |
| CAPITULO I Introducción | 1 |
| I.1 Química del Agua | 2 |
| CAPITULO II Antecedentes | 6 |
| II.1 Toxicidad de elementos metálicos | 8 |
| CAPITULO III Justificación | 22 |
| CAPITULO IV Metodología | 24 |
| IV.1 Área de Localización | 24 |
| IV.2 Características Fisiográficas Del Distrito Minero de Guanajuato | 25 |
| IV.3 Geología de la Región | 26 |
| IV.5 Yacimientos Minerales | 29 |
| IV.6 Muestreo | 34 |
| IV.7 Análisis Físicos | 35 |
| IV.8 Análisis Químicos | 36 |
| IV.9 Análisis de Elementos Mayoritarios y Traza | 40 |
| IV.10 Tratamiento de remoción de Al del agua | 44 |
| IV.10.1 Materiales | 44 |
| IV.10.2 Acondicionamiento de resina de intercambio iónico | 45 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| IV.10.3 | Acondicionamiento de material adsorbente | 45 |
| IV.9.4 | Tratamiento del agua con resina de intercambio y con adsorbente tratado térmicamente | 45 |
| IV.10 | Análisis de muestras de sedimentos | 46 |
| IV.10.1 | Tratamiento de sedimentos | 46 |
| IV.10.2 | Análisis de elementos mayoritarios y traza | 47 |
| IV.10.3 | Extracción secuencial de metales en sedimentos | 49 |
| IV.10.4 | Determinación de la media aritmética y del porcentaje de desviación estándar relativo (%DER) en las muestras | 51 |
| | CAPITULO V Resultados y Discusión | 52 |
| V.1 | Análisis Físico-químicos del agua | 52 |
| V.2 | Análisis Químicos del agua. | 53 |
| | CAPÍTULO VI Conclusiones | 61 |
| | Índice de Tablas | 63 |
| | Índice de Figuras | 64 |
| | Referencias Bibliográficas | 65 |
| | Anexo I | 71 |
| | Anexo II | 72 |
| | Anexo III | 75 |

R E S U M E N

El agua es fundamental para el sostenimiento y reproducción de la vida en el planeta, ya que constituye un factor indispensable para el desarrollo de los procesos biológicos que la hacen posible; sin embargo el abuso de éste puede convertirlo en un recurso no renovable, limitando su uso y poniendo en riesgo el desarrollo sustentable de todos los sistemas vivos, incluyendo la del hombre.

Las actividades antropogénicas hacen que el agua de uso humano se contamine en forma continua y disminuya aún más su disponibilidad, por ello, es necesario realizar análisis de calidad para determinar los procesos más apropiados de tratamiento para disminuir los posibles contaminantes en ésta.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar físicoquímicamente el agua de la presa y de la planta de tratamiento de la comunidad de Mata, Gto., con el propósito de conocer la calidad del agua que se suministra a la población desde este sitio, siguiendo las normativas oficiales mexicanas.

Los resultados que se presentan muestran que las concentraciones de Al, Fe, Mn y Hg se encuentran por arriba de los límites permisibles, siendo preocupante en especial el del Hg debido a su alta toxicidad; por lo que se recomienda para este elemento realizar análisis continuos para evitar daños a la población.

El agua fue tratada con resina de intercambio catiónica o con arcillas tratadas térmicamente de Calderones, Gto., para eliminar Al, los resultados fueron alentadores por lo que el proceso debe ser continuado para eliminar Al. Fe y Mn del agua en otros estudios.

A B S T R A C T

The water is fundamental to maintenance and reproduction of the life in earth, since it does constitutes an indispensable factor for development of biological processes that it makes possible; nevertheless, the abuse of this one can turn it into a not renewable resource, limiting it uses and putting in risk the sustainable development of all alive systems, including that of the man.

Anthropogenic activities produce water contamination from human use continuously and diminish the availability, it is necessary to carry quality analysis to determine the most appropriate processes of treatment to possible diminish the pollutants in that.

The objective of this work is physical and chemical characterization of the water of Mata dam and treatment plant of Guanajuato community, with the intention of knowing the quality of the water that is given to population from this site, following Mexican official norms.

The results shown concentrations of Al, Fe, Mn and Hg that are higher than permissible limits, being worrying especially of Hg, due to its high toxicity; for what it is recommended to maintain constant analyses for this element to avoid damage on the population.

The water was treated preliminary with a cationic interchange resin o with clay that was treated with heat from Calderones, Gto. The remove of Al was encouraged so that process must be continued to remove Al, Fe and Mn from water in other studies.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más importantes del Planeta Tierra que forma parte integral de los ecosistemas naturales y es fundamental para el sostenimiento, reproducción y desarrollo de la vida en los cuales intervienen los diferentes procesos biológicos y químicos que la hacen posible (Mongue, 2004).

La superficie de la tierra es principalmente acuosa ya que está cubierta en aproximadamente el 71% de ella, la mayor parte es agua salobre y solo el 2.8% agua dulce. Del agua que fluye en los continentes cerca del 0.63% está en lagos, ríos y lagunas y el 0.2% flota en la atmósfera (Huarte y Sánchez, 2006; Manahan, 2001).

El agua es considerada el disolvente universal por excelencia, ya que en ella se pueden disolver gran cantidad de sustancias; sin embargo, si las sustancias disueltas en el agua están en altos niveles pueden llegar a ser contaminantes altamente tóxicos y perjudiciales para la salud humana.

El ciclo del agua se manifiesta cuando el vapor de agua en la atmósfera es enfriado y en consecuencia se precipita en forma de lluvia, nieve o granizo en forma continua proporcionándonos agua potable para el desarrollo de la vida humana entre otras, sin embargo el abuso de este vital líquido puede ocasionar la

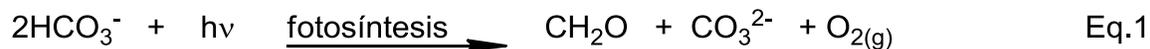
escasez del mismo, el cual, ya se manifiesta en muchas regiones del Planeta, en donde hace falta para actividades agrícolas, industriales y alimenticias (Mongue, 2004).

Actualmente la escasez del agua de consumo humano a nivel regional, nacional y mundial, se debe al abuso de las capacidades de los mantos acuíferos, es decir, se consume mayor cantidad de agua de estos mantos acuíferos que la capacidad que tienen éstos para recargarse, de tal forma que el volumen de agua extraído es mucho mayor del que se almacena en ellos.

Las condiciones físicas de los cuerpos de agua como los lagos, lagunas, presas, jagüeyes, ríos superficiales y subterráneos, entre otros, están fuertemente influenciados por los procesos químicos y biológicos que ocurren en ella; debido a que la presencia de materia orgánica, O_2 y la incidencia de la energía solar en el agua hace que haya crecimiento de algas; por otra parte, también el O_2 es consumido por la actividad bacteriana sobre la materia orgánica (Manahan, 2001).

I.1 Química del agua (Manahan, 2001)

Muchos de los procesos químicos que se desarrollan en el agua están influenciados por algas y bacterias; por ejemplo la fotosíntesis de las algas fija carbón inorgánico de bicarbonato en forma de biomasa (formaldehído), además de formar el carbonato como se muestra en el equilibrio 1.



Los carbonatos pueden presentar reacciones ácido-base para producir iones oxhidrilos y elevar el pH del agua, como se muestra en el eq. 2.



Pero también los carbonatos pueden presentar reacciones de precipitación con cationes presentes en el agua, como por ejemplo el Ca^{2+} para proporcionar compuestos poco solubles tal como el CaCO_3 que tiene como efecto incrementar la dureza de ésta, tal como se muestra en el eq. 3.



Por otra parte, las reacciones de óxido-reducción que se efectúan en el agua son catalizadas por bacterias, éstas se describen mediante los equilibrio 4, y 5 que presentan la conversión de N-NO_3^- en N-NH_4^+ en deficiencia de O_2 , aunque también se presentan otras reacciones en presencia de oxígeno como la conversión del N de compuestos orgánicos en nitratos.

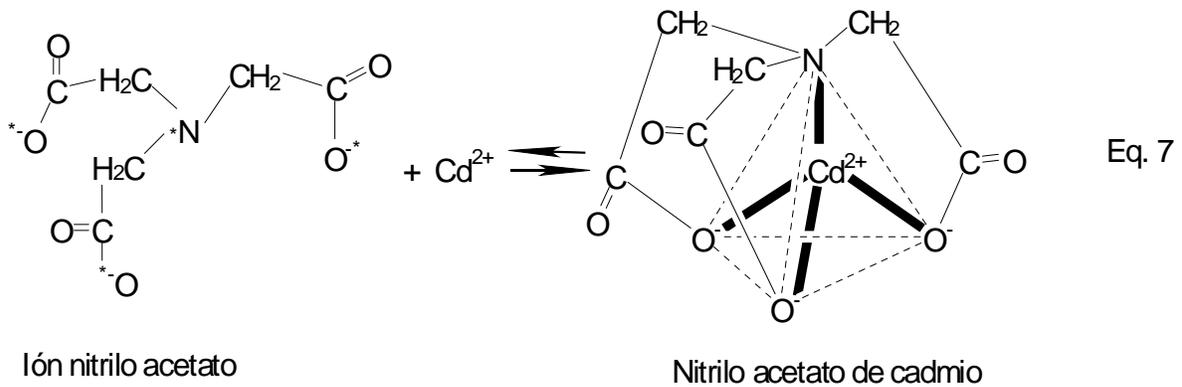




La actividad microbiana también puede hacer que se modifiquen las propiedades del agua, debido a la producción de gases como se muestra en el eq.6.



Los cationes metálicos como Cd^{2+} y Hg^{2+} , entre otros, pueden formar complejos con compuestos orgánicos quelantes presentes en el agua tales como el contaminante ácido nitrilo acético (NTA) o los ácidos fúlvicos que se encuentran en forma natural, estos compuestos actúan como bases de Lewis donando pares de electrones al ion metálico que actúa como un ácido de Lewis para formar una estructura tetraédrica coordinada con el ion nitrilo acético, como se muestra en el equilibrio 7; y que también se pueden presentar complejos similares con otros iones metálicos Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , entre otros.



Todas estas reacciones que se han mencionado, hace que las características físicoquímicas de cada reservorio de agua varíe constantemente tanto por actividades antropogénicas como por la naturaleza geológica de su ubicación y en consecuencia sea un requisito que se determinen continuamente sus propiedades cuando el agua almacenada es distribuida a una población para su consumo.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

El tratamiento del agua para consumo humano originalmente se centraba en mejorar las cualidades estéticas de ésta mediante procedimientos de sedimentación y filtración, por ejemplo, los antiguos pueblos orientales utilizaban arena y barro poroso para filtrar el agua; en Europa los romanos construyeron redes de acueductos y estanques e instalaron filtros para obtener agua de mejor calidad que utilizaban para beber, hacer bebidas y cocinar alimentos. El agua resultante de las actividades humanas (Agua residual) la utilizaban para riego de parcelas de cultivo y otras actividades domésticas.

En la antigüedad, los griegos recomendaban métodos físicos para el tratamiento de agua para consumo humano tales como filtración a través de carbón, exposición a los rayos solares y ebullición; por otra parte en Egipto se dejaba reposar el agua en vasijas de barro durante varios días y hasta meses para precipitar las partículas sólidas en suspensión e impurezas, y mediante un sifón extraían el agua de la parte superior (decantación); en ocasiones incorporaban ciertas sustancias minerales y vegetales para facilitar la precipitación de partículas y clarificar el agua (coagulación) y también llegaron a utilizar alumbre ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) para precipitar las partículas suspendidas en el agua.

En 1804 John Gibb construyó el primer sistema de suministro de agua potable y logró abastecer de agua filtrada a la ciudad de Glasgow, Escocia. En 1806 en París se puso en funcionamiento una planta de tratamiento de agua en donde se sedimentaba los sólidos que el agua acarrea y después de 12 horas se filtraba en arena y carbón. En 1827 James Simplón construyó en Inglaterra un filtro de arena para tratar el agua potable. En el siglo XX la filtración se convierte en uno de los tratamientos más efectivos para eliminar partículas sólidas del agua, aunque el grado de claridad conseguido no era medible; en Europa se estableció de forma más regular la filtración lenta sobre arena y se utilizó el cloro como desinfectante para reducir los brotes epidémicos. En 1880 Pasteur explicó que organismos microscópicos pueden transmitir enfermedades a través del agua, ya que las partículas en las fuentes de agua (materia fecal) sirven de refugio a los patógenos.

Actualmente han aparecido otras sustancias químicas procedentes de actividades antropogénicas en vertidos de agua (generalmente industriales), contaminando las aguas de abastecimiento público (superficiales) y subterráneas, causando un gran impacto negativo y obligando a la implementación de técnicas de tratamiento de agua con mayor eficiencia tales como coagulación, floculación, adsorción con carbón activo, empleo de ozono, dióxido de cloro, cloraminas, radiación ultravioleta, etc. Aunque en ocasiones no han sido efectivas para eliminar algunos de los nuevos contaminantes.

El uso de la filtración del agua y su desinfección con cloro incrementó la expectativa de vida de las personas en un 50% en los países desarrollados en el siglo XX.

Los avances más recientes en el tratamiento del agua son: el uso de membranas para osmosis inversa y la ozonización, que eliminan una gran cantidad de contaminantes del agua (Ramírez, 2011).

Los sistemas de abastecimiento de agua potable sin tratar o con un tratamiento inadecuado siguen siendo la mayor amenaza para la salud pública, especialmente en los países en desarrollo, donde casi la mitad de la población consume agua contaminada; desarrollándose enfermedades como cólera, tifoidea y disentería que afectan tanto a niños como a los adultos, provocando incluso hasta la muerte.

II.1 Toxicidad de elementos metálicos (Manahan, 2001a)

Actualmente, debido a la creciente industrialización de los países, se ha observado que los suministros de agua han incrementado las concentraciones de algunas sustancias tóxicas, entre las que destacan los elementos As, Cd, Pb, Cr y Hg, entre otras.

- **Arsénico**

El As es un metaloide que tiene una masa atómica de 74.91, número atómico de 33, los estados de oxidación de este elemento son 5, 3 y 3-, presenta una

densidad de $5.72 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y 2.0 unidades de electronegatividad, se ha descrito como uno de los 5 elementos más tóxicos; se encuentran en forma natural asociado con los minerales que contienen Au, Cu, Zn y Fe y que se explotan. En el agua, el As puede estar presente como H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} , AsO_4^{3-} , H_3AsO_3 y H_2AsO_3^- ; como se puede observar en el Diagrama de Pourbaix del arsénico, construido aplicando los equilibrios generalizados (Rojas-Hernández, 1995) para este elemento, en base a los datos de la tabla de potenciales (Burriel y col., 1994) y a las constantes de disociación (Ringbom, 1979) a fuerza iónica de cero; se pueden apreciar las principales especies (Fig. 1) a diferentes potenciales y pH.

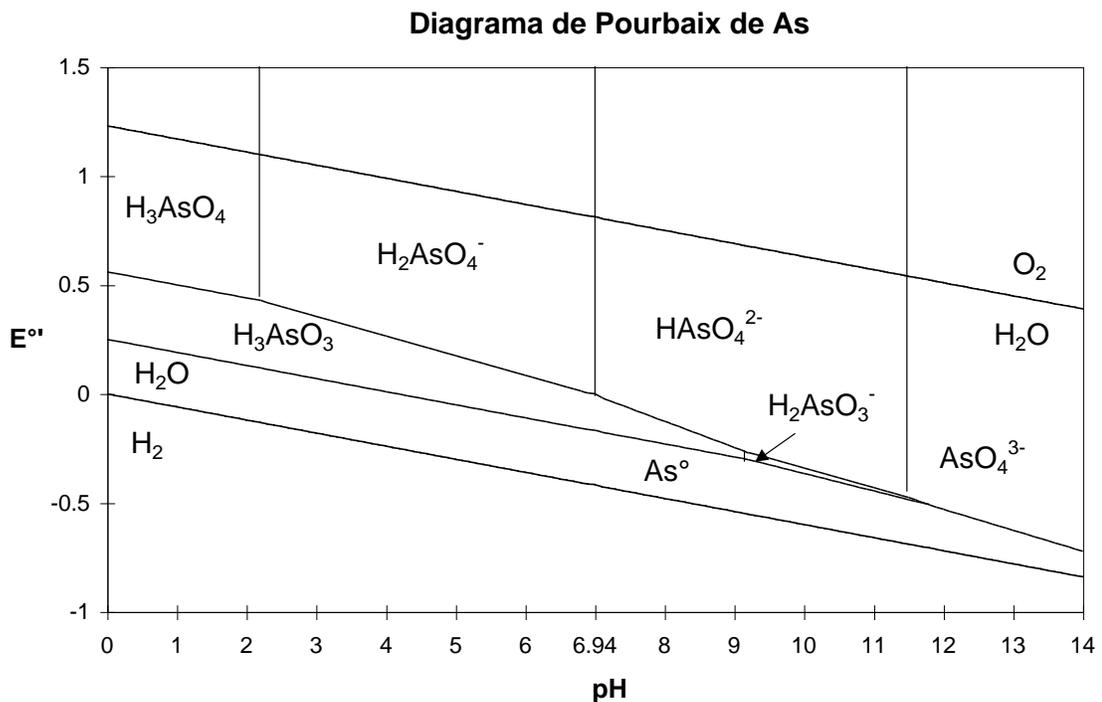


Figura 1. Diagrama de Pourbaix de arsénico en medio acuoso, elaborado con datos de Burriel, *et al.*, (1997) y utilizando el método de especies y equilibrios generalizados de Rojas-Hernández (1995). Se incluyen procesos de oxidación y reducción del medio (---). El H_3AsO_4 tiene los siguientes pKa de 2.19, 6.94 y 11.5; y el del H_3AsO_3 es 9.22.

