



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

ESTIMACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR RESIDUOS MINEROS EN LA MICROCUENCA DE ZIMAPÁN, HIDALGO

JESÚS DANIEL TORRES BAUTISTA

T E S I S

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

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2015

La presente tesis titulada **Estimación de la contaminación del agua por residuos mineros en la microcuenca de Zimapán, Hidalgo**, realizada por el alumno **Jesús Daniel Torres Bautista**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DRA. ANTONIA MACEDO CRUZ

ASESOR



DR. ISÍDRO VILLEGAS ROMERO

ASESOR



DR. ROGELIO CARRILLO GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, estado de México, Noviembre 2015.

RESUMEN

La actividad minera genera grandes volúmenes de residuos que se depositan sin tratamiento en espacios abiertos. En general se asume que estos constituyen un riesgo potencial, pero no se ha documentado extensivamente tal riesgo ni de las afectaciones que estos sitios están causando a los recursos naturales, al liberar compuestos y elementos contaminantes entre los que están los metales pesados como el Pb, Cd, Zn y Cu. Las concentraciones de estos elementos en los cauces y en los sedimentos que conforman los escurrimientos superficiales pueden permitir determinar el proceso de dispersión. Hasta ahora la información sobre estudios de concentración de metales pesados en fuentes de agua en México es escasa. El objetivo del presente estudio fue estimar la contaminación del agua por metales pesados transportados por escurrimientos superficiales provenientes de los depósitos de residuos y el escurrimiento en el cauce principal del tramo inmediato aguas abajo del núcleo de población, para determinar el alcance longitudinal de la contaminación. Para lograrlo se analizaron muestras de agua obtenidas en 6 sitios de muestreo a lo largo del cauce principal de la microcuenca Zimapán, ubicada en el estado de Hidalgo. Los depósitos de residuos son fuente directa de contaminación con Pb, Cd y Mn hacia los cauces, pero liberan bajas concentraciones de Cu, Fe y Zn. Estos elementos generan una pluma de contaminación mayor a 1.5 km aguas abajo del último sitio de muestreo; la correlación de Pearson y entre las concentraciones de Pb, Mn y Cd en el cauce a través del tiempo, se deduce una relación directamente proporcional al gasto superficial presente en el flujo.

Palabras clave: distribución espacial, límites máximos permisibles, metales pesados, pluma de contaminación, residuos de mina.

ABSTRACT

Currently in Mexico huge volume of waste are produced from mining activity, which are deposited in open land without treatment. Scarc knowledge about dispersion rate is available. The effect of release of Pb, Cd, Zn and Cu from tailing mine on natural resources has been poorly documented. The concentrations of heavy metals in river water and sediments could help to understand the dispersion rate from tailing deposits. The objective of this study was to assess the water pollution of heavy metals transported by surface runoff that come from the tailings deposits to the main channel of the immediately downstream section; to evaluate the longitudinal extent of contamination. Water samples were collected from 6 sampling sites along the mainstream of the Zimapán watershed, located in the State Hidalgo. The results showed that the waste deposits are a direct source of contamination with Pb, Cd and Mn for surface water of streams, these elements may disperse up to 1.5 km downstream from the last place; based on the Pearson correlation analysis and behavior of the concentrations over time in the channels analyzed it is was concluded that the concentration levels of Pb, Mn and Cd are directly related to the surface flow.

Keyword: spatial distribution, maximum permissible limits, heavy metals, contaminant plume, mine waste dump.

“Este logro está dedicado a todas aquellas personas que han estado conmigo acompañándome en cada momento: a mis padres, a mi hermano, a todos mis amigos y en especial a mi amada Blanca, que ha sido mi amiga, mi compañera y la gran mujer que siempre soñé.

A la Dra. Antonia Macedo Cruz, al Dr. Isidro Villegas Romero, al Dr. Rogelio Carrillo González, a la Dra. María del Carmen A. González Chávez, y a Laura Janeth Rodríguez González por su paciencia, por su valioso apoyo y por sus conocimientos brindados para la realización de la presente tesis, así como todos aquellos integrantes del área de Hidrociencias y Edafología, que me apoyaron en esta investigación”

AGRADECIMIENTOS

- ❖ Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado al proyecto de investigación denominado “Atlas de riesgo y vulnerabilidad por la dispersión de metales pesados por viento y lixiviados de residuos de mina” con clave: PDCPN1023-01-215241. Ya que el este trabajo de investigación forma parte de dicho proyecto, y por la beca otorgada como estudiante de maestría en el Colegio de Postgraduados.
- ❖ A la SAGARPA, en particular al SIAP quien tiene a su cargo la gestión de las imágenes satelitales del territorio nacional con el sistema ERMEX-NG, y al DR. Jesús Moncada de la Fuente, director del Colegio de Postgraduados que a través de la gestión del colegio de Postgraduados nos apoya con esta valiosa información, por las imágenes spot proporcionadas para dicho proyecto.
- ❖ Al Colegio de postgraduados, por el apoyo económico proporcionado para investigación, que fue de mucha utilidad sobre todo durante los primeros meses de muestreo, cuando el CONACYT aún no liberaba los recursos económicos del proyecto

TABLA DE CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	4
4. OBJETIVOS.....	7
4.1. Objetivo general.....	7
4.2. Objetivos específicos.....	7
5. HIPÓTESIS.....	8
6. MARCO TEÓRICO.....	9
6.1. Aspectos generales.....	9
6.2. Importancia económica de los yacimientos mineros.....	15
6.2.1. La producción minera actual.....	16
6.3. Minería y ambiente.....	17
6.4. Fases de laboreo minero y contaminación.....	18
6.4.1. Geografía de la contaminación minera en México.....	19
6.4.1.1. Breve descripción de la Minería en Zimapán, Hidalgo.....	20
6.4.1. Clasificación de los sitios contaminados.....	20
6.4.1.1. Residuos de minas.....	22
6.4.2. Medidas de control ambiental y rehabilitación	24
6.4.3. Acciones anticontaminantes de la minería en México.....	25
6.5. La cuenca hidrográfica.....	26

6.5.1. La cuenca como sistema hidrológico.....	27
6.5.2. Escurrimiento superficial.....	28
6.5.2.1. Aforo de escurrimientos.....	30
6.6. La cuenca y su relación con la hidrogeoquímica.....	32
6.6.1. Metales pesados.....	33
6.6.1.1. Metales pesados en suelo y sedimentos.....	36
6.6.1.2. Metales pesados en cuerpos de agua.....	39
6.6.1.3. Importancia del análisis de los metales pesados.....	41
6.6.2. Principales metales pesados en la zona de estudio.....	43
6.6.2.1. Cobre (Cu).....	43
6.6.2.2. Plomo (Pb).....	45
6.6.2.3. Hierro (Fe).....	46
6.6.2.4. Manganeso (Mn).....	47
6.6.2.5. Zinc (Zn).....	49
6.6.2.6. Cadmio (Cd).....	51
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
7.1. Materiales utilizados.....	54
7.1.1. Material cartográfico y de cómputo.....	54
7.1.2. Equipo de medición.....	54
7.1.3. Material de análisis químico del agua.....	55
7.2. Descripción fisiográfica de la microcuenca Zimapán Hidalgo.....	55
7.2.1. Ubicación y delimitación geográfica.....	56

7.2.2. Descripción del relieve.....	56
7.2.3. Clima.....	57
7.2.4. Geología.....	58
7.2.5. Uso de suelo.....	58
7.2.6. Suelos.....	59
7.2.7. Tipo de vegetación.....	60
7.2.8. Descripción de la microcuenca hidrográfica.....	62
7.2.8.1. Elementos morfométricos de la microcuenca.....	63
7.3. Metodología.....	66
7.3.1. Reconocimiento de la microcuenca.....	66
7.3.2. Diseño del muestreo de agua.....	68
7.3.3. Aforo de la corriente.....	70
7.3.4. Toma y manejo de muestras de agua.....	75
7.3.5. Número de muestras de agua analizadas.....	76
7.3.6. Análisis de muestras de agua en laboratorio.....	78
7.3.7. Cálculo de la concentración de metales pesados.....	79
8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	80
8.1. Resultados de laboratorio y aforo de la corriente.....	80
8.1.1. Resultados del aforo de la corriente.....	80
8.2. Resultados de laboratorio por sitio de muestreo.....	82
8.3. Determinación de la pluma de concentración en el tramo de cauce.....	83

8.4. Influencia de los depósitos de residuos de minas en los niveles de concentración de los metales pesados.....	90
8.5. Valoración de la calidad del agua con base a la normatividad ambiental vigente.	93
8.5.1. Valoración del cobre.....	97
8.5.2. Valoración del plomo.....	98
8.5.3. Valoración del hierro.....	98
8.5.4. Valoración del manganeso.....	99
8.5.5. Valoración del zinc.....	100
8.5.6. Valoración del cadmio.....	100
8.5.7. Análisis global de la calidad del agua.....	101
8.6. Análisis de la relación: concentración – escurrimiento.....	102
9. CONCLUSIONES.....	114
10. RECOMENDACIONES.....	116
11. BIBLIOGRAFÍA.....	117
12. ANEXOS.....	128

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Principales orígenes antropogénicos de los metales pesados.....	39
Cuadro 2: Características físicas de los suelos existentes en la Cuenca Zimapán.....	60
Cuadro 3. Uso de suelo en la microcuenca Zimapán.....	61
Cuadro 4: Morfometría de la cuenca Zimapán determinada con ArcGis 10.1.....	64
Cuadro 5: Longitudes de las corrientes de la cuenca Zimapán.....	65
Cuadro 6: Sitios de Muestreo en la zona de estudio.....	67
Cuadro 7. Periodo de muestreo.....	70
Cuadro 8. Estaciones y fechas de aforos en el distrito minero de Zimapán Hidalgo....	71
Cuadro 9: Distribución espacial y temporal de las muestras tomadas durante la campaña 2014, en el cauce principal del río Zimapán.....	77
Cuadro 10. Gasto hidráulico en los sitios de muestreo.....	80
Cuadro 11: Promedios de las concentraciones de metales pesados por cada sitio de muestreo determinadas con SAS.....	83
Cuadro 12. Límites máximos permisibles para los contaminantes.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista general de un depósito de residuos de minas y acumulación de los lixiviados en la base, antes de incorporarse al cauce de la microcuenca de Zimapán, Hidalgo.	4
Figura 2: Jale restaurado San Antonio 1 en Zimapán, Hidalgo.....	14
Figura 3: Jale restaurado San Antonio 2 en Zimapán, Hidalgo.	14
Figura 4: Riolita utilizada para la remediación del jal San Antonio 2, en Zimapán, Hidalgo.....	15
Figura 5: Mina La Purísima en actual funcionamiento, la cual continua acumulando residuos mineros en Zimapán, Hidalgo.	20
Figura 6 y 7: Línea de conducción de los residuos mineros a las presas de almacenamiento (residuos mineros) en Zimapán, Hidalgo.....	22
Figura 8 y 9: Residuos de minas San Miguel y Pal en Zimapán, Hidalgo.....	24
Figura 10. Letrero encontrado en unas casas de Zimapán, Hidalgo.....	26
Figura 11: Representación esquemática del ciclo del escurrimiento. De Wiest, 1967..	28
Figura 12: Curvas de nivel en la cuenca en estudio.....	57
Figura 13: Tipo de suelo en Cuenca Zimapán.....	59
Figura 14: Uso de suelo en Cuenca Zimapán.....	61
Figura 15: Delimitación geográfica de la cuenca de estudio.....	62
Figura 16: Red hidrográfica de la cuenca en estudio.....	65
Figura 17: Diagrama de flujo del muestreo.....	66
Figura 18: Distribución espacial de los sitios de muestreo.....	68
Figura 19. Identificación de los sitios de muestreo.....	69
Figura 20: división del cauce en secciones para la aplicación del método de la semisección.....	73
Figura 21. Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer.....	78
Figura 22. Diagrama de flujo general para la determinación de metales pesados por Espectrometría de absorción atómica.....	79
Figura 23. Salto hidráulico Jale Los Gómez.....	82
Figura 24: Distribución espacial del Cobre en los distintos sitios de muestreo.....	84

Figura 25: Distribución espacial del Plomo en los distintos sitios de muestreo.....	85
Figura 26: Distribución espacial del Hierro en los distintos sitios de muestreo.....	85
Figura 27: Distribución espacial del Manganeso en los distintos sitios de muestreo..	86
Figura 28: Distribución espacial del Zinc en los distintos sitios de muestreo.....	87
Figura 29: Distribución espacial del Cadmio en los distintos sitios de muestreo.....	88
Figura 30: Comportamiento del Cu en los sitios de muestreo.....	97
Figura 31: Comportamiento del Pb en los sitios de muestreo.....	98
Figura 32: Comportamiento del Fe en los sitios de muestreo.....	99
Figura 33: Comportamiento del Mn en los sitios de muestreo.....	99
Figura 34: Comportamiento del Zn en los sitios de muestreo.....	100
Figura 35: Comportamiento del Cd en los sitios de muestreo.....	101
Figura 36: Plomo-Escurrimiento en el Puente Santiago.....	104
Figura 37: Manganeso-Escurrimiento en el Puente Santiago.....	104
Figura 38: Cadmio-Escurrimiento en el Puente Santiago.....	105
Figura 39: Plomo-Escurrimiento en el Jale Preisser.....	106
Figura 40: Manganeso-Escurrimiento en el Jale Preisser.....	106
Figura 41: Cadmio-Escurrimiento en el Jale Preisser.....	107
Figura 42: Plomo-Escurrimiento en el Jale Pal.....	107
Figura 43: Manganeso-Escurrimiento en el Jale Pal.....	108
Figura 44: Cadmio-Escurrimiento en el Jale Pal.....	108
Figura 45: Plomo-Escurrimiento en el Jale Los Gómez.....	109
Figura 46: Manganeso-Escurrimiento en el Jale Los Gómez.....	110
Figura 47. Cadmio-Escurrimiento en el Jale Los Gómez.....	110
Figura 48. Plomo-Escurrimiento en el Punto de Salida 1.....	111
Figura 49. Manganeso-Escurrimiento en el Punto de Salida 1.....	112
Figura 50. Cadmio-Escurrimiento en el Punto de Salida 1.....	112
Figura 51 y 52: Producción agrícola y pecuaria en Zimapán, Hidalgo.....	115

1. INTRODUCCIÓN

Los avances de la industria minera en México han consolidado a este país como líder mundial en la producción de metales preciosos, como es el caso la plata (mayor productor a nivel mundial) y del oro (noveno productor a nivel mundial) (SGM, 2013). Esta dinámica del sector está generando avances favorables en la economía regional de los 24 estados de nuestro país en los que se desarrolla la minería, entre los cuales se encuentra Hidalgo (INEGI, 2000), en particular el municipio de Zimapán que fue fundado por los recursos minerales de la región (Trejo, 2007).

Debido al crecimiento de la minería también se ha derivado en aumento de los volúmenes de residuos producidos, estos materiales llamados jales mineros son depositados a la intemperie. En la práctica se les ha dado un manejo inapropiado, teniendo con ello poco conocimiento de las afectaciones que estos sitios están causando a los recursos naturales, al liberar cantidades excesivas de compuestos y elementos contaminantes como los metales pesados, entre los cuales está el Pb, Cd, Zn, Cu, Mn, y Fe.

Gran parte de la contaminación proveniente de los residuos mineros se atribuye a la dispersión de metales pesados de las presas de residuos. Los metales pesados son elementos químicos que llaman la atención por las repercusiones que pueden tener en el ambiente. Las concentraciones de metales en los cauces de agua y en los sedimentos que conforman los escurrimientos superficiales de las regiones mineras pueden permitir el diagnóstico de toxicidad potencial de los mismos, y del riesgo de su ingreso en la cadena trófica; lo anterior se asocia a la posibilidad que tienen algunos de estos elementos de avanzar en la superficie de los cauces (Ramos *et al.*, 2002).

El manejo inadecuado de residuos mineros y la ausencia de su confinamiento causan severos problemas ambientales, entre los cuales se pueden mencionar la generación de drenaje ácido de minas acompañado de la liberación de metales pesados. La falla de estructuras de retención (diques) de los depósitos que contienen a los residuos de minas, ocasionan por su naturaleza (tamaño de partículas, viscosidad y contenido de agua) derrames que cubren las partes más bajas de las cuencas hidrográficas. Estos

residuos se pueden transportar y depositar finalmente en los cauces y cuerpos de agua (Kelly, 1990).

En los últimos años estos efectos en el ambiente han causado preocupación por ser un factor de riesgo para la biota y la salud humana a corto, mediano y largo plazo; por lo cual se han comenzado a generar proyectos de mapeo y caracterización, rehabilitación y descontaminación de suelos contaminados y fuentes de contaminación.

La presente investigación tiene como propósito general diagnosticar el grado de contaminación del agua por metales pesados transportados por los lixiviados provenientes de los depósitos de residuos de minas; con el fin de identificar los riesgos a los que están expuestos los recursos naturales de Zimapán, Hidalgo.

Como objetivos específicos se determinó los aportes de metales al agua del río a través de escurrimientos superficiales provenientes del distrito minero ubicado en la microcuenca de Zimapán; la cual es aprovechada para distintos usos, entre los que destacan: uso doméstico, agrícola, pecuario y recreativo.

El resultado general obtenido fue la estimación del grado de contaminación del agua por metales pesados transportados por el escurrimiento superficial en el tramo del cauce principal aguas abajo del núcleo de población de Zimapán, Hidalgo. También, se determinó el alcance longitudinal y el nivel de contaminación de acuerdo a los niveles establecidos en las normas ambientales mexicanas.

Esta información puede ayudar a diseñar medidas de mitigación del impacto derivado de esta problemática y pueden servir para prevenir daños futuros a los núcleos de población, y al ambiente. A continuación se describen los antecedentes, planteamiento del problema y justificación, objetivos e hipótesis que guiaron esta investigación.

2. ANTECEDENTES

A partir de los años 90's varias instituciones gubernamentales como: SEMARNAT, CONAGUA, y CONACYT han llevado a cabo estudios e investigaciones relacionados con la ubicación y descripción de sitios contaminados por depósitos de residuos mineros (Volke, 2003).

En este sentido la SEMARTNAT (2013) reporta el desarrollo del proyecto de remediación del sitio jales mineros de Nacozari, Sonora; donde se estima la presencia de 40 millones de toneladas de residuos de mina, que contaminaban terrenos con arsénico, bario, cadmio, cromo, níquel, plata, plomo, entre otros.

Investigación anteriores como “Evaluación de la dispersión y movilidad de elementos potencialmente tóxicos (arsénico, plomo y cadmio) en suelos de Zimapán, Hgo.” y “Evaluación geoquímico ambiental de residuos (jales) de mineralizaciones poliméricas del estado de Hidalgo, México” realizadas por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, llevadas a cabo ambas en el año 2005, además de otras investigaciones que se han enfocado al estudio de las concentraciones de metales pesados acumulados en las presas de los residuos de mina; sus resultados coinciden en señalar que las concentraciones de un punto de muestra a otro varían en su composición; los elementos mayormente encontrados fueron arsénico, plomo, cadmio y zinc.

A diferencia de los estudios mencionados la presente investigación tuvo como propósito general, cuantificar los metales pesados en el agua del cauce principal de la microcuenca de Zimapán y determinar su relación con las fuentes de contaminación por residuos mineros más cercanos a la red de corrientes.

3.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La contaminación de las cuencas hidrográficas por metales pesados provenientes de residuos de minas, es un problema ambiental con raíces históricas, por lo tanto presente desde hace varios siglos y actualmente en incremento.

Desde el inicio de la actividad minera en México se ha dado un mal manejo de los residuos provenientes de las zonas de explotación minera, como es su abandono y colocación cerca de corrientes y cuerpos de agua que favorecen la dispersión de partículas contaminadas por el viento, escurrimiento superficial y la remoción en masa de los mismos depósitos, formando lixiviados que incrementan la concentración de metales pesados en el flujo de agua, acuífero y suelos (Figura 1).



Figura 1: Vista general de un depósito de residuos mineros y acumulación de los lixiviados en la base, antes de incorporarse al cauce de la microcuenca de Zimapán, Hidalgo. Fuente propia, tomada el 18 de septiembre del 2014.

La industria minera de Zimapán, Hidalgo, ha sido fuente de interés de instituciones científicas, por el impacto ambiental que se genera (Romero *et al.*, 2008), las cuales han enfocado sus investigaciones en el análisis directo de los depósitos de residuos mineros, los cuales han sido estudiados desde el punto de vista biológico, químico e hidráulico (Moreno *et al.*, 2012), sin analizar los aspectos relacionados con la

distribución espacial y biodisponibilidad de los elementos denominados metales pesados en los escurrimientos superficiales y aguas subterráneas.

La acumulación y dispersión de metales pesados en el agua y su translocación a las plantas y animales en concentraciones que pueden ser tóxicas, es un factor de riesgo para la salud humana en la región (Prieto *et al.*, 2009), situación que debe ser atendida de manera inmediata por las autoridades correspondientes.

El desarrollo urbano de la mayoría de núcleos de población del municipio de Zimapán Hidalgo se ha llevado a cabo en las cercanías de los sitios de aprovechamiento minero y de los depósitos de residuos de minas, los cuales contienen una elevada concentración de metales pesados, lo que causa que los habitantes mantengan constante interacción con las fuentes de contaminación que representan un importante riesgo para la salud (Duarte, 2013).

Los depósitos residuales mineros en Zimapán, generan dispersión de partículas finas y lixiviación de residuos que llegan directamente a los escurrimientos superficiales principales, pero no se han cuantificado y no se conocen las concentraciones puntuales de los metales pesados, que se están aportando a los cauces de agua, tampoco su alcance longitudinal y comportamiento químico, situación que no solo puede estar afectando a la población que vive directamente en el municipio sino también a las comunidades aledañas que utilizan los cauces de agua para sus diferentes actividades.

Las nueve compañías mineras que ya no se encuentran en funcionamiento pero que han dejado residuos abandonados que contribuyen con la contaminación de esta microcuenca a través de sus depósitos mineros son: Compañía Fresnillo S.A. de C.V., Industria Zimapán S.A. de C.V., Compañía Minera Peñoles, Minera de San Miguel S.A., Compañía Minera el Carrizal S. de R.L. de C.V., Minerale Industriales S.A. de C.V. (compañía cerrada temporalmente), Minerale Aislantes S.A., Compañía Minera del Espíritu, Beneficiadora de Zimapán (SGM, 2014).

Actualmente se depositan residuos en el Distrito minero Zimapán de dos compañías mineras en operación las cuales desechan sus residuos cerca de las áreas de procesamiento. Los depósitos presentes en el área son los denominados: Residuos de

minas Los Gómez, San Miguel, Santa María, Preisser, Pal, y San Antonio; que se ubican a corta distancia de los cauces principales y cuerpos de agua de la microcuenca, contribuyendo a la contaminación de estos de diversas formas (Froese y Ongley, 2000). En el pasado hubo otros depósitos de residuos pero estos fueron dispersados mecánicamente para emparejar terrenos o caminos y sobre ellos se construyó.

La población que se ve afectada por la contaminación del cauce principal de la microcuenca de Zimapán Hgo. se estima en 37,435 habitantes (INEGI, 2000) cuyas actividades productivas afectadas son las siguientes: la agricultura de temporal y de riego; la producción pecuaria y el turismo en general; aspectos que no se evalúan en esta investigación.

En relación con la agricultura, se puede presentar un incremento en la concentración de metales pesados en el agua de riego, lo que causaría la contaminación de los suelos irrigados y su absorción por las plantas. Estos elementos además de ser tóxicos, son acumulables por los organismos que los absorben, los cuales a su vez son fuente de alimentación de otros en la red trófica y son transferidos a cada uno de sus eslabones. Las formas iónicas al ser ingeridas con frecuencia por el hombre a través del agua y los alimentos, causan diversas enfermedades que podrían llegar a causar la muerte (Marrugo y Paternina, 2011), en función de la concentración absorbida o acumulada (Mencías y Mayero, 2000). La evaluación del riesgo de exposición a esos elementos constituye la razón fundamental para su estudio, sin mencionar las posibles implicaciones que su dispersión puede tener en el riesgo ecológico.

El interés de estudiar el comportamiento de los metales pesados como el Cd, Cu, Mn, Pb, y Zn en el escurrimiento superficial, radica en su alto potencial de toxicidad para la fauna y flora así como para el mismo desarrollo del hombre.

4.- OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Evaluar el grado de contaminación del agua por metales pesados transportados por los lixiviados provenientes de los depósitos de residuos de minas en el tramo inmediato aguas abajo del núcleo de población de Zimapán, Hidalgo, su alcance longitudinal en función de la normatividad ambiental del país.

4.2. Específicos

1. Describir la variación en la concentración de Cu, Fe, Zn, Pb, Cd y Mn en el cauce principal de la microcuenca para determinar su alcance longitudinal y su relación con el gasto hidráulico.
2. Determinar la influencia de los depósitos de desechos mineros en las concentraciones de Cu, Fe, Zn, Pb, Cd y Mn cuantificados en la corriente de agua del cauce principal del tramo de cauce muestreado.
3. Evaluar la calidad del agua con base en la normatividad ambiental vigente y los metales analizados.

5. HIPÓTESIS

H1.- La fuente directa de contaminación del agua en el escurrimiento principal de la microcuenca de Zimapán Hidalgo, proviene de los depósitos de desechos de mina localizados en las cercanías del cauce principal.

H2.- La concentración de metales pesados en el cauce principal de la microcuenca de Zimapán, Hidalgo, supera los límites máximos permisibles nacionales.

H3.- La concentración de los metales pesados en las aguas del cauce disminuye conforme el sitio de muestreo se aleja de la zona de depósito de los residuos.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Aspectos generales

La minería no es una actividad productiva reciente en nuestro país, esta ha tenido presencia en toda la historia del territorio nacional. Se ha practicado desde el México prehispánico (Ortega, 1997) en la época de la colonia, en el periodo independiente ha sido una industria que ha aportado ingresos a través de la explotación de los recursos minerales. Ahora en la globalización ha sido una de las principales vías de atracción de inversionistas para la explotación industrial de los minerales a una velocidad mucho mayor de lo que ha ocurrido en las etapas anteriores. En cada faceta ha tenido sus etapas de protagonismo, repercusiones, auges y decadencias, así como su época rudimentaria y de evolución (SGM, 2014).

Al día de hoy, la minería se ha convertido en un trabajo de alta especialización, sumamente mecanizado y computarizado, por lo que solo pueden competir en la explotación las grandes empresas con capacidad para realizar enormes inversiones en exploración y extracción, excluyendo a los mineros a pequeña escala de la competencia por las concesiones. Respecto a los minerales no ferrosos es una actividad meramente extractiva, que concentra los minerales para enviarlo a fundir a otros lugares (países), prácticamente sin control del Estado. En contraste con la realidad se dice que es una industria integrada verticalmente y se habla indistintamente de los minerales extraídos como de los productos beneficiados a partir de ellos: es decir que la minería y la industria minero-metalúrgica conforman un todo coherente (Coll-Hurtado, *et al.* 2002).

La concentración financiera generada por la minería conlleva a la concentración demográfica dentro del área de influencia de las zonas aprovechadas para los estados de Hidalgo, México, San Luis Potosí, Zacatecas, Durango, Coahuila, Sonora y Chihuahua (Romero, 2001), en donde se concentra la producción de oro, plata, carbón, zinc, plomo y cobre, así como de minerales no metálicos de importancia como la barita y la celestita (Canudas, 2005).

Por otra parte, las actividades extractivas hacen uso del suelo y del subsuelo en forma temporal pero intensa, causando importantes alteraciones al ambiente tanto por la

modificación del relieve como por el uso actual y potencial del suelo. En el caso de las obras en los tajos a cielo abierto es evidente este efecto. La contaminación directa de aguas, suelo y aire durante la extracción; y en el caso de las plantas de beneficio y fundición durante el proceso hay alguna variación en el impacto causado pero en todos los casos la deuda ambiental crece, las medidas de mitigación son prácticamente ausentes; después de concluida la fase de aprovechamiento, las áreas mineras quedan abandonadas y muy rara vez se realizan trabajos de rehabilitación de los terrenos minados o de limpieza de tierras contaminadas (Castells, 2012).

En el siglo pasado, los desechos de la minería en México fueron manejados al menor costo, desalojándolos indiscriminadamente sin restricciones legales para su manejo y acumulación, lo que ocasionó la contaminación de los suelos y mantos acuíferos en diversas zonas geográficas del país, provocando también bioacumulación y magnificación de estos desechos desde el nacimiento de la explotación minera (Coll-Hurtado, *et al.* 2002).

Los residuos de manera tradicional son retenidos en montículos de depósitos inestables y expuestos a la intemperización, creando drenajes ácidos de roca acompañados de lixiviados con metales pesados y otros elementos; y debido a la inexistencia de estructuras de retención de los depósitos de residuos de minas, se generan movimientos de material en forma de deslaves que se dispersan a las partes más bajas de las cuencas, como son los valles y llanuras. Estos materiales pueden llegar finalmente a las corrientes de agua de los cauces principales resultando una fuerte contaminación de la vegetación, suelos y agua circundantes (Kelly, 1990).

Actualmente se tiene poca información sobre el alcance (pluma de contaminación y daños al entorno) de este problema. La explotación minera genera residuos en forma de sulfuros sin valor económico, estos materiales son principalmente roca molida con minerales de baja ley y por lo tanto bajovalor como la piritita (FeS_2), pirrotita (FeS) y arsenopiritita (FeAsS); minerales de ganga como silicatos, carbonatos, etc., además se producen bajas cantidades de sulfuros con algún valor económico como PbS , ZnS , CdS , FeCuS_2 , que no son recuperados por las plantas concentradoras. Estos residuos constituyen en este tipo de menas hasta 85% del material procesado, por lo que la

cantidad de mineral que se envía al depósito de residuos es de miles de toneladas al año (Reyes, 2011). El nombre coloquial de estos residuos es el de jales, relaves o colas de minería y al sitio donde se depositan se le suele llamar presa de jales.

Uno de los problemas principales que causa la contaminación minera es el impacto a la cadena alimenticia a través de la ingesta de agua o productos a los cuales ingresan los contaminantes regularmente en forma de metales pesados (Aloway, 2013).

Los metales pesados son aquellos elementos cuya densidad es por lo menos 5 veces mayor a la densidad del agua , entre los principales se encuentra el cadmio, cromo, mercurio, plomo, arsénico, bario, níquel, cobre, hierro, manganeso, cobalto, estaño y zinc (Adriano,2000).

La contaminación del agua por metales pesados se refiere a la presencia en el cuerpo de agua de uno o más elementos contaminantes o cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio, que al incorporarse o actuar en el recurso hídrico altera su composición o condición natural (Reeve, 1994), modificando la capacidad de los recursos para los servicios ambientales y reduciendo su valor económico o su capacidad productiva.

Las fuentes de contaminantes se incrementan, ya que los metales son usados en diferentes líneas productivas o procesos. En el caso de la industria minera se usan materiales tóxicos para la extracción de metales preciosos; tal es el caso del “azogue”, método de la industria minera en el cual el mercurio se mezcla con los minerales triturados, después se recupera trayendo con síglo el metal económicamente buscado; una parte del mercurio se recupera pero no al 100% y el residuo se desecha con otros metales pesados y van a formar parte de los residuos de mina (González-Chávez, *et. al.* 2005). Algo similar sucede con otros métodos de extracción como la fundición, amalgamación (método de patio), cianuración (Salinas et al., 2004), flotación y lixiviación donde se hacen uso de metales pesados para la extracción (Navarro, 1999).

En los depósitos de residuos de minas, estos metales son liberados al ambiente de diferentes maneras. Esto causa la contaminación del suelo y las cuencas hídricas por medio del esparcimiento de partículas finas al aire, que al ser liberadas se incorporan

rápidamente hacia los ambientes acuáticos y de ahí al suelo, o bien, de la atmósfera se depositan directamente al suelo donde el tiempo de permanencia puede ser de años; lo anterior también se da debido a escurrimiento e infiltración de lixiviados causados de manera natural o gracias a la precipitación (Vázquez, 1999).

La industria minera en México es uno de los giros económicos más importantes y que aportan un gran crecimiento económico, debido a su fuerte avance tecnológico industrial, lo que incrementa la capacidad de extracción de minerales a mayor profundidad y en grandes volúmenes; sin embargo, se ha profundizado poco en reducir el impacto ambiental que tienen sus procesos de extracción y sobre todo de almacenamiento de los residuos; y no fue hasta hace algunos años que se comenzó con la investigación y avance en este campo.

La legislación en materia ambiental y la actividad minera está hecha a la medida de la conveniencia de los industriales. El marco jurídico ambiental en México inicio su desarrollo a finales de los años 80s y 90s con el fin de atender la problemática ambiental de suelos y ríos contaminados, creando entidades federales e interviniendo otras que ya existían para la solución al problema ambiental. Entre estas instancias se encuentran:

- Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.
- Comisión Nacional del Agua.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO):

Se crearon leyes, reglamentos y normatividades que sientan las bases del marco legal que permite darle seguimiento a la problemática ambiental en México pero al mismo tiempo la legalizan y son las siguientes:

a) Leyes:

- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF 22-05-2015).

- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (DOF 05-11-2013).
 - Ley general de aguas (DOF 08-02-2012)
- b) Normas:
- 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.
 - NOM 001-SEMARNAT 1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- c) Acuerdos y decretos:
- Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89 (DOF 13-12-1989).
 - DECRETO SUPREMO N° 002-2008-MINAM (Perú). Estándares nacionales de calidad ambiental para agua.
- d) Guías:
- Guía Técnica para Orientar la Elaboración de Estudios de evaluación de Riesgo Ambiental de Sitios Contaminados (SEMARNAT, 2006).

Todas estas instancias, reglamentos y normas sirven para dar seguimiento pero no control de los factores que son causantes de la contaminación de los ríos y suelos. O bien dan lineamientos para el control pero no describen los mecanismos para la remediación de las áreas contaminadas. Es decir en la formalidad y enfoque administrativo existen pero en la práctica no funcionan para sus objetivos básicos.

Un ejemplo de la remediación de sitios contaminados en Zimapán, Hidalgo son los residuos de minas “San Antonio 1” y San Antonio 2”.

El Jale San Antonio 1 tiene 30 años de haber iniciado el proceso de restauración (Figura 2: Rodríguez, 2006).



Figura 2: Jale restaurado San Antonio 1 en Zimapán, Hidalgo. Fuente propia, tomada el 18 de septiembre del 2014

El San Antonio 2 tiene más de 25 años de haber iniciado el proceso de restauración (Figura 3; Rodríguez, 2006).



Figura 3: Jale restaurado San Antonio 2 en Zimapán, Hidalgo. Fuente propia, tomada el 18 de septiembre del 2014

Para el recubrimiento de los residuos mineros se pueden utilizar materiales especiales, los cuales disminuyen la reacción de los contaminantes con el ambiente; entre estos materiales se encuentra materiales removidos durante el descapote que es una capa de suelo con calcita (carbonato de calcio) que se coloca como recubrimiento para evitar la oxidación de los residuos en presencia de agua y aire. También se utiliza riolita, que es un material rocoso, proveniente de rocas ígneas extrusivas de origen volcánico de color

rosado a grisáceo que se coloca para disminuir la toxicidad de los residuos de minas además de que propicia la formación de suelo como se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Riolita utilizada para la remediación del jal San Antonio 2, en Zimapán, Hidalgo.

Fuente propia, tomada el 18 de septiembre del 2014

6.2. Importancia económica de los yacimientos mineros

La presencia de los yacimientos minerales no necesariamente es reflejo de la ubicación de la actividad económica de la minería. Para que un depósito sea susceptible de explotación es necesario que cumpla con una serie de requisitos tanto geológicos, como técnicos, económicos y geográficos. En primer lugar, el yacimiento debe contar con las suficientes reservas de minerales de ley alta que hagan valer la explotación durante un tiempo lo bastante largo para que permita amortizar las fuertes inversiones necesarias que requiere la actividad minera. Otro elemento a considerar es la naturaleza del yacimiento, ya que muchas veces las vetas o bolsas del mineral son demasiado pequeñas o el depósito está tan fallado que no resulta económicamente viable su explotación, además las facilidades de acceso pueden influir en la apertura de un yacimiento (Buitelaar, 2001).

El sector minero-metalúrgico mexicano contribuye de manera importante a la economía nacional, por ello es necesario atender su operación bajo una visión estratégica de modernización, favoreciendo así que continúe siendo competitivo en el ámbito internacional. La actividad involucra por sí misma, procesos fisicoquímicos que

representan un riesgo potencial de impacto al ambiente, estas alteraciones deben ser atendidas en el marco legal de cada país, de tal manera que se garantice el aprovechamiento de los recursos minerales con los que se cuenta y una adecuada calidad de vida para las poblaciones donde exista minería, siendo fundamental en este proceso, la mitigación de los impactos generados, sólo así podrá la minería realmente ser sustentable (ONU, 2007).