Aunque considerando que el pH del agua está entre 7 y 8 se puede observar que la especie mayoritaria en esta fase es HAsO_4^{2-} ; por otra parte el contenido de arsénico, se llega a incrementar cuando el agua es clorada antes de su distribución, ya que el arsénico que se encuentra en los sedimentos es oxidado (Pérez, 2004).

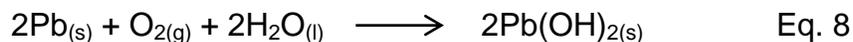
El As se ha utilizado como veneno, insecticida y herbicida; un envenenamiento crónico aparece por ingestiones continuas y en periodos largos de tiempo de pequeñas cantidades de As. Hay evidencias de que este elemento es carcinogénico. Actualmente se sabe que la toxicidad del arsénico se manifiesta por cambios cutáneos, hepáticos, neurológicos, hematológicos, cardiaco y hasta la muerte (Galvão y Germán, 1987; Berman, 1980; Prieto, 1997), además es acumulativo y sólo es expulsado del cuerpo en forma gradual a través de orina, pelo, uñas y piel; por consiguiente los pacientes que sufren de envenenamiento con este elemento presentan diferentes sintomatologías que pueden ir desde anorexia, diarrea y náuseas hasta melanosis, leuco-melanosis, queratosis, hiperqueratosis, gangrena y cáncer de piel, entre otros (Berman, 1980; Galvão y Germán, 1987; Nriagu, 1994; Prieto, 1997).

- **Plomo**

El Pb es un metal pesado que tiene una masa atómica de $207.19 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, número atómico de 82, los estados de oxidación de este elemento son 2 y 4, presenta una densidad de $11.342 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y una electronegatividad de 1.9, es otro de los 5 elementos más tóxicos; se encuentra ampliamente distribuido por todo el planeta

en forma de galena (PbS) y de otros minerales, aunque raramente se encuentra presente en el agua; la explotación de minas y los procesos de fundición de minerales son las principales fuentes de contaminación con este elemento del agua, ya que existen otras formas de contaminación con éste en los sistemas de distribución de agua (líneas de conducción, cañerías, bombas) que son uniones con Pb que lixivian al agua (McFarland y Dozier, 2004).

En condiciones normales el Pb no reacciona, sin embargo, cuando se pone en contacto con aire húmedo su reactividad aumenta formando una pequeña capa de PbO; el Pb en presencia de O₂ y H₂O genera Pb(OH)₂ como se describe en el equilibrio 8.



Otros tipos de reacciones tienen lugar cuando se encuentra en forma de sales, como PbCO₃ o Na₂Pb(CO₃)₂ las cuales son muy solubles (Litter, 2009).

En el agua, el Pb se puede presentar en alguna de sus formas iónicas Pb²⁺, Pb(OH)⁺ y/o HPbO₂⁻, sin embargo, la principal especie que puede estar presente en el agua es Pb(OH)⁺, debido a que el pH del agua normalmente está en el rango de 6 - 8.5 y esta especie es la forma predominante. La figura 2 muestra el diagrama de Pourbaix del plomo que fue construido con la base de datos y software FACTSAGE (Takeno, 2005).

La exposición al Pb produce cólicos, pigmentación de piel, parálisis, efectos neurológicos y/o teratógenos; compuestos orgánicos causan necrosis de neuronas y los inorgánicos degeneración axónica (degeneración de las dendritas de las neuronas). Ambas especies de plomo causan edema cerebral y congestión, pero los compuestos orgánicos de plomo se absorben rápidamente, por lo que se consideran de un mayor riesgo cancerígeno (McFarland y Dozier, 2004).

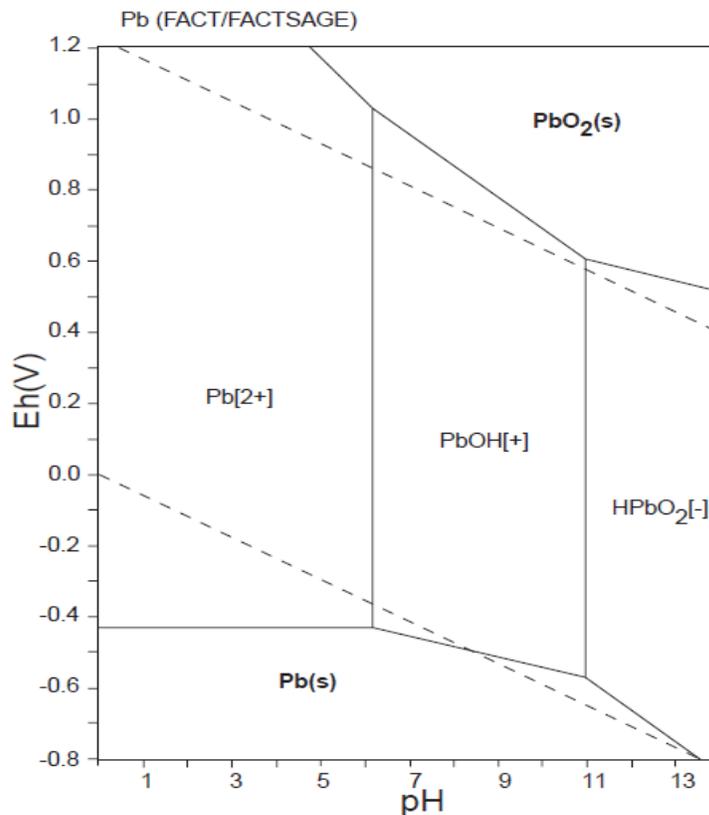


Figura 2. Diagrama de Pourbaix del Pb utilizando la base de datos y software Fact/Factsage (Takeno, 2005).

- **Cromo**

El Cr es un elemento metálico con una masa atómica de 51,996 g·mol⁻¹, número atómico de 24, sus estados de oxidación son más comunes son: 6+, 3+, 2+ y 0;

presenta una densidad de $7.19 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y una electronegatividad de 1.66 se ha descrito como uno más de los 5 elementos más tóxicos.

El cromo está distribuido ampliamente en la naturaleza, los principales minerales son cromita (FeCrO_4) y crocoita (PbCrO_4); y si bien, en aguas naturales está presente en concentraciones muy bajas, su presencia, bajo los estados de oxidación $3+$ y $6+$, puede aumentar como consecuencia de actividades antropogénicas, derivado de la utilización de compuestos de cromo (abonos fosfatados, pinturas, cromado, etc.).

En estado de oxidación $3+$, el cromo tiende a formar complejos con aniones inorgánicos u orgánicos y en ausencia de éstos, forma óxidos hidratados coloidales. En las condiciones de pH del agua natural es improbable la existencia de grandes concentraciones de Cr^{3+} ya que precipita como hidróxido. El Cr^{6+} es muy soluble y relativamente estable en ambientes acuáticos aeróbicos, en condiciones anaeróbicas o reductoras el Cr^{6+} se reduce a Cr^{3+} , mientras que a pH neutro o ligeramente alcalino se remueve por precipitación; en condiciones oxidantes y a $\text{pH} > 5$ predomina el estado de oxidación $6+$ en aguas superficiales. (Bravo, 2004).

El Cromo (III) es nutriente esencial para los humanos y la falta de este puede causar alteraciones en el funcionamiento del corazón, trastornos metabólicos y diabetes. Sin embargo el exceso de este elemento puede causar efectos sobre la salud tales como: fallas del hígado, riñón, anemia y debilitamiento muscular, entre otras (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

El Cromo (VI) causa varios efectos sobre la salud, tales como: erupciones cutáneas, úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño a riñones e hígado, alteración del material genético, cáncer de pulmón, y muerte (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

El Cr en el agua puede estar presente como Cr^{3+} , HCrO_4^- , CrO_4^{2-} , CrOH^{2+} , $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})$, Cr^{2+} , como se puede observar en el Diagrama de Pourbaix del cromo, construido en base a los datos del software FACTSAGE (Takeno, 2005), en el cual se pueden apreciar CrOH^{2+} y CrO_4^{2-} como las principales especies en función de los valores de potenciales óxido-reducción y pH (figura 3).

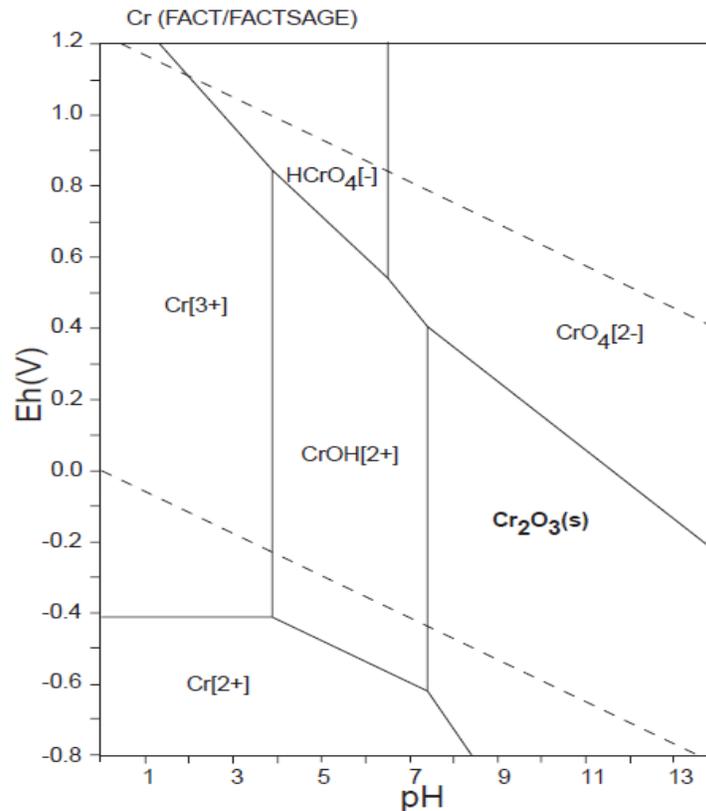


Figura 3. Diagrama de Pourbaix del Cr utilizando la base de datos y software Fact/Factsage (Takeno, 2005).

- **Cadmio**

El Cd es un metal pesado que tiene una masa atómica de 112,411 uma, número atómico de 48, su estado de oxidación más común es 2+; aunque puede presentar estado de oxidación 1+ con alta inestabilidad, presenta una densidad de 8.65 g·cm⁻³ y una electronegatividad de 1.69, se encuentra en minerales asociados con el zinc, plomo y cobre; los principales minerales de Cd son: grenockita (CdS) , otavita (CdO) y anglesita (PbSO₄), es un elemento extremadamente tóxico para el hombre y muchos animales a bajos niveles de concentración.

El Cd en el organismo humano puede causar erupciones cutáneas, malestar de estómago, úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en riñones e hígado, alteración del material genético (sustituye al Ca²⁺), cáncer de pulmón, cáncer de próstata y muerte (Calder, 1988; Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

La presencia de Cd en el agua puede ser como Cd²⁺, CdOH⁺, Cd(OH)_{2(aq)}, HCdO₂⁻, CdO₂²⁻ y Cd_(s) dependiendo del pH y de su potencial de oxidación-reducción, aunque por las condiciones de pH del agua (6-8.5), se puede observar en el Diagrama de Pourbaix del cadmio en base a los datos y software FACTSAGE (Takeno, 2005) que la principal especie es Cd²⁺ (figura 4).

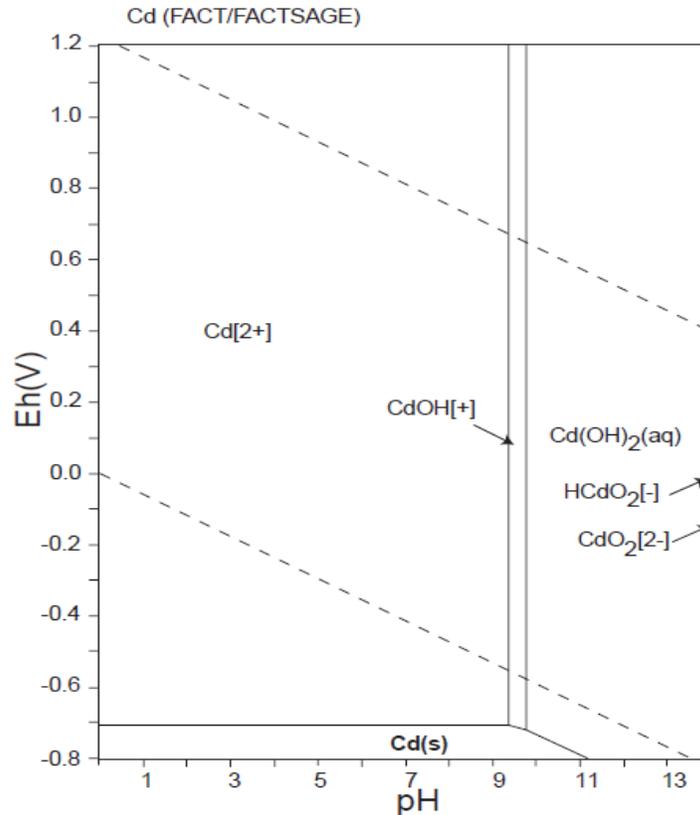


Figura 4. Diagrama de Pourbaix del Cd utilizando la base de datos y software Fact/Factsage (Takeno, 2005).

- **Mercurio**

El mercurio es un metal brillante de color blanco plateado que se encuentra en pequeñas cantidades en la corteza de la tierra, los principales minerales que contienen al Hg son óxidos, sulfuros, halogenuros, complejos orgánicos y metal nativo; el mineral más importante es el cinabrio HgS; el Hg tiene una masa atómica de 200.59 uma, número atómico de 80, sus estados de oxidación son 2+ y 1+, tiene una temperatura de fusión de -38 °C y una temperatura de ebullición de 357 °C, electronegatividad de 1.9 y una densidad de 13.6 g·cm⁻³; a temperatura ambiente es líquido inodoro que puede evaporarse lentamente en el aire; puede combinarse con otros elementos para formar compuestos orgánicos e inorgánicos

tales como sales mercúricas y mercurosas, HgCl_2 , Hg_2Cl_2 o $\text{Hg}_3(\text{AsF}_6)_2$ por formación de enlaces covalentes; las sales de mercúricas (II), tales como $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ o $\text{Hg}(\text{ClO}_4)_2$, son muy solubles en agua, ya que estas soluciones acuosas forman ácidos fuertes a causa de la hidrólisis que ocurre; otras sales de mercurio (II) como HgCl_2 o $\text{Hg}(\text{CN})_2$ también se disuelven en agua pero quedan poco disociadas. Compuestos organometálicos de mercurio, este elemento está directamente enlazado a los átomos de carbono o de nitrógeno; por ejemplo, $\text{H}_3\text{C-Hg-CH}_3$ o $\text{H}_3\text{C-CO-NH-Hg-NH-CO-CH}_3$. Finalmente, el Hg en complejos, como $\text{K}_2(\text{HgI}_4)$, a menudo presenta tres o cuatro enlaces (Emsley, 2001; Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

Los principales usos del Hg son en la elaboración de sosa cáustica, producción de cloro, procesamiento de minerales de Au, fabricación de lámparas fluorescentes, baterías, termómetros, insecticidas, bactericidas, fungicidas y pinturas, entre otros (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

El Hg, las especies iónicas y los compuestos organometálicos son altamente tóxicos, presenta efectos teratogénicos, carcinogénicos y mutagénicos; produce enfermedades coronarias, daña al sistema nervioso central, reduce la reproducción, altera el desarrollo de los niños y produce deformación del DNA, entre otros. (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

En el agua, el Hg puede estar presente como Hg^{2+} , $\text{Hg}(\text{OH})_{2(\text{aq})}$ y Hg , como se puede observar en el Diagrama de Pourbaix del mercurio, construido en base a los datos del software FACTSAGE (Takeno, 2005), donde se puede apreciar las principales especies a diferentes potenciales y pH (figura 5).

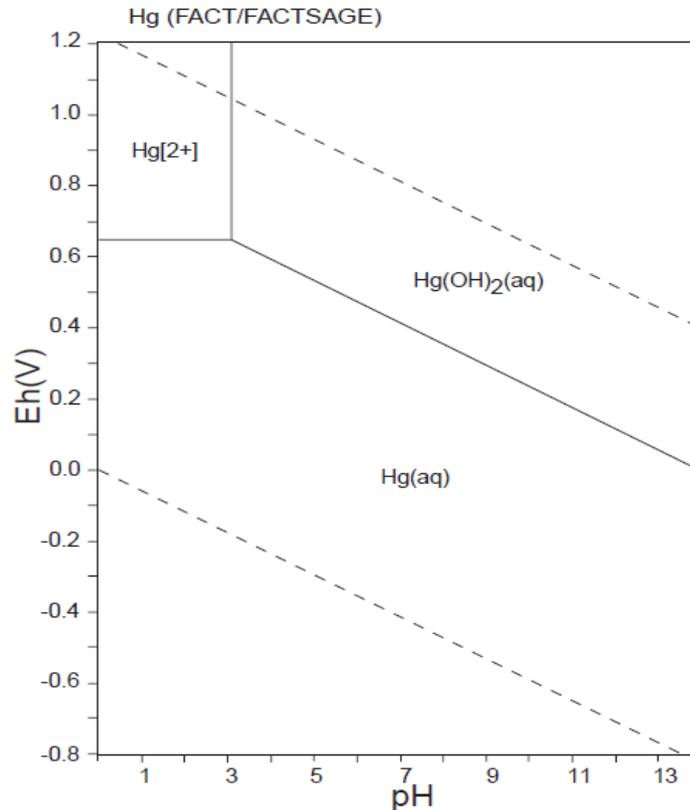


Figura 5. Diagrama de Pourbaix del Hg utilizando la base de datos y software Fact/Factsage (Takeno, 2005).

El agua potable debe ser incolora, si en el almacenamiento del agua, esta adquiere color, se debe a la presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas o coloidales y a organismos vivos presentes como algas y bacterias que se desarrollan en este medio y que le proporciona una apariencia poco agradable.

El sabor del agua potable debe de ser insípida, en caso de tener sabor, éste puede ser debido a la presencia de compuestos ácidos, básicos o neutros.

El sabor puede estar relacionado con el valor del pH del agua, el pH del agua potable normalmente deberá estar en el rango de 6-8.5 unidades, debido a la presencia de sales inorgánicas características de la geología de la región.

El olor del agua potable debe de ser inodora, pero la presencia de olor generalmente es debido a la presencia de materia orgánica e inorgánica presente en ésta.

Es por esto que los análisis químicos constituyen uno de los principales requisitos para caracterizar el agua ya que nos indica las sustancias que se encuentran y su concentración, aunque algunas sustancias estén en concentraciones a nivel de trazas.

Las guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (1995) señalan que los problemas relacionados con las sustancias químicas presentes en el agua de bebida se deben sobre todo a que ellas pueden afectar la salud después de una exposición prolongada.

El ion sulfato (SO_4^{2-}) se encuentra en casi todos los tipos de aguas naturales. La mayor parte de los compuestos sulfatados se originan a partir de la oxidación de las menas de sulfuro, debido a que los sulfatos en su mayoría son solubles se presentan en rocas metamórficas y en residuos industriales, además de que el sulfato es uno de los principales constituyentes disueltos de la lluvia ácida.

Una alta concentración de sulfato en agua potable tiene un efecto laxativo y puede causar irritación gastrointestinal en combinación con calcio y magnesio, los dos componentes más comunes de la dureza del agua.

Los fosfatos y compuestos de fósforo se encuentran en las aguas naturales en pequeñas concentraciones. Su origen es lixiviado de los terrenos que atraviesa, o por contaminación orgánica. Actualmente existe una fuente contaminante de fósforo artificial por el uso de los detergentes polifosfatados. Los fosfatos están directamente relacionados con la eutrofización de lagos y pantanos.

La forma asimilable del fósforo es el ion fosfato, aunque en el agua a veces se encuentran compuestos fosforados en estado coloidal o en forma de fósforo elemental.

La alcalinidad de una muestra de agua es su capacidad para reaccionar o neutralizar iones hidronio (H_3O^+) hasta un valor de pH igual a 4.5. La alcalinidad es causada principalmente por los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos presentes en solución y, en menor grado por los boratos, silicatos y fosfatos, que puedan estar presentes en la muestra. Los bicarbonatos y carbonatos presentes en cuerpos naturales de agua dulce se originan generalmente del desgaste y disolución de rocas en la cuenca que contienen carbonatos tales como la piedra caliza; a pesar de que la piedra caliza no es muy soluble en agua pura, su disolución es promovida por la presencia de CO_2 disuelto en el agua, además de dar un índice de la resistencia del agua al bajar su pH cuando se le añade ácido, es decir, actúa como mecanismo de amortiguación del pH.

El ion cloruro se encuentra con frecuencia en las aguas naturales y residuales, en concentraciones que varían desde unos pocos $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ hasta varios gramos por litro, este ion ingresa al agua en forma natural mediante el lavado que el agua de lluvia realiza sobre el suelo. Los cloruros son una de las sales que están presentes en mayor cantidad en todas las fuentes de abastecimiento de agua y drenaje.

Tal como sucede en la medición de cualquier parámetro, no existe un solo método de medida ni alguno en particular que sea infalible para cualquier tipo de muestras. Los métodos de análisis de cloruros más frecuentes en los laboratorios de calidad de aguas son el método de medición por electrodo específico, el método de titulación con nitrato de mercurio y el método de titulación con nitrato de plata; este último es uno de los más utilizados en la mayoría de los laboratorios.

Existe una gran variedad de parámetros que es necesario controlar en el análisis de agua potable como pesticidas, herbicidas, bacteriológicos, etc.

CAPÍTULO III

JUSTIFICACIÓN

Actualmente en Guanajuato se aprovechan aproximadamente $350 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ de agua subterránea y superficial, indispensable para satisfacer las necesidades de la población de la capital y sus zonas conurbadas.

La Presa de Mata se ubica hacia el oriente de la ciudad, tiene un superficie total de 2,652.87 hectáreas y su capacidad de almacenamiento es de $1,950,000 \text{ m}^3$; se construyó en el año 2008 para dar servicio a la Compañía Minera “Las Torres”, eventualmente se ha utilizado con fines de abastecimiento para la ciudad de Guanajuato.

Existe una planta potabilizadora de agua ubicada a la salida de la Presa de Mata, tiene una capacidad de suministro y tratamiento de $30 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$; la capacidad de tratamiento de la planta potabilizadora equivale al 8.6 por ciento de abastecimiento a la población, el tratamiento de esta planta potabilizadora utiliza un proceso de coagulación-floculación-sedimentación-filtración-desinfección; sin embargo la población presenta serias dudas acerca de la calidad del agua que se les envía a sus tomas domiciliarias por lo cual el objetivo del presente trabajo es: Caracterizar físicoquímicamente el agua de la presa de Mata y del agua que sale de la planta de tratamiento con el propósito de conocer la calidad del agua que se suministra a

la población desde este sitio. Por tal motivo se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Identificar las características geológicas principales de la región en que se encuentra la Presa de Mata, para determinar la posible procedencia de elementos que alteren la calidad del agua en la misma.
- Determinar la calidad del agua de la presa de Mata mediante el análisis de parámetros físicos y químicos establecidos por la normatividad mexicana.
- Conocer el contenido elemental de los sedimentos de la presa de Mata para relacionarlos con los parámetros del agua que estén fuera de los límites permisibles.
- Evaluar elementos presentes en lixiviación de sedimentos de la Presa de Mata utilizando soluciones extractoras con diferente fuerza y a diferente pH.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

IV.1 Área de Localización

La Presa de Mata y la planta purificadora se localizan dentro del Distrito Minero de Guanajuato, aproximadamente a 7.0 km al NE de la Ciudad de Guanajuato y al NW de la comunidad Monte de San Nicolás, en las coordenadas geográficas 21°01'30" Latitud Norte y 101°13'30" Longitud Oeste.

El acceso es por la carretera panorámica a una distancia de aproximadamente 12 km de camino de terracería, se muestra en la figura 1 (Google Earth, 2011).

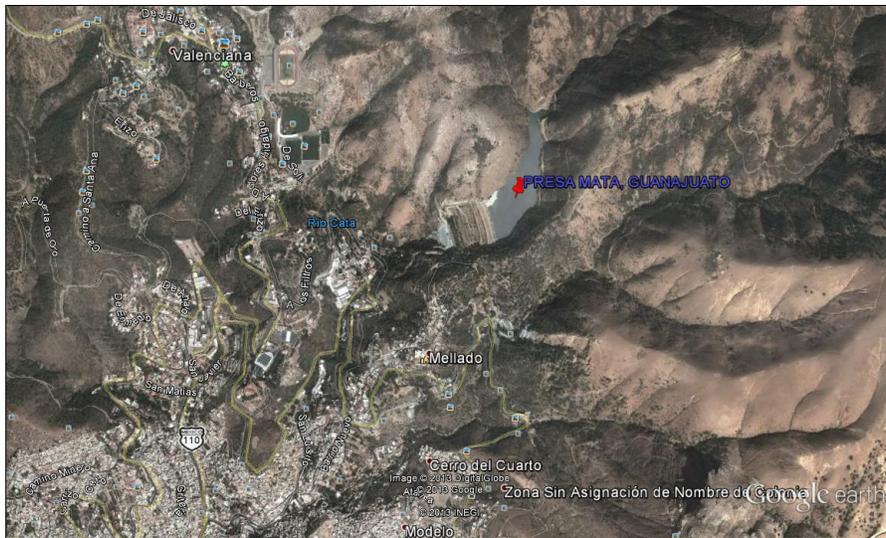


Figura 6: Presa Mata, Estado de Guanajuato, México. Se encuentra a 21°01'04" N y 101°13'46" O a 2225 msnm (Google Earth, 2011).

IV.2 Características fisiográficas del Distrito Minero de Guanajuato

El Distrito Minero de Guanajuato tiene una longitud de 20 Km con un ancho de 16 Km (320 Km²); se localiza en la porción centro occidental del estado a 360 Km al NW de la ciudad de México entre los 21°05' y 21°00' Latitud Norte y 101°20' y 101°10' Longitud Oeste y se considera como un sistema epitermal clásico de baja sulfuración (Heald y col., 1987). La mayor parte de las Minas de este distrito se localizan dentro de la subcuenca del río Guanajuato con una extensión de 103,255 ha; que pertenece a la cuenca del río Lerma, con 126 localidades; de las cuales 87 son yacimientos de minerales metálicos que explotan principalmente oro, plata, plomo, zinc y cobre (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach 2006).

La Región presenta una topografía muy abrupta que varía de 1,900 a 2,800 msnm en la Sierra de Guanajuato, el acuífero local se encuentra a 15 km al SW del Valle donde comienza el Bajío.

El clima de la zona está acorde con la topografía de tal manera que las zonas más altas reciben mayor precipitación y además cuentan con mayor densidad de vegetación, las cuales funcionan como centros de condensación y concentración de humedad. La temperatura media anual es del orden de 18.7 °C que oscila de 5 a 35 °C; presenta 77 días con lluvia al año en promedio. En los últimos 100 años se observó una precipitación promedio de 670.7 (173.25) mm; en 1961 se tuvo una precipitación mínima de 280.3 mm y en 1971 la precipitación máxima fue de 1,253 mm. La evaporación promedio anual es de 2,000 mm con humedad relativa

promedio es 66 %; y la velocidad media de los vientos es de 2.90 m/s con una dirección dominante de SW y W (SMN, 2000).

La estructura del distrito es muy compleja, encontrándose rocas cretácicas deformadas y metamorfozadas, fallas normales cenozoicas, y una posible caldera relacionada con el volcanismo del Terciario, además, aquí se encuentran alojados los yacimientos epitermales (Randall-Roberts y col., 1994). Las principales fallas tienen rumbo NW con longitudes de uno a más de 30 km con una profundidad de más de 1,000 m; entre ellas se presenta a la Veta Madre (Gross, 1975).

IV.3 Geología de la Región

El distrito minero de Guanajuato forma parte del cinturón de mineralización Ag–Pb–Zn, que corre paralelo al flanco Este de la Sierra Madre Occidental (Clark y col., 1982). En la Figura 2 se distinguen las unidades litológicas que afloran en la superficie así como las fallas y las principales minas del distrito (LL: La Luz; V: La Valenciana; Ca: Cata; R: Rayas; Si: Sirena; LT: Las Torres; SN: San Nicolás; Ecu: El Cubo).

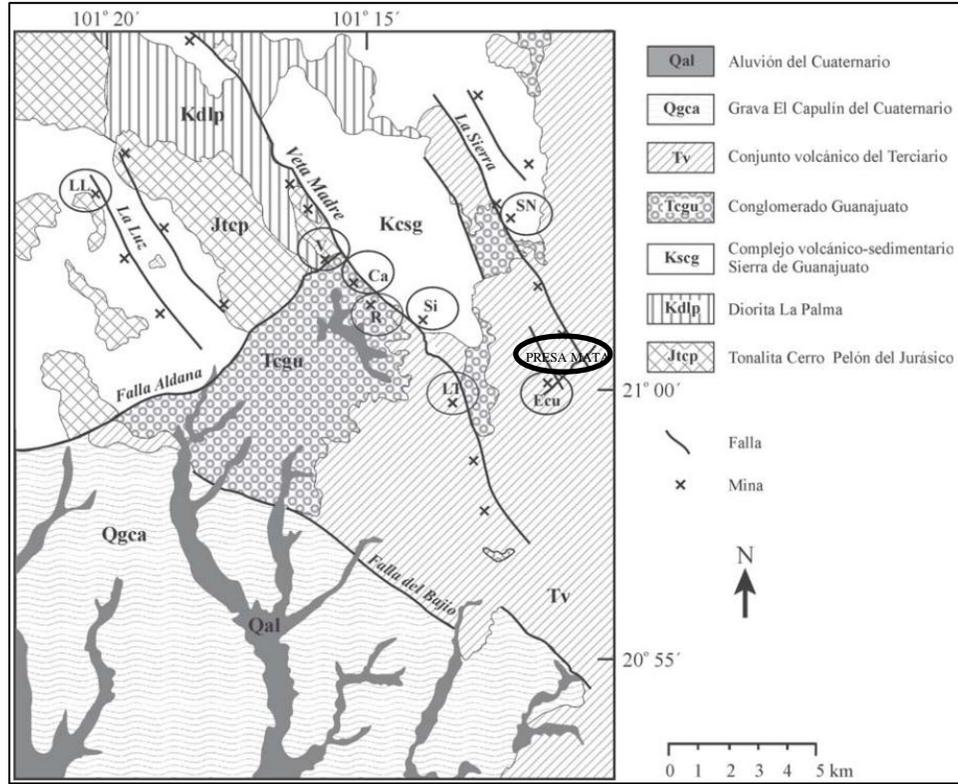


Figura 7. Bosquejo geológico del Distrito Minero de Guanajuato.

Las unidades litológicas más cercanas a la Presa Mata se describen a continuación:

a. *Complejo volcánico-sedimentario Sierra de Guanajuato, CVSG, (Kcsg).*

Este complejo del Cretácico Temprano agrupa diversas fases volcánicas y sedimentarias marinas que alcanzan aproximadamente 600 m de espesor, está compuesto por pizarras negras carbonáceas además de calcáreas, interestratificadas con areniscas, caliza y flujos de lava de composición andesítica a basáltica; todos se presentan débilmente metamorfozados a filitas y mármol alterados por hidrotermalismo. Con el nombre de Formación

Esperanza se conoce a un miembro de este complejo que constituye la única unidad compuesta por calizas en la zona.

- b. *Conglomerado Guanajuato (Tcgu)*. Formación de origen continental del Eoceno Medio descansa discordantemente sobre el CVSG y tiene un grosor mínimo de 1,500 m (Gross, 1975). Consiste en un conglomerado mal clasificado con intercalaciones de arenisca de estratificación delgada a gruesa; en la base están presentes arenas volcánicas y lavas andesíticas. Cerca de zonas fracturadas se presenta alteración propilítica y color verde por la presencia de clorita $(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$ (Mango, 1992).
- c. *Conjunto volcánico del Terciario (Tv)*. Se agrupa con esta denominación a una secuencia volcánica del Eoceno tardío-Oligoceno, compuesta por las siguientes unidades:
- *Formación Loseros (Tol)*. Arena volcánica verde cuando está cloritizada o violeta si se encuentra oxidada, es de 10 a 52 m de espesor (30 m en promedio), se formó en condiciones lacustres (Vasallo y col., 1996).
 - *Riolita La Bufa (Trbu)*. Son flujos piroclásticos de 360 m de espesor (Gross, 1975); debido a que esta roca es muy quebradiza, durante el fallamiento y posterior paso de fluidos mineralizantes se formaron yacimientos tipo stockwork, sobre todo en la estructura de la Veta Madre (Mango, 1992).