Los factores que repercuten en la producción minera son de diversa índole. Por una parte están los que derivan de la conformación propia del yacimiento: las características geológicas determinan la posibilidad de extracción en cada mina, el tipo de minado y la infraestructura necesaria para iniciar las obras. Por otro lado, ciertas particularidades regionales del sitio donde se ubica el yacimiento inciden en los costos de producción, por ejemplo: la distribución de la población local y sus niveles de capacitación que determinan la cantidad y calidad de la mano de obra disponible; la ubicación de centros urbanos en la región y la dotación de servicios; la cantidad y calidad de las vías de comunicación tanto dentro de la región como hacia afuera de ella; la localización de fuentes de agua y de energía, la cercanía de las fundiciones o bien de los mercados o puntos de embarque (Coll-Hurtado *et al*, 2002).

Por otra parte, el factor económico que más influye en los costos es la oscilación de los precios de los minerales en el mercado global, ya que su principal mercado es el externo. Los cambios de precio ocasiona modificaciones de los ritmos de producción y se llega incluso a abrir y cerrar minas, acentuándose el carácter aleatorio de la actividad por esta razón. Otro elemento a considerar son los de las fases posteriores al minado, es decir, los costos derivados de los procesos de beneficio y transformación de los minerales, la mayoría de los cuales se realiza a boca mina para eliminar los costos agregados del transporte de los minerales en bruto (INEGI, 2007).

6.2.1. La producción minera actual

En la actualidad la producción minera solo se puede realizar a niveles de competitividad económica si se lleva a cabo mediante la aplicación de nuevas tecnologías tanto en la fase de exploración como durante la explotación y el beneficio. Los cambios en la forma

de trabajo han sido sorprendentes también en la actividad minera; los nuevos métodos de minado han revolucionado la minería, ejemplo de ello es la opción de explotación mediante tajos a cielo abierto, la construcción de enormes obras dentro de las minas subterráneas en las que se utiliza desde la fuerza de gravedad hasta los más sofisticados medios de transporte.

Hoy en día la minería es una actividad altamente mecanizada, con sistemas de minado diseñados y planeados mediante la informática, en la que el viejo minero experimentado, heredero de una tradición en el trabajo por generaciones, no tiene razón de ser y ha dado paso al nuevo obrero calificado: operador de draga, operador de bulldozer, operador de trascabo. La ocupación de mano de obra se va reduciendo drásticamente: en 1960, la población activa minera era de cerca de 145 000 personas, mientras que para el año 2000, la fuerza de trabajo en minería no llegaba a cien mil trabajadores. El municipio de Zimapán Hidalgo fue creado para la explotación minera (Trejo, 2007).

6.3. Minería y ambiente

Igual que otras actividades productivas, la minería causa una alteración de los ecosistemas originales. Lo sorprendente es la falta de interés por parte del gobierno, de la problemática ambiental derivada de la minería, en un país que se ha caracterizado durante siglos por la explotación de sus riquezas minerales, mismas que todavía constituyen una parte significativa de las divisas que genera (Castells, 2012).

Las actividades de extracción de minerales hacen uso del suelo y subsuelo en forma temporal, o involucran la remoción del suelo para aprovechar al subsuelo. Después del aprovechamiento, las áreas abandonadas quedan degradadas e imposibilitadas para ser aprovechadas en otras actividades u otros usos, si no se realizan las actividades de restauración y recuperación del paisaje una vez concluida la explotación (Buitelaar, 2001).

6.4. Fases de laboreo minero y contaminación

Las afectaciones pueden estar en cualquiera de las etapas de desarrollo del proyecto minero, aunque no todas tienen la misma intensidad, diversidad y significado. Las fases de desarrollo de una explotación minera son tres: Exploración, desarrollo y puesta en marcha del proyecto, operación y cierre; la etapa de operación implica la extracción de los minerales de valor económico; el proceso de beneficio por molienda, concentración de minerales valiosos según diferentes métodos y eliminación de residuos líquidos y sólidos vía presas de jales o terreros. La última etapa consiste en el cierre o abandono de la mina, lo cual implica teóricamente, la restauración y rehabilitación del sitio minero una vez finalizada la explotación.

El alcance y la gravedad de los problemas ambientales causados por las explotaciones mineras dependen de factores como las características geográficas del sitio minero, el tipo de minado, la dimensión de la explotación, la antigüedad de la explotación, la clase de mineral explotado, el proceso de beneficio o tratamiento del mineral, y el destino de los residuos finales (Gutiérrez y Moreno, 1995). En las zonas mineras de México, la topografía es predominantemente montañosa, lo cual puede constituir un problema para el diseño de las instalaciones mineras, en particular el del confinamiento de los residuos, el manejo de las presas de jales y terreros. La geología del lugar incide a través de la presencia de numerosas fallas y fracturas de las rocas que influyen en la permeabilidad del suelo de tal forma que, ante la presencia del fenómeno de lixiviación de los residuos en las presas de residuos, se pueden causar la contaminación del suelo o de los mantos acuíferos subyacentes. La influencia del clima se refleja a través del régimen pluviométrico, las lluvias pueden ocasionar una lixiviación contaminante en los terrenos o las presas de residuos, y su ausencia puede favorecer la contaminación del aire a nivel local en las zonas mineras ubicadas en climas secos (Oblasser y Chaparro, 2008) como es el caso del Distrito minero de Zimapán, Hidalgo.

Otra de las características geográficas importantes es la hidrología superficial o subterránea, ya que es fundamental conocer los patrones de drenaje y la conformación de las cuencas hidrológicas de las áreas con instalaciones mineras, así como los regímenes hidrológicos y las redes de drenaje subterráneo, para prever los problemas

que pudieran derivarse del destino de los efluentes como el drenaje ácido de las minas o la contaminación del agua con metales pesados. Por otra parte, ocurre un abatimiento de los mantos freáticos como consecuencia del continuo bombeo del agua del interior de las minas, tanto en minas nuevas como en antiguas explotaciones; además se puede alterar la circulación general del agua subterránea y afectar a la población local que hace uso de ella, sobre todo si se considera que la mayor parte de las minas se localizan en zonas áridas o semiáridas. Esta agua sale a la superficie generalmente contaminada por los minerales con los que ha tenido contacto, y muchas veces no se puede utilizar para uso potable ni para actividades agrícolas y ganaderas.

Existen dos tipos de depósitos de residuos mineros, presas de residuos para los desechos producidos en el beneficio, y terreros para los desechos producidos en el descapote; para la construcción de ambos depósitos de desechos se deben tomar en cuenta ciertas reglas y normas para definir la ubicación más adecuada para su ubicación, principalmente alejados de los asentamientos humanos, se debe considerar la dirección de los vientos dominantes, la permeabilidad de los suelos, la cercanía a las corrientes superficiales y cuerpos de agua, además se recomienda cubrir a la presa en el fondo para evitar infiltraciones; también se debe considerar la posibilidad de rehabilitar los suelos alrededor de los depósitos para evitar la contaminación atmosférica (Cortinas, 2007).

6.4.1. Geografía de la contaminación minera en México

La presencia de minas, plantas de beneficio, fundidoras, etc., a lo largo y ancho del país determinan la distribución geográfica del impacto ambiental que ocasiona la actividad en todas sus fases. Los estados mineros más importantes son los que cuentan con el mayor número de plantas: Chihuahua, Coahuila, Sonora con 34 cada uno; Durango, Hidalgo, México y Zacatecas poseen entre 20 y 30 plantas. El Distrito Federal, aunque no es una entidad minera propiamente dicha, cuenta con más de diez plantas de fundición (Delgado y del Pozo, 2002).

Las características de la naturaleza mexicana agudizan el potencial contaminante de las plantas de tratamiento y de las minas, ya que coinciden con regiones montañosas

con redes hidrográficas condicionadas por el relieve y la geología. La contaminación de suelos, agua y aire es importante en todas ellas, a pesar de los esfuerzos que llevan a cabo algunas empresas para controlarla. Las plantas de mayor distribución geográfica son las que se ubican en la Sierra Madre Occidental y en las serranías que atraviesan el altiplano norte, así como en la Sierra Madre del Sur (Coll-Hurtado *et al.*, 2002).

6.4.1.1. Breve descripción de la minería en Zimapán, Hidalgo

Zimapán, Hidalgo se fundó como resultado de la actividad minera. La declaración del municipio el 16 de enero de 1870, en esta región fue para intensificar la explotación minera que se estaba dando en esos años (Trejo 2007). Los yacimientos mineros que se extraen son para la obtención de zinc, plata, plomo y en menor cantidad el vanadio, fosfato y oro. También se extraen materiales no metálicos como mármol y calcita.

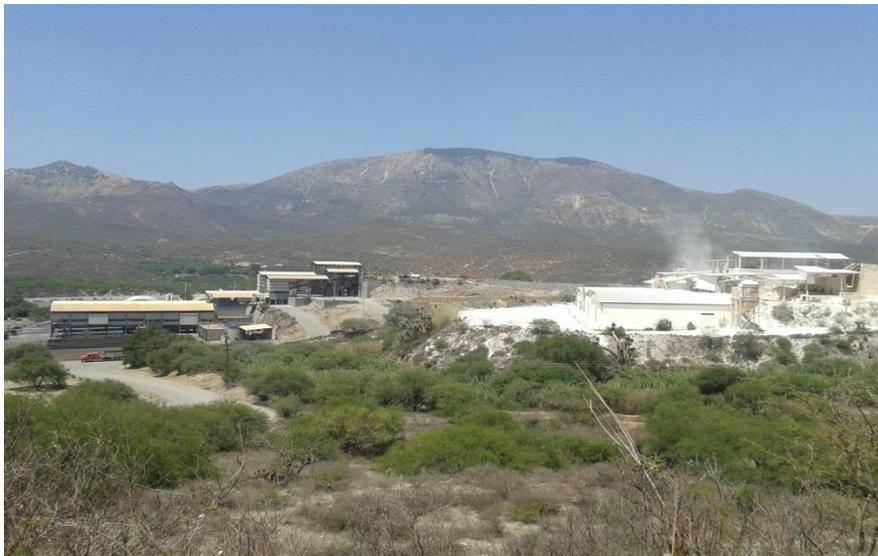


Figura 5: Mina La Purísima en actual funcionamiento, la cual continua acumulando residuos mineros en Zimapán, Hidalgo. Fuente propia, tomada el 18 de septiembre del 2014

Las estadísticas actuales de producción promedio anual por tipo de metal en Zimapán son los siguientes: zinc 756 ton, plata 3 ton y plomo 219 ton (INEGI, 2015).

6.4.2. Clasificación de los sitios contaminados

Con fines remediación de sitios contaminados, el Instituto Nacional de Ecología, clasifica en emergencias ambientales y pasivos ambientales.

Una emergencia ambiental se da cuando la contaminación del sitio derive de una circunstancia o evento que resulte en la liberación no controlada de materiales peligrosos o residuos peligrosos que afecten la salud humana o el ambiente, de manera inmediata (SEMARNAT, 2013).

Se considera pasivo ambiental a aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos, que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminante pero que implican una obligación de descontaminación. Como es común cada vez se usa más un anglicismo para referirse a esta acción, este vocablo es remediación. La determinación de acciones de descontaminación para estos casos, tanto para las emergencias ambientales como para los pasivos se basa fundamentalmente en la evaluación de riesgos al ambiente y a la salud (SEMARNAT, 2013).

En base a los aspectos anteriores los procesos de descontaminación (remediación) pueden aplicarse destruyendo o alterando la estructura química de los contaminantes, aislando los contaminantes o la extracción de los mismos. Los tratamientos de descontaminación suelen variar por el lugar en el que son aplicados, es decir, si el tratamiento se aplica directamente en el sitio contaminado, a un lado del sitio o se traslada el sitio contaminado (excavación y retiro) fuera del lugar (SEMARNAT, 2013).

Los tratamientos para la descontaminación de sitios contaminados y en consecuencia de la prevención de contaminación de los recursos naturales (cuerpos de agua superficial y subterránea, suelo y sedimentos) por depósitos de residuos mineros, basándose en su naturaleza a nivel estructural se suelen clasificar en tratamientos biológicos, químicos y físicos. Los tratamientos físicos y químicos son alternativas viables y utilizadas en diferentes regiones del país, sin embargo, tiene limitaciones económicas y de riesgo de alteración de los procesos biológicos (González-Chávez *et al.*, 2005).

Para los tratamientos biológicos se utilizan plantas (fitorremediación) y microorganismos (dentro de los métodos biológicos más usados esta la fitoestabilización y la

fitoextracción), teniendo menor costo y sin alteraciones ambientales asociadas (González-Chávez *et al.*, 2005).

6.4.2.1. Residuos de minas

Los residuos de minas son los apilamientos de rocas molidas en forma de lodos residuales que se desalojan después de que los minerales o metales de interés como el plomo, zinc, cobre, plata y otros han sido extraídos por procesos metalúrgicos de las rocas que los contienen.



Figura 6 y 7: Línea de conducción de los residuos mineros a las presas de almacenamiento (residuos de minas) en Zimapán, Hidalgo. Fuente propia, tomada el 18 de septiembre del 2014

En la actualidad los procesos de recuperación de minerales son solo parcialmente eficientes, es decir, nunca son extraídos al 100% y por tanto, un porcentaje de los minerales que se desea extraer, permanece en los residuos mineros (Coll-Hurtado *et al.*, 2002).

Los procesos de recuperación o extracción de menas del metal de interés también pueden concentrar minerales no deseados en los residuos, esto último debido a que en ocasiones se utilizan otros elementos tóxicos para la extracción del metal deseado, y que al momento de su reutilización no se recupera en su totalidad. Como resultado de los procesos de molienda, las grandes rocas que contienen los minerales se convierten en las partículas pequeñas de los residuos.

Las partículas de material fino a medio (limoso arenoso) de los jales mineros pueden fácilmente ser suspendidas o arrastradas en la atmósfera y en la superficie terrestre mediante la acción del viento o el agua (lixiviados) y ser dispersadas a través del ambiente en forma de partículas de polvo o escurrimientos superficiales. La movilidad de estas partículas provenientes de los jales mineros puede contener altas concentraciones de materiales potencialmente peligrosos, como lo son principalmente los metales pesados como el Cd, Pb, Mn, también contienen otros como el Zn, Cu y el Fe; estos contaminantes se encuentran expresados en los residuos de minas y en el ambiente al que afectan, como son los cuerpos de agua superficiales, en forma de sulfuros, como por ejemplo: sulfuro de plomo (PbS), sulfuro de Hierro (Fe₂S₃) y sulfuro de cobre (CuS) (Navarro, 1999).

El aspecto de un jale minero es un montículo de roca molida, material rocoso o lodo de aspecto sólido y en ocasiones húmedo el cual puede variar de color según sea su origen el material que fue extraído. En Zimapán, Hidalgo, varios de los jales mineros tiene un color grisáceo que con la acción del agua y el viento cambia a un color amarillento debido a su oxidación. El proceso de oxidación en la totalidad de un jale tarda varios, años viéndose afectado este tiempo por la cantidad de calcita que un jale contenga, la calcita (CaCO₃) es un material que se considera el mineral más estable que existe de carbonato de calcio el cual es muy común y tiene una amplia distribución por todo el planeta, calculándose que aproximadamente 4 % en peso de la corteza terrestre es de calcita (Pérez–Segura *et al.*, 2010), este material tiene una elevada reactividad incluso en los ácidos débiles, razón por la cual se considera que entre más calcita contenga un residuo más tardará en oxidarse (y en cambiar de color) ya que previene la formación de ácidos.



Figura 8 y 9: Residuos de mina San Miguel y Pal en Zimapán, Hidalgo. Fuente propia, tomada el 18 de septiembre del 2014

Según González *et al.* (2005) la cantidad de residuos que se generan para la extracción de metales preciosos en la minería suele variar, pero en promedio las cantidades de algunos materiales de ejemplo son las siguientes:

- Para oro: de 10 a 20 g de oro / tonelada de material triturado.
- Para plata: de 90 a 120 g de plata / tonelada de material triturado.
- Para zinc: 20 % de zinc / tonelada de material triturado.

6.4.3. Medidas de control ambiental y rehabilitación

Las normas legales en países desarrollados obligan a la recuperación de los lugares minados y su reconversión a su estado original, o al menos a su reutilización en actividades necesarias o atractivas al hombre. Como no es posible regresar la zona minera a su forma original, pueden rehabilitarse mediante prácticas de arquitectura del paisaje y otras medidas conservacionistas, como es el caso de las zonas afectadas por la deposición de metales pesados, de sedimentos con cianuros y sulfuros, e incluso de minerales radioactivos (Rodríguez, 2006).

Las presas de relaves (residuos de minas) requieren ser tomados en cuenta para incrementar su seguridad y prevenir el riesgo de ruptura o liberación de los residuos contenidos en ellos, en primer lugar destaca el hecho de que el diseño de tales presas o depósitos no puede concluirse antes del inicio de las operaciones que generarán los relaves, de hecho el tamaño y capacidad de estos depósitos suele expandirse a

medida que se lleva a cabo la producción minera lo cual demanda un proceso continuo de construcción y la atención permanente a las cuestiones de seguridad asociadas a ella, ya que lo que se busca es almacenar sólidos y no el retener el agua, la pared en la medida de lo posible deberá ser permeable (Cortinas, 2007).

Como medidas preventivas de la contaminación por residuos mineros, Cortinas (2007) recomienda desviar los cursos de agua más cercanos a las presas y establecer sistemas para captar el agua que caiga dentro del área de confinamiento, así como mecanismos para retener a los materiales de las paredes externas que puedan estarse erosionando. También menciona que la cantidad de agua dentro de las presas de relaves debe mantenerse bajo control eliminando periódicamente los excesos de manera a no inducir contaminación. Así mismo se puede llegar a requerir dotar a la presa de un recubrimiento inferior con una capa plástica (geomembrana) que prevenga las filtraciones. Además recomienda considerar su estabilidad y seguridad en todo momento de su vida, incluyendo la etapa de cierre o clausura. Ello implica considerar todo tipo de eventos como que se llene hasta el tope el depósito, la posible erosión de las paredes, los derrumbes o erosión asociados con los ductos que transportan los residuos de minas al depósito; todo lo cual hace necesario el empleo de métodos de evaluación y manejo de riesgos.

6.4.4. Acciones anticontaminantes de la minería en México

En México, los primeros esfuerzos para legislar las cuestiones ambientales en materia minera surgen en el decenio de los setenta, los cuales desembocan en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental, en vigor desde 1988, y modificada en 1996. A partir de ella surgen una serie de reglamentos y normas oficiales de diversa índole que tienen que cumplir las empresas mineras para impedir el impacto ambiental de descargas de aguas residuales, de contaminación atmosférica y depósito de residuos peligrosos. La reglamentación considera que los residuos de minas son residuos peligrosos que se deben confinar en presas construidas de acuerdo a ciertas normas y con determinadas características; como la referente a la distancia mínima a la

que deben de ubicarse respecto a los asentamientos humanos y a las corrientes y cuerpos de agua o el diseño de la base y el dique.

Las estrategias gubernamentales parten de una visión correctiva del daño ambiental y no preventiva, lo que significa que no se encaminan a evitar los daños ambientales, sino a asegurar que quienes los provocan realicen medidas de mitigación, esto es muy grave si se toma en consideración la visión monológica, excluyente, a corto plazo y poco integral a partir de la cual se definen los costos ambientales de la que hemos hablado; bajo este esquema, será difícil establecer medidas de mitigación adecuadas, que tomen en consideración consecuencias de muy largo plazo, sobre todo debido a que algunas de éstas no suelen ser evidentes sino hasta mucho después de que una mina ha terminado de operar (FUNDAR, 2002).



Figura 10. Letrero encontrado en unas casas de Zimapán, Hidalgo. Se lee: Zimapán Hgo. ¡Cementerio Toxico!

6.5. La cuenca hidrográfica

Cuenca hidrográfica se define como la totalidad del área drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces, tales que todo el escurrimiento originado de tal área es descargado a través de una única salida, la cuenca funciona como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos (Aranda, 1998).

Las cuencas y subcuencas están delimitadas por parteaguas. El parteaguas es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico donde los escurrimientos cambian de sentido y cruzan las corrientes en los puntos de salida.

Estos parteaguas separa la cuenca de otras cuencas vecinas; es decir una cuenca está limitada exteriormente por otras cuencas y a su vez interiormente está formada por las subcuencas correspondientes a las áreas de captación de cada uno de sus cauces tributarios y principales (Chávez, 2014).

En términos generales una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. La cuenca hidrográfica según FAO (1992), es una unidad hidrológica que ha sido descrita y utilizada como una unidad físico-biológica y también, en muchas ocasiones, como una unidad socio-económica-política para la planificación y ordenación de los recursos naturales (Chávez, 2014).

6.5.1. La cuenca como sistema hidrológico

Una cuenca hidrográfica según Faustino y Jiménez (2000) es el espacio de terreno limitado por las cimas de las montañas, laderas y colinas, en el que se desarrolla un sistema de drenaje superficial que concentra sus aguas en un solo cauce principal, el cual desemboca y descarga a otro cauce de mayor capacidad, a un lago, laguna o directamente al mar.

Por la ubicación de su desembocadura las cuencas se clasifican en: endorreicas y exorreicas.

Se denominan cuencas exorreicas a aquellas que por su morfología y extensión han logrado conectarse a la línea de costa y desembocan directamente al mar.

Las cuencas endorreicas, por diferencia con las anteriores, son aquellos sistemas naturales de drenaje cuyas aguas desembocan en una laguna, lago o simple depresión del terreno ubicado dentro de tierras continentales.

Una cuenca hidrográfica se puede dividir de diferentes maneras, atendiendo al grado de concentración de la red de drenaje, define unidades menores como la subcuenca que es toda área que desarrolla su drenaje directamente al curso principal de la cuenca, varias subcuencas pueden conformar una cuenca, y la microcuenca que es toda área

que desarrolla su drenaje directamente al curso principal de una subcuenca (Ordoñez, 2011).

6.5.2. Esgurrimiento superficial

El término esgurrimiento se considera sinónimo de corriente y es definido como la suma del esgurrimiento superficial y subterráneo que alcanza los cauces. La infiltración es el movimiento del agua a través del suelo y se debe diferenciar del flujo subterráneo. Para el estudio de las relaciones precipitación-esgurrimiento, las cuales son de vital importancia en muchos proyectos hidrológicos, es muy valioso un esquema claro y sencillo del ciclo del esgurrimiento (Chávez, 2014).

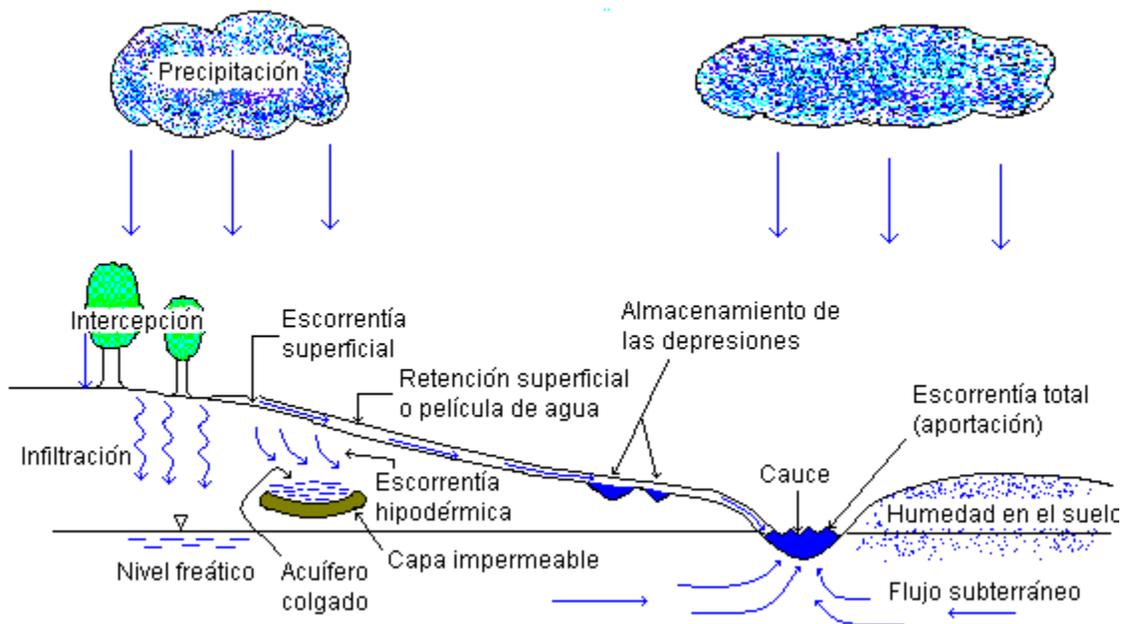


Figura 11: Representación esquemática del ciclo del esgurrimiento. De Wiest, 1967.

Una parte del agua que llega al suelo circula sobre la superficie y se concentra en pequeños surcos que luego integran arroyos, los cuales posteriormente desembocan en los ríos (esgurrimiento superficial) los que conducen las aguas a los lagos, embalses o mares, desde donde se evaporan o bien se infiltran en el terreno (Aranda, 1998).

La magnitud relativa de los diferentes componentes en los cuales la cantidad total de la precipitación de una tormenta se descompone depende de las características físicas naturales o artificiales de la cuenca así como de la tormenta. Al principio de una

tormenta una cantidad de la precipitación es interceptada por árboles y vegetación. El agua almacenada en la vegetación generalmente está expuesta al viento y ofrece grandes superficies a la evaporación (Chávez, 2014).

La precipitación de las tormentas de intensidad ligera y corta duración puede ser completamente agotada por intercepción y por pequeña cantidad de agua que se infiltra en el suelo y llena oquedades y pequeñas depresiones. Para que el agua se infiltre en la superficie del suelo debe estar en condiciones apropiadas. Cuando la intercepción y almacenamiento en depresiones son satisfechas y cuando la intensidad de la lluvia en la superficie del suelo excede la capacidad de infiltración del suelo, el flujo sobre la superficie se inicia. La superficie del suelo es entonces cubierta con una delgada capa de agua llamada detención superficial. Una vez que el flujo sobre el suelo alcanza el cauce de una corriente se transforma en escurrimiento superficial (Rodríguez, 1982).

El escurrimiento superficial es la parte del escurrimiento que se mueve sobre el suelo y se le denomina flujo sobre la superficie (Chávez, 2014).

El caudal que fluye sobre el terreno (escurrimiento superficial), y sobre las edificaciones es el aspecto más palpable del problema pluvial. Sin embargo este fenómeno es el menos estudiado y el más complejo de analizar (Rodríguez, 1982).

Diferentes autores han hecho pruebas en maquetas y mediciones "in situ", para determinar un modelo matemático que represente al movimiento del agua sobre el terreno. Los estudios realizados se han enfocado principalmente a grandes extensiones, para dar soluciones a grandes cuencas (Chávez, 2014). Estos resultados no son aplicables a zonas urbanas con áreas de captación pequeñas, especialmente en los casos de pendientes pronunciadas y cuando se presentan condiciones irregulares, como pueden ser, la existencia de obstáculos urbanísticos; edificaciones y calles que no siguen la dirección del flujo natural del agua (Rodríguez, 1982).

Las variables más importantes que afectan los escurrimientos superficiales, son el coeficiente de escurrimiento y el tiempo de concentración, el coeficiente de escurrimiento es la relación del caudal que fluye sobre el terreno entre el volumen de lluvia. El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda el agua en su

recorrido entre dos puntos determinados el extremo superior de la cuenca y el punto donde se mide el gasto pluvial (Díez Herrero, *et al.*, 2008).

6.5.2.1. Aforo de escurrimientos

La necesidad creciente de utilizar toda el agua disponible, aún en las regiones húmedas, y el aumento en los costos para desarrollar nuevas fuentes de agua hacen necesario que ésta sea aprovechada con menores costos, sin desperdicio y sin contaminantes. Esto no puede lograrse si no se utilizan sistemas de medición y control adecuados. En México esa situación se agudiza, ya que el 52% de la superficie tiene características semiáridas y el régimen de lluvias se concentra en el verano en la mayoría de las regiones del país, existiendo en el resto del año escasas a nulas precipitaciones, esto hace que para manejar el recurso hídrico de un curso de agua (río, arroyo, canal, etc.) con distintos propósitos de una manera eficiente, requiera del conocimiento de la cantidad de agua que pasa por una sección del cauce en un tiempo dado y durante un período de tiempo determinado (Basán, 2008). Esto es imprescindible para todo estudio de análisis hidráulico de una cuenca previamente definida o localizada.

Ese conocimiento es esencial para determinar:

- El gasto hidráulico que fluye en un sistema hídrico.
- La variación del flujo en los escurrimientos superficiales en las estaciones del año.
- La calidad del agua y su variación a lo largo del cauce
- La capacidad de un embalse o presa que permita atenuar las crecidas de los ríos.
- La dotación de agua establecida en las concesiones para los distintos usos.
- Controlar el volumen de agua que fluye, evitando que reciba más agua de la que puede conducir, y para regular la entrada con las necesidades aguas abajo.
- Determinar las pérdidas por conducción y localizar fugas, como también para distribuir el agua en su recorrido.

Existen varios métodos de aforo, entre los que destacan el método del flotador:

El método del flotador es un método directo para la determinación de la velocidad media del caudal. Los flotadores suelen ser objetos más ligeros que el agua (unicel, madera, etc.) que al ser arrastrados en suspensión por la corriente, estos proporcionan una medición aproximada de la velocidad de flujo; este método se utiliza en el aforo de canales y ríos pequeños (Ortega, 2012).

Para calcular la velocidad media de la corriente por medio del método del flotador se debe utilizar un flotador de un color visible, regla graduada cronómetro y cinta métrica. Primeramente, se elige un tramo del cauce el cual recorrerá el flotador y marcar el límite, las marcas servirán para definir las secciones de inicio y final del tramo, conviene que la longitud sea un número cerrado para que el cálculo sea fácil. El siguiente paso es arrojar el flotador, al menos tres metros aguas arriba de la marca inicial para que adquiera la velocidad de la corriente antes de pasar por esta; al momento que pasa por la marca inicial comienza el conteo del tiempo que el flotador tarda en recorrer el tramo de principio a fin. La velocidad media se calcula dividiendo la distancia del tramo entre el tiempo que el flotador tarda en recorrerla, el valor calculado tiene que corregirse por un factor de reducción, ya que se ha observado que la velocidad media fluctúa de 85% a 95% de la velocidad superficial (Kennedy, 1992).

Obtención del gasto:

$$Q = 0.9 A V$$

Dónde:

Q= Gasto (m^3/s)

A= Área de sección transversal (m^2)

V= Velocidad en el tramo (m/s)

0.9= Factor de reducción

6.6. La cuenca y su relación con la hidrogeoquímica

Conocer la razón de la composición química del agua superficial que se encuentra de manera natural, es de suma importancia para estudios en los cuáles se desea valorar alguna característica específica de la misma (como es para este estudio, las concentraciones de metales pesados) y con ello identificar, las fuentes de los resultados encontrados, su tipo y naturaleza, así como el comportamiento de las sustancias al entrar en contacto con otras, su avance y persistencia. En este sentido el agua de lluvia que escurre sobre la superficie, está en contacto con diversas formaciones geológicas y no geológicas (como depósitos no propios del lugar influenciados por el hombre), y disuelve materiales. En consecuencia adquiere composiciones diversas que llegan a lo largo de los ríos y arroyos por medio de escurrimientos y lixiviaciones; en relación con esto, se ha demostrado que la composición hidroquímica depende de la solubilidad y composición de las rocas y compuestos que entren en contacto con el flujo del agua, además de los factores que afectan la solubilidad de las sustancias, como temperatura, pH, potencial redox, etc (Pérez, 2014).

Debido a que el agua corre por cauces cuyas márgenes y lecho tienen composición mineralógica específica que está relacionada con el tipo de formación geológica, es importante mencionar la composición química de los materiales que la forman. Aunque suele variar de región en región, de manera general en la República Mexicana se constituye predominantemente por silicio, aluminio, oxígeno y fierro, en 87% de su volumen total; seguido en importancia el calcio, magnesio, sodio y potasio que son mayores del 1% y en menor porcentaje, fósforo, manganeso, azufre, cloro, carbono y titanio. En la segunda capa de la corteza terrestre predomina el silicio y el magnesio, en general, solo una docena de minerales se encuentran de forma predominante en la capa superficial de la corteza, aunque existen más de 2,000 minerales y 80 elementos químicos. Esta composición suele variar también con el tipo de roca y su origen, tratándose de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas, así como de los factores del lugar (Mancilla-Villa *et al.*, 2014).

De las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, las que aportan elementos al agua con mayor facilidad son las sedimentarias, estas tienen su origen en la erosión y

depósito de productos de meteorización de las rocas ígneas o metamórficas. Las rocas sedimentarias adquieren diversas composiciones por parte de residuos orgánicos o biológicos, tal es el caso de las calizas y dolomitas que se componen de conchas y esqueletos de animales, generalmente son ricas en carbono, calcio y magnesio (como CaCO_3 y MgCO_3). Otro grupo de sedimentarias está compuesto por turbas y carbones de origen vegetal (Mancilla-Villa, *et al.*, 2014).

Un tipo de roca sedimentaria está compuesto por residuos de solución originados por la cristalización de las sales disueltas en el interior de la corteza terrestre o del agua de mar, las sales que se conocen son todas calcáreas, tobas silíceas, anhidrita, sulfato de calcio y cloruro de sodio (Kovda, 1987).

Los residuos clásticos o detríticos que se forman de fragmentos de otras rocas constituyen también rocas sedimentarias como conglomerados y areniscas, estos residuos constituyen 0.75% de la capa superficial de la corteza terrestre, la composición de estos residuos varía según la composición de la roca que les da origen

De manera general, la composición del agua, desde el punto de vista geoquímico, es adquirida mediante el intemperismo de las rocas. En este proceso es fundamental el tiempo de contacto, la composición mineralógica del material y el proceso de disolución (Kovda, 1987).

6.6.1. Metales Pesados

El término metal pesado suele utilizarse para hacer referencia a metales cuyo peso específico es mayor a 5 g cm^{-3} o que tienen un número atómico superior a 20, se trata de elementos de transición de la tabla periódica, la química de estos elementos cambia sin brusquedad de elemento a elemento, y son comunes múltiples estados de oxidación (Ramos 2002).

Suele darse el término de metales pesados a los elementos metálicos de la tabla periódica que tiene un peso superior a 5 g cm^{-3} cuando está en forma elemental, o un número atómico mayor a 20, en este grupo también se considera al arsénico (As), boro (B), bario (Ba) y selenio (Se) presentar comportamientos similares (Diez, 2008).

No obstante es una definición convencional y poco uniforme cuando se consideran sus propiedades fisicoquímicas y sus funciones biológicas. Desde el punto de vista de los sistemas vivos, entre los metales pesados hay nutrientes esenciales como el Fe, Mn, Zn, Cu y Mo, elementos beneficiosos bajo ciertas circunstancias como Ni, Cr, V y Ti, y elementos que no se considera que tengan alguna función específica en los seres vivos, por lo que se les considera tóxicos: Cd, Pb y Hg (Stanley, 2006).

Esta discordancia en sus funciones, ha determinado una cierta controversia respecto al valor de la definición de metales pesados e, incluso, fuertes discrepancias a la hora de interpretarla, que va desde la no aceptación del término y sus sustituciones por otros como elementos traza y metal traza. En los elementos traza o metales traza (como suele llamársele a los metales pesados) se agrupan todos los elementos presentes en una muestra a concentraciones no detectables mediante técnicas de análisis clásicas, de forma que se consideran elementos trazas a los elementos detectables en un rango de concentración de 100 a 0.01 mg kg⁻¹ y se reserva el término ultratrazas a niveles comprendidos entre 0.01 mg kg⁻¹ y 10 µg kg⁻¹ (Marrugo y Paternina, 2011).

Las discrepancias y controversias en estos términos han llevado al establecimiento de una clasificación que relaciona los mecanismos de toxicidad con la tendencia química de estos metales a formar complejos con diversos ligandos, o la utilización del término metal pesado como denominación globalizadora para todos aquellos metales clasificados como contaminantes ambientales, tóxicos y ecotóxicos; situación que permitiría la inclusión de dicho término de elementos tales como el aluminio que, si bien no es pesado, tiene una función importante como metal tóxico en medios ácidos (Eisler, 2000).

Como característica relevante de los metales pesados, además de su toxicidad, destacan según Marrugo y Paternina (2011):

- Su elevada persistencia en el medio.
- La biomagnificación que experimentan en su concentración conforme se ascienden niveles en la cadena trófica (Nebel y Wright, 1999).
- Todos ellos provocan daños medioambientales a determinadas concentraciones.

- Suelen presentar efectos sinérgicos, es decir, su actividad es menor cuando se presentan solos que cuando aparecen juntos a otros metales.
- Su contenido en los cuerpos de agua y en el suelo debería ser únicamente función de la composición del material originario y de los procesos edafogenéticos que tienen lugar durante su formación, sin embargo la actividad humana ha incrementado el contenido de estos elementos en cantidades considerables; tal es el caso de la minería.

Al margen de lo anterior los metales pesados han sido objeto de atención por sus características contaminantes peculiares. Poseen carácter acumulativo, su concentración no disminuye con el tiempo; son necesarios y beneficiosos para las plantas y otros organismos a determinadas concentraciones, pero también son tóxicos a altas concentraciones; están siempre presentes en los suelos y en consecuencias en los cauces cercanos a concentraciones denominadas niveles de fondo, cuyo origen no es externo, sino que proviene del material parental originario de las rocas y su transformación. Estos elementos pueden ser incorporados por distintos fenómenos en los cuales interviene el hombre, también pueden llegar indirectamente hasta él a través de la cadena trófica. Con frecuencia se encuentran como cationes que interactúan fuertemente con la matriz del suelo, por lo que en ocasiones se pueden encontrar en altas concentraciones en forma química no dañina o inerte. Sin embargo, estos metales se pueden mover y cambiar de forma química debido a cambios en las condiciones ambientales (Cortinas, 2007).

La elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación en los organismos vivos, los convierte en contaminantes prioritarios cuyos efectos tóxicos no se detectan fácilmente a corto plazo, aunque si puede haber una incidencia muy importante a mediano y largo plazo (Montoya, 2006), desde luego dependiendo de la concentración de exposición.

De acuerdo con Adriano (2001), los metales pesados tienen tres vías principales de entrada principales en los cuerpos de agua y escurrimientos superficiales:

- La vía atmosférica, se produce debido a la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antropogénicos, principalmente combustión de combustibles fósiles y procesos de fundición de metales.
- La vía terrestre, es producto de filtraciones de vertidos, de la escorrentía superficial de terrenos contaminados (minas, utilización de lodos como abono, lixiviación de residuos sólidos, precipitación atmosférica, etc.) y otras causas naturales.
- La vía directa, son los vertidos directos de aguas y lodos residuales industriales (para este caso, la industria minera) y urbanas a los cauces fluviales.

6.6.1.1. Metales pesados en suelos y sedimentos

Es estrictamente necesario entender las características químicas que se suscitan en los suelos y sedimentos en los cuales están presentes los metales pesados, ya que esta capa de la superficie terrestre es el intermediario potencial entre la atmósfera y la hidrosfera, por lo tanto es el receptor de la mayoría de los contaminantes, en el cual se realizan una gran cantidad de reacciones y transformaciones de los metales pesados antes de ser esparcido por medio del arrastre de sedimentos hacia los cuerpos de agua y escurrimientos superficiales.

Los suelos, potencialmente, pueden recibir elementos tóxicos tanto de fuentes naturales como procedentes de un amplio rango de fuentes antropogénicas. El principal peligro asociado con la liberación de metales pesados al ambiente terrestre incluye la ingestión, inhalación, absorción por los cultivos haciéndolos no aptos para el consumo humano y la contaminación de aguas subterráneas y superficiales. Las fuentes de contaminación por metales pesados en el ambiente son muy variadas: material original el suelo, fertilizantes comerciales, plaguicidas, vertidos de aguas y lodos residuales, aguas de riego, residuos de combustión de carbono, emisiones de automóviles y un aporte importante de la industria minera, que en los últimos años se ha descubierto y llamado el interés de los investigadores por su alto impacto ambiental (Alloway, 2013).

La importancia relativa de las distintas vías de transferencia difiere considerablemente dependiendo del elemento químico, del tipo de suelo, de las condiciones del sitio, de las prácticas agrícolas, industriales, entre otros (Ramos, 2002).

En principio, los contenidos de metales pesados en los suelos y en el arrastre de sedimentos, son debido a su material original, pero con el transcurso del tiempo esto puede variar, debido a la acción de procesos edafogénicos zonales, que están principalmente determinados por la topografía, el clima y la vegetación. Pero es a partir de la revolución industrial, cuando los metales pesados son extraídos, concentrados y aplicados en la superficie terrestre, directamente por medio de plaguicidas o fertilizantes; o indirectamente como agentes contaminantes, los cuales se esparcen rápidamente gracias al arrastre de sedimentos ocasionado por factores naturales.

Los suelos y sedimentos que se encuentran próximos a concentraciones urbanas o asentamientos industriales (como es el caso de Zimapán, Hidalgo) reciben el aporte de estos elementos contaminantes a partir de aguas residuales o residuos sólidos (como lodos de desechos industriales; Ramos, 2002).

Los metales pesados en sedimentos, se presentan en diversas formas geoquímicas, que tienen distinta movilidad, toxicidad y comportamiento químico. Las altas concentraciones de metales pesados totales en el sedimento no necesariamente indican una contaminación de origen antropogénico, sino que muchas veces son debidas a los niveles de fondo de los materiales y a las características de los sedimentos (Tejeda *et al.*, 2005).

Los suelos y sedimentos pueden recibir contaminación por metales tanto de fuentes naturales como de antropogénicas.

En la contaminación química de origen natural, los metales pesados que se encuentra como constituyentes de los minerales primarios en rocas ígneas son incorporados por sustituciones isomórficas en las redes cristalinas. Estas sustituciones están gobernadas, por la carga iónica, radio iónico y electronegatividad de los elementos mayoritarios y del elemento traza que los sustituye. Así, las rocas eruptivas ultrabásicas (dunita y peridotita) y las básicas (basalto), son ricas en Zn, Co, Cu, Cr y Ni, y

relativamente pobres en Ba, Cr, Sr, Li y Rb. Las rocas eruptivas son ricas en metales alcalinos y alcalino-térreos, siendo pobres en Co, Cu, Cr y Ni (Bautista, 1999).

El contenido de metales pesados en las rocas sedimentarias depende de las concentraciones mineralógicas y de adsorción del material sedimentario, de la matriz y de las concentraciones de metales en el agua en la que fueron depositados los sedimentos. Las arcillitas y esquistos presentan contenidos relativamente altos de muchos elementos debido a su capacidad para adsorber iones metálicos. Los esquistos presentan niveles elevados de Ag, As, Cd, Cu, Pb, Mo, U, V y Zn. Las rocas sedimentarias como las arcillitas, presentan un contenido de elementos traza intermedio entre el de las eruptivas básicas y las ácidas, siendo más ricas en Mo y Pb, como lo son también las rocas carbonatadas (Bautista, 1999)

Las areniscas presentan cantidades bajas de metales pesados debido a que los granos de cuarzo no tienen como constituyentes elementos traza y además presentan baja capacidad de adsorción (Ramos, 2002).

Los suelos de textura arenosa o pobres en materia orgánica contienen menores cantidades de elementos traza, pues tienen menor capacidad para retenerlos que aquellos con mayor contenido de materia orgánica y de arcillas.

El aumento de la población y con ello la necesidad creciente de alimentos, así como el incremento en las actividades productivas y de transformación y extracción de los recursos naturales, ha incidido directamente en el ambiente natural de las regiones pobladas del país, lo que genera la contaminación del ambiente considerada como antropogénica (Cabildo *et al.*, 2010).

El crecimiento demográfico ha tenido como consecuencia un aumento indiscriminado en las actividades industriales y con ello, en la utilización de diferentes compuestos, como metales pesados, para mejorar dichos procesos productivos, emitiéndose al ambiente cantidades excesivas de estos contaminantes.

Teniendo en cuenta que el suelo es un intermediario entre atmósfera e hidrosfera, es fácil deducir que sea el medio receptor de gran parte de los contaminantes que genera la actividad urbana (Pulido y Vallejos, 2003).

Las actividades urbanas en su conjunto son fuente 9 elementos contaminantes del suelo, mismos que se generan solo por la actividad minera, esto es debido a que esta industria satisface los requerimientos de la población. La minería es una de las actividades productivas, pero más contaminantes por el conjunto y tipo de elementos químicos y compuestos que se manipula (cuadro 1).

Cuadro 1. Principales orígenes antropogénicos de los metales pesados.

Origen	Sb	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
Baterías eléctricas			*	*			*	*	
Cementos y amiantos					*				
Chapados metálicos					*				
Curtidos metálicos				*	*				
Curtidos de pieles				*	*				
Eléctrica y electrónica			*	*	*		*	*	*
Farmacéuticas		*		*	*				*
Fertilizantes		*	*	*	*	*	*	*	*
Fotografía			*	*	*			*	
Fundiciones		*	*	*	*		*	*	*
Galvanizados, electrochapados			*	*	*		*	*	*
Minería	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Motores de vehículo y chapados de aviones			*	*	*				*
Municiones y explosivos				*	*			*	
Papeleras y similares				*	*		*	*	*
Pesticidas		*		*	*	*		*	*
Pigmentos, tintes, tintas y pinturas	*		*	*	*		*	*	*
Plásticos	*		*		*				*
Químicas, petroquímica	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Textiles	*			*	*				*
Vitrocerámica			*				*	*	

Fuente: Wittmann, 1981; MOPU, 1982; Moreno Grau, 2003.

6.6.1.2. Metales pesados en cuerpos de agua

En los sistemas acuáticos continentales (ríos, lagos, embalses, escurrimientos superficiales menores) la contaminación se produce, bien por la presencia de

compuestos o elementos que normalmente no estarían sin la acción del hombre, o por un aumento o descenso de la concentración normal de las sustancias ya existentes debido a la acción humana (Rosas, 2001).

Una de las principales fuentes de contaminación por metales pesados en los sistemas acuáticos, en los cuales interviene la acción humana son las aguas y lodos residuales procedentes de las industrias que utilizan los cauces fluviales como vertederos. A menudo estos vertidos no son gestionados, no se someten a procesos de depuración o su tratamiento es inadecuado (Ramalho, 1996). Los contaminantes se pueden encontrar en forma disuelta o en suspensión, y ser orgánicos e inorgánicos por su naturaleza química (Fundación MAPFRE, 1994). Otra de las principales fuentes de contaminación a los ríos y escurrimientos superficiales son las lixiviaciones de desechos industriales derivadas de la precipitación y el derrumbamiento de depósitos (en el caso de jales mineros), que al no tener contenciones adecuadas pueden llegar por arrastre de partículas y escurrimientos hasta los cauces y ríos ocasionando una contaminación severa y de largo alcance.

Los metales pesados son considerados contaminantes importantes para los sistemas acuáticos, debido a que no son degradables por procesos naturales como los contaminantes de origen orgánico y pueden incorporarse a las cadenas alimenticias por medio de procesos de bioacumulación, bioconcentración o biomagnificación (Marrugo y Paternina, 2011).

La contaminación de los escurrimientos superficiales se ve regida en gran medida por los sedimentos, ya que estos pueden actuar como portadores y posibles fuentes de contaminación porque los metales pesados no se quedan permanentemente en ellos y pueden ser liberados a la columna del agua por cambios en las condiciones ambientales tales como pH, potencial redox, oxígeno disuelto, materia orgánica existente o la presencia de quelatos orgánicos. Los metales más tóxicos como Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, He y As se acumulan en los sedimentos donde se pueden transformar a formas químicas biodisponibles, resuspenderse hacia la columna de agua y producir intoxicaciones crónicas agudas (Oblasser y Chaparro, 2008).

Los sedimentos depositados en los lechos de los ríos, han sido usados para evaluar la calidad del agua y sedimentos en función de la distancia (Rivera *et al.*, 2005), ya que integran las fluctuaciones en los ingresos de metales pesados en el trayecto que sigue el curso del río. Los metales son emitidos a la atmósfera, descargados sobre el suelo o en las aguas y lodos residuales y acumulados finalmente en los sedimentos. Por lo tanto, los sedimentos ofrecen datos integrados en el tiempo sobre las tendencias geográficas y temporales de las emisiones. Cuando existe una capacidad limitada para realizar los análisis del contenido de metales disueltos, es más fácil estimar la calidad de un sistema de agua natural mediante los análisis de sedimentos. Por otra parte, la presencia de ciertos componentes de las formulaciones de los detergentes como son los tensoactivos, agentes blanqueadores, estabilizantes, entre otros, participan posiblemente en la movilización de los metales pesados (Cruz-Guzmán, 2007).

6.6.1.3. Importancia del análisis de los metales pesados

Los estudios de calidad ambiental de las cuencas hidrográficas han adquirido gran interés en las últimas décadas, debido a la creciente contaminación que se ha generado a consecuencia del incremento de población en sus riberas, el creciente grado de industrialización y los aportes del sector primario que se presentan. La importancia que tiene el estudio de metales pesados en aguas es debido a que al medir el nivel de sus concentraciones proporciona un indicio puntual de los niveles de contaminación de la cuenca que se estudia (Rosas, 2001). La investigación de la presencia de metales pesados en determinadas zonas, permite conocer las rutas de contaminantes, la fuente que los aporta y su interacción con otras sustancias presentes (Griet, 2006). El aporte de información contribuye al diagnóstico de cada cuenca y por consiguiente a facilitar la toma de decisiones en proyectos posteriores, sobre todo en decisiones de carácter gubernamental y de saneamiento y recuperación de sitios contaminados (Rosas, 2001).

Las acciones contaminantes por los metales pesados hacia los cauces superficiales se ve afectado por el comportamiento de estos elementos no solo en el agua, sino también en el suelo y sedimentos con los que tienen contacto los escurrimientos o lixiviados que fluyen hacia los cauces previos a analizar. Razón por la cual es recomendable que las investigaciones direccionadas a determinar las concentración de metales pesados en

agua, conozcan teóricamente el comportamiento de los metales pesados en suelo y sedimentos.

Entre los metales que tienen más probabilidades de causar problemas figuran el cobre (Cu), el cadmio (Cd), plomo (Pb), hierro (Fe), el mercurio (Hg), el manganeso (Mg), el cobalto (Co) y el níquel (Ni). Se consideran tóxicos si resulta perjudicial para el crecimiento o el metabolismo de las células al exceder cierta concentración, algunos de ellos se consideran venosamente graves incluso a concentraciones muy bajas (Vega y Reynaga, 1990). La toxicidad de estos metales pesados es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos, un metal disuelto en forma iónica puede absorberse más fácilmente que estando en forma elemental, y si esta se halla reducida finamente aumenta las posibilidades de su oxidación y retención por los diversos órganos (Rosas, 2001). La toxicidad de un metal depende de su vía de administración y del compuesto químico al que está ligado.

Los metales son difíciles de eliminar del medio, puesto que los propios organismos los incorporan a sus tejidos y de éstos a sus depredadores, en los que se acaban manifestando su toxicidad (Vega y Reynaga, 1990; Rosas, 2001); a esto se le llama bioacumulación.

La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años (Vega y Reynaga, 1990). Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación. Se sabe muy poco sobre los efectos de los metales en los ecosistemas. En los lugares en que aguas de drenaje de minas fluyen en cursos de agua dulce se producen con frecuencia efectos ecológicos evidentes como, por ejemplo, una gran reducción de la fauna invertebrada y la ausencia de peces. Una vez alcanzadas concentraciones tóxicas, puede necesitarse mucho tiempo para reducir las a niveles no tóxicos. Ningún contaminante actúa en forma aislada sobre un receptor. La capacidad de absorción de metales por las plantas varía con la acidez, el contenido orgánico y otras características del suelo (Vega y Reynaga, 1990).

6.6.2. Principales metales pesados en la zona de estudio

6.6.2.1 Cobre (Cu)

El cobre es un metal que ocurre naturalmente en el ambiente, rocas, suelo, agua y aire. Los minerales principales que sirven de fuente de obtención del cobre son los sulfuros de cobre como la calcocita, calcopirita, bornita y covelita; también se le puede encontrar como elemento nativo. Se encuentra tanto en yacimientos hidrotermales de baja temperatura de sulfuros ricos en cobre (asociada a la pirita, pirrotita, escalerita, galena, tetraedritas) y pobres de azufre, así como en yacimientos supergenicos en las zonas de enriquecimiento secundario de sulfuro de cobre. (Narváez, 2002).

De acuerdo con Marrugo y Paternina (2011), el cobre es blando, maleable, dúctil y un buen conductor del calor, se le considera semiprecioso, por ser atacado directamente solo por los ácidos oxidantes. Aunque Narváez (2002) menciona que en presencia de O_2 es atacado por otros ácidos. En el ambiente el cobre se encuentra comúnmente con una valencia de 2, pero puede existir con valencias 0, +1 y +3.

Se presenta en diversas sales minerales y compuestos orgánicos, así como en forma metálica, es poco soluble en agua, las sales o soluciones moderadamente ácidas, pero pueden ser disueltas en ácido nítrico y sulfúrico así como en soluciones básicas de hidróxido de amonio o carbonato.

Las fuentes naturales de cobre incluyen el viento $0.9 - 15 \times 10^3$ ton; partículas volcánicas, $0.9 - 18 \times 10^3$ ton; incendios forestales, 0.1 a 7.5×10^3 mg/kg; brisa marina, 0.2 a 6.9×10^3 ton, y procesos biogénicos $0.1 - 6.4 \times 10^3$ ton, mientras que las fuentes antropogénicas son: fundidoras, industria del hierro, estaciones de energía, aunque la mayor liberación de cobre a la tierra es de los residuos de las minas de Cu y lodos del drenaje (Narváez, 2002).

El Cu que se halla en el agua resulta del intemperismo del suelo y descargas de la industria y plantas de tratamiento de lodos (Ramalho, 1996).

Narváez, (2002) menciona que el cobre puede existir en aguas naturales ya sea en su forma disuelta como el ion cúprico (+2) o formando complejos con aniones inorgánicas

o ligandos orgánicos (carbonatos, cloruros, ácidos húmicos y fulvicos); Además puede estar presente como precipitado insoluble (hidróxido, fosfato o sulfito) o absorbido en material particulado. Las concentraciones relativas de cada una de estas formas dependen del número de parámetros químicos, incluyendo el pH, salinidad, alcalinidad y la presencia de ligandos orgánicos, aniones inorgánicos y otros iones metálicos.

Toxicidad del cobre

Los síntomas de toxicidad del cobre en cultivos tienen que ver con un menor crecimiento de la raíz principal por muerte del meristemo apical de la raíz principal, estimulación de la formación de raíces secundarias y posterior inhibición del meristema apical de las raíces secundarias cuando la concentración de metal supera el límite de tolerancia (Gallegos *et al.*, 2012; Cervantes *et al.*, 1999).

Gallegos *et al* (2012) y Cervantes *et al.*, (1999) coinciden en que los altos niveles de cobre en animales causan alteración en su desarrollo y reproducción. Sin embargo tales efectos no han sido reportados en humanos. La homeostasis del cobre tiene una función importante en la prevención de su toxicidad en los humanos, animales terrestres y organismos acuáticos. El cobre es rápidamente absorbido desde el estómago e intestino delgado; y después de cumplir con los requerimientos, hay varios mecanismos que evitan la sobrecarga del cobre. Sin embargo, la falla de este sistema homeostático puede suceder en los humanos y animales después de exponerse a altos niveles de concentración, pudiendo causar la enfermedad conocida de Wilson que se caracteriza por la excesiva retención del cobre en el hígado y la dañina excreción biliar del cobre.

Concentraciones bajas como 0.1 mg L^{-1} de cobre puede causar un sabor a óxido en la leche de las vacas. La Task Force Canadiense en Calidad de aguas sugiere que niveles de cobre sobre 0.6 mg L^{-1} pueden resultar en daños hepáticos en las vacas lecheras y para porcino, ha establecido un nivel máximo de 5 mg de cobre por L^{-1} de agua (Patience *et al.*, 1989).

6.6.2.2. Plomo (Pb)

El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11.4 g mL^{-1} a 16°C (61°F)), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad a 327.4°C (621.3°F) y hierve a 1725°C (3164°F). Las valencias con las que trabaja normalmente son 2(+) y 4(+). Es relativamente resistente al ataque de ácidos sulfúrico y clorhídrico. Pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico; es anfótero, ya que forma sales de plomo con los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico (Stanley, 2006).

La galena (PbS) es el principal mineral portador de Pb, es un mineral primario que se encuentra generalmente asociado a la pirita, sea en inclusiones, siguiendo fracturamiento o en contacto con la misma. En ocasiones, se encuentra asociada a esfalerita, arsenopirita y también a la cerusita (PbCO_3), anglesita (PbSO_4) y piromorfita ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) (Moreno, 2012).

El Pb se encuentra generalmente en los minerales que también contienen Cu, Zn, Cd, Fe y Ag, y se extrae como un co-producto de estos metales (Gallegos *et al*, 2012; Cervantes *et al*, 1999).

Una de las principales fuentes de contaminación del ambiente es el proveniente de la combustión de la gasolina, en donde se usa como antidetonante, lo que puede representar una vía importante de entrada en la cadena alimenticia a ser consumido por los animales. Se pueden encontrar concentraciones altas de plomo en suelo, aire y agua en lugares en donde haya habido (o haya) operaciones de compañías mineras o fundiciones. Así, el principal riesgo relacionado con la minería del plomo no radica en la posible puesta en solución de este metal (precipita rápidamente como carbonato o sulfato), sino en lo que concierne a los procesos metalúrgicos de las menas de plomo (fundiciones) (Higueras *et al*, 2010).

Toxicidad de plomo

El plomo es un metal carente de valor biológico, es decir, no es requerido para el funcionamiento normal de los seres vivos, por lo que no se trata de un elemento

esencial, sino tóxico, el cual es acumulativo en animales y plantas, afectando directamente a las mismas y en su consumo. Su presencia en el organismo produce dos tipos de efectos: agudos y crónicos (ATSDR, 2007).

Con respecto a los efectos agudos, los efectos del plomo sobre los adultos son poco significativos; sin embargo, sobre los niños produce encefalopatías agudas, con edema cerebral que puede llegar a producir efectos letales (Higueras, et. Al. 2010). Los efectos crónicos se relacionan con el hecho de que el plomo tiene un tamaño iónico que lo hace compatible con otros iones con valor biológico, como Ca, Fe y Zn, lo que le permite entrar en procesos biológicos, con resultados desastrosos: entra en la hemoglobina, y en especial, puede sustituir al calcio del apatito (fosfato cálcico) de los huesos. Esta situación es de nuevo particularmente alarmante en los niños, que debido a su crecimiento incorporan altas cantidades de calcio.

En adultos que trabajan en ambientes expuestos a la contaminación con plomo, el metal puede acumularse en los huesos, donde su vida media es superior a los 20 años. La osteoporosis, embarazo, o enfermedades crónicas pueden hacer que este plomo se incorpore más rápidamente a la sangre (ATSDR, 2007).

6.6.2.3. Hierro (Fe)

Es un elemento químico, con número atómico de 26 y peso atómico es 55.847. El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre (5%). Es un metal magnético, maleable, tenaz, de color gris plateado y magnético.

Los cuatro isótopos estables, que se encuentran en la naturaleza, tienen las masas 54, 56, 57 y 58. Los dos minerales principales son la hematita, Fe_2O_3 , y la limonita, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Las piritas, FeS_2 , y la cromita, $\text{Fe}(\text{CrO}_2)_2$, se explotan como minerales de azufre y de cromo, respectivamente. El hierro se encuentra en muchos otros minerales y está presente en las aguas freáticas y en la hemoglobina roja de la sangre (Gray, 1996).

El hierro es un metal extraordinariamente común y se encuentra en grandes cantidades en suelos y rocas, aunque normalmente en forma insoluble. Sin embargo, debido a un

número de complejas reacciones que se suceden de forma natural en el suelo, se pueden formar formas solubles de hierro que pueden contaminar cualquier agua que lo atraviese. Por lo tanto el exceso de hierro es un fenómeno común de las aguas subterráneas, especialmente aquellas encontradas de aguas subterráneas blandas (Gray, 1996).

Se le considera un elemento esencial, siendo muy abundante en la naturaleza, y se considera un elemento traza. La concentración en suelo y agua varía enormemente. Es difícil que sea tóxico aunque, cuando hay un alto nivel de sus formas amorfas, puede inducir una deficiencia de P y Mo; no cabe esperar una toxicidad directa debido a una aplicación de fertilizantes o vertido indirecto por fuentes industriales, por la rápida conversión del Fe soluble a compuestos insolubles. Sus propiedades geoquímicas son similares a las del Co y el Ni. Con respecto a su función en las plantas ocupa una posición intermedia entre macro y micronutrientes (Ramos 2002).

Toxicidad del Hierro

Encontrándose en cantidades excesivas en cultivos reducen el crecimiento y provocan acumulaciones indeseables en los tejidos (INFOAGRO, 2011).

Bajos niveles de Hierro pueden ser problemáticos en el agua. Niveles mayores 0.1 mg L^{-1} han sido reportados como causal de carne roja en terneras. Niveles sobre 0.3 mg L^{-1} pueden también causar una reducción en la ingesta de agua y en la producción de las vacas lecheras. Tan poco como 0.1 mg L^{-1} puede causar un sabor a óxido en la leche (Patience, et. Al., 1989). En los seres humanos pueden darse depósitos de hierro en diversos órganos, especialmente el hígado, lo que produce diversos daños y una enfermedad conocida como hemocromatosis. Una ingesta excesiva de hierro puede provocar un envenenamiento por este mineral (Ruiz, 2009).

6.6.2.4. Manganeso (Mn)

El manganeso es un metal que ocurre naturalmente y que se encuentra en muchos tipos de rocas. Es el segundo metal más abundante en la tierra. Los depósitos de mineral son por lo general de origen sedimentario, con capas de óxido intercaladas con

formaciones ricas en Fe. El manganeso puro es de color plateado, pero no ocurre naturalmente en esta forma. Se combina con otros elementos como oxígeno, azufre o cloro, también puede combinarse con carbono para producir compuestos orgánicos de manganeso. Algunos compuestos orgánicos incluyen plaguicidas, tales como maneb o mancozeb, y otros compuestos como metilciclopentadienil manganeso tricarbonil (MMT), el cual es un aditivo en ciertas gasolinas (FAO, 1992).

Debido a su gran afinidad por el oxígeno generalmente se presenta en forma de óxidos y también en la de silicatos y carbonatos. El Mn existe en diferentes estados de oxidación que cubre un rango de 0 a +7; pero solo tiene importancia biológica cuando trabaja con valencias +2, +3 y + 4, de estos solo el Mn +2 puede estar como ion libre en solución. El Mn como ion +3 puede estar en soluciones acuosas cuando está complejoado (Patience *et al*, 1989).

La mena de este mineral principalmente utilizado en la industria es la Pirolusita (MnO_2), con 63% de manganeso, pero se usan otras como la braunita ($MnS_{12}O_3$) de 69%, la rodonita o la rodocrusita, por lo que es abundante en la corteza terrestre. Entre las formas químicas naturales destacan óxidos, silicatos y carbonatos siendo las más importantes la pirolusita o manganesa, rodocrosita o dialogita; otras menos importantes son hausmannita, psilomelana (manganomelana), manganita, rodonita, braunita ($3Mn_2O_3$, $MnSiO_3$), hübnerita ($MnWO_4$). (FAO, 1992).

El Mn liberado al quemar un aditivo de la gasolina también representa una fuente en el aire. El metal proveniente de estas fuentes humanas puede entrar al agua superficial, subterránea y a aguas de alcantarilla. Pequeñas partículas de Mn también pueden ser arrastradas por el agua que corre a través de vertederos y suelo (ATSDR, 2008).

El comportamiento del manganeso en el ambiente se da la siguiente forma (ATSDR, 2008):

- No puede ser degradado en el ambiente. Solamente puede cambiar de forma o adherirse o separarse de partículas.
- Puede ser liberado al aire, suelo y agua durante la manufactura, uso o disposición de productos a base de manganeso.

- La forma química del manganeso y el tipo de suelo determinan la rapidez con que se moviliza a través del suelo o el agua y la cantidad que es retenida en los sedimentos.

Toxicidad del manganeso

En los cultivos las concentraciones altamente tóxicas de manganeso pueden causar alteración de la pared celular, abrasamiento de las hojas y generación de puntos color marrón reduciendo el crecimiento (FAO, 1992).

En la producción pecuaria el alto contenido de Mn puede provocar diarrea en el ganado, se acumulan en el hígado y en el sistema nervioso central, produciendo síntomas parecidos al Parkinson.

El exceso de manganeso disminuye las velocidades de absorción del hierro, calcio y fósforo en el intestino y dificulta la síntesis de hemoglobina y el depósito de calcio y fósforo en los huesos del ganado (ATSDR, 2008).

En los humanos el efecto más común que se observa involucra al sistema nervioso. Estos efectos incluyen alteraciones del comportamiento y en los movimientos, que pueden hacerse lentos y faltos de coordinación. Cuando esta combinación de síntomas se torna grave, se le refiere como manganismo. La exposición oral de animales a cantidades altas de manganeso ha producido efectos del sistema nervioso y reproductivo. Los estudios en niños sugieren que la exposición a niveles extremadamente altos de manganeso puede alterar el desarrollo del cerebro, lo que puede resultar en alteraciones del comportamiento y en la capacidad para aprender y memorizar (ATSDR, 2008).

6.6.2.5. Zinc (Zn)

La palabra zinc viene del alemán "zinke" que significa punta en español. Aunque no representa más que 0,012% de la corteza terrestre, está presente en el agua, el suelo y el aire, siendo un componente esencial e indispensable para el cuerpo humano. Estando presente en el agua de manera natural se encuentra distribuido en diferentes cantidades, siendo su media de concentración en el agua de mar es de 0.6-5 $\mu\text{g L}^{-1}$; los

ríos contienen generalmente entre 5 y 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ de zinc; las algas, entre 20 y 700 mg kg^{-1} , los peces de mar y caparazón de bivalvos 3-25 mg kg^{-1} , las ostras 100- 900 mg kg^{-1} y las langostas 7-50 mg kg^{-1} (ATSDR, 2005).

Es un metal blanco ligeramente azulado y brillante. Es un metal quebradizo cuando está frío, pero se vuelve maleable y dúctil entre 100 y 150°C. El zinc puro es dúctil y maleable pudiéndose enrollar y tensar, pero cantidades pequeñas de otros metales como contaminantes pueden volverlo quebradizo. Se funde a 420 °C y hierve a 907 °C.

Su densidad es 7.13 veces mayor que la del agua, ya que un pie cúbico (0.028m^3) pesa 445 lb. (200 kg.). En un ambiente húmedo, se cubre de una fina capa de hidrocarbonato que lo protege contra la oxidación (ATSDR, 2005).

El Zn es un elemento traza esencial para todos los organismos vivos. Es un constituyente de más de 200 metaloenzimas y otros compuestos metabólicos (FAO, 1992).

Este metal se encuentra generalmente asociado a otros metales como el cobre o el plomo. El principal mineral que lo aporta es la blenda o esfalerita que contiene como impurezas al cobre, manganeso, calcio, cobalto, plata etc. El mineral principal que sirve como fuente de obtención de zinc es la esfalerita (ZnS). La masa fundamental de los yacimientos de esfalerita, lo mismo que la galena (PbS), a la que va asociada casi siempre, es de origen hidrotermal. En los procesos de oxidación, la esfalerita se descompone con relativa rapidez formando sulfato de zinc, muy soluble en el agua, debido a lo cual, las zonas de oxidación suelen ser muy pobres en zinc (Navarro, 1999).

No se le atribuye nivel de clasificación de riesgo en el agua, puesto que no supone un gran peligro, no obstante esto sólo se refiere en su estado elemental, ya que algunos derivados, como arsenato de zinc y cianuro de zinc, pueden ser extremadamente peligrosos (ATSDR, 2005).

Toxicidad del zinc

La ingestión de cantidades excesivas puede perjudicar la salud de animales y del ser humano y volverse tóxico. La toxicidad suele ser baja para animales y personas, pero no debe descartarse la fitotoxicidad (Marrugo y Paternina, 2011).

Los estudios en plantas han demostrado que aunque sea un elemento esencial en altas concentraciones puede ser considerado como citotóxico.

En cultivos que presentan fitotoxicidad a causa de concentraciones elevadas de Zn se reduce el crecimiento de la planta y provoca acumulaciones indeseables en los tejidos. De acuerdo a las investigaciones realizadas se reconoce que el Zn se acumula irreversiblemente en el suelo (ATSDR, 2005).

Por ello, las aplicaciones o vertidos directos e indirectos en exceso, eventualmente llegan a contaminar los suelos, y cauces de los ríos, los cuales se pueden convertir en ambientes no productivos (INFOAGRO, 2011).

En producciones pecuarias, se producen problemas de constipación crónica, aunque pequeñas concentraciones le confieren al agua sabor desagradable lo que limita el consumo por parte de los animales jóvenes (FAO, 1992).

6.6.2.6. Cadmio (Cd)

El cadmio, es un metal blanco plateado dúctil y maleable, puede cortarse fácilmente, no se encuentra como elemento nativo, es insoluble en bases, pero se disuelve en ácido nítrico diluido y es poco soluble en los ácidos sulfúricos y clorhídricos. Es un elemento no esencial cuyas propiedades químicas son intermedias entre el Zn y el Hg, en ambientes dulceacuícolas, está íntimamente asociado con la materia coloidal en forma de CdCl_2 y CdSO_4 ; en el agua de mar 66% está presente en forma iónica junto con CdCO_3 (26%), $\text{Cd}(\text{OH})_2$ (5%), CdCl_2 , (1%) y CdSO_4 (1%); en el agua de estuarios una alta proporción de este metal se encuentra asociado a partículas formando complejos (Higueras, 2010).

Los minerales de cadmio no se encuentran en concentraciones y cantidades suficientes como para justificar una actividad minera específica por el elemento; de esta manera, el cadmio se recupera principalmente como un subproducto de la minería, fundición, y refino del zinc, y en menor grado del plomo y cobre. En promedio se recuperan 3 kg. de cadmio por tonelada de zinc. Entre los minerales de cadmio, la greenockita (CdS) es el más común. Este mineral se encuentra casi siempre asociado con la esfalerita (ZnS) (OECD, 2001).

Las principales fuentes de Cd en ambientes acuáticos son debidas al lavado de los suelos agrícolas y a las descargas de la minería y la industria. Otro origen importante son los desechos municipales y los lodos de las plantas de tratamiento; el cadmio en el agua dependerá de la fuente donde proviene y la acidez del agua, es probable que en algunas aguas superficiales que contengan un poco más de microgramos de cadmio por litro, se hallan contaminado por descargas de desechos industriales o por lixiviación de áreas de relleno, como es el caso de los “jales mineros”, también se da por suelos a los cuales se le han agregado lodos cloacales. Su presencia en ambientes marinos disminuye la capacidad de sobrevivencia de larvas y estadios juveniles de peces, moluscos y crustáceos (OECD, 2001).

Su uso principalmente se da en la industria del Zn y extracción del Cd a partir de sus residuos, en la fabricación de soldaduras, cadmiado de metales, aleaciones con acero, Zn y Cu, revestimientos metálicos, minerales plásticos, pigmentos para pinturas, en Industria atómica, en la Industria del plástico y fabricación de células solares (Codina, et al. 1993).

El Cd se encuentra en el ambiente de lugares de trabajo que manipulen baterías, soldadura, pigmentos y otros materiales que llevan aleaciones o compuestos de cadmio, en aguas contaminadas; en lugares cercanos a centrales térmicas y quemaderos de basuras, en el tabaco y particularmente en la interacción con la industria minera y en la lixiviación y arrastre de sus residuos y lodos residuales. El Cd se encuentra presente en la mayoría de los alimentos siendo más abundante en moluscos bivalvos, y dentro de las carnes en hígados y en riñones (Patience, 1989).

Toxicidad del cadmio

En cultivos agrícolas, el cadmio puede ser absorbido por las plantas y acumulado en cantidades que pueden entrañar serios riesgos para la salud humana. Su similitud con el Zn, le permite reemplazarlo, ser absorbido por la planta en su lugar y desempeñar sus funciones. Por su alta toxicidad ocasiona serios trastornos en la actividad enzimática de la planta; se le atribuye un marcado efecto en la reducción del crecimiento, la extensibilidad de la pared celular, el contenido de clorofila (OECD, 2001).

En la producción pecuaria, es persistente y bioacumulativo, afecta a la capacidad reproductiva, al desarrollo del feto, causan desórdenes del sistema nervioso, tóxico a organismos acuáticos, cancerígenos, entre otros.

En el ambiente, el cadmio es peligroso porque muchas plantas y algunos animales lo absorben eficazmente y lo concentran dentro de sus tejidos. Una vez absorbido, se combina con la proteína metalotioneína y se acumula en los riñones, el hígado y los órganos reproductores. El cadmio ha sido relacionado con la aparición de cáncer en animales de experimentación (Higuera, 2010).

En seres humanos, la población abierta se expone a su toxicidad a través de la cadena alimenticia. El cadmio se acumula en el organismo humano, fundamentalmente en los riñones, causando hipertensión arterial. La absorción pulmonar es mayor que la intestinal, por lo cual, el riesgo es mayor cuando el cadmio es aspirado (Higuera, 2010).

La consecuencia más seria del envenenamiento prolongado por cadmio es el cáncer (se asocia con la aparición de cáncer de próstata en humanos). Los efectos crónicos que primero se observan son daño en los riñones. Se piensa que el cadmio es también el causante de efisemas pulmonares y enfermedades de los huesos (osteomalacia y osteoporosis) (Patience, 1989).

7. MATERIALES Y MÉTODOS

Como metodología para el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo de investigación se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

1. Visita y reconocimiento de la zona de estudio.
2. Muestreo de agua en cauces y análisis de las muestras recolectadas.
3. Aforo de los sitios de muestreo, para la obtención de gasto de los escurrimientos superficiales.

7.1. Materiales utilizados

7.1.1. Material cartográfico y de cómputo

Para la elaboración de los diferentes mapas creados se utilizaron las siguientes cartas topográficas obtenidas de la página de INEGI:

- Para la realización de los mapas de suelo, y vegetación en la microcuenca Zimapán se utilizaron las cartas edafológicas de tipo y uso de suelo F14-C58, F14-C59, F14-C68 y F14-C69, con escala 1:50,000.
- Para la delimitación de la cuenca se utilizaron los modelos de elevación digital (DEM) F14-C58, F14-C59, F14-C68 y F14-C69.
- Para la caracterización morfométrica y biofísica de la microcuenca se utilizaron los DEM's F14-C58, F14-C59, F14-C68 y F14-C69 con escala 1:50,000.
- Para la creación de los mapas se utilizó el software ArGis 10.1.