- Arenisca Calderones (Taca). Es una unidad volcánoclastica verdosa debido a la cloritización, que incluye depósitos de lahar y una megabrecha compuesta de fragmentos de hasta 10 m de diámetro de las rocas mesozoicas y del Conglomerado Guanajuato con 200 a 250 m de espesor, sobreyace discordantemente a Riolita La Bufa. (Randall-Roberts y col., 1994).
- Andesita El Cedro (Tace). Son flujos de lava andesítica y tobas de composición dacítica a andesítica; presenta un espesor de 250 a 640 m (Randall-Roberts y col., 1994).
- Riolita Chichíndaro (Trch). Es una secuencia de domos y flujos de lava inter-estratificados con brechas y tobas volcánicas pobremente clasificadas, se aprecian texturas porfiríticas fluidales. Tiene una edad estimada de 32 ± 1 Ma por el método K–Ar (Gross, 1975); en algunas zonas a esta unidad se le conoce como intrusivo Peregrina (Tmp) y se le puede localizar en áreas bajas de las minas de Rayas y Sirena como un pórfido de monzonita que puede ser la base de esta unidad (Mango, 1992).

IV.4 Yacimientos Minerales

En la zona que abarca al Distrito de Guanajuato existieron tres épocas metalogenéticas (Randall-Roberts et al., 1994):

- *Cretácico*: Durante este periodo se formaron cuerpos tabulares de sulfuros masivos hospedados en rocas Mesozoicas del CVSG (Randall-Roberts et al., 1994).
- *Paleoceno*: En esta edad se emplazó un batolito granítico hacia el oeste del distrito. En el intrusivo como en el halo de alteración se formaron yacimientos de tungsteno (W), selenio (Se), bismuto (Bi), cobre (Cu), plata (Ag), plomo (Pb) y zinc (Zn) e incluso se detectaron trazas de minerales radioactivos en algunos cuerpos pegmáticos (Martínez-Reyes y col., 1995).
- *Oligoceno*: Este periodo estuvo asociado a la actividad volcánica del Terciario, la época más importante de mineralización y que fue atribuida a procesos de subducción. La mayoría de los yacimientos minerales se localizan en la Sierra Madre Occidental; éstos se emplazaron en vetas epitermales rellenando fisuras (Clark y col., 1982).

Por consiguiente, al Distrito Minero de Guanajuato se le considera un sistema epitermal clásico de baja sulfuración (Heald y col., 1987); donde las minas están alojadas en tres sistemas de vetas con tendencia NW: La Luz, Veta Madre y La

Sierra. Estos tres sistemas de vetas presentan un zonamiento vertical en la mineralogía, el cual fue clasificado en 1975 por Gross en función de la altura en que se encuentran y los denominó: yacimiento superior, a los que se encuentran entre 2,550 a 2,250 msnm; yacimiento bajo, los que se presentan a una altura de 2,250 a 1,800 msnm y yacimiento profundo, los que se encuentran a una altura entre 1,800 a 1,650 msnm.

- *Sistema de vetas La Luz:* son fallas pequeñas con tendencia NW de 70° a 80° y otras fallas cruzadas. Las minas en este sistema son: La Luz, Bolañitos, Sirio, Golondrinos, San José y San Pedro Xilmonene, se encuentran en un rango de profundidad de 2,300 a 1,700 msnm encajonadas entre el Complejo Volcánico de la Sierra de Guanajuato con la Formación Esperanza y entre las rocas intrusivas graníticas (Randall-Roberts et al., 1994). Los yacimientos que se presentan son filones y brechas (Antúnez, 1964), mientras que la mineralogía de ganga dominante es calcita y cuarzo; la alteración que presentan las rocas encajonantes es propilítica extendida, así como argílica y silícica muy localizadas en la estructura de la veta (Mango, 1992).
- *Sistema de vetas de La Sierra:* Las principales minas de este sistema son: Asunción, Monte de San Nicolás, Pasadena, Albertina, Peregrina y El Cubo; se encuentran localizadas entre 2,300 y 1,800 msnm; transversal a estas vetas se encuentra un yacimiento superior entre los 2,550 y 2,250 msnm con dirección NE con altos niveles de

oro asociado localmente con domos riolíticos (Randall-Roberts y col., 1994). En la veta Asunción existe un stockwork que se compone de vetillas de cuarzo y calcita que varían desde pocos milímetros a 30 cm de grosor y de 2 a 5 m de longitud (Randall-Roberts y col., 1994).

- *Veta Madre*: Es una falla normal que tiene más de 30 km de largo y un desplazamiento vertical de al menos 1,000 m (Gross, 1975); esta ha sido la más importante veta en cuanto a volúmenes de extracción, y su estructura contiene a las minas de NE a SE: Copenhague, Cebada, San Elías, Guanajuatito, La Valenciana, Tepeyac, Cata, Rayas, Mellado, Garrapata, Aparecida, Sirena, Las Torres, Cedro, Purísima, Santo Niño y El Nayal. En el sistema veta Madre se encontraban principalmente en zonas de bonanza en las partes altas, emplazados en el Conglomerado Guanajuato a lo alto de la veta y en la Formación bajo (Antúnez, 1964). Las brechas se encuentran comúnmente en la zona central de la Veta Madre, en los yacimientos bajo y profundo y se relacionan con la cercanía a la fuente de calor (Mango, 1992). Los principales yacimientos de tipo stockwork se ubican en las minas La Sirena y Las Torres.

En los tres sistemas existen los mismos minerales de mena y ganga pero en proporciones diferentes (Petruk y Owens, 1974).

- *Mineralogía de mena:* son sulfuros y sulfosales que se presentan formando bandas en el contacto con las rocas encajonantes o como granos diseminados en la ganga, se presenta como vetas rellenando fisuras en zonas de bonanza, como brechas y como stockworks (Wandke y Martínez, 1928; Randall-Roberts y col., 1994). Los minerales de mena no sobrepasan el 5% del volumen total de las vetas, salvo en el yacimiento profundo (SCMMSFG, 2002); en las partes superiores estos sulfuros se encuentran en bajas concentraciones y su concentración se incrementa conforme aumenta la profundidad de la mina.
 - En las brechas, la mineralización ocurrió como vetas bandeadas rodeando los clastos de las rocas brechadas y alteradas, éstas se encuentran principalmente en los yacimientos bajo y profundo entre 2,250-1,650 msnm (Mango, 1992).
 - Los stockworks son rocas quebradizas que se formaron durante el fallamiento de rocas, entre las que se pueden considerar: Riolita La Bufa, Arenisca Calderones y Andesita El Cedro; se presentan yacimientos bajos entre 2,250-1,800 msnm y tienen leyes menores que las vetas tabulares (Mango, 1992; Randall-Roberts y col., 1994).
- *Mineralogía de ganga:* Este tipo de mineralogía se compone principalmente de cuarzo (SiO_2), feldespatos, pirita (FeS_2), calcita (CaCO_3), y arcillas como caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), esmectita y clorita ($(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$) (Petruk y Owens, 1974).

IV.5 Muestreo

Se realizaron tres muestreos de agua y sedimento del tipo aleatorio simple durante el año 2011 (antes, durante y posterior al periodo de lluvias) en la presa de Mata de la Ciudad de Guanajuato, Guanajuato, México. En cada muestreo se colectaron 10 muestras de 2 litros de agua con envases de polipropileno en distintos sitios de la presa de Mata; se mezclaron todas las muestras colectadas para tener una muestra mixta de 20 litros.

Se colectaron 10 muestras de 1 kg de sedimento seco en la presa de Mata de la Ciudad de Guanajuato con una barrena tubular manual para perforación y muestreo de suelos de 10 cm de diámetro y con capacidad de toma de muestra de 30 cm de profundidad, se formó una muestra mixta mezclando las diez muestras y se tomó una muestra representativa de 2 Kg para realizar los estudios correspondientes.

Se solicitó un garrafón de 20 l de agua de la planta purificadora, la cual se encuentra en la parte externa de la cortina de la presa.

Las muestras de agua y sedimento se trasladaron al Laboratorio para ser analizadas.

A un matraz volumétrico de 100 ml se le colocaron 2 ml de HNO_3 concentrado y se le adiciono agua hasta el aforo, esta muestra se mantuvo en refrigeración hasta que se realizó el análisis elemental por EAA.

Un volumen de 2.0 litros de agua de la presa se reservó para realizar el análisis fisicoquímico.

IV.6 Análisis Físicos

Los análisis físicos que se evaluaron son: turbidez, color, olor y sabor empleando la normativa oficial mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

- *Turbidez:* Para determinar este parámetro se utilizó un turbidímetro de la marca Orbeco Hellige, el cual emplea una solución estándar de referencia para su calibración, las lecturas obtenidas se proporcionan en unidades de turbidez nefelométricas (UTN).
- *Color:* Se determinó utilizando un colorímetro marca Orbeco Hellige que está constituido de filtros con graduaciones que van desde 0 hasta 50 unidades de color con incrementos 5 unidades.
- *Olor y sabor:* La determinación de estos parámetros se realiza mediante pruebas organolépticas y ambos se determinan simultáneamente.

IV.7 Análisis químico

- *pH*: Este parámetro se determinó utilizando un potenciómetro de la marca Orion, modelo 3-Star-Plus, el cual fue calibrado previamente utilizando 2 soluciones buffer, una de pH 4.0 y la otra de pH 7.0 hasta que al pasar de una solución a otra el valor de pH tuviese una variación menor a 0.15 unidades de pH; una vez calibrado el potenciómetro se tomaron las lecturas de las muestras, manteniéndolas en agitación y hasta que el valor de pH fuera constante.
- *Conductividad eléctrica*. Este parámetro se determinó con un conductímetro de la marca Cole Parmer, Mod. 19815-00, el cual fue calibrado con una solución de NaCl de $1500 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, la cual proporciona una conductividad de $2930 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.
- *Sólidos disueltos totales*. Este fue determinado con el mismo conductímetro que se utilizó para medir la conductividad.
- *Alcalinidad*. La alcalinidad del agua se determina por titulación de 100 ml de muestra con una solución de ácido clorhídrico (HCl) 0.02 N y utilizando primero una gota de indicador de fenolftaleína 0.01% en alcohol para valorar los carbonatos; el color de la fenolftaleína cambiara de color rosa a incoloro en el punto de equivalencia y posteriormente se adiciona una gota de indicador de anaranjado de metilo al 0.01% en alcohol y se continua con

la valoración para determinar los bicarbonatos, el indicador cambia de color amarillo a color canela. La alcalinidad se calcula utilizando el volumen total de ácido utilizado en la valoración con la fórmula (1).

$$\text{Alcalinidad total (mg CaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}) = \frac{V_t \cdot N \cdot 50 \cdot 1000}{V_m} \quad (1)$$

Dónde:

| | | |
|-------|---|--|
| V_t | = | volumen total de ácido utilizado en la titulación (ml). |
| N | = | normalidad de la solución del ácido. |
| V_m | = | volumen de muestra (ml). |
| 50 | = | equivalente químico de CaCO_3 ($\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$). |
| 1 000 | = | factor para convertir g a mg. |

- *Bicarbonatos.* Los bicarbonatos del agua se determinan por titulación de 100 ml de muestra de agua con una solución de ácido clorhídrico (HCl) 0.02 N y utilizando una gota de indicador de anaranjado de metilo al 0.01% en alcohol. En el punto final de la valoración, el indicador cambia de color amarillo a un color canela. El cálculo del contenido de bicarbonatos se realiza utilizando la fórmula (2).

$$\text{HCO}_3^- \text{ (mg}\cdot\text{l}^{-1}) = \frac{V_t \cdot N \cdot 61 \cdot 1000}{V_m} \quad (2)$$

Dónde:

| | | |
|-------|---|---|
| V_t | = | volumen total de ácido utilizado en la titulación (ml). |
| N | = | normalidad de la solución del ácido. |
| V_m | = | volumen de muestra (ml). |
| 61 | = | equivalente químico de HCO_3 (g). |
| 1000 | = | factor para convertir g a mg. |

- *Cloruros.* Un volumen de muestra de 50 ml de agua se coloca en un matraz volumétrico de 125 ml, se le adiciona 3 gotas de cromato de potasio (K_2CrO_4) al 5% como indicador y se titula con una solución patrón de nitrato de plata (AgNO_3) al 0.01N, hasta llegar al punto final de la reacción, en que el color amarillo de la solución cambia a un color rojo ladrillo (Aguilar, 2001). El cálculo para la determinación de cloruros se realiza con la fórmula (3):

$$\text{Cl}^- (\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}) = \frac{(V_t - V_b) \cdot N \cdot 35.450 \cdot 1000}{V_m} \quad (3)$$

Dónde:

| | | |
|--------|---|---|
| V_t | = | volumen de nitrato plata utilizado en la titulación de la muestra (ml). |
| V_b | = | volumen de nitrato plata utilizado en la titulación de un blanco (ml). |
| N | = | normalidad de la solución de Nitrato de Plata. |
| V_m | = | volumen de muestra (ml). |
| 35.450 | = | equivalente químico del Cl^- (g). |
| 1000 | = | factor para convertir g a mg. |

- *Sulfatos.* Se preparó una curva de calibración de sulfatos en un rango de concentración de 0 hasta $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ utilizando volúmenes de 25 ml, a cada uno se le adicionaron 1.3 ml de solución acondicionadora y se colocaron en un agitador magnético, manteniendo una agitación constante; a cada

estándar se le adicionaron 0.1-0.2 g de cristales de cloruro de bario (BaCl_2) y se dejó en agitación por 1 min, se dejaron reposar 4 min y se determinó la absorbancia de cada uno de los estándares a una longitud de onda de 420 nm en un espectrofotómetro UV-VIS marca JENWAY modelo 6500. Volúmenes de 25 ml de agua fueron tratados de la misma manera que los estándares (Serra, 1981). Para determinar la concentración de sulfatos en las muestras de agua se realiza un ajuste por mínimos cuadrados de la absorbancia de los estándares en función a su concentración y se obtiene la expresión matemática de una línea recta; De la expresión matemática se obtiene la pendiente y la ordenada al origen de la recta que son utilizados para calcular la concentración de sulfatos en las muestras de agua; si se ha realizado dilución es necesario utilizar el factor de dilución con la expresión matemática (4).

$$C_R = \frac{C_l}{V_m} * V_{af} * F_d \quad (4)$$

Dónde:

| | | |
|----------|---|--|
| C_R | = | concentración real |
| C_l | = | concentración leída o calculada por el método de mínimos cuadrados |
| V_{af} | = | volumen de aforo |
| V_m | = | volumen de muestra tomada |
| F_d | = | factor de dilución |

- *Fosfatos*. Se prepara una curva de calibración de fosfatos en un rango de concentración de 0 hasta $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a partir de una solución madre de

KH_2PO_4 de $100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ utilizando matraces volumétricos de 25 ml, a cada uno se le adicionan 5 ml de solución de reactivo vanado-molibdato preparado de acuerdo a la normativa oficial mexicana (Aguilar, 2001b); se aforan con agua desionizada y se dejan reposar por 10 min previo a la determinación de la absorbancia de cada uno de los estándares a una longitud de onda de 420 nm en un espectrofotómetro UV-VIS marca JENWAY modelo 6500. Volúmenes de 5 ml de muestras de agua fueron tratados de la misma manera que los estándares. Se realiza un ajuste por mínimos cuadrados de la absorbancia de los estándares en función a su concentración y se obtiene la función matemática de una línea recta; se utilizan los valores de la pendiente y la ordenada al origen de la recta para calcular la concentración de los fosfatos en las muestras de agua. La concentración de fosfatos se efectúa con la fórmula 4.

IV.8 Análisis de elementos mayoritarios y traza

Muestras de 48 ml de agua de la presa de Mata y de la planta de tratamiento del agua de la misma presa fueron tratadas con 2 ml de HNO_3 concentrado y digeridas con un horno de micro ondas de la marca CEM modelo Mars_{LX} 5 con el siguiente programa: llevar la temperatura de las muestras desde temperatura ambiente a 170 °C en un tiempo de 10 min, sostener esta temperatura durante 10 min y mantener una presión menor a 200 psi durante la digestión; se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se aforaron a 50 ml en matraces volumétricos,

las muestras se colocaron en frascos de polietileno perfectamente lavados con ácido y enjuagados con suficiente agua. Se preparó la curva de calibración a partir de un estándar multielemental certificado que contenía los siguientes elementos: Be, Cd, Ag, Cr, Cu, Ni, Co, V, Fe, Al, Ba, Ca, Mg, Na y K y con un espectrofotómetro de emisión atómica de plasma por acoplamiento inductivo (ICP) de la marca PERKIN-ELMER modelo Optima 3000 XL se realizaron las curvas de calibración de cada uno de los elementos y se procedió a analizar cada una de las muestras. La concentración de cada uno de los elementos fue determinada empleando la fórmula 4.

Determinación de As

La determinación de As de las muestras de agua se realiza por espectroscopia de absorción atómica con generación de hidruros. A partir de una solución estándar de $1000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de As se prepara una curva de calibración desde 0 hasta $40 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ en matraces volumétricos de 25 ml, a cada estándar se le adiciona 10 ml de agua desionizada, 1.0 ml de KI y 1.0 ml de ácido ascórbico al 5% y 3.0 ml de HCl concentrado; se dejan reaccionar a temperatura ambiente durante 20 minutos y se aforan con agua desionizada (Davidosky, 1993).

Se toman 10 ml de muestra de agua a analizar y se lleva a un matraz volumétrico de 25 ml y se le da el mismo tratamiento que a los estándares.

Para realizar el análisis se emplea un espectrofotómetro de absorción atómica de la marca Varian modelo SpectrAA 860 equipado con un generador de hidruros de flujo continuo que está constituido por una bomba peristáltica con capacidad para mezclar ácido (HCl al 50 %), reductor (NaBH₄ al 0.5 % estabilizado con NaOH al 0.05 %) y muestra con velocidades de flujo de 1 ml·min⁻¹ para el ácido y el reductor y 8 ml·min⁻¹ para la muestra.

Las soluciones reaccionan de acuerdo al equilibrio 6 al mezclarse para formar la arsina (AsH₃) con el arsénico (Pérez, 2004), que es enviada a una celda de cuarzo con gas N₂ colocada sobre el quemador con una flama de aire acetileno, la lámpara que se utiliza es de cátodo hueco a 193.7 nm con corriente de lámpara de 10 mA.



La concentración de As es determinada con la fórmula 4.

Determinación de Se

La determinación de Se de las muestras de agua se realiza por espectroscopia de absorción atómica con la técnica de generación de hidruros. De una solución estándar de 1000 mg·l⁻¹ de Se se prepara una curva de calibración desde 0 hasta 40 µg·l⁻¹ en matraces volumétricos de 25 ml, a cada estándar se le adiciona 10 ml de agua desionizada y 10 ml de HCl concentrado; se calientan a una temperatura

de 70 °C durante 20 minutos baño maría, se dejan enfriar a temperatura ambiente y se aforan con agua desionizada (Davidosky, 1993).

Se toman alícuotas de 10 ml de muestra de agua a analizar y se lleva a un matraz volumétrico de 25 ml y se le da el mismo tratamiento que a los estándares.

Para realizar el análisis se emplea un espectrofotómetro de absorción atómica de la marca Varian modelo SpectrAA 860 equipado con un generador de hidruros de flujo continuo que está constituido por una bomba peristáltica con capacidad para mezclar ácido (HCl al 50 %), reductor (NaBH_4 al 0.5 % estabilizado con NaOH al 0.05 %) y muestra con velocidades de flujo de $1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ para el ácido y el reductor y $8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ para la muestra.

Las soluciones reaccionan al mezclarse para formar el seleniuro de hidrógeno (SeH_3) con el selenio que es enviada a una celda de cuarzo con gas N_2 colocada sobre el quemador de aire acetileno y flama, la lámpara que se utiliza es de cátodo hueco a una longitud de onda de 196 nm con una corriente de lámpara de 10 mA. La concentración de Se es determinada con la fórmula 4.

Determinación de Hg

Para la determinación de Hg se prepara una curva de calibración de este elemento en un rango de concentración de 0 hasta $10 \mu\text{g/L}$ en matraces volumétricos de 25

ml, se adiciona 10 ml de agua desionizada más 10 ml de HCl concentrado y se calientan a temperatura de 90°C durante 20 minutos, se dejan enfriar a temperatura ambiente y se aforan. Paralelamente se toman 10 ml de muestra de agua a analizar y se llevan a un matraz volumétrico de 25 ml, se adiciona a cada 10 ml de HCl y se calientan a 90 °C también por 20 min se dejan enfriar a temperatura ambiente y afora a 25 ml con agua destilada.

Para realizar el análisis se emplea un espectrofotómetro de absorción atómica de la marca Varian modelo Spectraa 860 equipado con un generador de hidruros de flujo continuo que está constituido por una bomba peristáltica con capacidad para mezclar ácido (HCl al 50 %), reductor ($ZnCl_2$ al 25 % en HCl al 20 %) y muestra con velocidades de flujo de $1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ para el ácido y el reductor y $8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ para la muestra.

Las soluciones reaccionan al mezclarse para formar el hidruro de mercurio (HgH_2) con el mercurio que es enviada a una celda de cuarzo con gas N_2 colocada sobre el quemador de aire acetileno sin flama, la lámpara que se utiliza es de cátodo hueco de Hg a 253.7 nm con corriente de lámpara de 10 mA. La concentración de Hg es determinada con la fórmula 4.

IV.9 Tratamiento de remoción de Al del agua

IV.9.1 Materiales

Para realizar el estudio de remoción de Al presente en el agua de tratamiento se utilizó una resina de intercambio catiónico fuerte de tipo gel Dowex 50 x8 de la Marca Fluka y una cantera de Calderones Gto.,

IV.9.2 Acondicionamiento de resina de intercambio iónico

La resina se activó realizando lavados con una solución de NaCl al 4 % por tres ocasiones y a continuación se lavó con agua desionizada hasta que con la prueba de nitrato de plata AgNO_3 no se observara un precipitado lo cual sucedió cuando se realizaron aproximadamente doce lavados.

IV.9.3 Acondicionamiento de material adsorbente

Se redujo el tamaño de la cantera utilizando un marro de acero, un molino de quijadas y un molino de discos. El material obtenido se tamizó utilizando una maquina vibratoria de tamices, se separó el material de acuerdo a su tamaño de partícula.

El material que se utilizó para las pruebas están entre el rango de tamaño de partícula de 0.85-1.18 mm, se calentó a una temperatura de 600 °C durante una hora en una mufla y se dejó enfriar a temperatura ambiente.

IV.9.4 Tratamiento del agua con resina de intercambio y con adsorbente tratado térmicamente

Se colocó un volumen de 25 ml de resina activada o adsorbente tratado en una bureta de 25 ml y se le hizo pasar agua de la presa de Mata y de la planta de tratamiento de este sitio a un flujo de 20 ml·h⁻¹ colectando fracciones de 50 ml, desechando las muestras nones y colectando las fracciones pares.

Las fracciones colectadas se conservaron con HNO₃ al 2%, posteriormente se analizó el contenido de Al en un espectrofotómetro de absorción atómica de la marca Varian modelo spectrAA 860 en las condiciones apropiadas para este elemento.

IV.10 Análisis de muestras de sedimentos

IV.10.1 Tratamiento de sedimentos

Los sedimentos que se muestrearon en la presa de Mata se dejaron secar a temperatura ambiente, posteriormente se cuarteo y se tomó una muestra que fue tamizada y nuevamente fue cuarteada para tomar una muestra de 10 g de suelo,

se le adiciono 25 ml de agua; esta muestra se agito hasta mezclarse perfectamente bien en un vaso de precipitado de 150 ml y se le midió el pH empleando un potenciómetro de la marca Orion, modelo 3-Star-Plus calibrado previamente utilizando 2 soluciones buffer, una de pH 4.0 y la otra de pH 7.0 hasta que al pasar de una solución a otra el valor de pH tuviese una variación menor a 0.15 unidades de pH; una vez calibrado el potenciómetro se tomaron las lecturas de las muestras, manteniéndolas en agitación hasta que el valor de pH fuera constante.

Para poder realizar el análisis elemental en los sedimentos, una parte de los sedimentos del tamaño de partícula menor a malla de 30 fue digerida en un horno de microondas de la marca CEM modelo Mars_{LX} 5 bajo las siguientes condiciones: 0.4 gr de sedimento seco y se colocan en un vaso de PTFE (poli-tetra-fluoro-etileno o teflón); se le adiciona una mezcla de 11 ml de ácidos concentrados HNO₃-HCl-HF (1:3:7) en la secuencia mencionada. La digestión se realiza en dos etapas, en la primera se inicia de una temperatura ambiente hasta una temperatura máxima de 210 °C y una presión máxima de 100 PSI en un tiempo de 25 min; mantener esta temperatura por 10 min y dejar enfriar a temperatura ambiente. En la segunda etapa se adicionan 35 ml de ácido bórico (H₃BO₃) saturado y se vuelven a calentar las muestras en el horno de microondas llevándolo de temperatura ambiente hasta 210 °C y una presión máxima de 100 psi por un tiempo de 10 min, se calienta isotérmicamente a 210 °C durante un

tiempo de 5 min y se deja enfriar (Martínez, 2008). Las muestras tratadas se aforan a un volumen de 25 ml y están listas para leer los elementos de interés.

IV.10.2 Análisis de elementos mayoritarios y traza

Las muestras de sedimentos tratadas se colocaron en frascos de polietileno perfectamente lavados con ácido y enjuagados con suficiente agua. Se preparó una curva de calibración a partir de un estándar multielemental certificado con los siguientes elementos: Be, Cd, Ag, Cr, Cu, Ni, Co, V, Fe, Al, Ba, Ca, Mg, Na, K, Al, Si y S y con un espectrofotómetro de emisión atómica de plasma por acoplamiento inductivo (ICP) de la marca PERKIN-ELMER modelo Optima 3000 XL se realizaron las lecturas de las curvas de calibración de cada uno de los elementos y se procedió a analizar cada una de las muestras. La concentración de cada uno de los elementos se determinó con la fórmula 4.

Determinación de As

La determinación de As de las muestras de sedimentos se realiza por espectroscopia de absorción atómica con generación de hidruros al igual que las muestras de agua. Para realizar este análisis se utiliza una alícuota de solución de la digestión de los sedimentos y se trata de igual forma que para el análisis de agua para este elemento.

En el análisis se emplea un espectrofotómetro de absorción atómica de la marca Varian modelo Spectraa 860 equipado con un generador de hidruros de flujo continuo, constituido por una bomba peristáltica con capacidad para mezclar ácido (HCl al 50 %), reductor (NaBH_4 al 0.5 % estabilizado con NaOH al 0.05 %) y muestra con velocidades de flujo de $1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ para el ácido y el reductor y $8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ para la muestra.

Determinación de Se

La determinación de Se en las muestras de sedimento digeridas se realiza por espectroscopia de absorción atómica con la técnica de generación de hidruros; utilizando la metodología que se menciona para el agua, así como el mismo equipo y condiciones de análisis.

Determinación de Hg en suelos

El Análisis de Hg se realizó tomando una alícuota de la muestra de sedimentos digerida totalmente utilizando la técnica que se menciona para este elemento en muestras de agua con el mismo equipo y mismas condiciones.

IV.10.3 Extracción secuencial de metales en sedimentos

Para determinar el grado de lixiviación de los elementos metálicos pesados en los sedimentos, se utiliza el método de propuesto por Tessier, en el que indica cinco soluciones con diferente fuerza extractora bajo las condiciones siguientes (Villar y col., 2003; Schalscha y col., 1999):

- Fracción 1: Extracción de elementos intercambiables: Un gramo de sedimento se coloca en un matraz Erlenmeyer, se adiciona 8 ml de solución de $MgCl_2$ 1 M ajustado a pH de 7, el matraz se coloca en una zaranda con control de agitación y se agita durante 1 hora, al término de la agitación la solución se centrifuga, obteniéndose una solución con los elementos intercambiables y la fracción residual se somete a la siguiente extracción.
- Fracción 2: Extracción de elementos asociados a carbonatos: Al residuo de la fracción 1 se le adicionan 8 ml de solución de acetato de sodio (NaOAc) 1 M ajustado a pH 5, se agita durante 5 horas y posteriormente se centrifuga, obteniéndose la solución con elementos químicos que se asocian con los carbonatos y un residuo.
- Fracción 3: Extracción de elementos asociados a las formas reducibles de los elementos: Al residuo de la fracción 2 se le adicionan 20 ml de clorhidrato de hidroxilamina ($NH_2OH-HCl$) 0.04 M en ácido acético (HAc) al

25 %, se calienta durante 5 hrs a 95 °C, se centrifuga y se decanta para obtener la solución con los elementos en su forma reducible y un residuo.

- Fracción 4: Extracción de elementos químicos en forma oxidada: El residuo de la fracción 3 se coloca en un vaso de precipitados de 250 ml, se adicionan 2 ml de HNO_3 0.02 M y 5 ml de H_2O_2 , al 30 %, se ajusta el pH a 2, se coloca un vidrio de reloj y se calienta 2 horas a 85 °C con agitación ocasional y se agrega otra porción de 3 ml de H_2O_2 al 30% a pH 2 y se continua calentando durante otras 3 horas; se enfría a temperatura ambiente, se agregan 5 ml de acetato de amonio 3.3 M en HNO_3 al 20%, se diluye a 20 ml con agua destilada, se agita durante 30 min y se centrifuga, obteniéndose la fracción o forma oxidable.
- Fracción 5: Se coloca el residuo en un vaso de Teflón, se agregan 2 ml de HClO_4 y 10 ml de HF y se calienta hasta sequedad. A continuación se agrega 1 ml de HClO_4 se evapora nuevamente y el residuo se disuelve con HNO_3 0.02 M, se diluye a 25 ml con agua desionizada.

IV.10.4 Determinación de la media aritmética y del porcentaje de desviación estándar relativo (%DER) en las muestras

La determinación de los elementos se realizó por triplicado, por lo que es necesario obtener un promedio mediante la utilización del estadístico de la media aritmética y para determinar el grado de dispersión (error relativo) se utilizó el estadístico del porcentaje de desviación estándar relativo (%DER) utilizando las expresiones de Miller y Miller (2002).

La media \bar{x} , está dada por la expresión matemática:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n} \quad \text{Ec. 5}$$

La desviación estándar, s , de n medidas esta dada por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Ec. 6}$$

y el porcentaje de desviación estándar relativo por:

$$\%DER = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde:

X_i es cada uno de los datos obtenidos

n es el total de datos

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V.1 Análisis Físico-químicos del agua.

Los resultados del análisis de pH, indican que tanto en la presa como en la planta tratadora de agua el pH está cercano al límite alcalino, estando dentro de los límites permisibles de alcalinidad, sólidos disueltos, sólidos totales, conductividad, turbidez y color, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis Físicoquímico promedio del agua de presa y planta de tratamiento de Mata en la ciudad de Guanajuato, México.

| Elemento | Presa | Planta de Tratamiento | *NOM-127 SSA-1994 |
|--|---------------|-----------------------|-------------------|
| Alcalinidad como CaCO_3 ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) | 179.36(29.3) | 185.44(22.9) | -- |
| Sólidos Disueltos Totales ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) | 267.33(133.7) | 101.84(50.9) | -- |
| pH | 8.8(0.1) | 8.2(0.1) | 6.5-8.5 |
| Sólidos Totales ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) | 275.3(151.6) | 407.3(98.3) | 1,000 |
| Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | 144.3(0.6) | 306.3(0.6) | 1500 |
| Turbiedad (UTN) | 1(0.5) | 1(0.5) | 5 |
| Color (UC) | 8.3(2.9) | 3.3(2.9) | 20 |

*Noma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; () desviación estándar.

Por consiguiente los valores obtenidos de estos parámetros no representan riesgo para la salud; los altos valores de pH se debe a la geología de la región ya que está constituido de calizas lo cual implica que el agua tenga pH elevados.

V.2 Análisis Químicos del agua

De los elementos analizados y que se encuentran reportados en la tabla 2, los elementos de Pb, Cr y Cd se encuentran por debajo de los límites permisibles, por lo tanto estos elementos no representan un factor de riesgo para la salud de la población que ingiere este vital líquido.

Los elementos mayoritarios correspondientes a Ca, Mg, Na y K, a pesar de que se encuentran en altas concentraciones, estos elementos están dentro de los límites permisibles en el agua.

Por otra parte, se puede notar que el Mn se encuentra cerca de los límites permisibles por la normatividad mexicana en la presa y en la planta de tratamiento.

El Fe se encuentra en concentraciones menores a lo que permite la normatividad mexicana, sin embargo se detecta que en la planta de tratamiento la concentración de este elemento rebasa los niveles permisibles e incluso casi se llega a duplicar.