7.1.2. Equipo de medición

Para el aforo de la corriente y la toma de muestras de agua, se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Cronómetro
- Los puntos de muestreo fueron georeferenciados con GPS Garmin Etrex 20.
- Libreta de campo
- Esferas de unicel
- Flexómetro

- Reglas de medición en centímetros

7.1.3. Material de análisis químico del agua

Para llevar a cabo el análisis químico de las muestras de agua fue necesario contar con los siguientes materiales e instalaciones:

- Formato de toma de muestras
- Botellas de plástico
- Refrigerador
- Tarjetas para la identificación de muestras
- Hieleras
- HNO₃ concentrado
- Espectrofotómetro de absorción atómica
- Laboratorio de Química Ambiental, ubicado en el área de Edafología del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

7.2. Descripción fisiográfica de la microcuenca de Zimapán Hidalgo

Zimapán es el municipio más grande del estado de Hidalgo en cuanto a su extensión territorial. Este municipio tiene casi cinco siglos de haberse fundado por los españoles, es un municipio que se ha caracterizado por ser una zona minera donde se ha venido explotando principalmente el zinc, plata, plomo y en menor cantidad el vanadio, fosfato, mármol y oro entre otros materiales. Por lo cual la población masculina de la mayoría de las localidades se ha dedicado siempre al trabajo en las minas (Trejo, 2007).

El Distrito Minero Zimapán está constituido por varias compañías mineras entre las más importantes y que se encuentran activas al día de hoy están:

- La Purísima S.A. de C.V.
- Compañía Minera de Zimapán S.A. de C.V.

Estas compañías mineras explotan varios puntos de extracción, a través del tiempo de explotación de minas se han dejado varios depósitos de residuos, entre los cuales se pueden observar los denominados:

- Los Gómez.
- San Miguel.
- Santa María
- Preisser
- Pal
- San Antonio.

Todos estos depósitos de residuos mineros se encuentran bastante cercanos a cuerpos de agua, ya sean pozos de extracción o escurrimientos superficiales que nacen y se desprenden de las laderas de las montañas, razón por la cual varios de estos cuerpos de agua son los sitios de muestreo analizados en este estudio.

7.2.1. Ubicación y delimitación geográfica

La presente investigación se realizó en la microcuenca de Zimapán, ubicada dentro del Distrito Minero del mismo nombre, el cual se localiza a 144 kilómetros de Pachuca ubicado exactamente en la zona urbana del municipio, específicamente en las coordenadas 20°43'47.92" N y 99°23'27.72" O y a una altura promedio de 1,780 msnm.

Limita al norte con los municipios de Pacula y Jacala; al sur con los de Tecozautla y Tasquillo; al este con los de Nicolás Flores e Ixmiquilpan y al oeste con el Estado de Querétaro. Está situado en la porción occidental del estado de Hidalgo, formando parte del Valle del Mezquital por la carretera estatal no. 85 Actopan-Ixmiquilpan-Tasquillo. Sus principales comunidades son: Xaha, Aguas Blancas, Xitha, el Cerrote, Morelos, Encarnación y Durango.

7.2.2. Descripción del relieve

De acuerdo con el DEM la microcuenca Zimapán tiene una extensión territorial de 860.90 kilómetros cuadrados y se encuentra a 1,780 metros sobre el nivel de mar, el relieve es en su mayor parte abrupto por el eje neo volcánico; su mayor elevación es el Cerro de la piedra azul o mejor conocido como Cerro de la Encarnación que se encuentra a 2,820 metros sobre el nivel del mar.

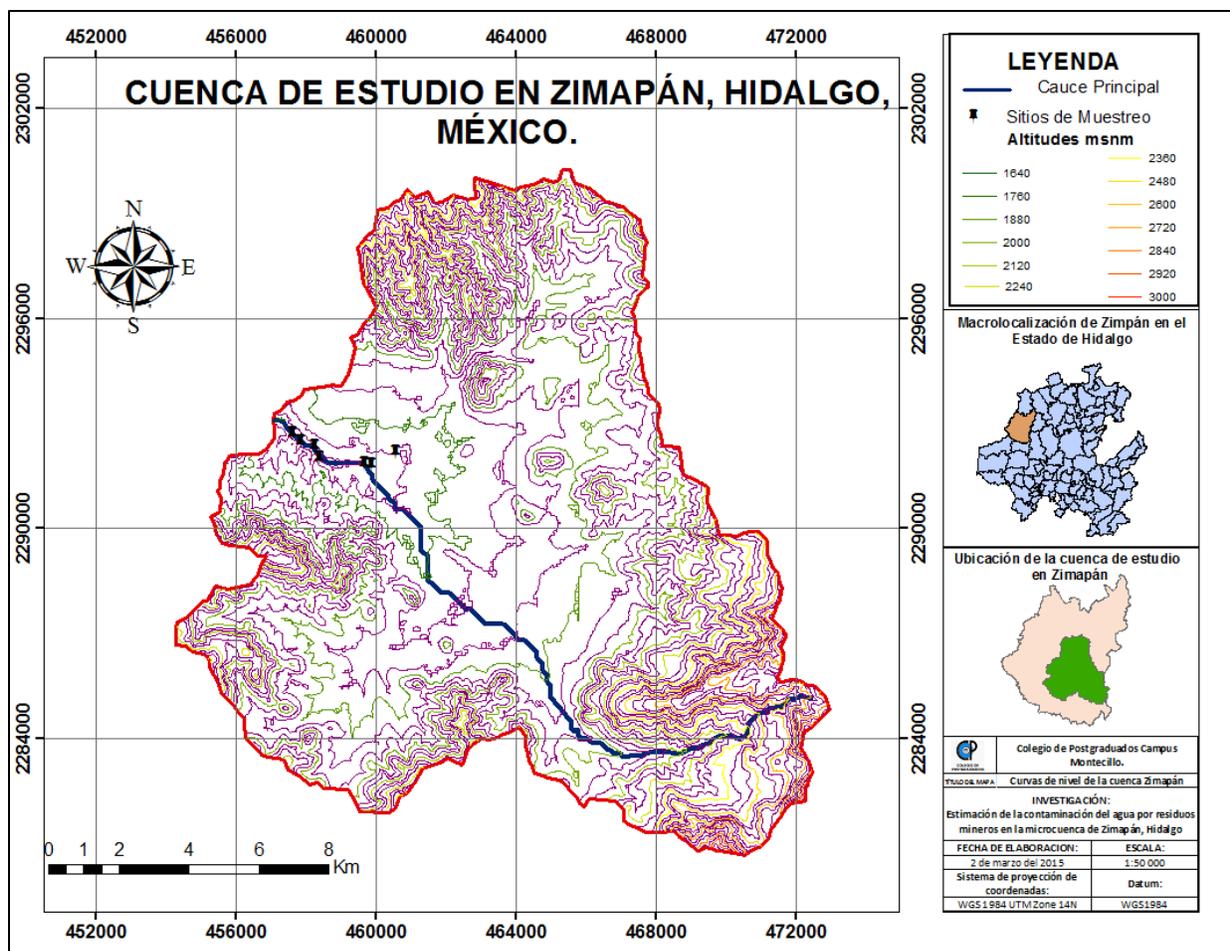


Figura 12: Curvas de nivel en la cuenca en estudio.

En la Figura 12 se muestra el mapa de curvas de nivel de la microcuenca Zimapán en donde se ilustran las altitudes sobre el nivel del mar que conforman el relieve de la región (desde 1,600 hasta 3,000 msnm) y que son las que forman los escurrimientos que llegan al área de muestreo.

Algo importante de resaltar en el mapa es que con base en las curva de nivel y el transeptor por el que avanza el cauce principal, el área donde están ubicadas las estaciones de muestreo es la parte más baja de la microcuenca.

7.2.3. Clima

De acuerdo al sistema de clasificación climática de Wladimir Köppen, modificado por Enriqueta García, el municipio tiene un clima semiseco semicálido, registra una

temperatura media anual de 19 °C., una precipitación promedio anual de 450 milímetros por año, el período lluvioso es de julio a septiembre (INEGI, 2014).

De acuerdo a la información del Servicio Meteorológico Nacional, la estación climática más cercana al municipio (17.3 km) y que presenta datos climáticos más completos (datos hasta el 2007) es la Estación Meteorológica-Encarnación, Zimapán. Los datos de ubicación de esta estación son:

- Clave: 13065
- Latitud N: 20° 53' 0"
- Longitud W: 99° 12' 0"
- Altitud: 2,140

7.2.4. Geología

De manera general, la geología de Zimapán Hidalgo pertenece a la etapa mesozoica, encontrándose rocas ígneas extrusivas e intrusivas las cuales son ricas en minerales. Está constituida por la secuencia volcánica sedimentaria formada por lutitas calcáreas, limolita, caliza, micritica, pirita, areniscas y pedernal; contiene lava y piroclásticos andesíticos y riolíticos con alteración hidrotermal. Tiene unidades calcáreo pelíticas, pelticas-calcareas, volcánico riolítica, volcánico basálticas, cuerpos intrusivos y conglomerados intrusivos (Azpeita, 2007).

7.2.5. Uso de suelo

En cuanto al uso del suelo, 51% de la superficie de la cuenca está bajo uso pecuario, 8.7% es de uso forestal, 3% bajo agrícola y 37.3% a otros usos, donde posiblemente se incluye al uso minero (INEGI, 2000).

En cuanto a la tenencia de la tierra se tienen dos formas: 69% corresponde a la superficie ejidal y el 31 por ciento a la pequeña propiedad; no se diferencia de la superficie en concesión para la explotación minera. Su uso y explotación radica principalmente en la minería, el suelo del Municipio no es propicio para ejercer la agricultura (INEGI, 2010).

7.2.6. Suelos

El conocer el tipo de suelo que se tiene en la región nos da una idea clara de su estructura y sus características las cuales nos indican si en la región existe erosión, infiltraciones o escurrimientos cercanos a los depósitos de residuos mineros y que su movilidad a través del suelo pueden ser causantes de contaminación.

Conforme a lo registrado en las cartas edafológicas publicadas en la página del INEGI (año 2000) en el apartado de Conjunto de datos Edafológico escala 1: 250 000 y en el Conjunto de Datos de Perfiles de Suelos Escala 1: 250 000 para el estado de Hidalgo se elaboró el mapa de unidades edafológicas de la microcuenca de Zimapán, Hidalgo (Figura 13).

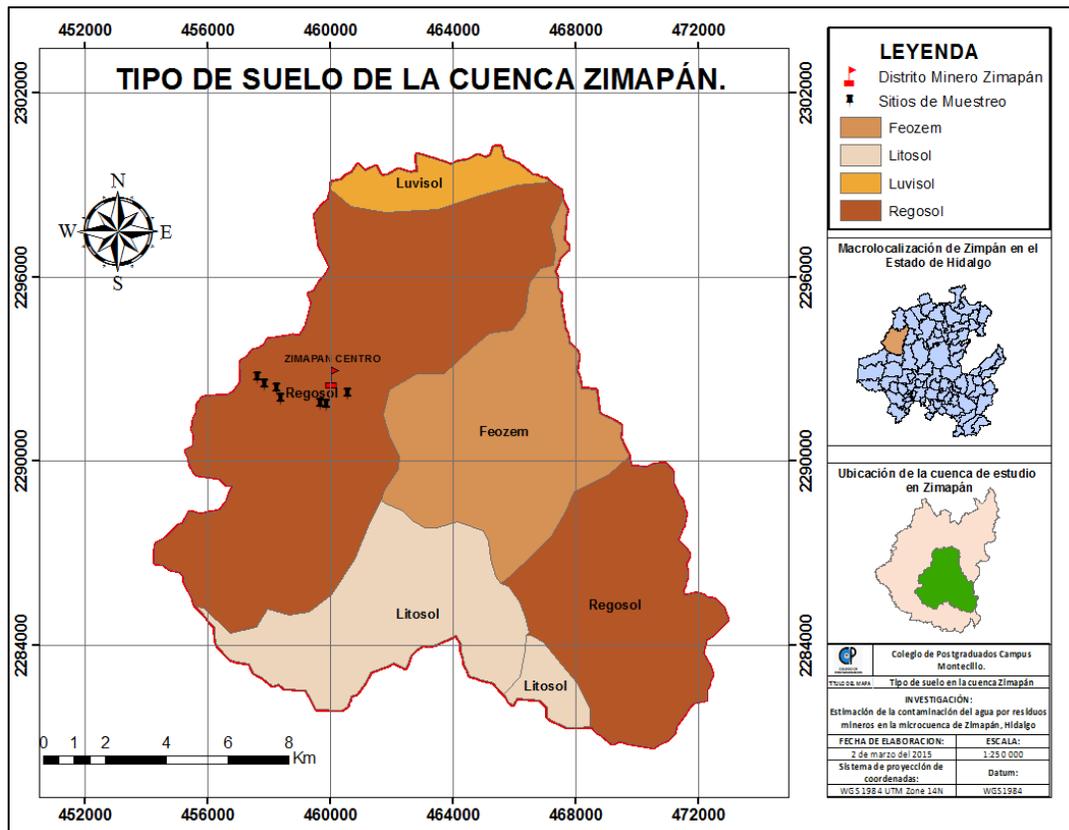


Figura 13: Tipo de suelo en Cuenca Zimapán.

Con información del INEGI 2015, se elaboró el siguiente Cuadro en donde se muestra las características físicas de los suelos existentes en la cuenca Zimapán y la extensión territorial que estos abarcan:

Cuadro 2: Características físicas de los suelos existentes en la Cuenca Zimapán

Grupo	Textura	Prof Prom (m)	Densidad (g cm ⁻³)	Cap de Ret (cm m ⁻¹)	Sup (km ²)	% Territorio
Regosol	Media	0.6	1.45	10	125.78	57.89
Feozen	Media	0.83	1.45	10	43.12	19.84
Luvisol	Fina	1.5	1.25	23	9.62	4.42
Litosol	Media	0.073	1.4	10	38.73	17.82
Total:					217.25	100

De acuerdo con el cuadro anterior los Regosoles ocupan 57.89% del área de estudio, seguidos de los Feozem con 19.84% y los Leptosoles con el 17.82%.

En general son suelos muy jóvenes formados *in situ* sobre laderas y transportándose por el agua, acumulándose en la base de los pies de montes y formando colinas de poca altura.

7.2.7. Tipo de vegetación.

De manera general, la microcuenca cuenta con poca vegetación por ser un área semiárida, donde predomina el matorral xerófilo.

El área de estudio se caracteriza por presentar grandes extensiones de nopaleras, arbustos bajos, matorral alto, maguey, órganos, cardones, biznagas, huizaches, ortigas y mezquites, como elementos constitutivos principales de este tipo de vegetación (Rzedowski, 2006). En las partes altas de la subcuenca hay comunidades vegetales con variación en las especies predominantes.

Utilizando la carta de uso de suelo y vegetación F14-11 referida al Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V, publicada en la página del INEGI (año 2013), con escala 1:250,000 se realizó el siguiente mapa de vegetación en ArcGis 10.1.

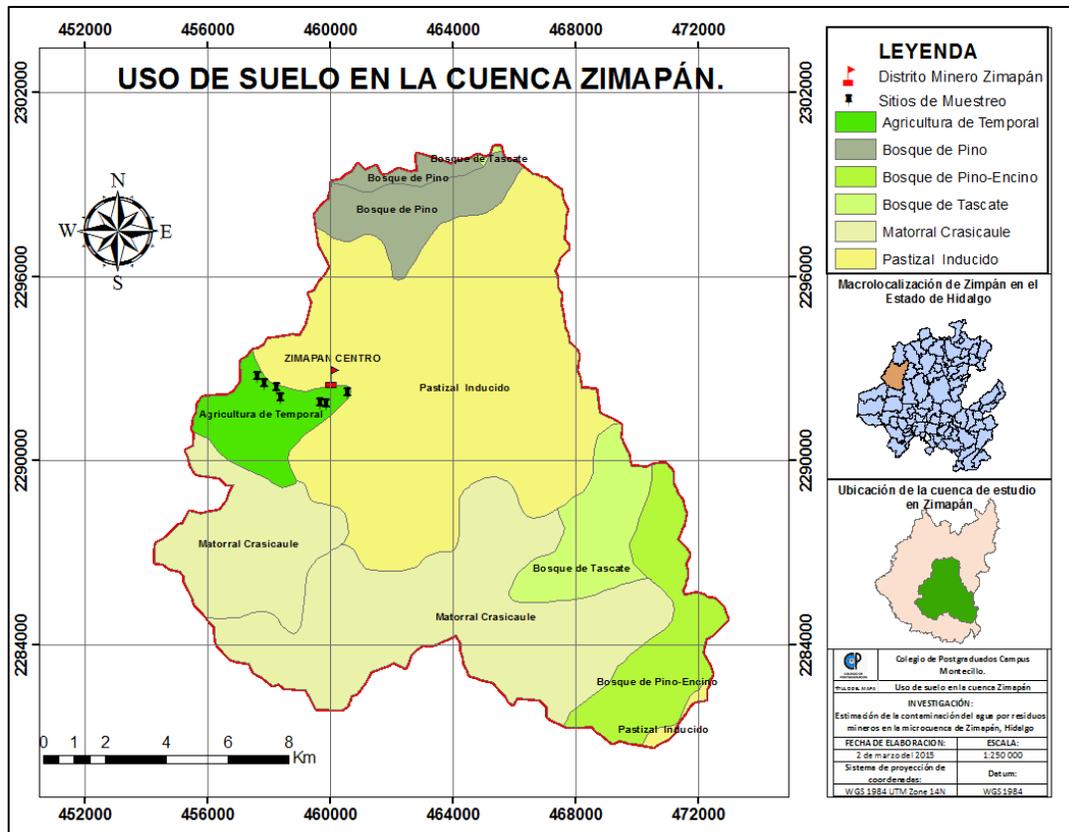


Figura 14: Uso de suelo en Cuenca Zimapán.

La interpretación del mapa anterior permitió elaborar el cuadro 3, en el cual se puede constatar que la vegetación dominante está representada por pastizales y matorral crasicaule, ocupando el 38.23% y 33.59% del área de estudio respectivamente.

Cuadro 3. Uso de suelo en la microcuenca Zimapán

Clave	Uso del suelo y vegetación	Superficie (ha)	%
ZU	Zona urbana	701	3.23
PI	Pastizal inducido	8306	38.23
AH	Bosque de Tascate	1314	6.05
BO	Matorral de Crasicaule	7297	33.59
BP	Bosque de pino	1363	6.27
BP-E	Bosque de pino-encino	1704	7.84
AT	Agricultura de temporal	1040	4.79

Fuente: Cartas de uso de suelo y vegetación del INEGI. 2015.

7.2.8. Descripción de la microcuenca hidrográfica

La microcuenca delimitada comprende un área de 217.25 km². Dentro de las corrientes pluviales más importantes destacan los ríos; Tula, Amajac y Metztitlán. El río Tula al unirse al río San Juan, toma el nombre de Río Moctezuma, que es el límite natural con el estado de Querétaro, por la parte oeste del Municipio. Posteriormente entra en el Estado de San Luis Potosí y forma el río Pánuco. Sólo en época de lluvia se forman pequeños arroyos que riegan algunos sembradíos, como los de Chepinque y Tolimán.

La delimitación de la cuenca se realizó por medio del modelo digital de elevación (DEM), utilizando como base las cartas con clave: F14-C58, F14-C59, F14-C68 y F14-C69 INEGI (año 2001) que están a una escala de 1:50 000. Este análisis se realizó utilizando el software ArGis 10.1 para detectar una cuenca con las características deseadas. La delimitación de la Cuenca Zimapán, se muestra en el siguiente mapa de ubicación:

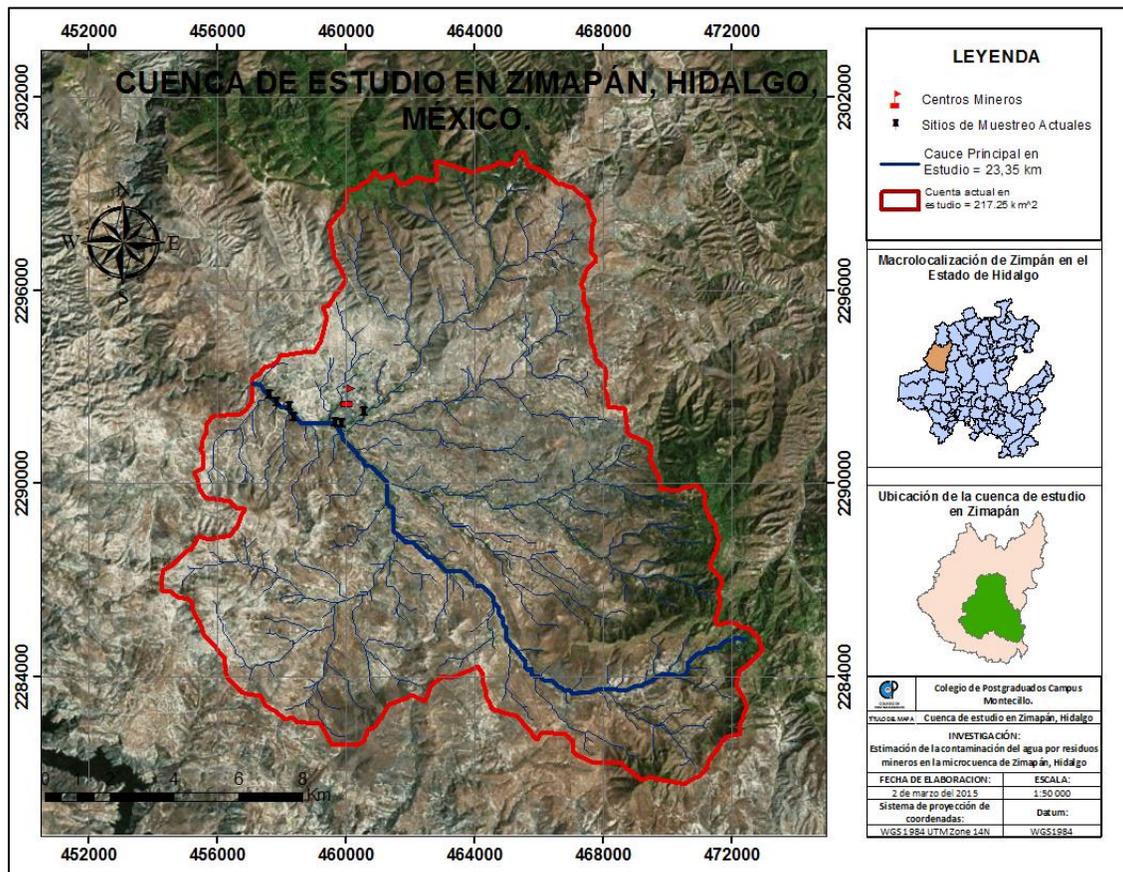


Figura 15: Delimitación geográfica de la cuenca de estudio.

Es una cuenca de orden 5, seguida de cuatro corrientes de orden 4. Su elevación máxima es de 3,014 msnm. Sus escurrimientos son alimentados principalmente por la precipitación pluvial que es de hasta 391 mm año⁻¹, fenómeno natural que da origen a todos los cauces observado.

La red hidrográfica que se encuentra en el área de estudio pertenece según información de la CONAGUA a la cuenca hidrográfica Río Moctezuma, dicha cuenca es la que abarca más del 76 % del municipio de Zimapán, Hidalgo, incluyendo la zona de análisis. Los datos hidrográficos específicos a los que pertenece la cuenca Zimapán según el INEGI son:

- Región hidrográfica administrativa: Golfo Norte
- Región hidrográfica: Panuco No. 26.
- Cuenca: Río Moctezuma.
- Corriente: Río Tula.
- Nombre de la microcuenca: cuenca Zimapán.

Para tener información general de las características de la cuenca y poder utilizarla en la discusión y análisis de los resultados se realizó una caracterización morfométrica y biofísica determinando uso de suelo y descripción de la red hídrica, con los DEM's F14-C58, F14-C59, F14-C68 y F14-C69 con escala 1:50,000 y con el software ArGis 10.1, utilizando la base de datos geográfica disponible en el INEGI (Anexo 13.5)

El mapa anterior permite mostrar que en la cuenca objeto de estudio se localiza toda el área de impacto del distrito minero de Zimapán lo que permite aseverar que la contaminación del agua se debe solo a las fuentes localizadas en dicho distrito.

7.2.8.1. Elementos morfométricos de la microcuenca

La descripción sistemática de la geometría de una cuenca hidrológica y su sistema de cauces requiere de la definición de aspectos de área de la cuenca, de medidas lineales del sistema de drenaje, y del relieve del sistema de cauces y pendientes del suelo de áreas contribuyentes. Mientras las dos primeras categorías de medida son planimétricas, y hacen referencia a las propiedades proyectadas sobre un plano

horizontal de referencia o Datum; la tercera categoría trata de las desigualdades verticales de las formas de la cuenca hidrológica (Chávez, 2014).

Con base a lo anterior se realizó la caracterización morfométrica de la cuenca; para lo cual se utilizaron los DEM's F14-C58, F14-C59, F14-C68 y F14-C69 con escala 1:50,000 en el software ArGis 10.1, obteniendo lo siguiente:

Cuadro 4: Morfometría de la cuenca Zimapán determinada con ArcGis 10.1.

DESCRIPCION	UNIDAD	VALOR
DE LA CUENCA		
Área	km ²	217.25
Perímetro	Km	74.8
COTAS		
Máxima	-	2991.35
Mínima	-	1640.22
COORDENADAS DEL CENTROIDE		
Coordenada en X	M	463630.84
Coordenada en Y	M	2290035.08
Coordenada en Z (altura media)	M	2240.82
ELEVACION		
Elevación media de la cuenca	msnm	2240.82
Elevación de frecuencia media	msnm	1934
PENDIENTE		
Pendiente promedio de la cuenca	%	18.003
DE LA RED HIDRICA		
Longitud del cauce principal	km	23.350125
Orden de la red Hídrica	-	5
Longitud total de la red hídrica	km	309.59
Pendiente promedio de la cuenca	%	18.003
Pendiente promedio de la red hídrica	%	1.0461
Pendiente del cauce principal	%	50.25
Densidad de drenaje	Km km ⁻²	0.05695
Densidad de corriente	Drenajes km ⁻²	2.1142
Longitud media de flujo de superficie	km ² km ⁻¹	8.9762

Se elaboró el mapa siguiente en el cual se ilustra la red hidrográfica de la cuenca Zimapán.

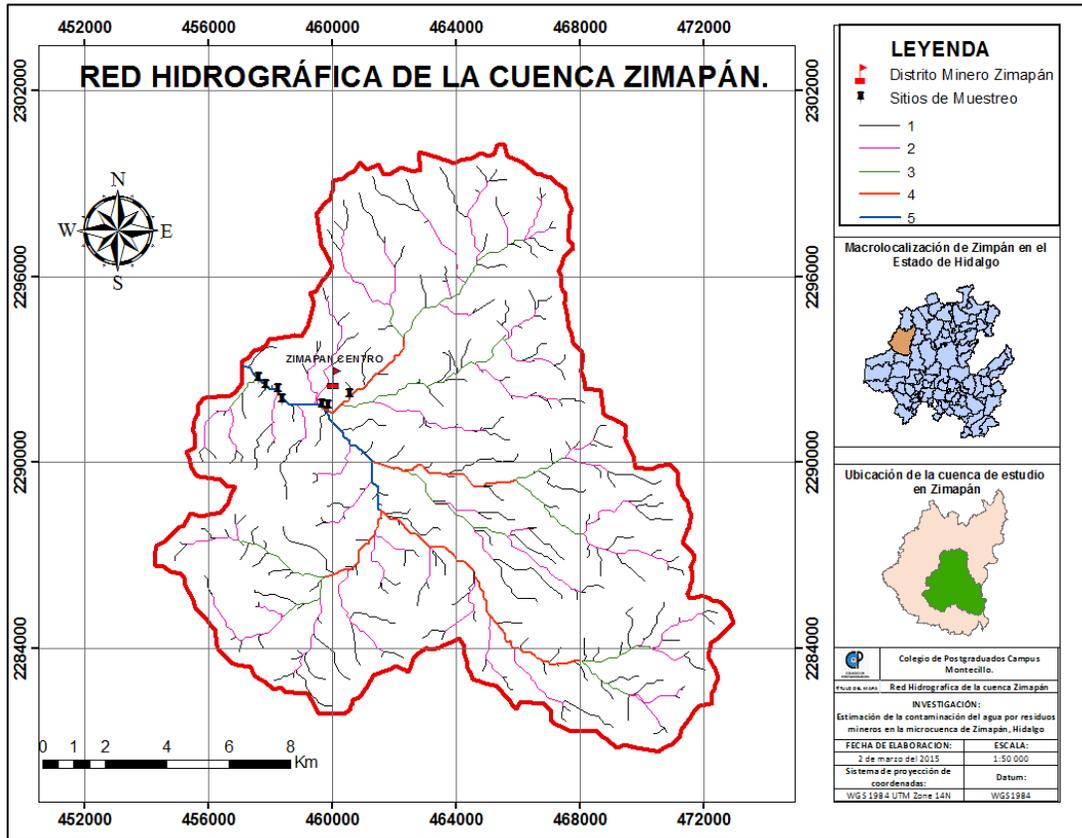


Figura 16: Red hidrográfica de la cuenca en estudio.

Se determinaron las longitudes de las corrientes de la cuenca y longitud media de cauces utilizando los valores encontrados en la tabla de atributos contenida en el shape que se usó para determinar el orden de la cuenca.

Cuadro 5: Longitudes de las corrientes de la cuenca Zimapán.

Longitud de las corrientes de la cuenca.			
Numero de orden (u)	Nu	Longitud (km)	Lu (m)
1	241	153.26	0.63593361
2	120	92.36	0.76966667
3	57	34.46	0.6045614
4	38	21.89	0.57605263
5	19	7.62	0.40105263
SUMATORIA	475	309.59	2.98726694

7.3. Metodología

En el presente apartado se presenta la metodología desarrollada para el muestreo y análisis de muestras de agua, la forma de llevarlo a cabo se sintetiza en la figura 17.

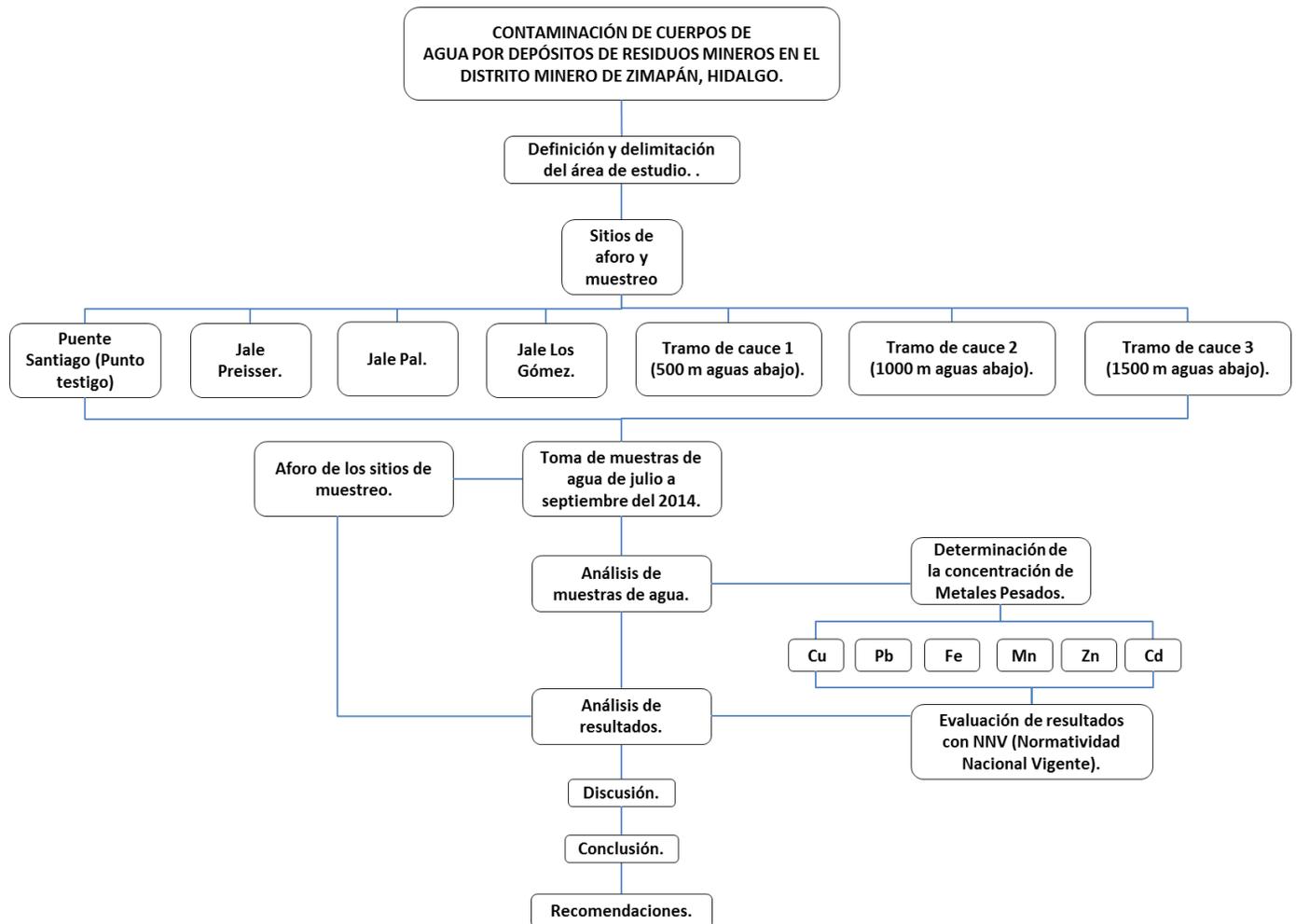


Figura17: Diagrama de flujo del muestreo.

7.3.1. Reconocimiento de la microcuenca

En este proyecto se definieron sitios de muestreo como un factor fijo, puesto que fueron escogidas a priori por sus condiciones particulares, y porque los flujos serían el resultado de la interacción constante con el medio ambiente local, con los residuos mineros y con la estación del año en que se realizó el muestreo. Los sitios de muestreo

fueron tomadas por la influencia de las acciones antrópicas representadas por los depósitos de residuos mineros de la zona, fueron georeferenciados con GPS Garmin Etrex 20, cuyas coordenadas de ubicación espacial se muestran en el cuadro 6, Figura 18.

Cuadro 6: Sitios de Muestreo en la zona de estudio.

Observación	N	Sitio de muestreo	ID	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	(UTM) Zona	Elevación (msnm)	Longitud de cauce en el que influye (m)
Punto Testigo Influencia directa por los residuos de minas	1	PUNTE SANTIAGO	A	460552.00	2292186.00	14 N	1714	873.3
	2	JALE PREISSER	B	459867.00	2291845.00	14 N	1697	200
	3	JALE PAL	C	459678.00	2291869.00	14 N	1694	1477
	4	JALE LOS GÓMEZ	D	458389.00	2292014.00	14 N	1685	500
Alcance de la pluma de contaminación	5	PUNTO DE SALIDA 1: 500 METROS AGUAS ABAJO DEL JALE "LOS GÓMEZ".	E	458229.10	2292365.89	14 N	1683	500
	6	PUNTO DE SALIDA 2: 1000 METROS AGUAS ABAJO DEL JALE "LOS GÓMEZ".	F	457837.00	2292503.00	14 N	1681	500
	7	PUNTO DE SALIDA 3: 1500 METROS AGUAS ABAJO DEL JALE "LOS GÓMEZ".	G	457620.00	2292707.00	14 N	1665	-

Fuente: Elaboración propia, 2015.