El agua de la presa presenta altos contenidos de Al rebasando ligeramente los límites permisibles por la normatividad mexicana, sin embargo los niveles de Al que presenta la planta de tratamiento son mucho más altos, esto puede ser en principio a que el Al puede lixiviarse de los suelos con mayor facilidad debido a que el pH del agua es ligeramente alcalino, sin embargo, los valores altos de Al que se presentan en la planta se puede deber al uso de alúmina en el tratamiento de purificación del agua.

Tabla 2. Análisis químico elemental promedio del agua de la presa y de la planta de tratamiento de Mata de la Cd. de Guanajuato.

| Elemento | Planta de Tratamiento en $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ | Presa en $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ | *NOM-127 SSA-1994 en $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ |
|----------|--|--|--|
| Pb | < 2.4 | | 10 |
| Be | < 4.0 | | -- |
| Cd | <4.00 | | 5 |
| Ag | 64.5(0.1) | 36.6(0.1) | -- |
| Cr | 29.8(0) | 36.1(32.53) | 300 |
| Mn | 141.43(19.1) | 160.6(75.5) | 150 |
| Zn | 49.33(32.3) | 5.4(5.4) | 5,000.00 |
| Cu | < 0.10 | | 2,000.00 |
| Ni | 0.02(0.02) | 0(0.02) | -- |
| Co | 205.77(163.6) | 182.35(101.8) | -- |
| V | 4.06(7.4) | 1.45(0.5) | -- |
| Fe | 282.8(56.2) | 530.75(5.2) | 300 |
| Al | 1145.7(386.7) | 248(124) | 200 |
| Ba | 12.35(2.7) | 12.85(3.8) | 700 |
| Ca | 49760.67(10571.1) | 44271.8(981.9) | 250,000.00 |
| Mg | 10577(298.4) | 10637.67(112.2) | 100,000.00 |
| Na | 5687.03(1278.6) | 7486.33(5751.5) | 200,000.00 |
| K | 1914.67(77.1) | 1880.2(24.6) | 10,000.00 |
| P | 2.4(0.9) | 13.15(5.9) | -- |

*Noma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; () desv. est.

En el análisis de los aniones, los resultados se presentan en la tabla 3; en la cual se presentan valores de Cl^- y SO_4^{2-} dentro de los límites máximos permisibles por la normatividad mexicana; por consiguiente estos iones no presentan riesgo para la salud humana. Los otros iones que se analizaron no están normados, sin embargo presentan datos importantes para definir el tipo de agua que está en la presa de Mata de la Cd. de Guanajuato.

Tabla 3. Análisis químico promedio de aniones del agua de la presa y planta de tratamiento de Mata de la Cd. de Guanajuato.

| Aniones | Planta de Tratamiento en mg·l ⁻¹ | Presa en mg·l ⁻¹ | *NOM-127 SSA-1994 en mg·l ⁻¹ |
|---|---|-----------------------------|---|
| Fosfatos (PO ₄ ³⁻) | 0.053 (0.024) | 0.009 (0.004) | -- |
| Carbonatos (CO ₃ ²⁻) | Nd | Nd | -- |
| Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻) | 226.24 (28.0) | 218.82 (35.8) | -- |
| Sulfatos (SO ₄ ²⁻) | 149.58 (17.58) | 178.84 (22.23) | 400 |
| Cloruros (Cl ⁻) | 17.7 (0.9) | 8.08 (0.1) | 250 |

*Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; () desv. est.

Con los datos obtenidos de los aniones y cationes presentes en el agua, éstos se convierten a meq/l (Cl⁻, HCO₃⁻ + CO₃²⁻, SO₄²⁻, Na⁺ + K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺), y de los aniones se obtiene el total de meq de aniones y se obtiene la fracción correspondiente a cada anión; lo mismo se hace para calcular el porcentaje de los cationes y con estos datos (Tabla 4), es posible determinar el tipo de agua de acuerdo a la metodología de Piper.

Tabla 4. Cationes y aniones considerados para definir la clasificación del agua de Mata, Gto.

| Iones | Planta de tratamiento en meq·l ⁻¹ | Presa en meq·l ⁻¹ | Planta de Tratamiento % meq | Presa % meq |
|---|--|------------------------------|-----------------------------|-------------|
| Ca ²⁺ | 2.21 | 2.48 | 63.89 | 68.05 |
| Mg ²⁺ | 0.87 | 0.87 | 25.30 | 23.84 |
| Na ⁺ + K ⁺ | 0.37 | 0.30 | 10.80 | 8.11 |
| Ion SO ₄ ²⁻ | 3.11 | 3.72 | 42.53 | 49.39 |
| Cl ⁻ | 0.50 | 0.23 | 6.82 | 3.02 |
| CO ₃ ²⁻ + HCO ₃ ⁻ | 3.71 | 3.59 | 50.65 | 47.58 |

meq = milésima de equivalentes químico

De acuerdo con los datos de la tabla 4 fue elaborado el diagrama de Piper (figura 8), en él se muestra que tanto el agua de la presa es de tipo mixto en sulfatos y bicarbonatos, mientras que el agua de la planta es del tipo bicarbonatada-cálcica predominantemente.

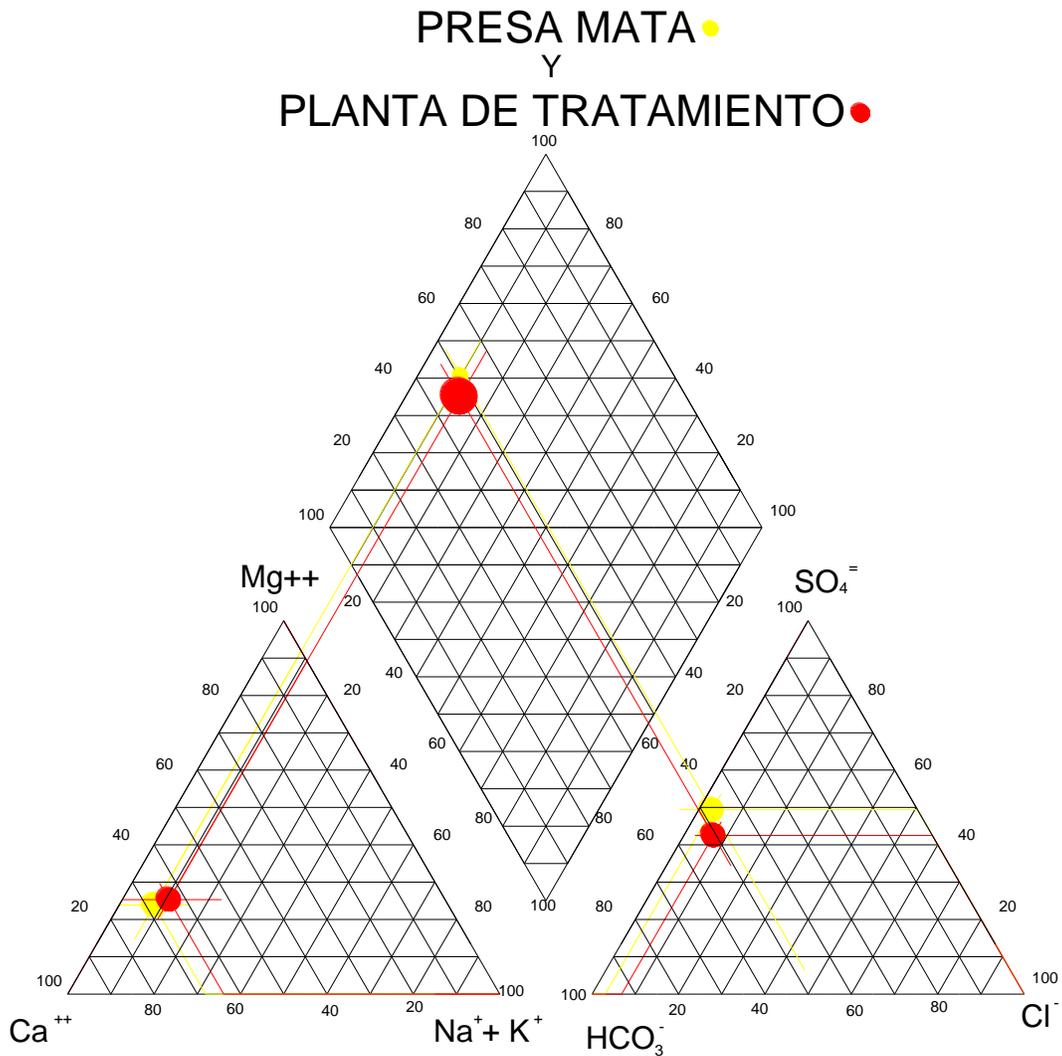


Figura 8. Diagrama de Piper del agua de la presa y planta de tratamiento de Mata, Gto. El agua se clasifica hidroquímicamente como: bicarbonatada-sulfatada-cálcica en la presa de Mata y bicarbonatada-cálcica en la planta de tratamiento.

Los elementos de As y Se en el agua de la presa y en la planta de tratamiento de Mata se presentan a valores menores a los límites permisibles por la normatividad mexicana; sin embargo el Hg presenta límites mayores a los límites permisibles por esta misma normativa, siendo un riesgo para la población que consume el agua y el cual requiere de ser monitoreada en virtud de los altos niveles detectados.

Tabla 5. Análisis promedio de As, Se y Hg en el agua de la presa y en la planta de tratamiento de Mata de la Cd. de Guanajuato.

| Elemento | Planta de Tratamiento en $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ | Presa en $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ | Norma en $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ |
|----------|---|---|---|
| As | 4.8 (0.17) | 4.9 (0.16) | 25 |
| Se | 0.3 (0.1) | 0.3 (0.1) | -- |
| Hg | 12.16 (0.3) | 12.76 (0.2) | 1 |

() desv. est.

Los resultados que se obtienen de los elementos totales en los sedimentos y los porcentajes de los mismos elementos en la extracción secuencial de Tessier se muestran en la tabla 6, en esta tabla se observa que los principales elementos que lixivian en la solución asociada a elementos intercambiables (FI) son: Ba, Ca y Mg. En la solución asociada a carbonatos (FII), se empieza a lixiviar Mn y también Ba, Ca y Mg.

En la solución asociados (FIII) a las formas reducibles se lixivian Be, Cu, Co, Zn Fe y Mn en alto porcentaje.

En la solución asociada a óxidos (FIV), los elementos que lixivian de los sedimentos son: Pb, Be, Cr, Zn, Ba, Cu, Na, Fe y Al.

En la solución de lixiviación de elementos residuales (FV), se observa que lixivian altos contenidos de Cr, Zn, Co, Fe, Al, Na y K. Esto debido al ataque fuerte de los aluminosilicatos que contiene.

Tabla 6. Análisis promedio de elementos totales de sedimentos de la presa de Mata y extracción secuencial de sedimentos por el método de Tessier.

| Elemento | Conc. Total en $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | % F I | % F II | % F III | % FI V | % F V |
|----------|---|-------|--------|---------|--------|-------|
| Pb | 70.2 (5.9) | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 88.0 | 10.0 |
| Be | 0.5 (0) | 0.0 | 0.0 | 19.0 | 81.0 | 0.0 |
| Cr | 19.8 (2.6) | 3.0 | 2.0 | 1.0 | 36.0 | 58.0 |
| Mn | 176.7 (4.5) | 2.0 | 15.0 | 45.0 | 22.0 | 16.0 |
| Zn | 35.7 (1.6) | 0.0 | 0.0 | 7.0 | 29.0 | 64.0 |
| Cu | 23.3 (1.1) | 0.0 | 0.0 | 17.0 | 56.0 | 27.0 |
| Co | 17.1 (12.1) | 0.0 | 0.0 | 13.0 | 21.0 | 65.0 |
| Fe | 10586.2 (211.9) | 0.0 | 0.0 | 10.0 | 17.0 | 72.0 |
| Al | 12825 (922.9) | 0.0 | 0.0 | 2.0 | 15.0 | 83.0 |
| Ba | 45.5 (38.1) | 15.0 | 26.0 | 8.0 | 33.0 | 19.0 |
| Ca | 2442.2 (389.4) | 26.0 | 65.0 | 4.0 | 4.0 | 0.0 |
| Mg | 929 (236.4) | 69.0 | 24.0 | 3.0 | 4.0 | 0.0 |
| Na | 3587.6 (569.2) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 32.0 | 67.0 |
| K | 4047.7 (110.5) | 2.0 | 6.0 | 2.0 | 1.0 | 90.0 |

() desv. est.

Los resultados preliminares de retención de Al contenido en el agua de la planta de Mata, Gto., con la resina de intercambio catiónico fuerte de tipo gel Dowex 50 x8 de la Marca Fluka (figura 9), indica que el Al es altamente retenido con este tipo de resina, ya que se observa que de las 25 fracciones analizadas, solo en una se observó con niveles de retención cercanos al 60 % por lo que se puede considerar que en las 25 fracciones se retuvo el aluminio con cerca del 100 %, estas 25 fracciones en realidad corresponden a

100 volúmenes de resina utilizada y se observa que no se ha alcanzado el nivel de saturación en la resina.

Al utilizar el agua de la presa de Mata con la misma resina de intercambio catiónica, se observa que la resina se satura con 10 fracciones (figura 9), esto es menor cantidad de fracciones que con el agua de la planta, ya que después se observa alta variabilidad en los contenidos de Al, a pesar de que en la planta contiene altos niveles de Al, se puede considerar que hay otros iones que compiten como el Fe.

Con el adsorbente tratado se pudo observar que el mismo comportamiento que la resina, sin embargo solo se trataron 9 fracciones de agua de la presa y tres fracciones del agua de la planta, tales datos no son suficientes para definir la capacidad que presenta el adsorbente, sin embargo, con el agua de la presa se puede observar que si presenta capacidad para ser considerada en estudios futuros.

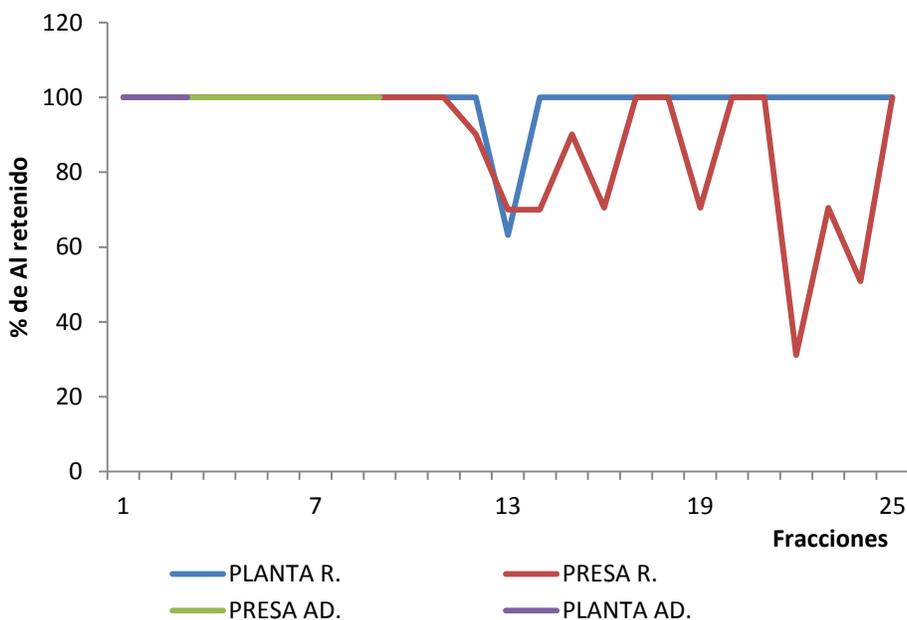


Figura 9. Adsorción de Al contenido en agua de la presa y planta de tratamiento de Mata, Gto., con resina de intercambio catiónico de tipo Gel y cantera de Dolores, Gto., tratada térmicamente a 650 °C durante 1 h.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

La mayoría de los parámetros físicoquímicos se encuentran dentro de los límites permisibles por la normativa oficial mexicana.

El agua de la presa y de la planta de tratamiento, se clasifican hidroquímicamente como aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas, el cual se relaciona con el tipo de suelo de esta región.

La concentración de Al en la presa y la planta de tratamiento de Mata Guanajuato sobrepasan considerablemente los límites normados, más aún, en la planta de tratamiento es aproximadamente 5 veces mayor, esto es debido a que en la planta de tratamiento posiblemente utilizan alúmina en el tratamiento de purificación del agua .

Se detectó que la concentración de Hg en el agua de la presa y en la planta de tratamiento se presentan en una concentración de $12 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ aproximadamente, sin embargo la normativa establece un límite máximo permisible de $1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$; la concentración determinada no fue posible confirmarla, por lo que se considera conveniente que se realicen otros análisis para este elemento.

De acuerdo con el trabajo realizado para disminuir el contenido de Al presente en el agua de la presa y de la planta de tratamiento se observa que la resina de

intercambio catiónico empleada presenta una buena capacidad de retención de Al; mientras que utilizando el adsorbente de Calderones tratada térmicamente se observa que de las fracciones analizadas, todas presentan total retención de Al; en consecuencia trabajos futuros deberán de estar enfocados a determinar la capacidad de retención de este material así como su caracterización tanto del material en su estado natural como modificado térmicamente.

ÍNDICE DE TABLAS

| | PÁGINA |
|--|---------------|
| Tabla 1. Análisis Físicoquímico promedio del agua de Presa y planta de tratamiento de Mata en la Ciudad de Guanajuato, México. | 53 |
| Tabla 2. Análisis químico elemental promedio del agua de la presa y de la planta de tratamiento de Mata de la Cd. de Guanajuato. | 55 |
| Tabla 3. Análisis químico promedio de aniones del agua de la presa y planta de tratamiento de Mata de la Cd. de Guanajuato. | 56 |
| Tabla 4. Cationes y aniones considerados para definir la clasificación del agua de Mata, Gto. | 56 |
| Tabla 5. Análisis promedio de As, Se y Hg en el agua de la presa y en la planta de tratamiento de Mata de la Cd. de Guanajuato. | 58 |
| Tabla 6. Análisis promedio de elementos totales de sedimentos de la presa de Mata y extracción secuencial de sedimentos por el método de Tessier. | 59 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | PÁGINA |
|--|---------------|
| Figura 1. Diagrama de Pourbaix de arsénico en medio acuoso. | 9 |
| Figura 2. Diagrama de Pourbaix del Pb . | 12 |
| Figura 3. Diagrama de Pourbaix del Cr . | 14 |
| Figura 4. Diagrama de Pourbaix del Cd . | 16 |
| Figura 5. Diagrama de Pourbaix del Hg . | 18 |
| Figura 6. Presa Mata, Estado de Guanajuato, México. | 24 |
| Figura 7. Bosquejo geológico del Distrito Minero de Guanajuato. | 27 |
| Figura 8. Diagrama de Piper del agua de la presa y planta de tratamiento de Mata, Gto. | 57 |
| Figura 9. Adsorción de Al contenido en agua de la presa y planta de tratamiento de Mata, Gto. | 60 |

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, R. M. (DGN). 2001. NMX-AA-073-SCFI. Análisis de agua. Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Diario Oficial de la Federación. 13 pp.

Aguilar, R. M. (DGN). 2001b. NMX-AA-029-SCFI Análisis de agua. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Antúnez, E.F. 1964. Monografía Histórica y Minera del Distrito Minero de Guanajuato: México, Consejo Nacional de Recursos Naturales no Renovables, Publicación 17-E, 589 pp.

Berman, E. 1980. Toxic metals and their analysis. Ed. Heyden international topics in science. Londres. 293 pp.

Bravo, N. 2004. Utilización de adsorbentes para la eliminación de contaminantes en aguas y efluentes líquidos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Belgrano.

Buchanan, L.J. 1979. The Las Torres mine, Guanajuato, México; Orecontrols of a fossil geothermal system: Colorado. Colorado School of Mines, tesis doctoral, 138 pp.

Burriel, M. F. Lucena, C. F. Arribas, J. S. y J. H. Méndez. 1994. Química analítica cualitativa. Ed. Paraninfo. Madrid, España.

Calder, L.M., 1988. "Chromium Contamination of Groundwater" In: Chromium in the Natural and Human Environments. From: Nriagu, J. O. and E. Nieboer, Editors. John Wiley & Sons, New York: 20: 215- 230.

Clark, K.F; Foster, C.T; Damon, P.E. 1982. Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico, Geological Society of America Bulletin, 93: 533-544.

Davidowski, L.A; 1993. Simple continuous flow hydride generator for ICP-OES Perkin Elmer Corporation, 1-7 pp.

Emsley, J. 2001. Nature’s Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements. Oxford University Press Inc., New York. 542 pp.

Galvão, L. A. C. y Germán. 1987. Arsenico. Seria Vigilancia 3 Ed. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud. 70 pp.

Google Earth, 2013, US Dept of State Geographer © 2013 Google. Image © 2013 TerraMetrics. Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO.

Gross, W.H. 1975. New ore discovery and source of silver–gold veins, Guanajuato, México, Economic Geology, 70:1175-1189.

Hald, P; Foley, N.K; Hayba, D.O. 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid–sulfate and adularia–sericite types, Economic Geology, 82, 1–26.

Huarte, C. P; Sánchez, B. Á. 2006. El agua: Un Elemento Común pero Extraño, Agua: Un Recurso Escaso, España. Publicaciones Digitales S.A.

Kabata-Pendias A and A. B. Mukherjee, 2007. Trace elements from soils to humans. Ed. Springer. 561 pp.

Litter, M. I. 2005. Remoción de contaminantes metálicos. “Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación de agua”, M.A. Blesa y J. Blanco Gálvez,

Editores, Editorial Escuela de Posgrado UNSAM, San Martín, Prov. de Buenos Aires, Argentina, Cap. 10, 67-83.

Manahan, S. E. 2001. Environmental chemistry of water In Fundamentals of environmental chemistry. Ed. CRC press LLC. Chapter 11. 39 pp.

Mango, H.N. 1992. Origin of epithermal Ag–Au–Cu–Pb–Zn mineralization on the Veta Madre, Guanajuato, México, Hanover, New Hampshire, Dartmouth College, Tesis Doctoral, 138 pp.

Martínez, LL. X. 2008. Presencia, Movilidad y Riesgo de Elementos Traza en Suelos Naturales. Los Mecanismos de Absorción como Reguladores del Equilibrio Suelo-Agua, Programa de doctorado de recursos naturales y medio ambiente. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.

Martínez-Reyes, J; Vassallo, L.F; Franco, F.J. 1995. Geología y potencial minero de la porción central-poniente del Estado de Guanajuato: Guanajuato, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Centro, Gobierno del Estado de Guanajuato, Secretaría de Desarrollo Económico, Dirección de Promoción Minera, 70 pp.

McFarland, M. L. y Dozier M. C. 2004. Problemas del Agua Potable: El Plomo. Instituto de Recurso de Recursos de Agua de Texas. 4pp.

Miller, J. N. y J. C. Miller. 2002. Estadística y Quimiometría para Química Analítica. 4^a. Ed. Pearson Educación, S. A. Madrid, España. 278 pp.

Miranda-Gasca, M.A. 2000. The metallic ore-deposits of the Guerrero Terrane, western Mexico; an overview, Journal of South American Earth Sciences, 13, 403–413.

Mongue, C. 2004. La naturaleza del agua como recurso. Perspectiva social, económica e institucional de una gestión integral, Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua, Tortosa, España.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el Agua para su Potabilización". México

Nriagu, J. O. 1994. Arsenic in the environment. Part II: Human Health and Ecosystem. *Advances in Environmental Science and Technology*. 27(5): 93-107.

Pérez, M. F. 2004. Dinámica del Arsénico en aguas subterráneas de pozos y sedimentos del distribuidor general de agua potable de Zimapán, Hidalgo. Tesis Doctoral. Instituto de Ciencias Basicas e Ingenieria. Centro de Investigaciones Quimicas. 132 pp.

Petruk, W; Owens, D.R. 1974. Some mineralogical characteristics of the silver deposits in the Guanajuato mining district, Mexico, *Economic Geology*, 69, 1078–1085.

Prieto, G. F. 1997. Depuración de aguas residuales mediante formación de ferritas in situ. Diseño y optimización de un reactor a escala piloto. Evaluación de ferritas. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. Fac. Ciencias. Dpto. Quím. Anal. 293 pp.

Ramírez, Q. F. 2011. Tratamiento del Agua, El Agua Potable. Madrid. Versión electrónica disponible en:
[http://www.elaguapotable.com/tratamiento_del_agua.htm].

Ramos-Arroyo, J.R. y Siebe-Grabach D. 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: Estudio de caso en el Distrito de Guanajuato México. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 23: 54-74.

Randall-Roberts, J.A; Saldaña, E; Clark, K.F. 1994. Exploration in a volcano-plutonic center at Guanajuato, México, *Economic Geology*, 89: 1722-1751.

Ringbom, A. 1979. Formación de complejos en química analítica. Ed. Alambra, S. A. España. 458 pp.

Rojas-Hernández, A. 1995. El método de especies y equilibrios generalizados para el estudio de sistemas químicos en equilibrio bajo condiciones de amortiguamiento. Condiciones de amortiguamiento: Teoría y Algoritmos de los diagramas de zonas de predominio. Tesis Doctoral. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. UAM-Iztapalapa. México. 320 pp.

Schalscha, E. B., Escudero P., Ahumada c. I., 1999. Contenido y fraccionamiento de Cu, Cr, Ni y Zn en suelos montmorilloníticos y alofánicos: comparación entre dos diferentes procedimientos de extracción. Departamento de Química Inorgánica y Analítica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Serra, C. R. (DGN). 1981. NMX-AA-074. Análisis de Agua. Determinación del ion sulfato. Diario Oficial de la Federación. 10 pp.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2000. Normales Climatológicas 1971-200. Estación: 00011094. Guanajuato, México.

Sociedad Cooperativa Minero Metalúrgica Santa Fé de Guanajuato S.A. de C.L. (SCMMSFG). 2002. Archivos de producción 1977-2001: Guanajuato, México, 1460.

Takeno, N. 2005. Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Research Center for Deep Geological Environments. 287 pp.

Vasallo, L.F. 1988. Características de la composición mineralógica de las menas de la Veta Madre de Guanajuato. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 7: 232-24.

Vassallo, L F; Martínez-Reyes, J; Paris, J.P. 1996. Estructuras circulares y lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, México y su significado en la prospección minera, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13: 252-257.

Vilar, S., Gutiérrez A., Antezana J., Carral P. y Álvarez A., 2003. Estudio comparativo de diferentes métodos de extracción secuencial para metales pesados en suelos. Departamento de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid, España.

Wandke, A; Martínez, J. 1928. The Guanajuato Mining District, Guanajuato México: Economic Geology, XXIII (1): 1-44.

ANEXO I

Normas Oficiales de Límites Permisibles de Elementos en Agua Potable.

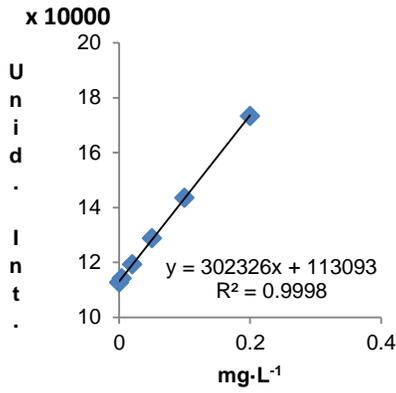
| Elemento | NOM-127-SSA1-1994 en ppb | OMS en ppb (1) | EPA en ppb (2) | CANADA en ppb (3) |
|----------|--------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Pb | 10.00 | 10.00 | 15.00 | 10.00 |
| Be | -- | -- | 4.00 | -- |
| Cd | 5.00 | 3.00 | 5.00 | 5.00 |
| Ag | -- | -- | -- | -- |
| Cr | 300.00 | 50.00 | 100.00 | 50.00 |
| Mn | 150.00 | 500.00 | -- | -- |
| Zn | 5000.00 | 3000.00 | -- | -- |
| Cu | 2000.00 | 2000.00 | 1300.00 | -- |
| Ni | -- | 20.00 | -- | -- |
| Co | -- | -- | -- | -- |
| V | -- | -- | -- | -- |
| Fe | 300.00 | -- | 300.00 | 300.00 |
| Al | 200.00 | 200.00 | 200.00 | |
| Ba | 700.00 | 300.00 | 2000.00 | 1000.00 |
| Ca | 250000.00 | -- | -- | -- |
| Mg | 100000.00 | -- | -- | -- |
| Na | 200000.00 | 200000.00 | -- | -- |
| K | 10000.00 | -- | -- | -- |
| P | -- | -- | -- | -- |

MODIFICACIÓN a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Publicada el 20 de junio de 2000.

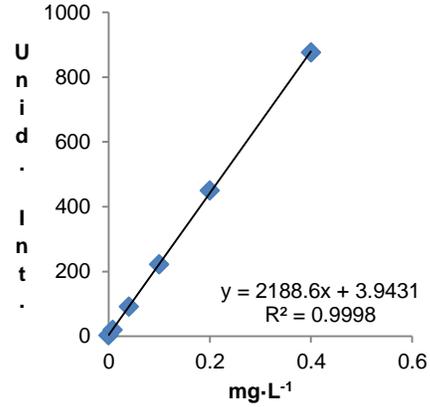
1. Organización Mundial de la Salud. Tercera edición. 2008. Guías para la calidad del agua potable. Capítulo 12. Hojas de información sobre sustancias químicas.
2. EPA: Estándares europeos de la calidad del agua potable. Directrices de la OMS para la calidad del agua potable, establecidas en Génova, 1993, son el punto de referencia internacional para el establecimiento de estándares y seguridad del agua potable.
3. The Guidelines for Canadian Drinking Water Quality and the Guideline Technical Documents (formerly known as Guideline Supporting Documents) are developed by the Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water and have been published by Health Canada since 1968.

ANEXO II

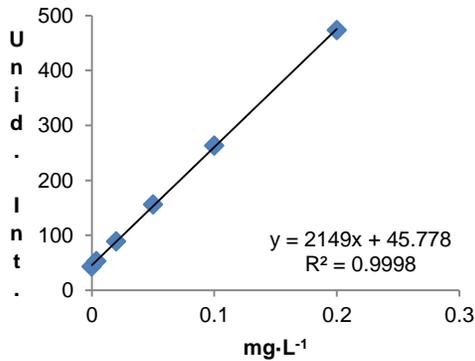
Curvas de calibración de los principales elementos realizados mediante espectroscopia de emisión por acoplamiento inductivo (ICP) en el análisis de agua de la presa y planta de tratamiento de Mata Guanajuato.