La ubicación espacial de los sitios de muestreo se reportan en el siguiente mapa:

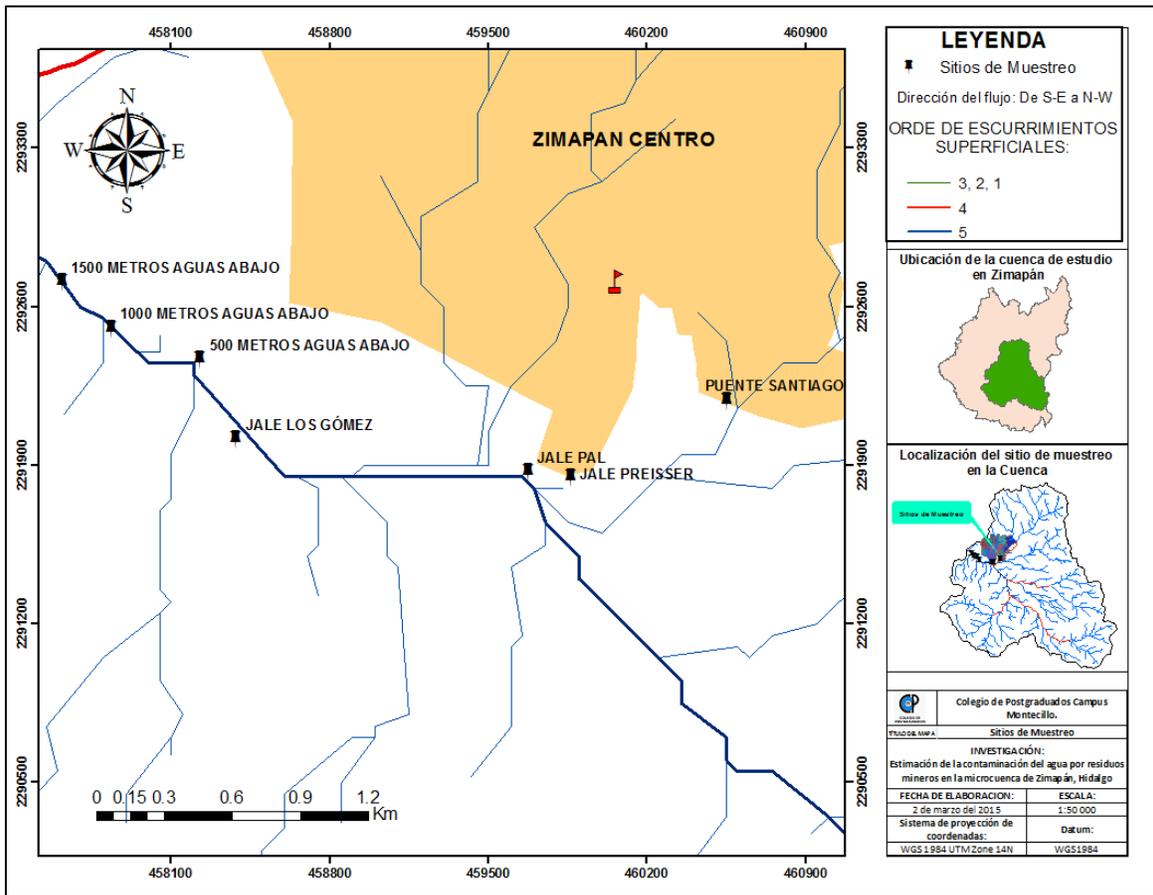


Figura 18: Distribución espacial de los sitios de muestreo.

7.3.2. Diseño del muestreo de agua

La selección de los sitios de muestreo en campo, está basada en la observación y evidencias claras de los aportes de contaminantes (metales pesados) hacia los cauces de agua por lixiviación y escurrimientos.

Tomando como base las observaciones en campo, los sitios de muestreo se definieron de acuerdo a los siguientes elementos:

- La presencia de lixiviaciones provenientes del depósito de residuos mineros (presa) en la vertiente derecha del cauce analizado, es decir, debe identificarse el escurrimiento proveniente de los residuos en forma de cárcava o escurrimiento bien marcado.

- Evidencia del avance de dicho escurrimiento, avanzando en una separación, entre los residuos y el cauce analizado, no mayor a 20 metros lineales de distancia.
- Presencia de marcas directas del aporte que se da al cauce superficial.
- El tramo del cauce analizado debe ser de 10 metros lineales en un sección longitudinal lo más recta posible, con la misma profundidad y distancia en su sección transversal (ya que esto favorece la confiabilidad de los aforos realizados).
- En el cauce analizado debe existir flujo de agua.
- Es preferible que en la vertiente izquierda del cauce exista un ambiente que proporcione accesibilidad al muestreador (En la mayoría existen áreas de cultivo o ambiente arbustivo).

Lo descrito en los puntos anteriores se muestra en el siguiente esquema:



Figura 19. Identificación de los sitios de muestreo.

El aporte de contaminantes por parte de los residuos a los cauces de agua se ve afectada por las lixiviaciones y escurrimientos, razón por la cual esta condición se acentúa de forma significativa en la época de lluvia, en consecuencia la frecuencia de los muestreos se puede establecer en forma estacional. Estableciendo como periodo estacional de muestreo la temporada de lluvia en Zimapán, Hidalgo, la cual se da en los meses de julio a septiembre (Periodo determinado con base en el comportamiento de las lluvias en un lapso de 9 años de análisis, mostrado en el anexo 12.3.). Considerando lo siguiente: Las muestras de agua se recolectaron dos veces a la semana en cada sitio (lunes y jueves), o el mismo día en que se haya presentado una lluvia significativa. El muestreo se realizó invariablemente dentro del horario de 8 a 12 horas am, realizando 24 campañas durante el periodo de lluvias, como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7. Periodo de muestreo.

PERIODO DE MUESTREO EN CAUCES DE AGUA DE ZIMAPÁN, HIDALGO.			
Muestreo (M)	Fecha	Muestreo (M)	Fecha
M-1	10/07/2014	M-13	18/08/2014
M-2	14/07/2014	M-14	21/08/2014
M-3	17/07/2014	M-15	25/08/2014
M-4	21/07/2014	M-16	28/08/2014
M-5	24/07/2014	M-17	01/09/2014
M-6	28/07/2014	M-18	04/09/2014
M-7	31/07/2014	M-19	08/09/2014
M-8	01/08/2014	M-20	11/09/2014
M-9	04/08/2014	M-21	15/09/2014
M-10	07/08/2014	M-22	18/09/2014
M-11	11/08/2014	M-23	22/09/2014
M-12	14/08/2014	M-24	25/09/2014

7.3.3. Aforo de la corriente

Se midió el volumen de agua que pasa por la sección transversal de los sitios de muestreo por unidad de tiempo (caudal), con el fin de relacionarlo con el comportamiento, distribución y alcance de las concentraciones de los metales pesados

(relación concentración-escorrimento). Las secciones de aforo, y las fechas en las que se obtuvo la información, se muestran en el recuadro siguiente:

Cuadro 8. Estaciones y fechas de aforos en el distrito minero de Zimapán Hidalgo.

N	Fecha	Secciones de aforo y muestreo				
		A	B	C	D	E
1	10/07/2014					
2	14/07/2014					
3	17/07/2014					
4	21/07/2014					
5	24/07/2014					
6	28/07/2014					
7	31/07/2014					
8	01/08/2014					
9	04/08/2014	Puente Santiago	Jale Preisser	Jale Pal	Jale Los Gómez	Punto de salida 1
10	07/08/2014					
11	11/08/2014					
12	14/08/2014					
13	18/08/2014					
14	21/08/2014					
15	25/08/2014					
16	28/08/2014					
17	01/09/2014					
18	04/09/2014					
19	08/09/2014					
20	11/09/2014					
21	15/09/2014					
22	18/09/2014					
23	22/09/2014					
24	25/09/2014					

El método de aforo aplicado fue el de sección-velocidad, midiendo la velocidad por medio del método de flotador, el cual se describe a continuación:

El aforo se realizó en las cinco secciones de muestreo (A, B, C, D y E) establecidas en el cuadro 8; cada aforo se realizó aplicando el siguiente procedimiento:

- En cada caso se ubicó un tramo longitudinal de 10 metros de cauce, cuidando que el tramo fuera lo más recto y uniforme posible en cuanto a pendiente, ancho y rugosidad.
 - El tramo de cauce se dividió en 3 secciones transversales (inicial, media y final) sobre las cuales se midió la altura alcanzada por el espejo del flujo de agua.
 - La altura del espejo del agua en cada sección del cauce se midió cada 10 cm.
 - La medición de la altura del espejo de agua se realizó con una regla de madera de 1 m y una cinta métrica de 3 m.
 - La estimación de la velocidad del flujo, se realizó midiendo el tiempo requerido por una esfera de unicel del #3, para recorrer los 10 m del tramo de cauce.
 - Para tener mayor confiabilidad en la medición del tiempo de recorrido de la esfera la medición se repitió 10 veces en el mismo tramo de cauce con la ayuda de un cronómetro; y se obtuvo un promedio de tiempo y velocidad,
 - Los datos obtenidos de campo se registraron en el formato (libreta de campo) que se muestra en el Anexo 12.2. ; cabe destacar que en cada estación de aforo se utilizó un formato distinto.
 - Con la información de campo contenida en los formatos se elaboró la base de datos que permitió calcular el área de la sección transversal (m^2), velocidad media del tramo de cauce ($m s^{-1}$), y el gasto ($m^3 s^{-1}$) hidráulico medio diario para cada sección de aforo. Los datos de la sección transversal se utilizaron para realizar la representación visual de los cauces aforados ilustrado en la Figura 20 y Anexo 12.4.
- Cálculo del aforo.

Para el análisis de gabinete de los aforos realizados se utilizó el curso de “Aforadores de corrientes de agua”–IMTA EEA Santiago del Estero–Elaborado por: Ing. en Rec. Hídricos (M.Sc.) Mario Basán Nickisch, (2008). El “Método por secciones” fue el que se empleó, realizando algunas modificaciones ya que las velocidades de la corriente no se determinaron con un molinete:

Se calcularon los caudales parciales que pasan entre las verticales distribuidas cada 10 cm, para luego sumarlos y obtener el caudal total. Para ello se tomó como velocidad media de la sección (V_M) a la sumatoria de las velocidades parciales (V_P); y para el área total se utilizan las profundidades verticales (h) hacia ambos lados y las distancias de cada vertical medidas cada 10 cm. El esquema que ejemplifica lo anterior es:

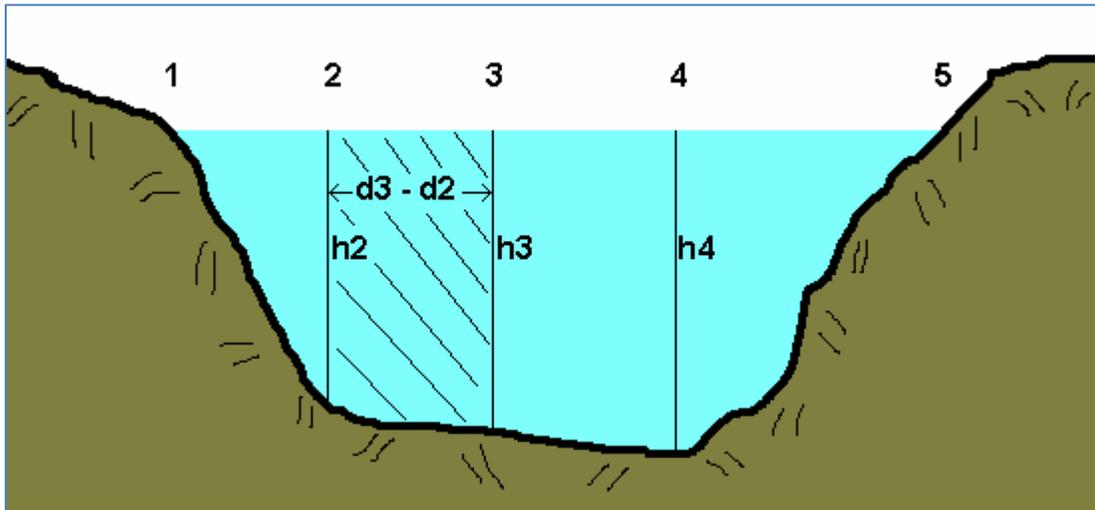


Figura 20: división del cauce en secciones para la aplicación del método de la semisección (Chávez, 2014).

Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

- Para calcular el área parcial

$$A_p = ((d_4 - d_3) + (d_3 - d_2)) * \left(\frac{h_2 + 2 * h_3 + h_4}{4} \right)$$

Donde:

A_p : Área parcial de la sección, expresada en m^2 .

d_4 : distancia horizontal de la profundidad 4, expresada en m.

d_3 : distancia horizontal de la profundidad 3, expresada en m.

d_2 : distancia horizontal de la profundidad 2, expresada en m.

h_4 : profundidad 4, expresada en m.

h_3 : profundidad 3, expresada en m.

h_2 : profundidad 2, expresada en m.

- Área Total

$$A_T = \sum_{i=1}^n A_p$$

Donde:

A_T : área total, expresada en m^2

- Velocidad parcial de la corriente:

$$V_p = t * d$$

Donde:

v_p : es la velocidad del agua, expresada en $m s^{-1}$, calculada para cada una de las 10 repeticiones del recorrido de la esfera.

t : es el tiempo en que la esfera recorre la distancia establecida, expresada en s.

d : distancia que debe recorrer la esfera de unicel, expresada en m.

- Velocidad media de la corriente:

$$V_M = \frac{\sum_1^{10} V_p}{10}$$

Donde:

V_M = Velocidad media de la corriente, expresada en m/s.

- Gasto Parcial:

$$Q_P = V_p * A_p$$

Donde:

Q_P : Gasto Parcial, expresado en $m^3 s^{-1}$

- Gasto Total:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_p$$

Donde:

Q_T : Gasto total, expresado en $m^3 s^{-1}$

7.3.4. Toma y manejo de muestras de agua

La toma de muestras se realizó en la parte media del flujo y a la mitad de la profundidad de este. Para reducir el número de muestras se ubicaron tramos del cauce en donde la composición del agua fuera uniforme con la profundidad y la sección trasversal, lo que permitió tomar una muestra por cada sitio logrando confiabilidad y representatividad de la sección muestreada.

Con base en lo establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001, los recipientes de recolección utilizados fueron botellas de 500 y 1000 mililitros de capacidad, y hechas de polietileno, las cuales están equipadas con un sistema de cierre hermético.

En la colecta de cada muestra de agua, la botella utilizada se enjuagó 3 veces con la misma agua a muestrear, con el fin de eliminar cualquier sustancia que no corresponda con la verdadera composición del agua bajo estudio; para el llenado de la botella se inclina en un ángulo de 45° con la horizontal; mientras la botella se llene, se debe mover lentamente contra la corriente para evitar que el agua que toca la mano del muestreador entre en ella; llenando una cuarta parte con el agua captada, posteriormente se coloca el tapón y se sacude la botella para lavar el interior, esta operación se repitió en tres ocasiones.

Después del lavado de la botella, se llena en su totalidad y se tapa herméticamente, tomando un mínimo de 500 mL de muestra, evitando la entrada de elementos extraños en la botella.

Custodia de la muestra: Los procedimientos establecidos por la APHA-AWWA-WPCF-1992 y la NMX-AA-051-SCFI-2001 dictaminan que las muestras deben ser transportadas al laboratorio en el menor tiempo posible después de su colecta.

Inmediatamente después de tomar la muestra se procedió a su identificación, colocando una tarjeta donde se anotó los siguientes datos requeridos:

- Entidad que solicitó el análisis.
- Personal que recolectó la muestra.

- Localización del sitio de captación.
- Punto de la fuente de agua donde se captó la muestra.
- Fecha y hora de la captación.
- Número o identificación de la muestra recolectada.

El transporte de las muestras se realizó en hieleras de resistencia satisfactorias las cuales mantenían el líquido a la temperatura adecuada y en condiciones seguras evitando rupturas o modificaciones de su condición durante el transporte al laboratorio.

Las muestras en todo momento, después de ser colectadas, en su traslado y en el laboratorio se mantuvieron en refrigeración a 4°C. El almacenamiento en refrigeración y en el traslado al laboratorio se aseguró que las muestras estuvieran bien tapadas, previendo cualquier contaminación proveniente del hielo derretido.

El tiempo de retención de la muestra entre la captación y el análisis en laboratorio exclusivamente para metales pesados no debe pasar de 24 horas, a excepción de que le sea ajustado el pH a 2 en las muestras con HNO₃ concentrado y sean almacenadas a 4°C; para este caso, el tiempo máximo de análisis puede ser de hasta 6 meses para metales pesados disueltos a excepción del mercurio.

7.3.5. Número de muestras de agua analizadas

Los muestreos realizados en el periodo de análisis, señalando la hora de la recolección de la muestra, así como el sitio y la fecha, se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Distribución espacial y temporal de las muestras tomadas durante la campaña 2014, en el cauce principal del río Zimapán.

Muestreo	Fecha	Sitio	Hora (am)												
M1	10/07/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M2	14/07/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M3	17/07/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M4	21/07/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M5	24/07/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M6	28/07/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M7	31/07/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M8	01/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M9	04/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M10	07/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M11	11/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M12	14/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M13	18/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00				
M14	21/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00	F	10:30		
M15	25/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00			G	11:00
M16	28/08/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00	F	10:30		
M17	01/09/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00			G	11:00
M18	04/09/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00	F	10:30		
M19	08/09/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00			G	11:00
M20	11/09/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00	F	10:30		
M21	15/09/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00			G	11:00
M22	18/09/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00	F	10:30		
M23	22/09/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00			G	11:00
M24	25/09/2014	A	08:00	B	08:30	C	09:00	D	09:30	E	10:00	F	10:30		

El análisis en laboratorio se realizó por continuamente conforme las muestras llegaban al laboratorio, analizando las muestras recolectadas previas al procedimiento en laboratorio.

Se manejaron dos repeticiones por cada muestra analizada; de estas concentraciones obtenidas. Antes de tomar las alícuotas respectivas las muestras se agitaron para homogenizar su composición. Se obtuvo un promedio que se utilizó para el manejo y análisis de la información, así como una desviación estándar para conocer la dispersión que presentan las concentraciones de las repeticiones respecto de la media obtenida.

Las concentraciones de metales pesados de cada sitio, en todo el periodo de muestreo, se presentan en el Anexo 12.1.

7.3.6. Análisis de muestras de agua en laboratorio

A las muestras colectadas se les agregaron 3-4 gotas de HNO_3 concentrado para estabilizar el pH a un valor inferior a 3 y se almacenaron en refrigeración.

Las concentraciones de cobre (Cu), plomo (Pb), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cadmio (Cd), se determinaron utilizando el método analítico recomendado por la norma oficial mexicana y NMX-AA-051-SCFI-2001 y por la EPA-Method-6010B, el cual es el de Espectrometría de absorción atómica en este método se utiliza un Espectrofotómetro de Absorción Atómica.



Figura 21. Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer.

Estos análisis se realizaron en el laboratorio de Química Ambiental, ubicado en el área de Edafología del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

De manera general se muestra el diagrama de flujo de la determinación de metales pesados por espectrometría de absorción atómica:

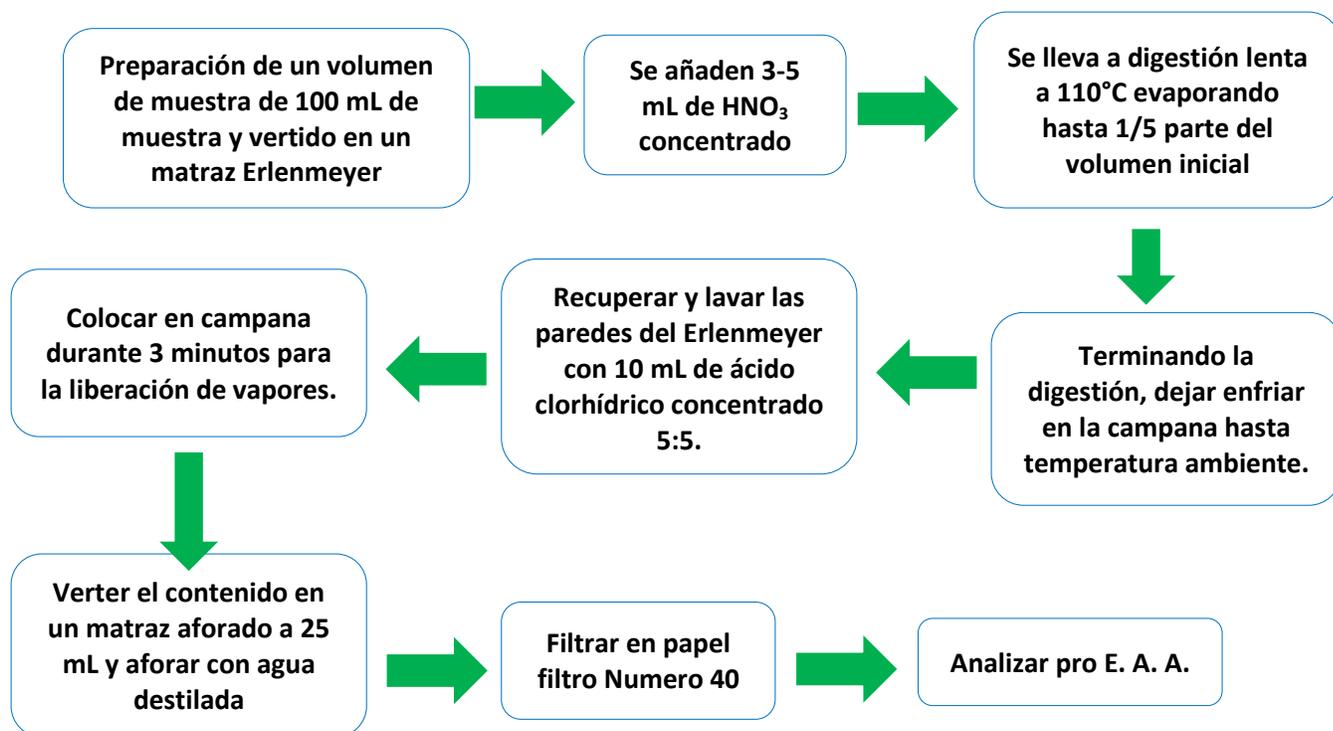


Figura 22. Diagrama de flujo general para la determinación de metales pesados por Espectrometría de absorción atómica.

7.3.7. Cálculo de la concentración de metales pesados

El Espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer) proporciona las concentraciones de metales pesados en mg L^{-1} ; sin embargo, estas concentraciones no son de la muestra total sino sólo de la utilizada para la lectura que se encontraba diluida, por lo que la concentración obtenida debe multiplicarse por la dilución efectuada durante el análisis y por la alícuota utilizada; para la obtención de los resultados se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración MP} \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] = \text{Lectura} \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] \times \frac{\text{Aforo antes del filtrado} [\text{ml}]}{\text{Volumen de muestra inicial} [\text{ml}]}$$

donde,

- MP: Metales pesados.
- Aforo antes del filtrado = 25 mL
- Volumen de muestra inicial (alícuota) = 100 mL

8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Acorde con la metodología y objetivos planteados en la presente investigación, se obtuvieron los siguientes resultados globales: gasto hidráulico diario y concentración de metales pesados por tramo de cauce.

8.1. Resultados de laboratorio y aforo de la corriente

8.1.1. Resultados del aforo de la corriente

La sección hidráulica y los formatos utilizados para la realización de los cálculos se muestran en el Anexo 12.2, los gastos ($L s^{-1}$) calculados con los aforos realizados en los sitios de muestreo se muestran a continuación:

Cuadro 10. Gasto hidráulico en los sitios de muestreo.

Mes de muestreo	Fecha	Muestreo	Gasto en $L s^{-1}$				Punto de salida 1
			Puente Santiago	Jale Preisser	Jale Pal	Jale Los Gómez	
Julio	10/07/2014	1	17.89	23.12	56.78	639	201.9
	14/07/2014	2	9.9	22.31	43.28	392	245.82
	17/07/2014	3	8.72	10.79	42.38	409	168.33
	21/07/2014	4	7.78	11.93	40.15	632	149.5
	24/07/2014	5	8.12	13.34	54.32	593	152.3
	28/07/2014	6	16.71	22.21	51.21	619	289.23
	31/07/2014	7	16.46	15.2	30.91	300	303.3
Agosto	01/08/2014	8	8.13	20.1	61	809	452.16
	04/08/2014	9	7.89	21.06	59.02	929	603.12
	07/08/2014	10	8.93	12.32	44.14	788	452
	11/08/2014	11	9.32	14.32	59.01	985	423
	14/08/2014	12	17.72	21.37	60.12	1032	512
	18/08/2014	13	9.05	9.33	42.12	986	606.2
	21/08/2014	14	11.1	10.07	40.06	782	574.08
	25/08/2014	15	16.11	19.19	61.71	759	401.23
	28/08/2014	16	17.12	20.22	50.14	748	432.06
	Septiembre	01/09/2014	17	27.525	20.14	81.92	1023
04/09/2014		18	67.89	23.17	89.98	890	473.32
08/09/2014		19	31.26	35.14	104.5	908	624.29
11/09/2014		20	72.34	45.19	100.87	975	520.14
15/09/2014		21	73.14	51.67	73.45	1132	621.45
18/09/2014		22	31.34	58.32	79.82	990	480
22/09/2014		23	35.43	56.63	102.64	1129	412.34
25/09/2014		24	63.21	63.12	93.91	897	589.07

El caudal o gasto hidráulico varía con la longitud del cauce por lo que se obtuvo un valor distinto en cada uno de los sitios de muestreo, observándose un incremento en el volumen conforme el escurrimiento avanza aguas abajo a partir del punto testigo, con excepción del punto de salida 1, en que se registra un gasto hidráulico siempre menor.

El incremento en el gasto hidráulico se puede atribuir a varios factores, como la descarga de agua residual de la zona urbana, el aporte de los afluentes secundarios algunos de los cuales provienen de los escurrimientos formados sobre los depósitos de residuos de minas ubicados en el área de drenaje.

Desde el punto de vista del balance hidrológico, el caudal también se incrementa en forma proporcional al área de captación de la cuenca, así mismo cuando la tasa de pérdida por infiltración en el cauce y la evaporación es menor a la tasa de aporte por escurrimiento superficial y subsuperficial.

En el caso de estudio también se observa un incremento significativo en la sección hidráulica del cauce que se analiza, destacando que las secciones hidráulicas más grandes se encuentran en el Jale Los Gómez y el Punto de Salida 1, siguiéndole en menor tamaño el Jale Pal y por ultimo siendo muy similares el Punto Testigo y el Jale Preisser.

En el jale Los Gómez el caudal llega con notable velocidad debido a que este punto es un canal abierto el cual suma el volumen de varios afluentes aguas arriba, razón por la que esta estación de aforo presenta el mayor gasto calculado, asumiendo que el aporte hidráulico es mayor que las pérdidas.

En la Figura 23, se muestra el salto hidráulico que se encuentra al pasar la sección de aforo, la cual ayuda a disminuir la velocidad de la corriente registrada en el siguiente tramo delimitado por el punto de salida 1.

En la sección hidráulica del punto de salida 1, se obtuvieron gastos hidráulicos menores durante toda la campaña de muestreo y aforo, lo cual se atribuye a errores en el desarrollo del aforo, pero también a la posible pérdida de caudal por infiltración en el

lecho del cauce, lo cual a su vez puede atribuirse al cambio de materiales geológicos y a la baja velocidad con que se desplaza el flujo de agua en este tramo.



Figura 23. Salto hidráulico Jale Los Gómez

8.2. Resultados de laboratorio por sitio de muestreo

Como se puede observar en los registros, el muestreo en los puntos de salida 2 y 3 (puntos F y G) comenzaron a partir del día número 14 con el siguiente sustento: al observar las concentraciones obtenidas en los análisis de laboratorio para el punto de salida 1 (punto E), se encontró una elevada concentración de metales pesados. Esto no permitía definir claramente el comportamiento de las cantidades de metales pesados en los cauces de agua al dejar atrás la zona de residuos de minas, razón por la cual se decidió tomar otra muestra 1000 metros más aguas abajo, generando así los puntos de salida 2 y 3. La toma de muestras en los puntos de salida 2 y 3 se realizó dos veces por semana alternado los días para cada punto de muestreo.

Se hizo análisis estadístico de los datos obtenidos en laboratorio utilizando el paquete estadístico SAS. Para todos los análisis estadísticos el criterio de significancia se estableció a $p < 0.05$, obteniéndose en todos los caso valores de $p < 0.001$ mostrando criterios altamente significativos. El análisis estadístico permitió determinar las medias aritméticas de las concentraciones para cada contaminante por sitio de muestreo, los resultados obtenidos con la corrida realizada se presenta en el cuadro siguiente como la media \pm desviación estándar:

Cuadro 11: Promedios de las concentraciones de metales pesados por cada sitio de muestreo determinadas con SAS.

SITIO DE MUESTREO	COBRE		PLOMO		HIERRO		MANGANESO		ZINC		CADMIO	
	Promedio	Desv.Est	Promedio	Desv.Est	Promedio	Desv.Est	Promedio	Desv.Est	Promedio	Desv.Est	Promedio	Desv.Est
Puente Santiago	0.011	±0.007	0.044	±0.014	0.194	±0.042	0.024	±0.018	0.059	±0.036	0.013	±0.007
Jale Preisser	0.027	±0.008	0.209	±0.023	0.759	±0.097	0.334	±0.031	0.710	±0.175	0.046	±0.006
Jale Pal	0.036	±0.003	0.275	±0.042	0.933	±0.158	0.395	±0.036	0.790	±0.133	0.065	±0.007
Jale Los Gómez	0.049	±0.007	0.577	±0.035	1.188	±0.060	0.418	±0.023	0.733	±0.151	0.080	±0.004
Punto de Salida 1	0.051	±0.009	0.574	±0.059	1.310	±0.063	0.439	±0.051	0.703	±0.138	0.069	±0.007
Punto de Salida 2	0.035	±0.008	0.349	±0.035	0.860	±0.090	0.298	±0.030	0.492	±0.094	0.039	±0.003
Punto de Salida 3	0.020	±0.003	0.283	±0.048	0.671	±0.091	0.244	±0.028	0.351	±0.049	0.021	±0.003

***p<0.001

Para evaluar la existencia de diferencias significativas (agrupamiento Tukey) entre las concentraciones medias para cada uno de los metales en las estaciones de muestreo, se utilizó un análisis de varianza (ANDEVA), el cual asume que los datos se ajustan una distribución normal y que las poblaciones presentan homogeneidad de varianza. Por lo anterior, antes de aplicar el análisis se hizo necesario aplicar el test de normalidad ($w=0.938441$) de Kolmogorov-Smirnov y el test de homogeneidad de varianza de Bartlett.

El análisis estadístico ayudó a determinar el comportamiento de los metales pesados en los sitios de muestreo, el cual presentó un patrón de comportamiento muy similar para los 6 elementos analizados, mostrando un proceso acumulativo del metal sobre el avance del flujo desde su comienzo en el Puente Santiago hasta el jale Los Gómez y el Punto de Salida 1 en donde se alcanza las máximas concentraciones para todos los metales. Aguas abajo de los sitios antes mencionados comienza su disminución en el nivel de concentración. La influencia directa del vertido de los lixiviados a los flujos superficiales analizados disminuyó; este comportamiento se observa de manera más ilustrativa en el subtema de variación espacial de la presente investigación.

8.3. Determinación de la pluma de concentración en el tramo de cauce

Para observar la variación espacial de los metales pesados en las estaciones de muestreo, se elaboraron mapas de distribución, representando las concentraciones de

los metales con puntos de proporcionalidad. Cabe resaltar que la dinámica de metales pesados entre las estaciones al día de hoy está sujeta a variaciones espaciales y temporales, como resultado de los cambios en la magnitud de la escorrentía terrestre, erosión del suelo y fuentes de contaminación metálica.

A continuación se muestra el comportamiento de cada metal en el área de estudio.

Distribución espacial del cobre. Las concentraciones presentan una marcada homogeneidad y poco aumento en sus niveles de sitio a sitio muestreado, hasta llegar a un máximo de 0.04 mg L^{-1} en los depósitos los Gómez y después comienza su disminución en el nivel de concentración. Para todos los casos, las concentraciones son inferiores a los límites máximos permisibles (Figura 24).

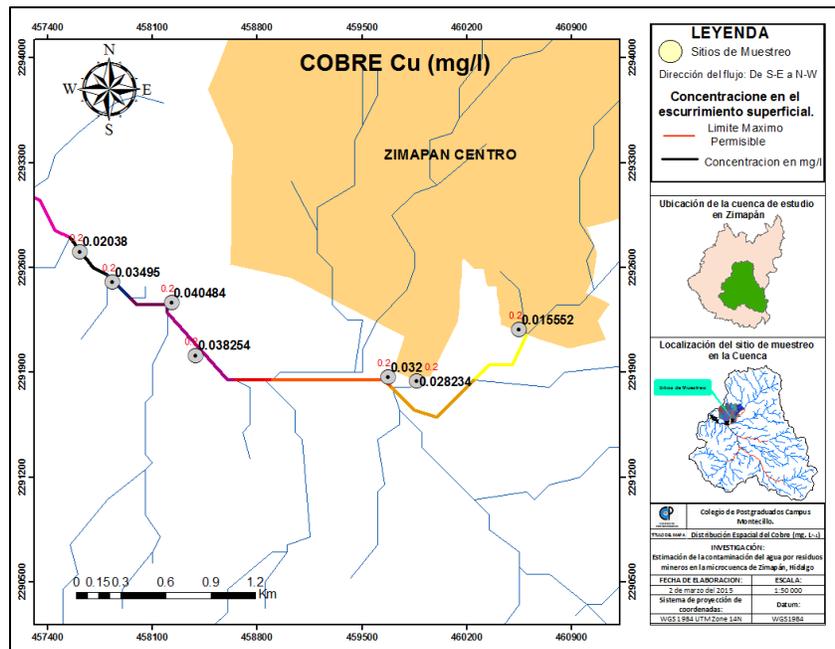


Figura 24: Distribución espacial del cobre en los distintos sitios de muestreo.

Distribución espacial del plomo: Se observan tendencias hacia concentraciones altas superiores a los límites permisibles en todas las estaciones a excepción del Puente Santiago, alcanzando la máxima concentración de 0.5156 mg L^{-1} en el Punto de Salida 1 y después comienza a disminuir (Figura 25).

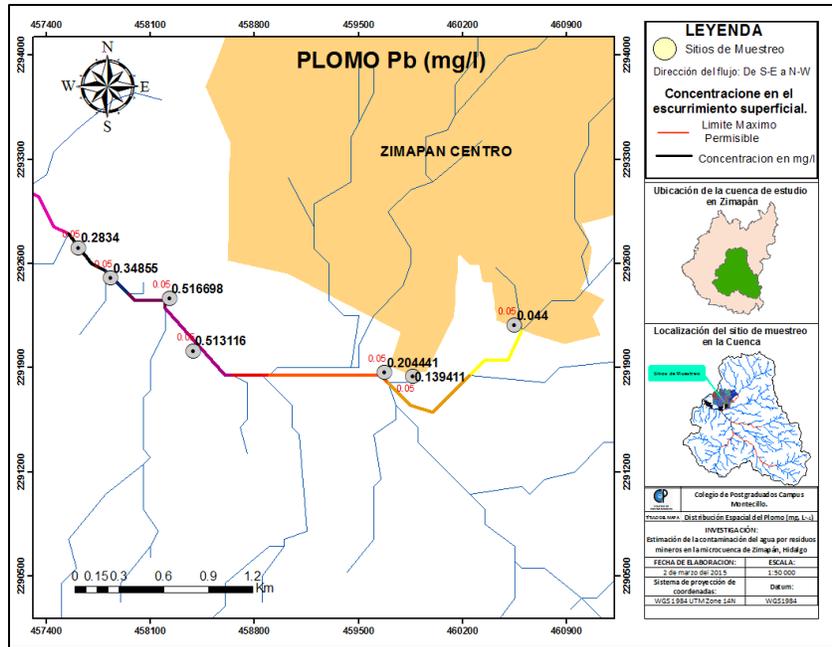


Figura 25: Distribución espacial del plomo en los distintos sitios de muestreo.

Distribución espacial del hierro: Comienza un rápido incremento a partir de los depósitos Preisser, alcanzando la máxima concentración en el Punto de salida 1 de 0.96 mg L^{-1} , a partir de ahí comienza a disminuir en el cauce; sin embargo, de manera general se mantienen los niveles en condiciones normales de concentración (Figura, 26).

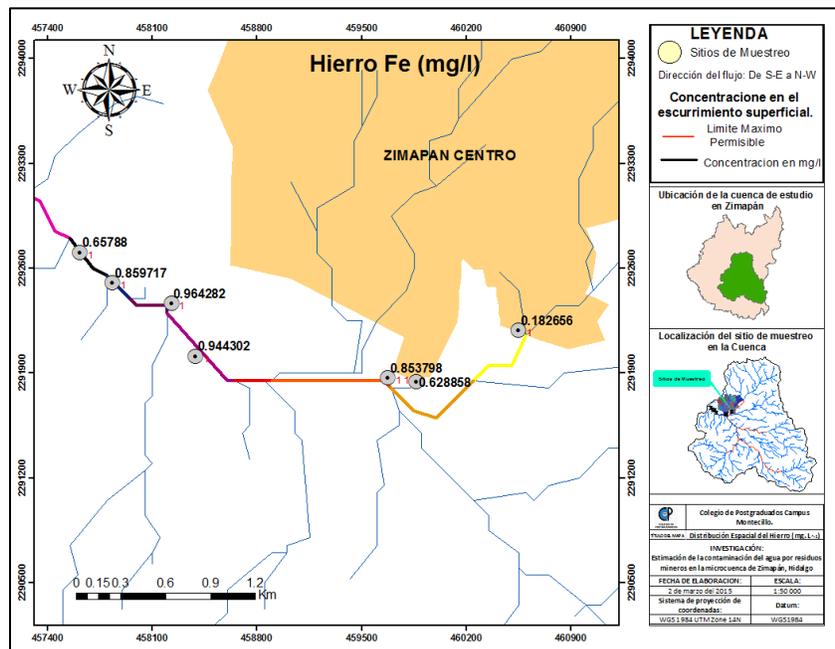


Figura 26: Distribución espacial del hierro en los distintos sitios de muestreo.