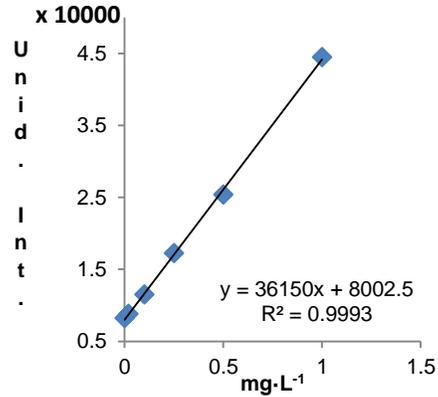
Curva de Calibración Be



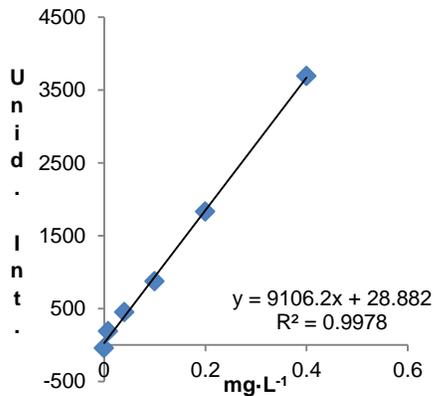
Curva de Calibración Cr



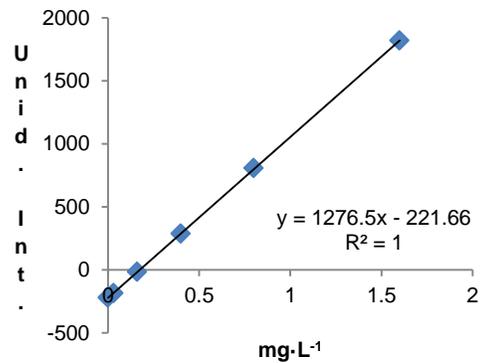
Curva de Calibración de Cd



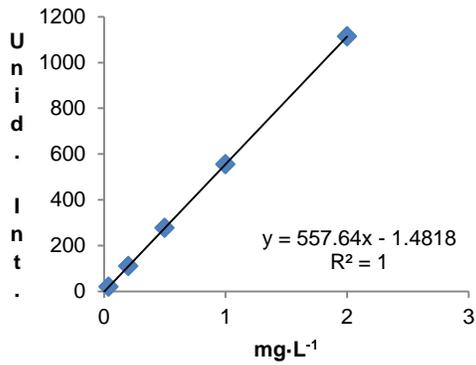
Curva de Calibración de Cu



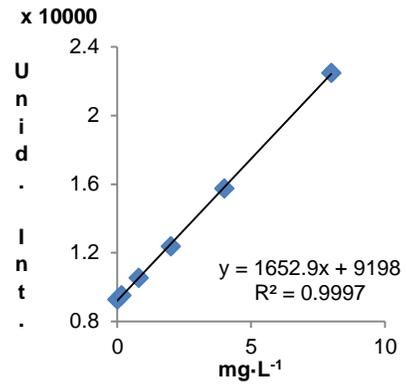
Curva de Calibración de Ag



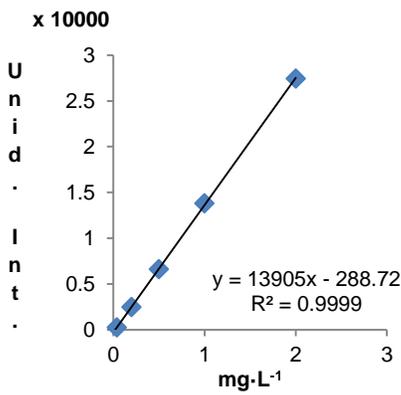
Curva de Calibración de Ni



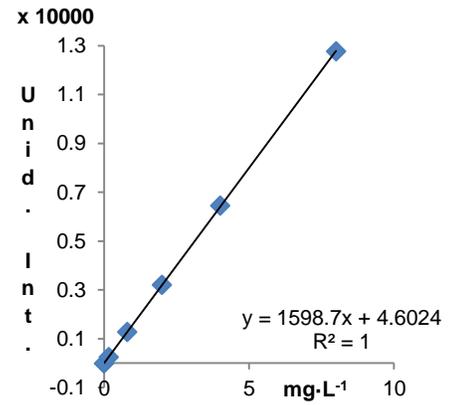
Curva de Calibración de Co



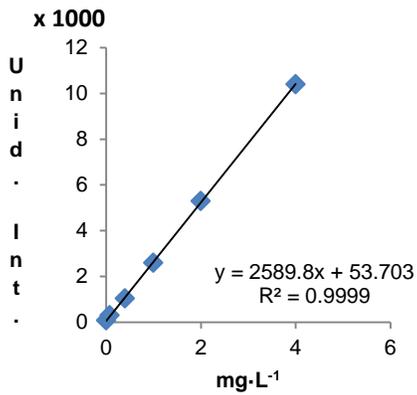
Curva de Calibración de Al



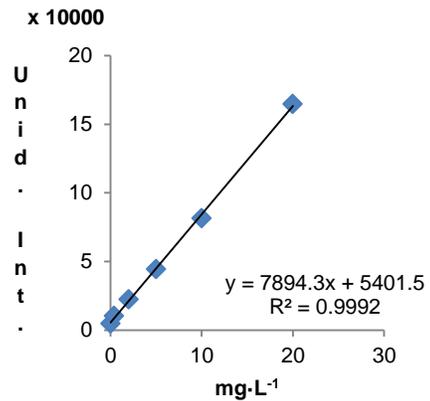
Curva de Calibración de V



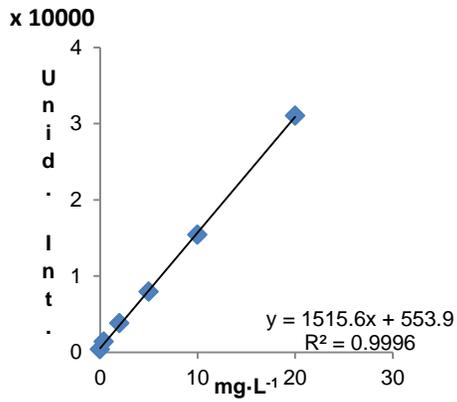
Curva de Calibración de Ba



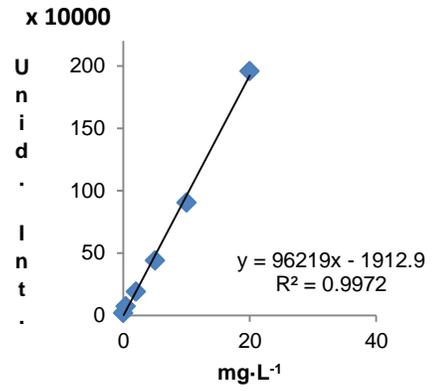
Curva de Calibración de Fe



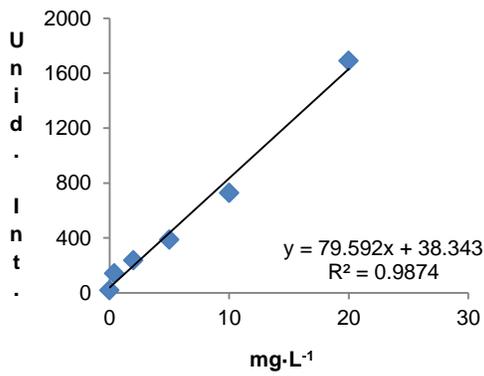
Curva de Calibración de Ca



Curva de Calibración de Mg



Curva de Calibración de K



Curva de Calibración de Na

ANEXO III

Guía de Valores Analíticos para ICP/AAS

Guide to ICP/AAS Analytical Values

| Element | Symbol | λ (nm) | | ICP | Flame AA | | Zeeman Furnace AA | | MSR | | | |
|--------------|--------|---------|---------|-----------------|---------------------|-----------------|-------------------|------------------|-------|------|----|----|
| | | AA | ICP | Detection Limit | Characteristic Conc | Detection Limit | Flame Type | Characteristic # | Conc* | Mass | % | EI |
| | | | | μg/L | μg/L | μg/L | | μg/L | pg | | | |
| Silver | Ag | 328.1 | 328.068 | 3 | 30 | 2 | Air | 0.035 | 0.7 | 97 | Ag | |
| Aluminium | Al | 309.3 | 167.081 | 1.5 | 800 | 30 | N ₂ O | 0.25 | 5 | 100 | Al | |
| Arsenic | As | 193.7 | 188.985 | 12 | 500 | 300 | N ₂ O | 0.5 | 10* | 86 | As | |
| Gold | Au | 242.8 | 267.595 | 5.5 | 100 | 10 | Air | 0.22 | 4.4 | 94 | Au | |
| Boron | B | 249.8 | 249.773 | 1.5 | 8000 | 500 | N ₂ O | 43 | 855* | 70 | B | |
| Barium | Ba | 553.6 | 455.403 | 0.07 | 200 | 20 | N ₂ O | 0.85 | 17 | 100 | Ba | |
| Beryllium | Be | 234.9 | 313.042 | 0.2 | 15 | 1 | N ₂ O | 0.025 | 0.5 | 64 | Be | |
| Bismuth | Bi | 223.1 | 223.061 | 12 | 200 | 50 | Air | 0.45 | 9 | 88 | Bi | |
| Bromine | Br | 163.34 | 6000 | | | | | | | | Br | |
| Carbon | C | | 247.856 | 65 | | | | | | | C | |
| Calcium | Ca | 422.7 | 393.366 | 0.03 | 10 | 1 | N ₂ O | 0.03 | 0.6 | 94 | Ca | |
| Cadmium | Cd | 228.8 | 228.802 | 1.5 | 10 | 2 | Air | 0.01 | 0.2* | 87 | Cd | |
| Cerium | Ce | 520 | 418.66 | 7.5 | 100000 | 100000 | N ₂ O | | | | Ce | |
| Chlorine | Cl | 725.665 | 200000 | | | | | | | | Cl | |
| Cobalt | Co | 240.7 | 228.616 | 5 | 50 | 5 | Air | 0.21 | 4.2 | 98 | Co | |
| Chromium | Cr | 357.9 | 267.716 | 4 | 50 | 6 | N ₂ O | 0.075 | 1.5 | 100 | Cr | |
| Cesium | Cs | 852.1 | 455.531 | 3200 | 20 | 4 | Air | 0.55 | 11 | 58 | Cs | |
| Copper | Cu | 324.7 | 324.754 | 2 | 30 | 3 | Air | 0.3 | 6 | 84 | Cu | |
| Dysprosium | Dy | 421.2 | 353.17 | 0.3 | 600 | 30 | N ₂ O | 2.3 | 45 | 100 | Dy | |
| Erbium | Er | 400.8 | 337.271 | 0.7 | 500 | 50 | N ₂ O | 5 | 100 | 100 | Er | |
| Europium | Eu | 459.4 | 381.967 | 0.3 | 300 | 1.5 | N ₂ O | 1.3 | 25 | 100 | Eu | |
| Iron | Fe | 248.3 | 259.94 | 1.5 | 50 | 6 | Air | 0.06 | 1.2 | 97 | Fe | |
| Gallium | Ga | 294.4 | 417.206 | 6.5 | 800 | 100 | Air | 0.23 | 4.5* | 80 | Ga | |
| Gadolinium | Gd | 368.4 | 342.247 | | 2.5 | 20000 | 2000 | N ₂ O | | | Gd | |
| Germanium | Ge | 265.1 | 265.118 | 13 | 1000 | 200 | N ₂ O | 0.45 | 9* | 100 | Ge | |
| Hafnium | Hf | 307.3 | 264.141 | 4 | 10000 | 2000 | N ₂ O | | | | Hf | |
| Mercury | Hg | 253.7 | 184.95 | 8.5 | 1500 | 200 | Air | 7.5 | 150* | 69 | Hg | |
| Holmium | Ho | 410.4 | 345.6 | 0.5 | 700 | 40 | N ₂ O | | | | Ho | |
| Iodine | I | 178.276 | 60 | | | | | | | | I | |
| Indium | In | 303.9 | 325.609 | 18 | 150 | 40 | Air | 0.35 | 7.0* | 100 | In | |
| Iridium | Ir | 208.9 | 224.268 | 3.5 | 800 | 500 | Air | 6.8 | 135 | 97 | Ir | |
| Potassium | K | 766.5 | 766.49 | 10 | 7 | 3 | Air | 0.02 | 0.4 | 90 | K | |
| Lanthanum | La | 550.1 | 379.478 | 0.02 | 40000 | 2000 | N ₂ O | | | | La | |
| Lithium | Li | 670.8 | 670.784 | 0.6 | 20 | 2 | Air | 0.2 | 4 | 49 | Li | |
| Lutetium | Lu | 336 | 261.542 | 0.05 | 7000 | 300 | N ₂ O | | | | Lu | |
| Magnesium | Mg | 285.2 | 279.553 | 0.1 | 3 | 0.3 | Air | 0.01 | 0.2 | 75 | Mg | |
| Manganese | Mn | 279.5 | 257.61 | 0.3 | 20 | 2 | Air | 0.03 | 0.6 | 92 | Mn | |
| Molybdenum | Mo | 313.3 | 202.03 | 4 | 300 | 20 | N ₂ O | 0.35 | 7 | 96 | Mo | |
| Nitrogen | N | 174.272 | 50 000 | | | | | | | | N | |
| Sodium | Na | 589 | 588.995 | 1 | 3 | 0.2 | Air | 0.005 | 0.1 | 92 | Na | |
| Niobium | Nb | 334.9 | 309.418 | 4 | 20000 | 2000 | N ₂ O | | | | Nb | |
| Neodymium | Nd | 492.5 | 401.225 | 2 | 6000 | 1000 | N ₂ O | | | | Nd | |
| Nickel | Ni | 232 | 231.604 | 5.5 | 70 | 10 | Air | 0.24 | 4.8 | 98 | Ni | |
| Osmium | Os | 290.9 | 225.585 | 5 | 1000 | 100 | N ₂ O | | | | Os | |
| Phosphorous | P | 213.6 | 177.499 | 18 | 120000 | 40000 | N ₂ O | 110 | 2200* | 69 | P | |
| Lead | Pb | 217 | 220.353 | 14 | 100 | 10 | Air | 0.28 | 5.5 | 92 | Pb | |
| Palladium | Pd | 244.8 | 340.458 | 7 | 50 | 10 | Air | 0.43 | 8.6 | 100 | Pd | |
| Praseodymium | Pr | 495.1 | 417.939 | 0.8 | 20000 | 10000 | N ₂ O | | | | Pr | |
| Platinum | Pt | 265.9 | 265.945 | 20 | 1000 | 100 | Air | 3.5 | 70 | 82 | Pt | |

Guide to ICP/AAS Analytical Values

| Element | | ICP | | Flame AA | | Zeeman Furnace AA | | | MSR | | EI |
|-----------|----|---------|---------|-----------|----------------|-------------------|------------------|------------------|------|-----|----|
| | | λ (nm) | | Detection | Characteristic | Detection | Flame | Characteristic # | Mass | % | |
| | | AA | ICP | Limit | Conc | Limit | Type | Conc* | pg | | |
| | | μg/L | μg/L | μg/L | | μg/L | | | | | |
| Rubidium | Rb | 780 | 780.023 | 35 | 50 | 10 | Air | 0.05 | 1 | 90 | Rb |
| Rhenium | Re | 346.1 | 227.525 | 11 | 8000 | 1000 | N ₂ O | | | - | Re |
| Rhodium | Rh | 343.5 | 343.489 | 5 | 100 | 5 | Air | 0.4 | 8 | 95 | Rh |
| Ruthenium | Ru | 349.9 | 267.876 | 5.5 | 400 | 100 | Air | 0.75 | 15 | 100 | Ru |
| Sulphur | S | 180.734 | 20 | | | | | | | - | S |
| Antimony | Sb | 217.6 | 217.581 | 18 | 300 | 40 | Air | 0.5 | 10 | 96 | Sb |
| Scandium | Sc | 391.2 | 361.384 | 0.4 | 300 | 50 | N ₂ O | | | - | Sc |
| Selenium | Se | 196 | 196.026 | 37 | 1000 | 500 | N ₂ O | 0.7 | 14* | 92 | Se |
| Silicon | Si | 251.6 | 251.611 | 5 | 1500 | 300 | N ₂ O | 0.75 | 15 | 100 | Si |
| Samarium | Sm | 429.7 | 442.434 | 7 | 6000 | 1000 | N ₂ O | | | - | Sm |
| Tin | Sn | 235.5 | 242.949 | 15 | 700 | 100 | N ₂ O | 0.5 | 10* | 93 | Sn |
| Strontium | Sr | 460.7 | 407.771 | 0.02 | 40 | 2 | N ₂ O | 0.1 | 2 | 94 | Sr |
| Tantalum | Ta | 271.5 | 268.517 | 9 | 10000 | 2000 | N ₂ O | | | - | Ta |
| Terbium | Tb | 432.7 | 350.917 | 5 | 7000 | 700 | N ₂ O | 0.18 | 3.5 | 90 | Tb |
| Tellurium | Te | 214.3 | 214.281 | 27 | 200 | 30 | Air | 0.45 | 9* | 93 | Te |
| Thorium | Th | 274.716 | 17 | | | | | | | - | Th |
| Titanium | Ti | 364.3 | 334.941 | 0.6 | 1000 | 100 | N ₂ O | 2.5 | 50 | 100 | Ti |
| Thallium | Tl | 276.8 | 351.924 | 16 | 200 | 20 | Air | 0.75 | 15 | 63 | Tl |
| Thulium | Tm | 371.8 | 346.22 | 1.5 | 300 | 20 | N ₂ O | | | - | Tm |
| Uranium | U | 358.5 | 385.958 | 18 | 100000 | 40000 | N ₂ O | | | - | U |
| Vanadium | V | 318.5 | 309.311 | 2 | 700 | 100 | N ₂ O | 1.1 | 22 | 79 | V |
| Tungsten | W | 255.1 | 239.709 | 17 | 5000 | 1000 | N ₂ O | | | - | W |
| Yttrium | Y | 410.2 | 371.03 | 0.2 | 2000 | 200 | N ₂ O | | | - | Y |
| Ytterbium | Yb | 398.8 | 328.937 | 0.3 | 60 | 4 | N ₂ O | 0.15 | 3 | 97 | Yb |
| Zinc | Zn | 213.9 | 213.856 | 0.9 | 8 | 1 | Air | 0.0075 | 0.15 | 92 | Zn |
| Zirconium | Zr | 360.1 | 339.198 | 1.5 | 9000 | 1000 | N ₂ O | | | - | Zr |

NOTES:

* Modifier used to obtain these results.

+ 20 mL injection

The Characteristic Masses listed were determined in aqueous solution using maximum heating rate in argon with zero gas flow during atomization.

For Deuterium Furnace systems, the equivalent Characteristic Concentration and Characteristic Mass is easily calculated using the following conversion:

$$CM_n = CM_z \times MSR (\%)/100$$

$$CC_n = CC_z \times MSR (\%)/100$$

Where:

CM_n = Characteristic Mass for Deuterium Furnace Systems

CM_z = Characteristic Mass for Zeeman Furnace Systems (from Table above)

MSR = Magnetic Sensitivity Ratio (as % from Table above)

CC_n = Characteristic Concentration for Deuterium Furnace Systems

CC_z = Characteristic Concentration for Zeeman Furnace Systems (from Table above).