Distribución espacial del Mn: La distribución de Mn en el área de estudio es relativamente uniforme en todos los sitios de muestreo con promedios entre 0.279 a 0.253 mg L⁻¹ llegando a un máximo de concentración en el Punto de Salida 1 de 0.307 mg L⁻¹ (Figura 27).

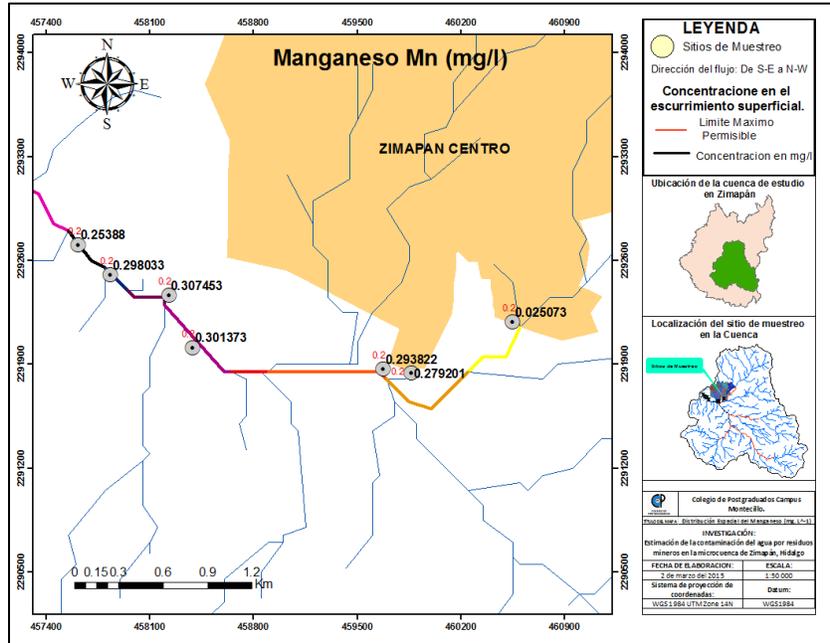


Figura 27: Distribución espacial del manganeso en los distintos sitios de muestreo.

Distribución espacial del zinc: Éste metal presenta homogeneidad en el nivel de concentración a partir del jale Preisser con un rango que va desde 0.405 a 0.344 mg L⁻¹, aunque no se sobrepasan los límites máximos permisibles para ninguno de los sitios muestreados (Figura 28).

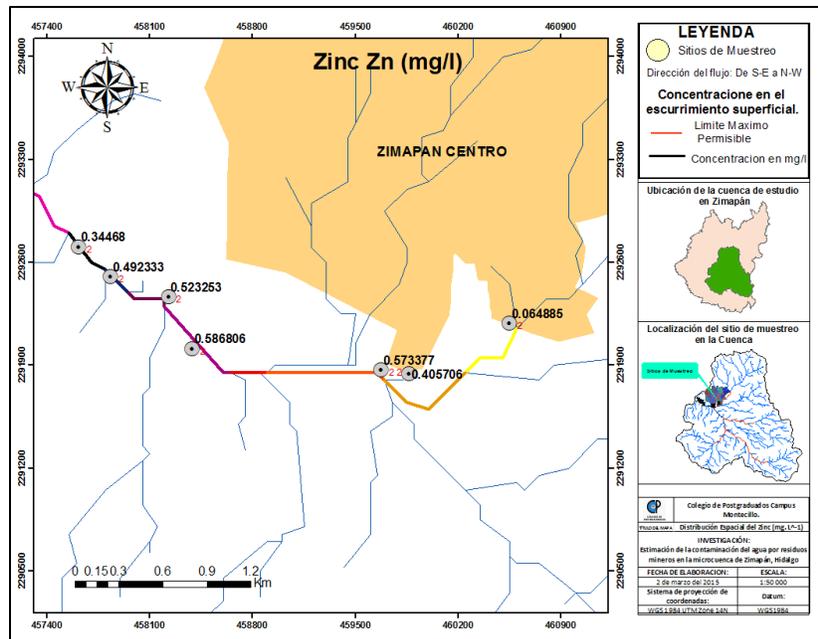


Figura 28: Distribución espacial del zinc en los distintos sitios de muestreo.

Distribución espacial del cadmio: Los niveles de Cd encontrados oscilaron entre los 0.015 y 0.021 mg L⁻¹, que en todos los caso son superiores a los límites máximos permisibles, incluyendo el punto testigo. Este metal, registró concentraciones con una distribución poco homogénea a lo largo de todas los sitios, donde el promedio más alto se determinó en el sitio residuos Los Gómez, hecho que puede ser explicado por el aporte directo del jale en el sitio y por el arrastre de dicho metal en el flujo que se conduce sobre el cauce (Figura 29).

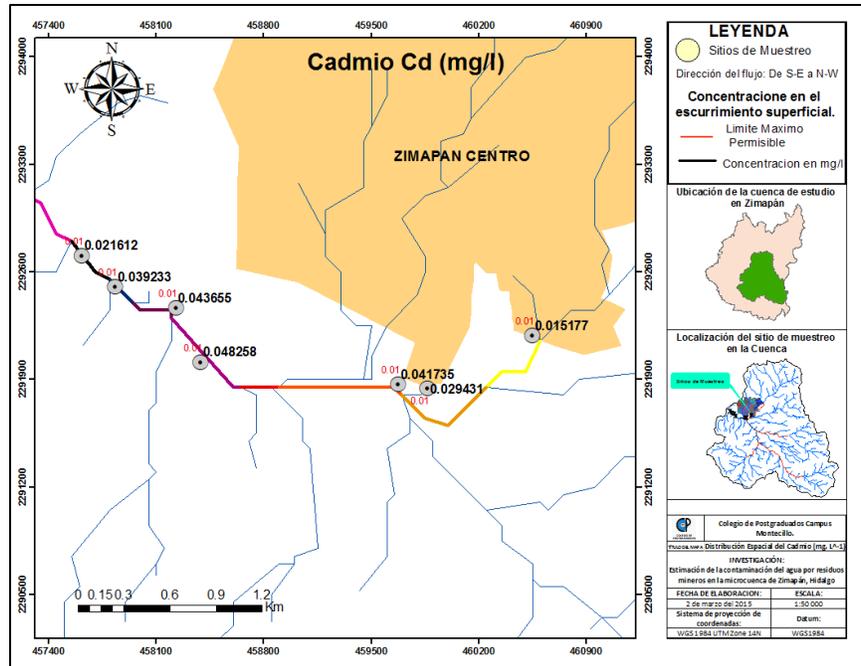


Figura 29: Distribución espacial del cadmio en los distintos sitios de muestreo.

- Determinación de la pluma de contaminación

Con la prueba de Tukey obtenida en el análisis de varianza se logró identificar si existen diferencias estadísticas significativas entre los 7 sitios de muestreo y con ello plantear si los puntos de salida muestreados, en comparación con el punto testigo (Puente Santiago), presentan valores numéricos de concentración superiores o inferiores a este último.

El fundamento con el que se utilizó la prueba de Tukey para determinar la persistencia en el medio de los metales pesados es el siguiente:

- Si en los puntos de salida se presentaran diferencias estadísticas significativas con valores de la media superiores al punto testigo, significaría que la pluma de contaminación del metal en cuestión no se logró identificar ya que la persistencia en el medio avanza aguas abajo fuera del alcance del muestreo actual;
- Si por el contrario en los puntos de salida no existiesen diferencias estadísticas significativas en comparación con el punto testigo o éstas fueran inferiores a dicho sitio de muestreo, significaría que la pluma de contaminación no excede

1.5 km aguas abajo de la última presa de residuos de mina muestreado (Los Gómez).

- Alcance de las concentraciones de cobre

Con base en los valores mostrados en la Figura 30, se observan diferencias estadísticas significativas en todas las concentraciones de los 7 sitios de muestreo, las diferencias estadísticas no son absolutas ya que numéricamente los valores de las medias son muy cercanos unos con otros. Esta información permite concluir que el avance y persistencia del cobre en los cauces de agua alcanza una distancia superior a los 1.5 km aguas abajo del último jale analizado (Jale Los Gómez), debido a que la concentración en el Punto testigo (Puente Santiago) es menor que la encontrada en el Punto de Salida 3.

- Alcance de las concentraciones de plomo

En la Figura 31 se muestra que existen tres grupos de medias con diferencias estadísticas significativas, haciendo notar que las concentraciones entre los Residuos de minas Preisser y Pal, y los Puntos de Salida 2 y 3 no tienen diferencias significativas, demostrando que el punto de salida 3 aun contiene elevadas concentraciones de plomo iguales a las encontradas en los puntos de drenaje de los residuos de minas; lo que demuestra que el plomo es altamente persistente en el ambiente y es un elemento ocupacional.

De igual manera, con esta información estadística se afirma que la pluma de contaminación del plomo en los cauces de agua, alcanza una distancia superior a los 1.5 km aguas abajo del jale Los Gómez, debido a que la concentración en el Punto testigo (Puente Santiago) es mucho menor que la encontrada en el Punto de Salida 3.

- Alcance de las concentraciones de hierro

Este metal presentó concentraciones con pocas diferencias estadísticas significativas en varios de sus puntos (Figura 32), observando que los sitios con mayor concentración y sin diferencias significativas son los residuos de minas Pal, Los Gómez y el Punto de Salida 1. Aunque es un metal no excedió los límites máximos permisibles si es

persistente en el ambiente proyectando un alcance que supera los 1.5 km aguas abajo del jale Los Gómez.

- Alcance de las concentraciones de manganeso

Del análisis estadístico realizado sobre concentraciones de manganeso (Figura 33), se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en las concentraciones entre el Puente Santiago y el Punto de salida 3, que demuestran que el manganeso es un contaminante altamente persistente en medios acuosos con una amplia pluma de contaminación que supera 1.5 km aguas abajo del último jale analizado.

- Alcance de las concentraciones de zinc

La Figura 34 muestra que existen diferencias estadísticas significativas entre el Puente Santiago y el Punto de Salida 3, sin embargo estas diferencias no son absolutas, lo que indica que los niveles de concentración entre estos dos sitios son muy cercanas y que aunque el avance del zinc supera los 1.5 km aguas abajo después del jale Los Gómez, la persistencia del metal en el agua ya no avanzará por una larga distancia.

- Alcance de las concentraciones de cadmio

El análisis estadístico realizado (Figura 35) demuestra que los depósitos de residuos mineros son una fuente directa de contaminación por cadmio a los flujos de agua, observando que este metal tiene una persistencia prolongada en el cauce, avanzando aguas abajo de manera similar que los otros metales analizados; estadísticamente el punto testigo y el Punto de salida 3 tienen diferencias significativas, lo que lleva a concluir que la pluma de contaminación es superior a 1.5 km aguas abajo de la fuente contaminante.

8.4. Influencia de los depósitos de residuos de minas en los niveles de concentración de los metales pesados

- Comportamiento del cobre

En la Figura 30 se observa que existe poco aporte por parte de los depósitos a los cauces de agua, presentando un comportamiento homogéneo y similar a lo largo del

flujo, teniendo por tanto, concentraciones inferiores a los límites permisibles establecidos, esto se debe a que el metal es poco soluble en agua, encontrándose mayormente como precipitado insoluble (hidróxido, fosfato o sulfato) absorbido el material particulado inorgánicos y orgánicos; esta insolubilidad se debe a que el ion libre en el agua es bajo, en comparación con la concentración de cobre asociado con los sedimentos suspendidos y de fondo, por lo que el cobre tiende a precipitarse. Una vez en el agua, la mayor parte de este cobre se adhiere rápidamente a partículas o se convierte a otras formas que se depositan en el fondo del cauce. Esto puede limitar la exposición al cobre a menos que los sedimentos se agiten.

Evidentemente los resultados mostraron concentraciones de cobre diluido en los cauces analizados, dicho metal en dilución normalmente está presente como ion cúprico, el cual puede ser transportado en el agua de superficie ya sea en la forma de compuestos de cobre o cobre libre o, con más probabilidad, como cobre unido a partículas suspendidas en el agua, que como se encontró en la presente investigación, pueden avanzar distancia prolongadas aguas debajo de donde se realizó el vertido.

- Comportamiento del plomo

Los resultados de la investigación (Figura 31) demuestran altas concentraciones de Plomo disueltas en los flujos de agua, contaminación que evidentemente fue aportada por los depósitos residuales de las minas y que además muestran un proceso acumulativo del metal sobre el avance del flujo. Aun sabiendo que el plomo es un metal pesado el cual en su forma elemental no se disuelve en agua en condiciones normales; cuando se pone en contacto con aire húmedo (condición que se presenta mayormente en temporada de lluvias), la reactividad con el agua aumenta, formándose en la superficie del metal una pequeña capa (PbO) que reacciona con el agua, convirtiéndose en hidróxido de plomo (Pb(OH)₂) y volviéndose altamente soluble (situación que explica las altas concentraciones de este metal encontradas en los cauces analizados):



Otras formas similares en las que el plomo se encuentra soluble es cuando forma complejos de PbCO_3 o $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2$, además también suele reaccionar con compuestos orgánicos e inorgánicos.

- Comportamiento del hierro

Aunque el hierro es un metal muy poco soluble, las concentraciones encontradas en los flujos de agua analizados (Figura 32) son altas, mostrando un visible aporte proveniente de los lixiviados de los residuos de minas y un arrastre del metal sobre el avance del flujo. Este comportamiento se presenta principalmente por las condiciones redox sobre el catión al encontrarse en contacto con el agua, ya que este metal en su forma reducida (Fe^{2+}) es más soluble que su forma oxidada (Fe^{3+}). De igual manera, cuando los sulfuros existentes en los residuos mineros se ponen en contacto con el agua se oxidan a sulfatos, esta oxidación provoca la unión con el catión metálico formando compuestos como FeSO_4 facilitando así la adsorción con partículas pequeñas en el agua las cuales pueden ser arrastradas por el flujo.

- Comportamiento del manganeso

En los resultados mostrados en la Figura 33 podemos observar que el manganeso es un elemento que está disuelto y en altas concentraciones en los cauces analizados, situación que se fundamenta debido a que éste es un metal que al igual que el hierro se ve influenciado en su forma soluble por las condiciones redox sobre el catión al estar en contacto con el agua, el cual puede encontrarse en más de un estado de valencia, pero de manera general su forma reducida (Mn^{2+}) es más soluble que su forma oxidada (Mn^{4+}) encontrándose prioritariamente en forma de pequeñas partículas en el agua, las cuales pueden ser arrastradas por el flujo y avanzar grandes distancias.

- Comportamiento del zinc

El análisis estadístico muestra (Figura 34) concentraciones de zinc con bajo aporte por parte de los depósitos residuales, debido a que este metal en su forma elemental no reacciona con las moléculas de agua, sino que depende de la temperatura y del pH del agua en cuestión y debido a que el pH de los flujos analizados es neutro a básico, el

zinc es poco soluble. Sin embargo, las concentraciones encontradas en los flujos analizados se deben principalmente a que el zinc puede formar compuestos con otras sustancias las cuales forman partículas solubles que avanzan con el cauce, algunos ejemplos de estos complejos son: cloruro-cinc $[ZnCl]^+$ y $[ZnCl_2]^{2+}$.

- Comportamiento del Cadmio

El cadmio es un elemento con alta afinidad a la disolución al formar compuestos con otros minerales existentes en el agua; este metal tiende a formar complejos principalmente con los sulfuros lo que lo hacen aún más soluble, ya que en esta forma es fácilmente adsorbido por partículas suspendidas en el agua y logra así alcanzar largas distancias; esto explica las altas concentraciones encontradas en los cauces de los sitios analizados y el largo alcance de la pluma de contaminación, ya que los residuos de minas tienen altas concentraciones de sulfuros que al unirse al cadmio forman $CdSO_4$ y con esta estructura avanzan fácilmente con el flujo.

8.5. Valoración de la calidad del agua con base a la normatividad ambiental vigente

La base para la búsqueda y el análisis de la normatividad utilizada en el presente trabajo de investigación fue, el ubicar los criterios de calidad para fuentes de abastecimiento de agua propuestos por la normatividad mexicana para concentraciones de metales pesados en cauces naturales de aguas superficiales.

Entendiendo como límite máximo permisible el valor o intervalo expresado en unidades de concentración, cantidad de materia o unidades específicas, asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en aguas naturales superficiales, descargas de agua residual y aguas tratadas. Estos valores están consignados en los criterios ecológicos para uso o aprovechamiento del agua (NMX-AA-051-SCFI-2001).

La normatividad y reglamentación actual en la cual se basa la presente investigación para determinar si los resultados de las concentraciones de metales pesados en las muestras de agua se encuentran dentro de los límites máximos permisibles son:

- Estándares Nacionales de calidad ambiental para agua en México.

- Criterios Ecológicos de Calidad del Agua Publicados en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989.
- NOM-001SEMARNAT
- NOM-127-SSA1-1994

De acuerdo con lo establecido en los lineamientos legales anteriores se elaboró un cuadro comparativo (Cuadro 12), con las concentraciones permisibles que se señalan en cada norma y reglamento (ya que estos valores suelen variar de documento a documento) con el objetivo de obtener la información más completa y utilizarla como base comparativa y aplicarla a los resultados obtenidos en las muestras de agua analizadas.

Cuadro 12. Límites máximos permisibles para los contaminantes

COMPUESTO O ELEMENTO	CRITERIOS ECOLÓGICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA (D.O.F. 13 DE DICIEMBRE DE 1989)				NOM 001-SEMARNAT (mg L ⁻¹)		ESTÁNDARES NACIONALES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA (mg L ⁻¹)		NOM-127-SSA1-1994 (mg L ⁻¹)
	Fuente de abastecimiento de agua potable	Recreativo con contacto primario	Riego agrícola	Pecuario	Riego agrícola	Uso público urbano	Recreativo con contacto primario	Agua para riego, consumo crudo y bebida de animales	Agua para consumo humano
COBRE		-	-	-	4.00	4.00	2.00	0.2	2.00
PLOMO	0.05	-	5.00	0.1	0.50	0.20	0.01	0.05	0.01
HIERRO	0.3	-	5.00	-	-	-	0.30	1.00	0.3
MANGANESO	0.1	-	-	-	-	-	0.10	0.20	0.15
ZINC	5.0	-	2.0	50.0	10.00	10.00	3.00	2-24	5.00
CADMIO	0.01	-	0.01	0.02	0.20	0.10	0.01	0.01	0.005

Analizando las concentraciones señaladas en el Cuadro 12, la información más completa y que coincide con el uso que se le dan a los cauces de agua con los que se trabajaron, es la que establece los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, en su apartado Agua para riego, consumo crudo y bebida de animales.

Por lo que con base al análisis anterior, los límites máximos permisibles utilizados como referencia para la presente investigación son los establecidos por dichos estándares nacionales.

Los estándares nacionales de calidad ambiental para agua presentan como límites máximos permisibles, en cauces de agua superficiales utilizados para riego, consumo crudo y bebida de animales, las siguientes concentraciones:

- Propuesta Nacional para límites máximos permisibles en cobre.

Se establece una concentración para el cobre de 0.2 mg L^{-1} , para aguas destinadas al riego tomando como base de investigación lo realizado por la FAO, lo cual es una de las guías que cuenta con criterios más comúnmente utilizados por distintos países, para formular los estándares de Calidad Ambiental. Regularmente las concentraciones recomendadas para bebidas de animales suele ser un poco más elevada, sin embargo esto varía por muchos factores, como el consumo diario de agua por el animal y el peso del mismo, etc., por lo que se toma como base de análisis los límites máximos permisibles para riego.

- Propuesta Nacional para límites máximos permisibles en plomo.

Se formula una concentración de plomo de 0.05 mg L^{-1} para aguas destinadas a la Bebida de animales ya que el plomo es uno de los metales más tóxicos en bajas concentraciones. Este elemento es acumulativo en el organismo del animal, se acumula en los riñones, hígado y huesos, produciendo también reducción del crecimiento y desarrollo del animal. Dejando claro que los efectos tóxicos dependen de muchos factores, entre los cuales se encuentra el consumo diario de agua por el animal y el peso del mismo.

- Propuesta Nacional para límites máximos permisibles en hierro.

Se establece el valor de 1 mg L^{-1} al hierro, este valor lo establece la Ley General de Aguas en su clase III, correspondiente a aguas para riego de vegetales de Consumo Crudo y bebidas de animales.

- Propuesta Nacional para límites máximos permisibles en manganeso.

Se considera como límite una concentración de 0.05-0.2 mg L⁻¹ de manganeso en aguas destinadas a la bebida de animales. Este valor lo establece la FAO, tiene un amplio margen de seguridad, se basa en concentraciones generalmente encontradas en aguas subterráneas y superficiales aptas para el consumo animal y no representan necesariamente los niveles de tolerancia de los animales. El rango en el que se encuentran los valores de tolerancia indica que por lo general es tóxico en suelos ácidos desde unas cuantas décimas hasta unos pocos mg L⁻¹.

- Propuesta Nacional para límites máximos permisibles en zinc.

La concentración de zinc de 2-24 mg L⁻¹ se considera como límite superior para aguas destinadas a la bebida de animales y al riego agrícola, este valor lo establece la FAO la cual tiene un amplio margen de seguridad, este valor se basa en concentraciones generalmente encontradas en aguas superficiales aptas para el consumo animal y no representan necesariamente los niveles de tolerancia de los animales. Dado que los niveles sin peligro dependen de muchos factores.

- Propuesta Nacional para límites máximos permisibles en cadmio.

Se establece una concentración de 0.01 mg L⁻¹ de cadmio. Para aguas destinadas al riego este valor se sustenta en la investigación elaborada por la FAO, bajo criterios toxicológicos de su alta concentración en vegetales y en el suelo. Se recomiendan límites bajos debido a su acumulación potencial en suelos y plantas que pueden ser tóxicos para seres humanos; los límites máximos para bebida de animales suele variar en gran medida debido a que esto depende de muchos factores, entre los cuales se encuentra el consumo diario de agua por el animal y el peso del mismo, por lo cual se toma como referencia el valor de concentración establecido para riego agrícola.

Realizando el análisis estadístico se logró identificar los metales pesados que exceden los límites máximos permisibles, y los sitios que presentan las concentraciones más elevadas de dichos contaminantes.

8.5.1. Valoración del cobre

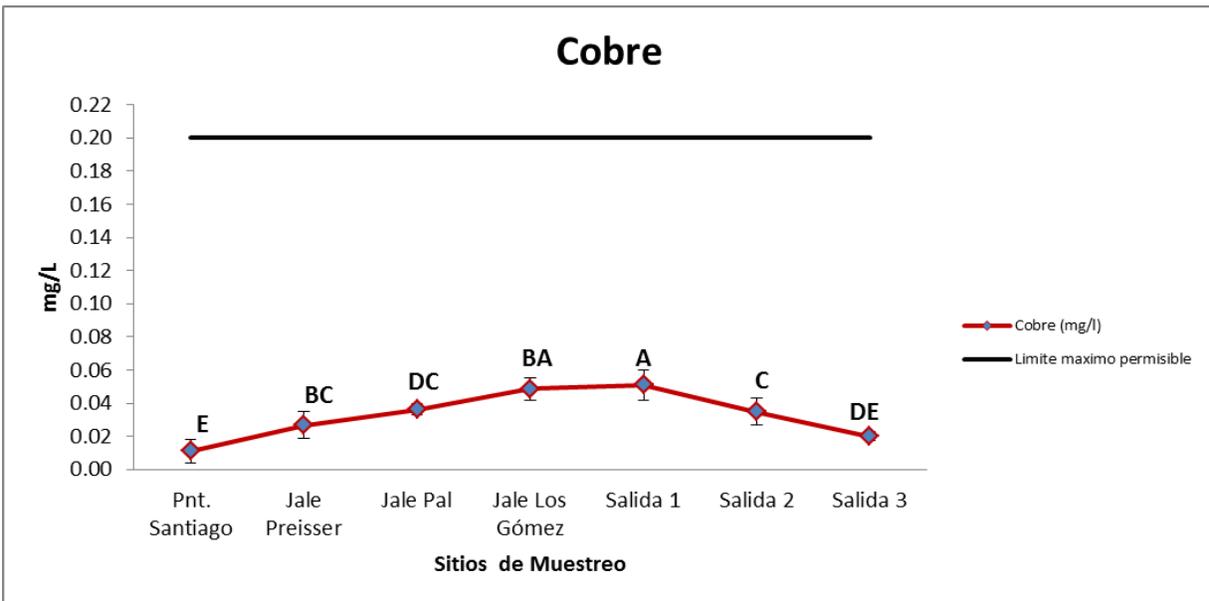


Figura 30: Comportamiento del Cu en los sitios de muestreo.

*Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

Con relación al límite máximo permisible, las concentraciones de cobre en el área de estudio son inferiores, por lo que se determina que los residuos de minas no representa una fuente de contaminación por cobre en los escurrimientos superficiales de Zimapán.

De igual manera, se puede observar que el aporte directo por los residuos de minas es mínimo ya que no se muestra un incremento significativo en las concentraciones entre el punto testigo y los depósitos residuales mineros.

8.5.2. Valoración del plomo

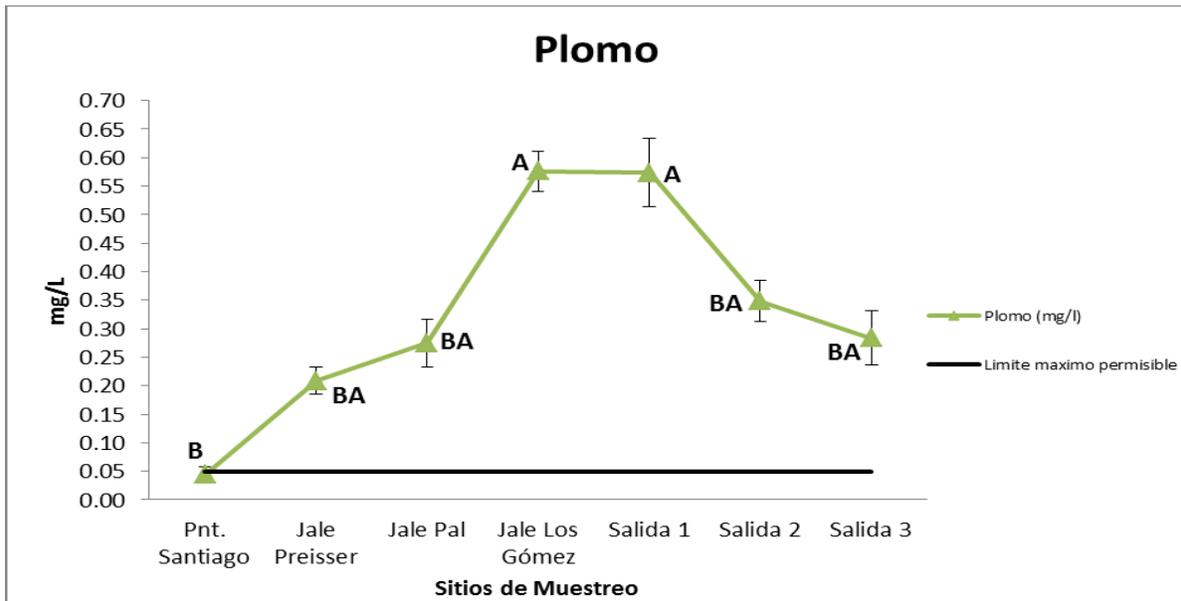


Figura 31: Comportamiento del Pb en los sitios de muestreo
*Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

Los depósitos del distrito minero de Zimapán, Hidalgo, son una importante fuente de contaminación por plomo, superando considerablemente los límites máximos permisibles establecidos y en consecuencia poniendo en riesgo la salud y estabilidad ambiental de la región. La gráfica muestra que en el Puente Santiago se encuentran concentraciones que llegan casi al límite de tolerancia, situación que sucede debido al aporte de agua residual que las comunidades y el municipio vierten a los cauces. Sin embargo, las concentraciones se incrementan de manera importante cuando el avance del cauce entra a áreas de influencia de los depósitos residuales.

8.5.3. Valoración del hierro

Con base en la gráfica se establece que los depósitos residuales del distrito minero de Zimapán Hidalgo no son una fuente de contaminación por hierro; aunque en el jale Los Gómez y en el Punto de Salida 1 se supera el límite máximo permisible, al avanzar 500 metros más aguas abajo la concentración se reduce por debajo del límite.

Aunque si existe aporte de los residuos de minas, no es en concentraciones que pongan en peligro el sistema ambiental del área de estudio.



Figura 32: Comportamiento del Fe en los sitios de muestreo
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

8.5.4. Valoración del manganeso

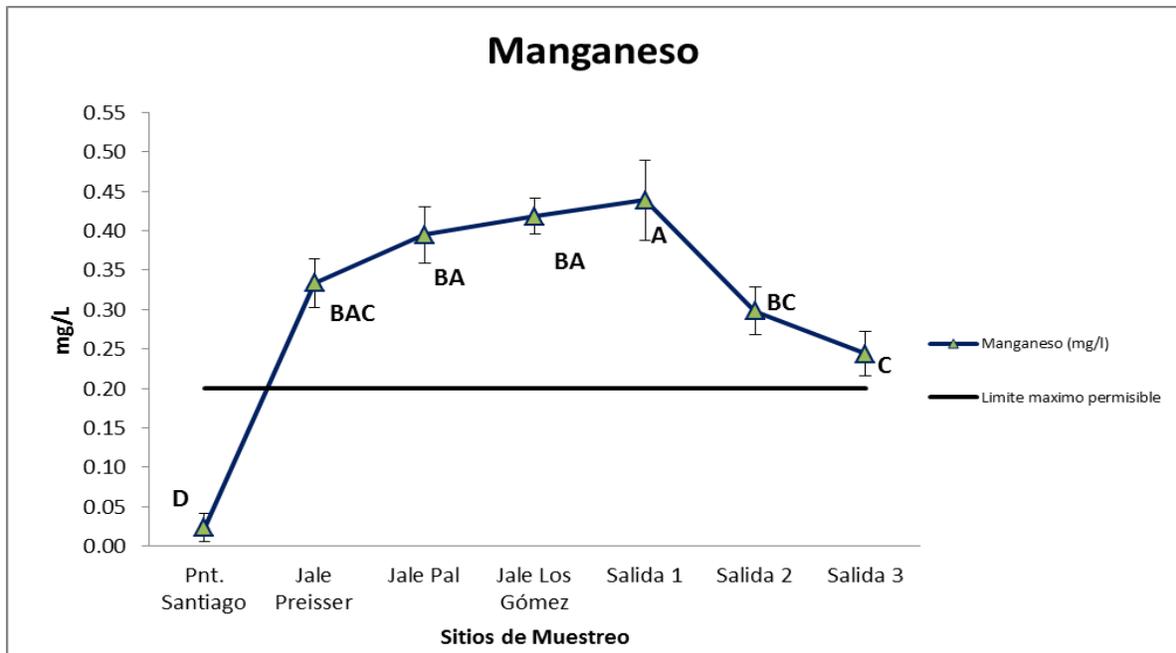


Figura 33: Comportamiento del Mn en los sitios de muestreo.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

Los depósitos de residuos mineros representan una fuente de contaminación de manganeso para el área de estudio, ya que el aporte a los cauces de agua sobrepasa los límites máximos permisibles.

Evidentemente los residuos de minas proporcionan cantidades considerables a los flujos de agua ya que la concentración al pasar del punto testigo al área de residuos de minas, se incrementa de manera significativa.

8.5.5. Valoración del zinc

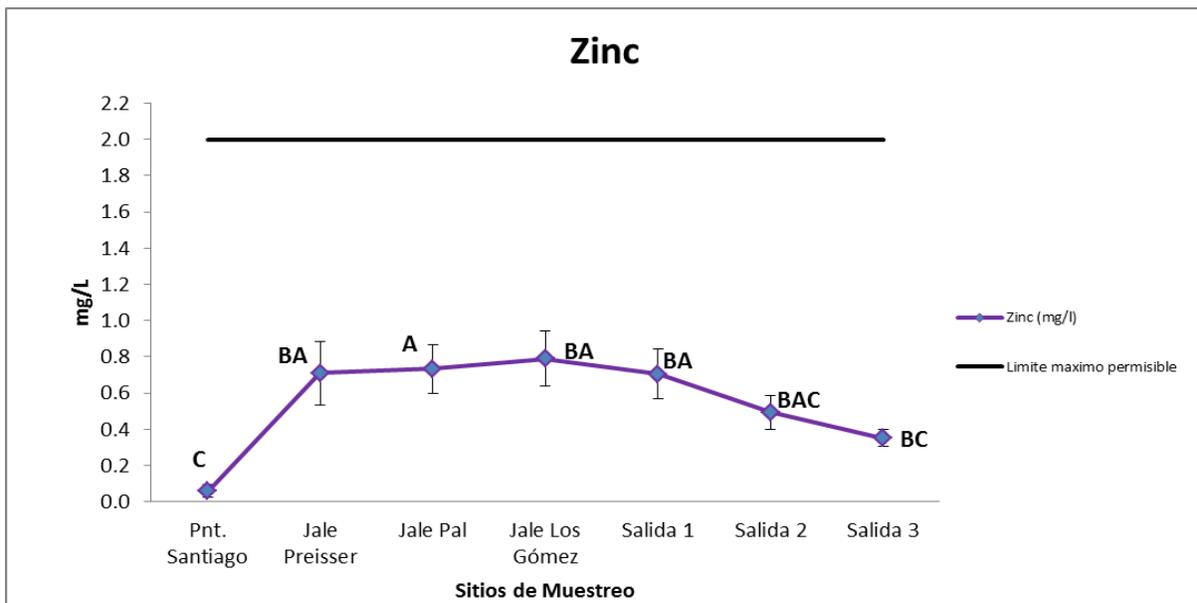


Figura 34: Comportamiento del Zn en los sitios de muestreo.

*Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

De acuerdo a los análisis realizados, los cauces de agua que se conducen por el distrito minero de Zimapán no presentan cantidades elevadas de zinc, encontrándose muy por debajo de los límites máximos permisibles de referencia. Por lo que se establece que los residuos de minas no son una fuente de contaminación por zinc para los escurrimientos superficiales.

8.5.6. Valoración del cadmio

Con base a las concentraciones encontradas en las muestras de agua, los aportes directos de cadmio a los cauces superficiales se da en altas concentraciones

sobrepasando significativamente los límites máximos permisibles estipulado por la normativa ambiental de referencia, por lo que se afirma que los depósitos de residuos encontrados en el distrito minero de Zimapán son una fuente importante de contaminación por cadmio sobre cauces de agua encontrados en el lugar.

Aunque es evidente que el agua que se conduce por los cauces analizados antes de entrar al área de residuos de minas ya contiene concentraciones de cadmio que sobrepasan los límites permisibles, seguramente causado por el vertido directo de agua residual proveniente de las comunidades aguas arriba y del municipio; al avanzar aguas abajo y entrar en contacto con los depósitos residuales mineros, las concentraciones se elevan haciendo notar la influencia que tienen los depósitos residuales mineros en la contaminación por cadmio encontrada.

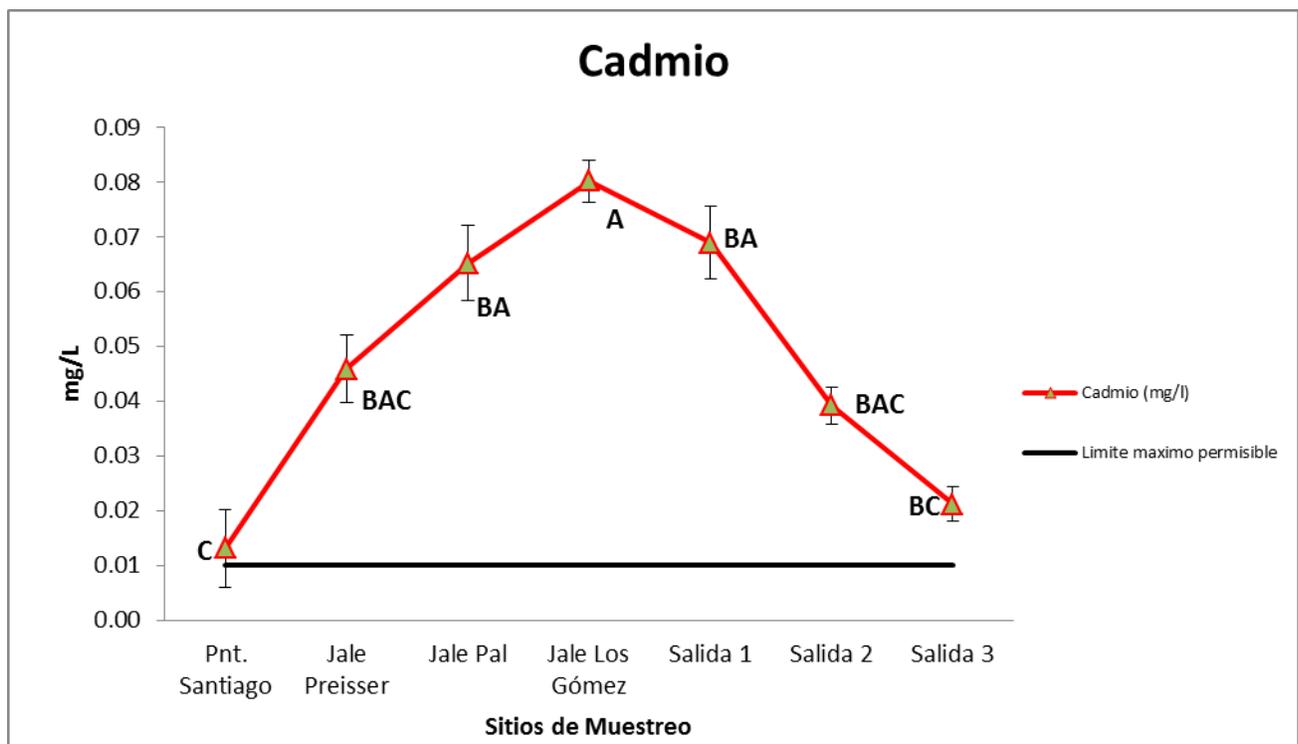


Figura 35: Comportamiento del Cd en los sitios de muestreo.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

8.5.7. Análisis global de la calidad del agua

De acuerdo con los resultados obtenidos en laboratorio y con el análisis estadístico, los elementos que se consideran como contaminantes debido a que sobrepasan los límites

máximos permisibles estipulados por las normas ambientales usadas para esta investigación, son: **plomo, manganeso y cadmio.**

Para analizar el impacto que causan estos elementos contaminantes en los cauces analizados, es necesario visualizar la información como cuenca (Figura 16) y así definir los factores que se encuentran en riesgo dentro de la misma, y los factores que explican los resultados obtenidos, como la procedencia y origen de los cauces, las concentraciones encontradas en el punto testigo, y el uso productivo que se le está dando a la región.

La razón por la cual las concentraciones obtenidas en el punto testigo (Puente Santiago) presentaron valores que en algunos casos sobrepasaban los límites máximos permisibles como ocurre con el cadmio; o bien llegando al límite de lo permisible se observó con el plomo. Esto ocurre debido al vertido de aguas residuales de las comunidades existentes aguas arriba y provenientes del mismo municipio.

Además de las comunidades que influyen en los flujos de agua no existe otro factor que intervenga antropogénicamente en las concentraciones encontradas, recalcando que en el área de estudio no se observa otro distrito minero más que el ubicado en la zona urbana de Zimapán, situación que proporciona datos confiables en las concentraciones determinadas.

8.6. Análisis de la relación: concentración – escurrimiento

1.- Elementos gráficos concentración-escurrecimiento: El análisis del comportamiento de los escurrimientos determinados con los aforos y de las concentraciones a través del tiempo que duro el muestreo se realizó solamente para los tres metales que sobrepasan los límites máximos permisibles como es el plomo, manganeso y cadmio, los cuales (según los resultados obtenidos en esta investigación), presentan actualmente un factor contaminante en la región. Este análisis se muestra a continuación realizando una clasificación por sitio de muestreo. En los resultados se presentan las diferencias estadísticas significativas entre muestreos para un mismo elemento (Prueba de Tukey representa con letras mayúsculas) y en un mismo sitio de muestreo; procedimiento que se realizó con un criterio de significancia de $p < 0.05$,

obteniéndose para todos los caso valores de $p < 0.001$ mostrando criterios altamente significativos.

2.- Coeficiente de correlación: El plomo, manganeso y cadmio, están en constante relación con el caudal presente en los escurrimientos, ya que un flujo mayor o menor, constante o inconstante provocará comportamientos variables en las concentraciones, en su alcance y bioaccesibilidad. Por lo que podríamos decir que la concentración de elementos contaminantes en el flujo es directamente proporcional al volumen de escurrimiento superficial, situación que se comprobó realizando un análisis de correlación de Pearson entre estas dos variables, resultados que se muestran a continuación para cada elemento en conjunto con el grafico concentración-escurrimiento.

Para los coeficientes de correlación calculados en cada uno de los metales que están provocando contaminación en los flujos superficiales y su relación con los escurrimientos superficiales calculados con los aforos, se encontró que solo en algunos sitios de muestreo existe una correlación que presenta una alta significancia entre estas dos matrices con valores de $p < 0.05$. Este hecho puede ser explicado debido a que las esorrentías aforadas no siempre referían escurrimientos suscitados en cada estación de muestreo, sino, en varias ocasiones la precipitación se daba aguas arriba lo que provocaba una fuerte avenida aguas abajo en el sitio muestreado pero sin que hubiese existido escurrimiento directo en jale ubicado en el sitio (como se cree, basado en los resultados obtenidos, sucede en el jale Los Gómez); otra razón es que existe vertidos de agua directo por parte de la zona urbana de Zimapán (principalmente en el Puente Santiago), lo que hace variar la relación en cuestión; estos hechos hacen disminuir el grado de confiabilidad de los coeficientes de correlación obtenidos entre estas 2 variables. Aun así existen datos que presentan alto grado de significancia como por ejemplo está el cadmio en el depósito de residuos Preisser o el plomo en el Punto de Salida 1.

- **Relación de la concentración – escurrimiento en el Puente Santiago**

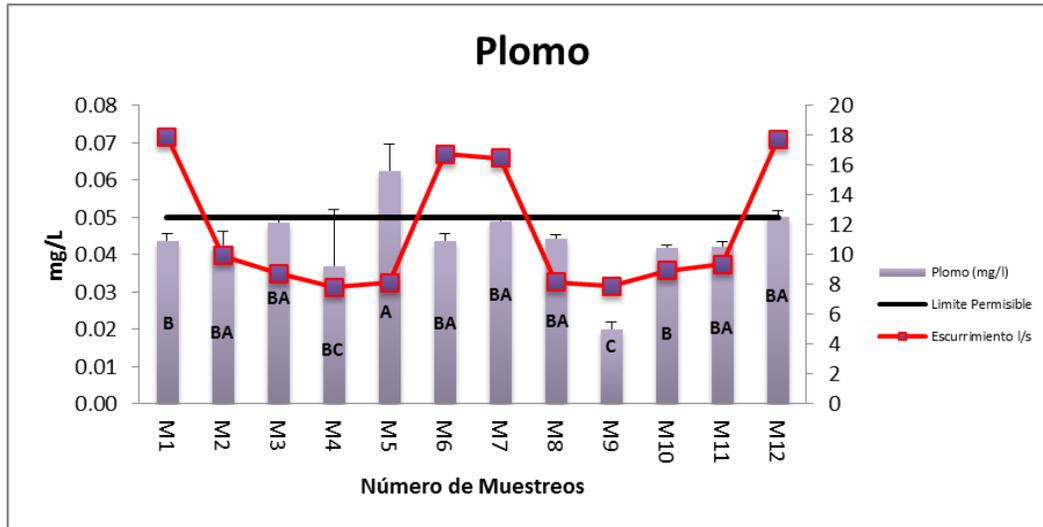


Figura 36: Plomo-Escurrimiento en el Puente Santiago.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

Aunque el coeficiente presenta una correlación lineal positiva ($\rho_{xy} = 0.2331$) se encontró que el resultado presenta una baja significancia ($p = 0.4658$) entre estas dos variables con valores de $p > 0.05$. La concentración de Pb en el agua no solo depende de la descarga de escurrimientos, sino hay otros factores que pueden estar influenciando tal variación.

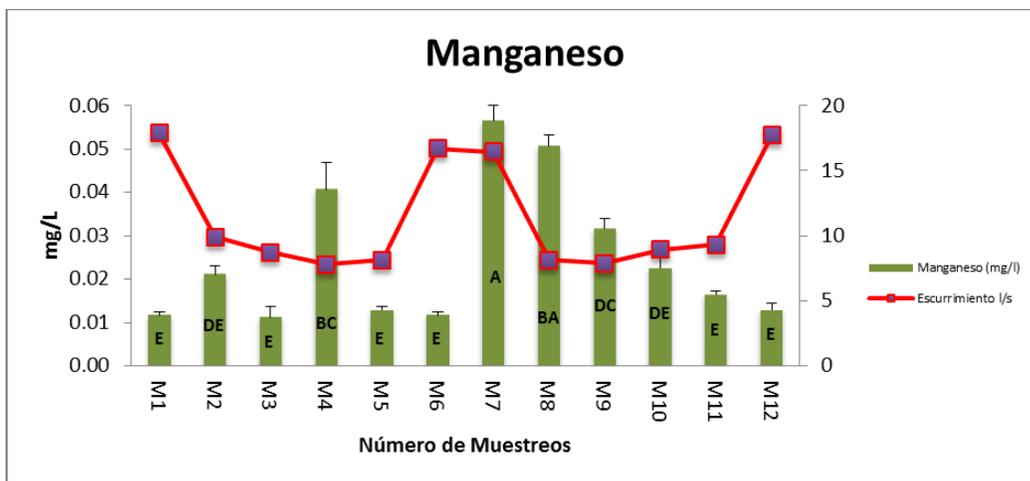


Figura 37: Manganeso-Escurrimiento en el Puente Santiago.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente presenta una correlación lineal positiva ($\rho_{xy} = 0.1711$) pero el resultado presenta una baja significancia entre estas dos variables con valores de $p > 0.05$, ($p =$

0.5949). Una correlación aceptable es de 0.75 o más, con bajo valor de p; los valores observados en este caso implican que no hay relación directa entre escurrimientos y concentración de Mn en el agua muestreada. Esto implica la existencia de otros factores que afectan la variación de la concentración.

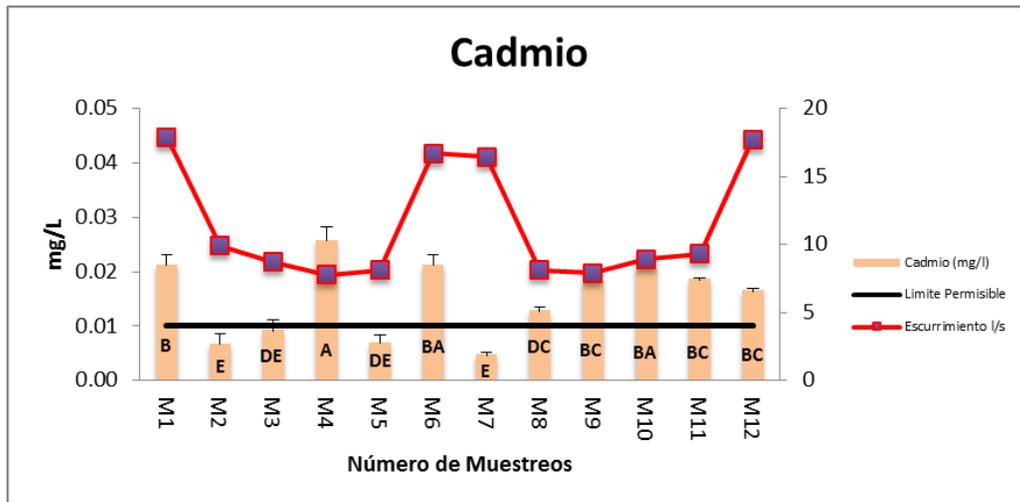


Figura 38: Cadmio-Escurrimiento en el Puente Santiago.
*Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente de correlación es positiva ($\rho_{xy} = 0.0690$) pero con una baja significancia entre estas dos variables con valores de $p > 0.05$ ($p = 0.8312$).

De manera general en las gráficas 36, 37 y 38 se observa que existen diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de los metales a excepción del cadmio el cual presenta un comportamiento más homogéneo en todo el muestreo teniendo varios datos que no presentan diferencias significativas. En general muestra una tendencia directamente proporcional, es decir, cada que el gasto se incrementa también se incrementa las concentraciones encontradas en el cauce.

- **Relación de la concentración – escurrimiento en el Jale Preisser**

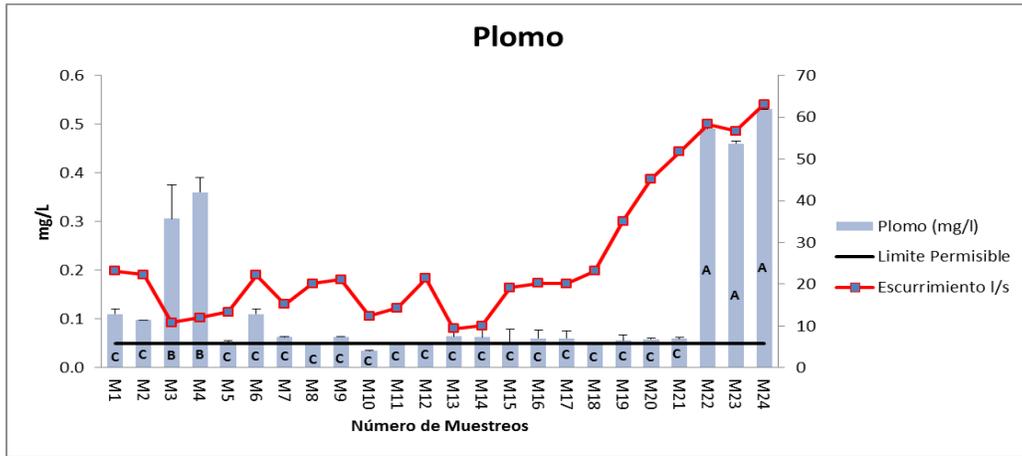


Figura 39: Plomo-Escurrecimiento en el Jale Preisser.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

La correlación fue positiva ($\rho_{xy}= 0.600$; $p=0.0019$) obteniéndose una alta significación estadística entre estas dos variables con valores de $p<0.05$.

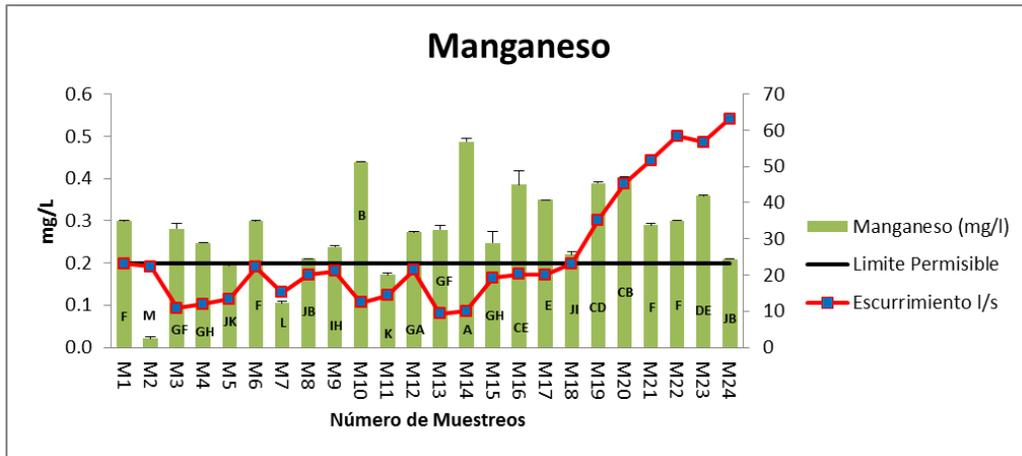


Figura 40: Manganeso-Escurrecimiento en el Jale Preisser.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

La correlación de Pearson dio un valor positivo ($\rho_{xy}= 0.1027$) pero el resultado presenta una baja significancia entre estas dos variables con valores de $p > 0.05$ ($p= 0.6328$).

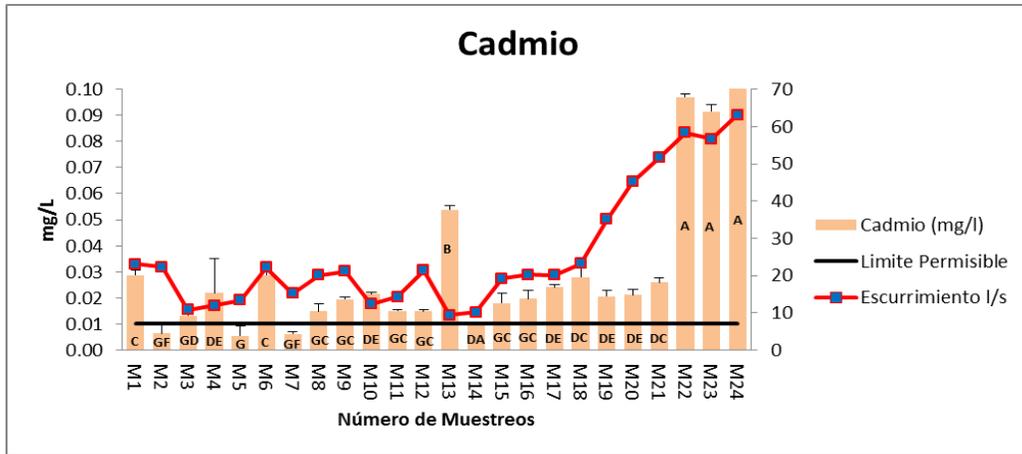


Figura 41: Cadmio-Escurrecimiento en el Jale Preisser.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

Se observó una correlación lineal positiva obteniéndose una alta significación estadística entre estas dos variables con valores de $p < 0.05$.

De manera general, las gráficas 39, 40 y 41 para el Jale Preisser, el plomo y el cadmio presentaron comportamientos homogéneos, mostrando pocas diferencias significativas en todo el ciclo de muestreo, aportando concentraciones muy similares a los cauces de agua y solo se observó un incremento significativo para finales de septiembre cuando los escurrimientos superficiales aumentaron su gasto considerablemente. Al contrario del manganeso que muestra datos menos homogéneos y poco confiables basándose en el coeficiente de correlación del Pearson.

- **Relación de la concentración – escurrimiento en los residuos Pal**

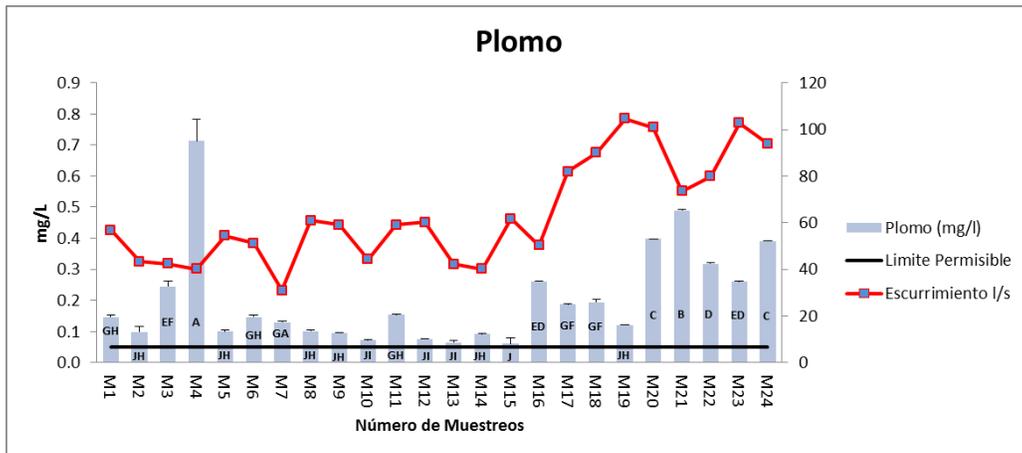


Figura 42: Plomo-Escurrecimiento en el Jale Pal.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente presenta una correlación lineal positiva ($\rho_{xy}= 0.2296$) obteniéndose una alta significación estadística ($p= 0.028$) entre estas dos variables con valores de $p<0.05$.

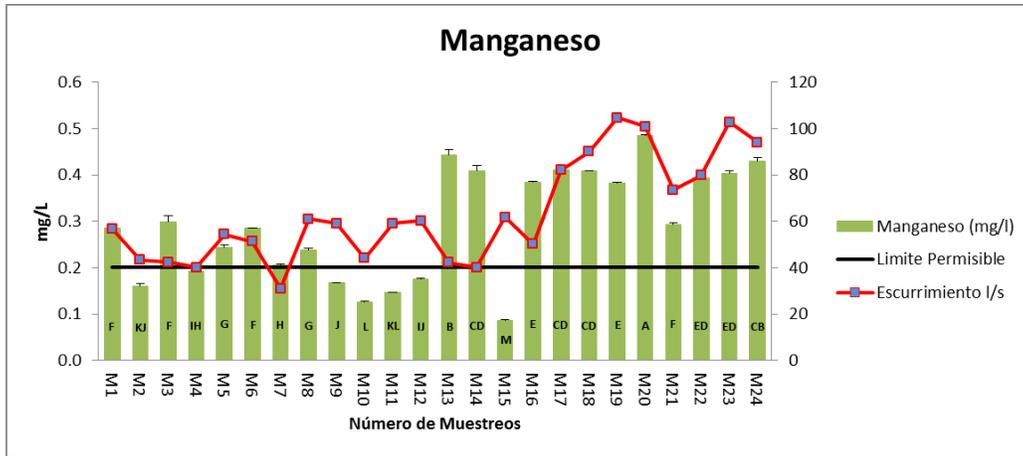


Figura 43: Manganeseo-Escorrentamiento en el Jale Pal.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente de Pearson fue bajo ($\rho_{xy}= 0.5430$) alta significación estadística ($p= 0.0061$) entre estas dos variables con valores de $p<0.05$.

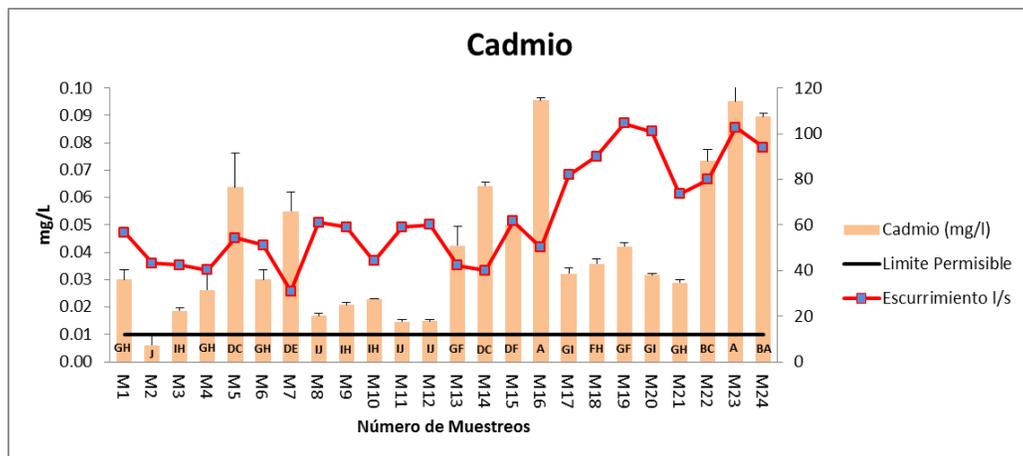


Figura 44: Cadmio-Escorrentamiento en el Jale Pal.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente presenta una correlación lineal ($\rho_{xy}= 0.2875$) positiva obteniéndose una alta significación estadística ($p= 0.0173$) entre estas dos variables con valores de $p<0.05$. Las variaciones en la concentración posiblemente dependen de la descarga de los lixiviados y su mezcla con el agua.

Conforme a lo que se observa en las gráficas 42, 43 y 44, el comportamiento en el jale Pal mostro no ser homogéneo como en los dos sitios anteriores, debido probablemente al incremento en el gasto de los flujos analizados, ya que la sección transversal en este sitio de muestreo es mayor, logrando así avenidas mayor y velocidad de flujo superior a comparación del Puente Santiago y de los residuos Preisser, que provocan una variación notable en las concentraciones, sin embargo, de forma general se observa una tendencia a la alza entre el escurrimiento y la concentración para cada metal. Estos resultados muestras que a diferencia del Jale Preisser, la correlación de Pearson para los tres metales presenta alta significancia lo que hace confiables los resultados obtenidos y determinado que existe una relación lineal positiva entre concentración escurrimiento para este sitio de muestreo.

- **Relación de la concentración – escurrimiento en el Jale Los Gómez**

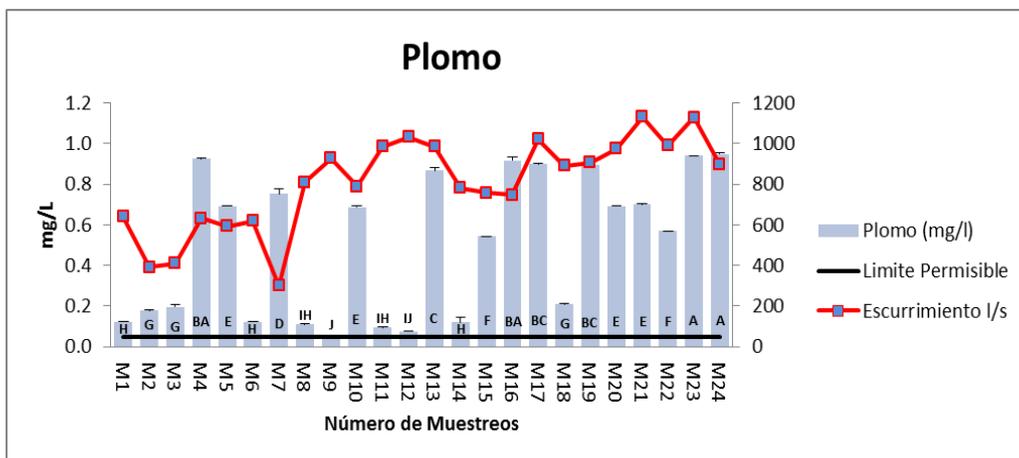


Figura 45: Plomo-Escurrimiento en el Jale Los Gómez.

*Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente de Pearson fue positivo ($\rho_{xy} = 0.1947$) pero el resultado presenta una baja significancia ($p = 0.3618$) entre estas dos variables con valores de $p > 0.05$.

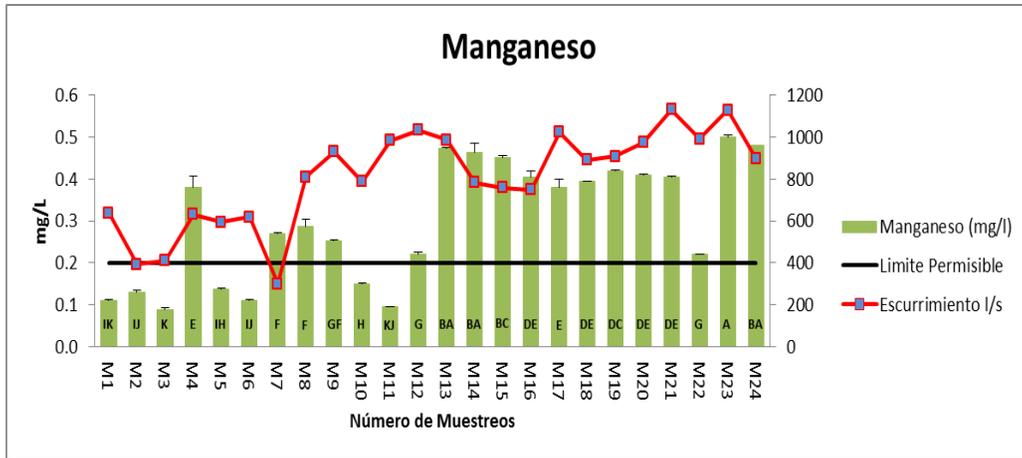


Figura 46: Manganeseo-Escorrentamiento en el Jale Los Gómez.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente presenta una correlación lineal positiva ($\rho_{xy} = 0.488$) obteniéndose una alta significación estadística ($p = 0.0154$) entre estas dos variables con valores de $p < 0.05$.

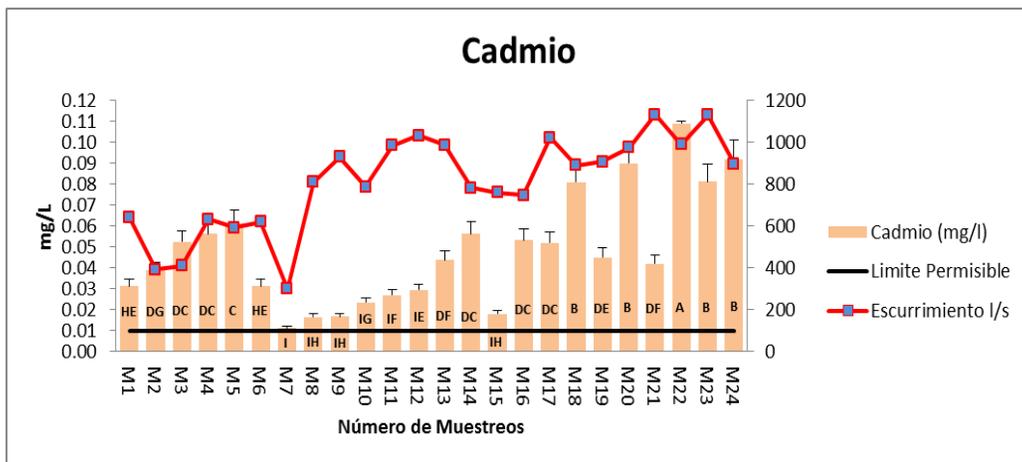


Figura 47. Cadmio-Escorrentamiento en el Jale Los Gómez.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

La correlación fue baja ($\rho_{xy} = 0.3235$) con baja significancia ($p = 0.123$) entre estas dos variables con valores de $p > 0.05$, aparentemente la concentración del Cd no solo depende del sitio de muestreo.

En las gráficas 45, 46 y 47, el comportamiento en las concentraciones de los tres elementos contaminantes se da de manera similar, encontrando evidentes variaciones con un comportamiento heterogéneo en dichos niveles de concentración, que se justifica gracias al gasto que se da en este cauce, el cual presenta un flujo que llega

hasta los 1132 L s⁻¹ con una velocidad y una sección transversal superior a los otros sitios de muestreo. Situación que provoca que aunque los coeficientes de correlación de Pearson presenten una relación lineal positiva, los valores no sean confiables debido a un criterio de significancia obtenido de $p > 0.05$.

La correlación lineal positiva obtenida con los cálculos en SAS sustenta el comportamiento gráfico el cual muestra que la concentración es directamente proporcional al caudal presente en el sitio de muestreo, ya que ambas variables se van incrementado conforme avanza el periodo de análisis.

- **Relación de la concentración – escurrimiento en el Punto de Salida 1**

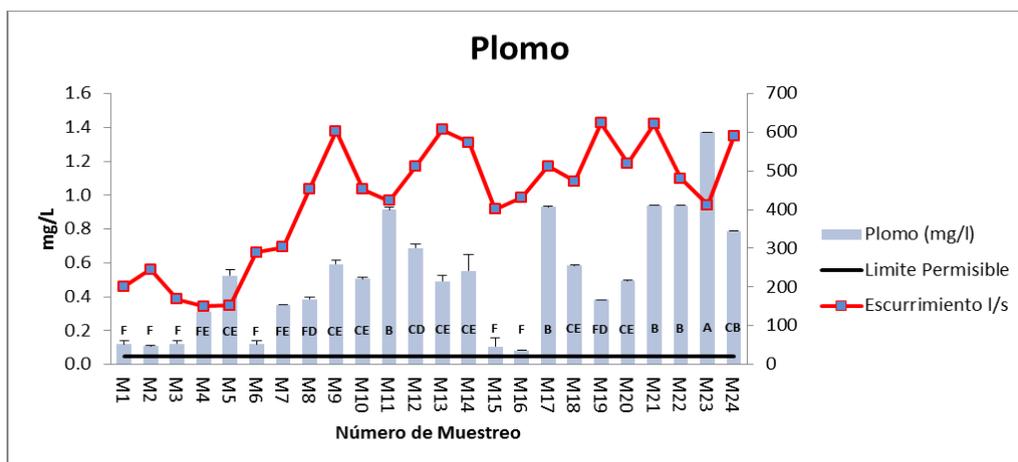


Figura 48. Plomo-Escurrecimiento en el Punto de Salida 1.
 *Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente presenta baja correlación lineal positiva ($\rho_{xy} = 0.4736$) obteniéndose una alta significación estadística ($p = 0.0149$) entre estas dos variables con valores de $p < 0.05$.

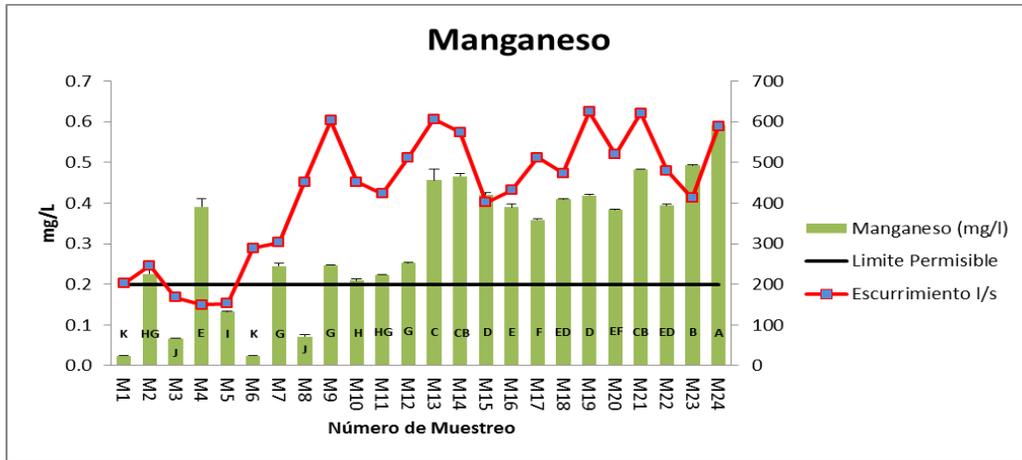


Figura 49. Manganeseo-Escorrimento en el Punto de Salida 1.
*Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente presenta una correlación lineal positiva ($\rho_{xy}= 0.6192$) obteniéndose una alta significación estadística ($p= 0.0013$) entre estas dos variables con valores de $p<0.05$.

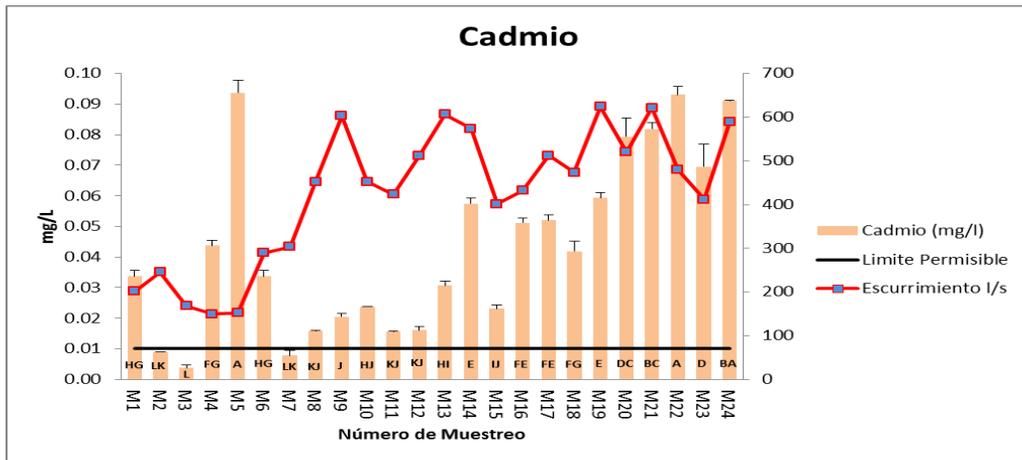


Figura 50. Cadmio-Escorrimento en el Punto de Salida 1.
*Prueba de Tukey: Simbolizada con letras mayúsculas en la gráfica.

El coeficiente presenta baja correlación lineal positiva ($\rho_{xy}= 0.2704$) con alta significación estadística ($p= 0.020$) entre estas dos variables con valores de $p<0.05$.

El análisis de las concentraciones a través del tiempo en el Punto de Salida 1 mostrado en las gráficas 48, 49 y 50, para los tres elementos, presentan un comportamiento que se va incrementando considerablemente con forme se avanza en el periodo de análisis, situación que se acentúa aún más entrando en el mes de septiembre (a partir del

muestreo 16), en donde las concentraciones incrementan su nivel al mismo tiempo que el gasto en el flujo del cauce también se incrementa, por lo que es notable que el escurrimiento es directamente proporcional al nivel de concentración de los metales analizados, situación que se sustenta con los coeficientes de correlación de Pearson calculados los cuales muestran para los tres casos correlaciones lineales positivas con $P < 0.05$ haciéndolos estadísticamente confiables.

9. CONCLUSIONES

Respecto a las hipótesis propuestas al inicio de la investigación, se concluye que las tres se aceptan, considerando los análisis químicos realizados al agua muestreada y de acuerdo al análisis de la distribución espacial de los metales pesados incluidos en el presente estudio.

- Los depósitos de residuos de mina del distrito minero de Zimapán, Hidalgo son fuente directa de contaminación con Pb, Cd y Mn hacia los cauces de agua superficiales, afectando el estado natural del medio biofísico de la zona de estudio.
- Los depósitos de residuos de mina del distrito minero de Zimapán, Hidalgo no son una fuente de contaminación de Cu, Fe y Zn. Ya que aportan concentraciones en mg L^{-1} que están por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua.
- Del conjunto de metales pesados analizados se concluye que solo el Pb, Mn y Cd generan una pluma de contaminación mayor a 1.5 km aguas abajo del Jale Los Gómez (último sitio con aporte directo de material residual minero), lo que indica alta persistencia en el agua y alto potencial de afectación a distancias superiores a las previstas en esta investigación.
- Con base en el análisis de correlación de Pearson y al comportamiento de las concentraciones a través del tiempo en los cauces analizados, se determina que los niveles de concentración de Pb, Mn y Cd son directamente proporcionales al gasto superficial presente en el flujo.
- Tomando como base el análisis estadístico y el comportamiento químico expresado en la distribución espacial de los metales pesados, las concentraciones de Cu, Fe, Zn, Pb, Cd y Mn se ven influenciados directamente

por los depósitos de residuos mineros localizados en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo, elevando considerablemente sus niveles de concentración.

Al analizar el uso de suelo encontrado en el área de estudio podemos observar que desafortunadamente donde se realizó el muestreo es exactamente el estrato que está dedicado al uso agrícola en la región, como se muestra en la Figura 14.

Principalmente se produce maíz, frijol, avena forrajera y alfalfa verde (según datos de la SAGARPA), y debido a la baja precipitación del lugar, estos cultivos son regados con agua obtenida de los cauces, lo que pone en evidente riesgo de contaminación por plomo, manganeso y cadmio a los cultivos.

En la región existe producción pecuaria, de ganado bovino y ovino que interactúa diariamente con los cauces analizados, lo que pone en exposición directa de plomo, cadmio y manganeso al ganado.



Figura 51 y 52: Producción agrícola y pecuaria en Zimapán, Hidalgo. Imagen del 19 de septiembre del 2015.

Haciendo referencia al apartado 6.6.2. de la presente investigación, podemos encontrar descrito claramente cuáles son los efectos tóxicos del plomo, cadmio y manganeso, a los cultivos, animales y al ser humano; y con ello puntualizar la razón por la cual es preocupante la relación e interacción que existe actualmente entre los cauces de agua que se encuentran influenciados por los residuos de minas del Distrito Minero Zimapán y los factores productivos de la región en estudio.

10. RECOMENDACIONES

- Considerando que el alcance de la pluma de contaminación del Pb, Mn y Cd es mayor a 1.5 km del último sitio de muestreo que proporciona un aporte directo de residuos mineros (Jale Los Gómez), y observando que los niveles de las concentraciones están muy por arriba de los límites máximos permisibles de referencia en esta investigación, es recomendable realizar muestreos aguas abajo después del Punto de Salida 3, con el objetivo de determinar el alcance que tienen estos metales y establecer hasta donde es posible que lleguen las afectaciones al ambiente por los depósitos de residuos mineros del área en estudio.
- La presente investigación se realizó en los meses donde se presenta el periodo de lluvias en Zimapán, Hidalgo (época húmeda del año), con el objetivo de observar el aporte de los lixiviados originados en los depósitos residuales, sin embargo, es recomendable realizar el mismo muestreo en el periodo seco del año, y con ello lograr analizar el comportamiento de concentraciones de metales por época y observar variaciones en concentraciones y la contaminación provocada al ambiente.
- Establecer estaciones de aforo y monitorear en forma regular la cantidad y calidad del agua en todos los cauces cercanos a los depósitos de residuos de mina en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo.
- Monitorear la calidad del agua subterránea utilizada para uso doméstico, unidades de producción pecuaria y riego, que puedan estar afectadas por los elementos químicos más persistentes, ya señalados.
- Valorar la factibilidad técnica económica y social para el establecimiento de plantas de tratamiento de aguas contaminadas por depósitos de residuos de mina.
- Establecer una mejor aplicación de las normas ambientales en cuanto a la ubicación y tratamientos previos del sitio de depósito de residuos de mina, que eviten la llegada de los lixiviados a las corrientes de agua superficial.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Adriano, C. D. 2001. Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability, and risk of metals. Springer-Verlag, new Cork. 866 p.
- Alloway, B. J. 1995. Heavy Metals in Soils, Blackie Academic and Professional, London, UK, 2nd edition.
- APHA, AWWA, WPCF. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18Th edition. U.S.A.
- Aranda Campos, D.F. (1998). Proceso del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Azpeitia Caballero, Andrés. 2007. Evaluación de las alternativas para la disminución del impacto ambiental por jales históricos en el distrito minero de Zimapán. Tesis de Licenciatura, UAEH, México.
- Bautista Z. Francisco. 1999. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Facultad de medicina veterinaria y zootecnia. Dirección general de desarrollo académico. Subdirección de extensión departamento editorial. Yucatán, México.
- Buitelaar, R. (2001). Aglomeraciones mineras y desarrollo local en América Latina. Alfaomega grupo editor. Bogotá, Colombia.
- Cabildo *et al.* 2010. Reciclado y tratamiento de residuos. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España.
- Cámara de Diputados, H. congreso de la Unión. 2013. Ley General para la Prevención y Gestión integral de los residuos. Diario Oficial de la Federación. Última reforma. México, D.F. Documento recuperado el día 29 de Octubre de 2013, de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263.pdf>
- Cámara de Diputados, H. congreso de la Unión. 2013. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación. Última reforma. México, D.F. Documento recuperado el día 29 de Octubre de 2013, de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>

- Canudas Sandoval, Enrique, 2005. Las venas de plata en la historia de México. Síntesis de historia económica siglo XIX. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Editorial Utopía. Villahermosa, Tabasco.
- Castells, Xavier Elias. 2012. Los residuos mineros. Monografías. Energía, Medioambiente, Tratamiento de residuos. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España.
- Cedillo B., Leonor A. 2008. Proyecto de asistencia técnica para facilitar la acción de la implementación del convenio de Estocolmo en relación a sitios contaminados. Documento recuperado el día 29 de Octubre de 2013, de:http://siscop.ine.gob.mx/descargas/proyectos/reporte_final_sp_leonor_cedillo.pdf
- Chow, Ven Te. Editor-in-Chief.1964. Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill Book, Inc. U.S.A.
- Coll-Hurtado, *et al.* (2002). La minería en México: geografía, historia, economía y medio ambiente. Temas selectos de geografía de México. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F.
- CONAGUA. 2001. NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Documento recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-051-SCFI-2001.pdf>
- Cortinas de Nava, Cristina. (2007). Manejo ambiental de los relaves o jales mineros. Instituto nacional de ecología. SEMARNAT. Documento electrónico disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/155/cortinas.html>
- Cruz-Guzmán, Marta. 2007. La contaminación de suelos y aguas, su prevención con nuevas sustancias naturales. Universidad de Sevilla. Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla. Sevilla, España.
- De la Cruz Pons, Alfredo., J. Zavala Cruz, A. Guerrero Peña, S. Salgado Garcia, L.C. Lagunes espinoza, F. Gavi Reyes. 2012. Metales pesados en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. Universidad y ciencia. 28. 2.

- De Weist J. M. Roger. 1965. Geohydrology. John Wiley & Sons, Inc. New York. London. Sydney.
- Delgado Wise. Raul y del Pozo Mendoza Rubén, 2002. Minería, Estado y Gran Capital en México. Universidad Nacional Autónoma de México. México. D.F.
- Díez Herrero A., *et al.* 2008. Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Díez Lázaro, F. Javier. 2008. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. Tesis doctoral. Facultad de biología. Universidad de Santiago de Compostela. España.
- Duarte Zaragoza, Victor Manuel. 2013. Origen y distribución espacial de metales pesados en suelo de Zimapán, Hidalgo. Tesis Doctoral. Montecillo, Texcoco, Edo. De México.
- Eisler, Ronald. 2000. Handbook of chemical risk assessment health hazards to humans, plants and animals. Volume 1: metals. Lewis publishers. U.S. Geological Survey Patuxent Wildlife Research Center. Laurel, Maryland.
- Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, (S/A). Estado de Hidalgo: Zimapán. Documento electrónico disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM13hidalgo/municipios/13084a.html>
- ESRI. 2013. México D.F. Sitio consultado el 26 de febrero del 2015, en: <http://www.esri.com.mx>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), (2003), Manual Curso Análisis Espacial Arcview 8.2.
- FAO. 1985. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO: Riego y drenaje N° 29, Rev. 1. Roma, FAO.
- FAO. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. Estudio FAO: Riego y drenaje N° 47. Roma, FAO.

- Faustino y Jiménez. 2000. Manejo de cuencas hidrográficas. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Área de cuencas y sistemas agroforestales. Turrialba, Costa Rica.
- Froese, Kenneth L., & Michael W. Ongley. 2000. Health Effects associated with wastewater treatment, disposal, and reuse. *Revista Water Environment Research*, Vol. 7, No. 5. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/29763074>
- Fundación MAPFREE. (1994). Manual de Contaminación Ambiental. ITSEMAP AMBIENTAL. Madrid, España.
- FUNDAR, Centro de Análisis e Investigación. (2002). Minería, comunidades y medio ambiente Investigaciones sobre el impacto de la inversión canadiense en México. México. Documento electrónico disponible en: <http://www.fundar.org.mx/mexico/pdf/mineria.pdf>
- George, P. (1979). Geografía y medio ambiente, población y economía. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- Gonzáles Chávez Ma. del Carmen A., et al. 2005. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Montecillo, Edo de México.
- Griet Eeckhout, S. (2006). Mercure: une solution qui nous empoisonne. Laboratorio Europeo de Radiación del Sincrotrón en Grenoble, Francia. <http://www.scienceinschool.org/2007/issue7/mercury/spanish>.
- Gutiérrez R., Margarita y Moreno T., Manuel. 1995. Los residuos en la minería Mexicana. Residuos peligrosos en México. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.
- Instituto nacional de ecología, 2012. SEMARNAT. México, D.F. Sitio consultado el día 31 de Octubre de 2013, en: <http://www.inecc.gob.mx/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2000. Anuario Estadístico Hidalgo. Gobierno del Estado de Hidalgo. Secretaría de Desarrollo Social-INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2010. Anuario estadístico Estado de Hidalgo. Gobierno del estado de Hidalgo (Secretaria de Desarrollo Social)- INEGI. México.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2007. La minería en México. Secretaría de programación y presupuesto. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014. Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2013. México.
- Jiménez Arévalo, I. Y., 2005 Evaluación de la dispersión y movilidad de elementos potencialmente tóxicos (arsénico, plomo y cadmio) en suelos de Zimapán, Hgo. Protocolo de maestría, UASLP, México.
- Kelly, E. G. and Spottiswod, D. J., 1990. Disposición de las colas. en: Introducción al procesamiento de minerales. (traducción al español por la Ed. Limusa) p.p. 423-427.
- Kennedy P. A., *et al.*, 1992. Manual de aforos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). México.
- Kovda V. A. Quality of irrigation water. In: Irrigation, drainage and salinity. An international source book. Chapter 7. 1987. FAO/UNESCO. Pp 177-205.
- Lucena Juan José, La calidad de los quelatos de hierro en el mercado nacional. Nuevas metodologías analíticas para su caracterización. INFOAGRO. Dpto. Química Agrícola Universidad Autónoma de Madrid. 2011. <http://www.infoagro.com/abonos/quelatos.htm>.
- Mancilla-Villa O. R., A. L. Bautista-olivas, H. M. Ortega-Escobar, E.I. Sanchez B., A. Can C., R. D. Guevara G., Y. M. Ortega-M. Hidrogeoquímica de las salinas de Zapotitlan y los lagos-cráter Alchichina y Atexcac, Puebla. 2014. IDESIA. 32: 55-69.
- Marrugo Negrete, J. L. y R. Paternina Uribe 2011. Evaluación de la contaminación por metales pesados en la ciénaga la Soledad y Bahía de Cispatá, Cuenca del Bajo Sinú, Departamento de Córdoba. Universidad de Córdoba. Facultad de Ciencias Básicas. Departamento de Química. Montería, Colombia.
- Mencías Rodríguez, E. y Mayero Franco, L.M. 2000. Manual de Toxicología básica. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España.

- Mendoza S., Isabel. 2009. Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco. Estado de México.
- Moguel, R. (1993). Consideraciones ambientales en la industria minero-metalúrgica. Memorias. XX Convención de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos. México.
- Moreno Tovar, R., 2005. Evaluación geoquímico - ambiental de residuos (jales) de mineralizaciones poliméricas del estado de Hidalgo, México. Tesis Doctoral, UASLP, México.
- Moreno Tovar R., L. Barbanson, O. Coreño A. 2009. Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, estado de Hidalgo, México. Revista: Minería y Geología, vol. 25, núm. 2.
- Moreno Tovar R., J. Téllez H., M. G. Monroy F. 2012. Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. Revista: Revista internacional de contaminación ambiental vol.28 num.3.
- N.F.Gray. 1996. Calidad de Agua Potable, editorial Acribia, S.A – Zaragoza (España), 365 pp.
- Nebel, Bernard J. y Wright, Richard T. Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible. Sexta edición. Pearson education.
- Oblasser, Angela y Chaparro, Eduardo. 2008. Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Naciones Unidas. Santiago de Chile.
- Ordoñez Gálvez, Juan Julio. 2011. ¿Qué es una cuenca hidrológica? Sociedad Geográfica de Lima. Foro Peruano para el agua. Cartilla Técnica. Lima, Perú.
- Organización de las Naciones Unidas, 2007. Minería. Reportes nacionales: México. Disponible en:

http://www.un.org/esa/dsd/dsd_aofw_ni/ni_pdfs/NationalReports/mexico/Mineria.pdf

- Ortega Gaucin, David. 2012. Hidrometría básica aplicada a la operación de distritos y unidades de riego. Instituto del agua del estado de Nuevo León (IANL). México.
- Ortega Morel, Javier. 1997. Una aproximación a la historia de la minería del Estado de Hidalgo. Instituto de ciencias exactas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Secretaría de Educación Pública. Pachuca, Hidalgo.
- Patience, J.F., J. McLeese and M.L. Tremblay, Nutrients and Toxic Substances in Water for Livestock and Poultry. National Academy of Sciences, 1989, Washington D.C.
- Pérez D., José P. 2014. Composición iónica del agua de la cuenca Lerma-Santiago-Pacífico. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco. Estado de México.
- Prieto Méndez, Judith; González Ramírez, César A.; Román Gutiérrez, Alma D.; Prieto García, Francisco. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and subtropical Agroecosystems, vol. 10, núm. 1.
- PROFEPA. 2013. PROFEPA, México. México, D.F. Sitio consultado el día 31 de Octubre de 2013, en: <http://www.profepa.gob.mx/>.
- Pulido B., Antonio y Vallejos I., Ángela. 2003. Gestión y contaminación de recursos hídricos. Universidad de Almería. Servicio de publicaciones. Almería España.
- Ramírez G., Jazmín. 2009. Índices de salinidad de la red hidrográfica del Estado de Morelos, México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco. Estado de México.
- Ramos Castellanos P. *et al.* 2002. Medio Ambiente Calidad Ambiental. Ediciones Universidad de Salamanca. Delegación de Alumnos de la Facultad de Ciencias Químicas. Salamanca, España.
- Ramos M. José. J. 2002. Estudio de la contaminación por metales pesados y otros procesos de degradación química en los suelos de invernadero del

ponente almeriense. Universidad de Almería. Facultad de ciencias experimentales. Departamento de edafología y química agrícola. Tesis doctoral. Almería, España.

- Reeve, R.N. 1994. Environmental analysis. John Wiley & sons. Chinchester.
- Reyes Cruz Víctor Esteban, et al, 2007. Evaluación de las alternativas para la disminución del impacto ambiental por jales históricos en el distrito minero de Zimapán. Tesis Doctoral, UAEH, México.
- Rengifo Trigozo, Juan, Manual de ArcGis 10.0. Difucion ArcGeeK, Consulta 2015. UNAM, México D.F.
- Ripley, E. et al. (1995). Environmental effects of mining. St. Lucie Press. Florida. Estados Unidos.
- Rivera *et al.* 2005. La medición de sedimentos en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Jiutepec, Morelos/Villahermosa, Tabasco, México.
- Rodríguez E., María de los Ángeles. (2006). Adaptación y desarrollo de tres especies ornamentales para crecer en suelos contaminados con residuos mineros. Tesis. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco. Estado de México.
- Rojas M., Citlalli M. 2011. Estudios de la contaminación de los recursos hídricos en la cuenca del Río San Pedro, previos a la construcción de una hidroeléctrica (P.H. Las cruces) en Nayarit, México. Tesis. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. División de Ciencias Biológicas y Ambientales. Zapopan, Jalisco.
- Romero, F. M., M. A. Armienta, M. E. Gutiérrez, y G. Villaseñor. 2008. Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. Revista internacional de contaminación ambiental. Vol. 24 núm. 2.
- Romero Gil, Juan M. 2001. La minería en el noreste de México: Utopía y realidad 1850-1910. Plaza y Valdés editores. México, D.F.

- Rosas Rodríguez, H. (2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.
- Ruiz de las Heras, Aranza (2009). Dieta y nutrición. Minerales. Web consultas. Documento electrónico disponible en: <http://www.webconsultas.com/dietaynutricion/dietaequilibrada/micronutrientes/minerales/hierro-1833>
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. Primera edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.
- Salas, G.P. (1976). Aportaciones de México a la carta metalogenética de Norteamérica, escala 1:2,000,000. The Geological Society of America. USA.
- Salinas, E., I Rivera, F. R. Carrillo, F. Patiño, J. Hernandez y L. E. Hernández 2004. Mejora del proceso de cianurización de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. Rev. Soc. Quim. Mexicana.
- Sandoval, Carlos A (2002). Investigación cualitativa. Bogotá, Colombia, Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior (ICFES), Documento en electrónico.
- SEMARNAT, 2013. Sitios contaminados. Datos generales. Información general. Documento recuperado el día 30 de Octubre de 2013, de: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/informacion/Informacion.pdf>
- SEMARNAT, 2010. Guía técnica para orientar en la elaboración de estudios de caracterización de sitios contaminados. SEMARNAT. Tlalpan, D.F. Documento recuperado el día 28 de Octubre de 2013, de: <http://www.relascmex.org/pdfs/guia-caracterizacion-pdfs/00-guiacompleta.pdf>
- SEMARNAT, 2013. Sitios contaminados. Proyectos de Cooperación Internacional: Sistema Informático de Sitios Contaminados (SISCO). Documento recuperado el día 28 de Octubre de 2013, de: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/sisco/sisco.pdf>

- SEMARNAT, 2013. Confinamiento Cytrar, jales mineros de Nacozari de García, Sonora. Documento recuperado el día 28 de Octubre de 2013, de: <http://semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/metas/metas.pdf>.
- Servicio Geológico Mexicano, 2011. Panorama Minero del Estado de México. Coordinación General de Minería. Documento recuperado el día 29 de Octubre de 2013. Disponible en: http://www.sgm.gob.mx/pdfs/EDO_MEXICO.pdf
- Servicio Geológico Mexicano, 2013. Anuario estadístico de la minería Mexicana 2012. Secretaría de economía. Coordinación general de minería. Disponible en http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/anuario_mineria_mexicana_2012_ed2013.pdf
- Servicio Geológico Mexicano, 2014. Panorama minero del Estado de Hidalgo. Secretaría de economía. Recuperado de <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/HIDALGO.pdf>
- Taylor, Steve J. y Robert Bogdan (1987). Introducción a los métodos cualitativos de investigación. La búsqueda de significados. España, Editorial Paidós.
- TEXAS-TAMU-SWAT. 2013. México D.F. Sitio consultado el 26 de febrero del 2015, en: <http://www.tamu-swat.edu.mx>
- Trejo M., Juana. (2007). Trabajo monográfico del municipio de Zimapán Hidalgo. Tesis. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo. Documento electrónico disponible en: <http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icshu/licenciatura/documentos/Trabajo%20monografico%20del%20municipio.pdf>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). 1996. EPA Method 6010B: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. Documento recuperado de <http://www2.epa.gov/sites/production/files/documents/6010b.pdf>

- Vázquez Alarcón, Antonio. 1999. Evaluación del riesgo a la contaminación con metales pesados, en la región del Valle del Mezquital, Hgo. Tesis. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, Edo. De México.
- Vega G. S. y Reynaga O. J. (1990). Evaluación epidemiológica de riesgos causados por agentes químicos ambientales. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Noriega, Limusa. México. Viarengo, A. (1985). Biochemical effects of trace metals. Marine Pollution Bulletin. 16: 153-159
- Volke S., Tania. 2003. Informe final: remediación de sitios contaminados por metales provenientes de jales mineros en los distritos de El triunfo-san Antonio y santa Rosalía, Baja California sur. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Documento recuperado en <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/remediacion2003.pdf>

12. ANEXOS

12.1. Concentraciones en cada sitio de muestreo

12.1.1. Puente Santiago

Cuadro 13. Resultados análisis de laboratorio para el Puente Santiago.

Tratamiento	Cu	Promedio	D. E.	Pb	Promedio	D. E.	Fe	Promedio	D. E.
M1	0.0043	0.004	0.000	0.043	0.044	0.002	0.167	0.170	0.005
M1	0.0043			0.045			0.174		
M2	0.0100	0.008	0.004	0.045	0.043	0.004	0.275	0.254	0.030
M2	0.0050			0.040			0.233		
M3	0.0075	0.009	0.002	0.050	0.049	0.002	0.148	0.158	0.014
M3	0.0100			0.048			0.168		
M4	0.0375	0.038	0.000	0.026	0.037	0.015	0.081	0.088	0.010
M4	0.0375			0.048			0.095		
M5	0.0075	0.006	0.002	0.058	0.063	0.007	0.223	0.241	0.027
M5	0.0050			0.068			0.260		
M6	0.0068	0.007	0.000	0.043	0.044	0.002	0.167	0.170	0.005
M6	0.0068			0.045			0.174		
M7	0.0070	0.007	0.000	0.050	0.049	0.002	0.156	0.155	0.001
M7	0.0075			0.048			0.154		
M8	0.0270	0.026	0.002	0.045	0.044	0.001	0.090	0.086	0.005
M8	0.0245			0.044			0.083		
M9	0.0210	0.021	0.000	0.019	0.020	0.002	0.248	0.249	0.002
M9	0.0213			0.021			0.251		
M10	0.0220	0.022	0.000	0.042	0.042	0.001	0.180	0.177	0.004
M10	0.0215			0.041			0.175		
M11	0.0198	0.019	0.001	0.043	0.042	0.001	0.192	0.190	0.002
M11	0.0188			0.041			0.189		
M12	0.0208	0.021	0.000	0.049	0.050	0.002	0.275	0.254	0.030
M12	0.0208			0.051			0.233		

Cuadro 13. Continúa...

Tratamiento	Mn	Promedio	D. E.	Zn	Promedio	D. E.	Cd	Promedio	D. E.
M1	0.0113	0.012	0.001	0.046	0.046	0.000	0.023	0.021	0.002
M1	0.0123			0.047			0.020		
M2	0.0198	0.021	0.002	0.055	0.059	0.005	0.005	0.007	0.002
M2	0.0225			0.062			0.008		
M3	0.0095	0.011	0.002	0.066	0.075	0.012	0.008	0.009	0.002
M3	0.0130			0.083			0.011		
M4	0.0450	0.041	0.006	0.123	0.108	0.020	0.024	0.026	0.003
M4	0.0363			0.094			0.028		
M5	0.0135	0.013	0.001	0.017	0.023	0.008	0.006	0.007	0.002
M5	0.0125			0.029			0.008		
M6	0.0113	0.012	0.001	0.046	0.046	0.000	0.023	0.021	0.002
M6	0.0123			0.047			0.020		
M7	0.0498	0.057	0.010	0.035	0.037	0.003	0.005	0.005	0.001
M7	0.0633			0.039			0.004		
M8	0.0525	0.051	0.003	0.126	0.124	0.002	0.013	0.013	0.001
M8	0.0488			0.123			0.012		
M9	0.0300	0.032	0.002	0.124	0.124	0.001	0.018	0.018	0.000
M9	0.0333			0.125			0.018		
M10	0.0210	0.023	0.002	0.046	0.047	0.002	0.021	0.021	0.001
M10	0.0243			0.048			0.020		
M11	0.0170	0.017	0.001	0.049	0.049	0.001	0.019	0.019	0.000
M11	0.0160			0.050			0.018		
M12	0.0120	0.013	0.001	0.040	0.041	0.002	0.016	0.016	0.001
M12	0.0140			0.042			0.017		

12.1.2. Jale Preisser

Cuadro 14. Resultados análisis de laboratorio para el Jale Preisser.

Tratamiento	Cu	Promedio	Desv Est	Pb	Promedio	Desv Est	Fe	Promedio	Desv Est
M1	0.011	0.010	0.001	0.103	0.110	0.011	0.567	0.566	0.002
M1	0.010			0.118			0.565		
M2	0.010	0.010	0.000	0.098	0.098	0.000	0.270	0.289	0.027
M2	0.010			0.098			0.308		
M3	0.040	0.041	0.002	0.258	0.306	0.069	0.793	0.816	0.034
M3	0.043			0.355			0.840		
M4	0.050	0.050	0.000	0.381	0.360	0.030	1.038	1.000	0.053
M4	0.050			0.339			0.963		
M5	0.008	0.008	0.000	0.053	0.054	0.002	0.468	0.475	0.011
M5	0.008			0.055			0.483		
M6	0.011	0.010	0.001	0.103	0.110	0.011	0.567	0.566	0.002
M6	0.010			0.118			0.565		
M7	0.004	0.004	0.000	0.062	0.062	0.001	0.183	0.185	0.003
M7	0.005			0.063			0.187		
M8	0.028	0.027	0.000	0.048	0.049	0.001	0.313	0.313	0.000
M8	0.027			0.050			0.312		
M9	0.027	0.026	0.001	0.064	0.063	0.001	0.660	0.651	0.011
M9	0.026			0.063			0.643		
M10	0.022	0.022	0.001	0.033	0.034	0.001	0.297	0.295	0.004
M10	0.023			0.035			0.292		
M11	0.028	0.028	0.001	0.047	0.048	0.002	1.001	0.998	0.004
M11	0.027			0.050			0.995		
M12	0.026	0.025	0.001	0.047	0.047	0.000	0.270	0.289	0.027
M12	0.025			0.047			0.308		
M13	0.024	0.023	0.001	0.049	0.065	0.022	0.192	0.187	0.006
M13	0.023			0.080			0.183		
M14	0.035	0.028	0.009	0.045	0.063	0.025	0.134	0.267	0.188
M14	0.022			0.081			0.401		
M15	0.022	0.021	0.002	0.071	0.051	0.028	0.248	0.260	0.016
M15	0.020			0.032			0.272		
M16	0.029	0.029	0.000	0.049	0.061	0.016	0.891	0.891	0.001
M16	0.029			0.072			0.890		
M17	0.021	0.020	0.001	0.071	0.060	0.016	0.928	0.920	0.012
M17	0.020			0.049			0.912		
M18	0.031	0.031	0.001	0.050	0.050	0.000	0.796	0.780	0.022
M18	0.032			0.049			0.765		
M19	0.041	0.039	0.002	0.064	0.056	0.010	0.941	0.940	0.001
M19	0.037			0.049			0.939		

M20	0.045	0.046	0.001	0.057	0.059	0.002	0.933	0.935	0.003
M20	0.047			0.061			0.937		
M21	0.048	0.047	0.002	0.061	0.060	0.002	0.891	0.890	0.001
M21	0.046			0.058			0.889		
M22	0.040	0.039	0.001	0.480	0.490	0.014	0.818	0.820	0.003
M22	0.038			0.501			0.822		
M23	0.049	0.048	0.002	0.456	0.460	0.005	0.906	0.900	0.008
M23	0.046			0.464			0.894		
M24	0.047	0.045	0.003	0.530	0.530	0.000	0.858	0.860	0.002
M24	0.043			0.531			0.862		

Cuadro 14. Continúa...

tratamiento	Mn	Promedio	Desv Est	Zn	Promedio	Desv Est	Cd	Promedio	Desv Est
M1	0.299	0.300	0.000	0.150	0.149	0.002	0.030	0.029	0.002
M1	0.300			0.147			0.028		
M2	0.019	0.022	0.004	0.028	0.029	0.000	0.004	0.006	0.004
M2	0.025			0.029			0.009		
M3	0.290	0.281	0.012	0.153	0.150	0.004	0.012	0.013	0.002
M3	0.273			0.148			0.015		
M4	0.248	0.248	0.000	0.154	0.155	0.002	0.013	0.022	0.013
M4	0.248			0.156			0.031		
M5	0.196	0.194	0.003	0.183	0.182	0.001	0.008	0.006	0.004
M5	0.192			0.182			0.003		
M6	0.299	0.300	0.000	0.034	0.035	0.000	0.030	0.029	0.002
M6	0.300			0.035			0.028		
M7	0.103	0.105	0.003	0.044	0.045	0.001	0.006	0.006	0.001
M7	0.108			0.046			0.007		
M8	0.210	0.210	0.001	0.124	0.123	0.001	0.013	0.015	0.003
M8	0.211			0.122			0.017		
M9	0.236	0.238	0.003	0.097	0.099	0.002	0.019	0.019	0.001
M9	0.240			0.100			0.020		
M10	0.439	0.439	0.001	0.157	0.158	0.001	0.021	0.022	0.001
M10	0.440			0.159			0.022		
M11	0.175	0.172	0.003	0.082	0.081	0.000	0.015	0.015	0.000
M11	0.170			0.081			0.015		
M12	0.274	0.273	0.001	0.099	0.099	0.000	0.015	0.015	0.001
M12	0.272			0.099			0.014		
M13	0.287	0.279	0.011	0.720	0.715	0.007	0.055	0.054	0.002
M13	0.272			0.710			0.053		
M14	0.483	0.488	0.007	0.599	0.602	0.004	0.009	0.010	0.001
M14	0.493			0.605			0.011		
M15	0.229	0.248	0.026	0.230	0.238	0.011	0.015	0.018	0.004
M15	0.266			0.245			0.021		
M16	0.408	0.385	0.032	0.438	0.423	0.021	0.022	0.020	0.003
M16	0.363			0.408			0.017		
M17	0.349	0.350	0.000	0.831	0.830	0.001	0.025	0.024	0.001
M17	0.350			0.830			0.023		
M18	0.226	0.220	0.008	0.863	0.870	0.011	0.025	0.028	0.005
M18	0.215			0.878			0.032		
M19	0.392	0.390	0.003	0.625	0.625	0.000	0.022	0.021	0.002
M19	0.387			0.624			0.019		
M20	0.401	0.402	0.002	0.790	0.789	0.001	0.020	0.021	0.002
M20	0.403			0.788			0.023		

M21	0.292	0.290	0.003	0.936	0.934	0.003	0.025	0.026	0.002
M21	0.287			0.932			0.027		
M22	0.301	0.300	0.000	0.872	0.874	0.002	0.096	0.097	0.001
M22	0.300			0.875			0.098		
M23	0.359	0.360	0.000	0.836	0.834	0.004	0.093	0.092	0.002
M23	0.360			0.831			0.090		
M24	0.209	0.209	0.000	0.701	0.700	0.000	0.103	0.100	0.004
M24	0.209			0.700			0.098		

12.1.3. Jale Pal

Cuadro 15. Resultados análisis de laboratorio para el Jale Pal.

Tratamiento	Cu	Promedio	Desv Est	Pb	Promedio	Desv Est	Fe	Promedio	Desv Est
M1	0.0075	0.0073	0.0004	0.143	0.1463	0.0053	0.582	0.5795	0.0032
M1	0.0070			0.150			0.577		
M2	0.0125	0.0113	0.0018	0.110	0.0988	0.0159	0.390	0.3813	0.0124
M2	0.0100			0.088			0.373		
M3	0.0900	0.0913	0.0018	0.258	0.2450	0.0177	0.961	0.9805	0.0276
M3	0.0925			0.233			1.000		
M4	0.0875	0.0813	0.0088	0.663	0.7125	0.0707	0.503	0.5056	0.0044
M4	0.0750			0.763			0.509		
M5	0.0125	0.0125	0.0000	0.103	0.1000	0.0035	0.260	0.2488	0.0159
M5	0.0125			0.098			0.238		
M6	0.0075	0.0073	0.0004	0.143	0.1463	0.0053	0.582	0.5795	0.0032
M6	0.0070			0.150			0.577		
M7	0.0275	0.0275	0.0000	0.132	0.1294	0.0030	1.919	1.9205	0.0025
M7	0.0275			0.127			1.922		
M8	0.0318	0.0326	0.0012	0.103	0.1005	0.0032	1.241	1.2404	0.0002
M8	0.0335			0.098			1.240		
M9	0.0235	0.0228	0.0011	0.096	0.0953	0.0007	1.241	1.2274	0.0193
M9	0.0220			0.095			1.214		
M10	0.0235	0.0243	0.0011	0.070	0.0713	0.0018	1.120	1.1226	0.0037
M10	0.0250			0.073			1.125		
M11	0.0355	0.0341	0.0019	0.154	0.1529	0.0016	1.165	1.1664	0.0019
M11	0.0328			0.152			1.168		
M12	0.0223	0.0230	0.0011	0.074	0.0756	0.0019	0.390	0.3813	0.0124
M12	0.0238			0.077			0.373		
M13	0.0238	0.0241	0.0005	0.062	0.0649	0.0048	0.382	0.3751	0.0097
M13	0.0245			0.068			0.368		
M14	0.0250	0.0251	0.0002	0.094	0.0918	0.0025	0.357	0.3585	0.0018
M14	0.0253			0.090			0.360		
M15	0.0298	0.0308	0.0014	0.074	0.0601	0.0200	0.192	0.2130	0.0293
M15	0.0318			0.046			0.234		
M16	0.0298	0.0308	0.0014	0.260	0.2611	0.0012	0.889	0.8909	0.0034
M16	0.0318			0.262			0.893		
M17	0.0913	0.0903	0.0014	0.185	0.1865	0.0028	0.936	0.9225	0.0194
M17	0.0893			0.189			0.909		
M18	0.0278	0.0285	0.0011	0.200	0.1936	0.0094	1.237	1.2344	0.0037
M18	0.0293			0.187			1.232		
M19	0.0313	0.0303	0.0014	0.122	0.1203	0.0025	1.241	1.2390	0.0028
M19	0.0293			0.119			1.237		
M20	0.0228	0.0223	0.0007	0.398	0.3974	0.0005	1.352	1.3483	0.0052

M20	0.0218			0.397			1.345		
M21	0.0263	0.0278	0.0021	0.492	0.4890	0.0042	0.931	0.9320	0.0014
M21	0.0293			0.486			0.933		
M22	0.0263	0.0278	0.0021	0.316	0.3176	0.0027	0.740	0.7383	0.0016
M22	0.0293			0.320			0.737		
M23	0.0263	0.0240	0.0032	0.260	0.2603	0.0011	0.872	0.8738	0.0025
M23	0.0218			0.261			0.876		
M24	0.0253	0.0260	0.0011	0.391	0.3901	0.0009	1.031	1.0290	0.0025
M24	0.0268			0.390			1.027		

Cuadro 15. Continúa...

Tratamiento	Mn	Promedio	Desv Est	Zn	Promedio	Desv Est	Cd	Promedio	Desv Est
M1	0.286	0.2858	0.0004	0.130	0.1298	0.0004	0.028	0.0300	0.0035
M1	0.286			0.130			0.033		
M2	0.155	0.1593	0.0064	0.739	0.7355	0.0049	0.009	0.0060	0.0035
M2	0.164			0.732			0.004		
M3	0.291	0.2993	0.0120	0.963	0.9559	0.0097	0.020	0.0186	0.0012
M3	0.308			0.949			0.018		
M4	0.195	0.1925	0.0035	0.710	0.7081	0.0027	0.033	0.0263	0.0088
M4	0.190			0.706			0.020		
M5	0.248	0.2443	0.0046	0.143	0.1378	0.0071	0.073	0.0638	0.0124
M5	0.241			0.133			0.055		
M6	0.286	0.2858	0.0004	0.130	0.1298	0.0004	0.028	0.0300	0.0035
M6	0.286			0.130			0.033		
M7	0.206	0.2055	0.0011	0.161	0.1645	0.0046	0.050	0.0550	0.0071
M7	0.205			0.168			0.060		
M8	0.240	0.2386	0.0023	0.217	0.2111	0.0083	0.016	0.0169	0.0009
M8	0.237			0.205			0.018		
M9	0.168	0.1683	0.0000	0.949	0.9491	0.0005	0.022	0.0208	0.0011
M9	0.168			0.950			0.020		
M10	0.128	0.1263	0.0021	0.865	0.8825	0.0247	0.023	0.0230	0.0000
M10	0.125			0.900			0.023		
M11	0.147	0.1461	0.0005	0.106	0.1059	0.0005	0.015	0.0146	0.0009
M11	0.146			0.106			0.014		
M12	0.176	0.1751	0.0012	0.673	0.6488	0.0336	0.015	0.0149	0.0005
M12	0.174			0.625			0.015		
M13	0.451	0.4421	0.0122	0.118	0.1189	0.0009	0.038	0.0425	0.0071
M13	0.434			0.120			0.048		
M14	0.401	0.4093	0.0113	0.824	0.8236	0.0009	0.063	0.0643	0.0014
M14	0.417			0.823			0.065		
M15	0.084	0.0855	0.0021	0.450	0.4563	0.0088	0.051	0.0500	0.0007
M15	0.087			0.463			0.050		
M16	0.385	0.3846	0.0009	0.922	0.9234	0.0027	0.096	0.0955	0.0011
M16	0.384			0.925			0.095		
M17	0.409	0.4099	0.0019	0.701	0.7029	0.0023	0.034	0.0321	0.0023
M17	0.411			0.705			0.031		
M18	0.407	0.4080	0.0014	0.535	0.5335	0.0025	0.035	0.0359	0.0016
M18	0.409			0.532			0.037		
M19	0.384	0.3825	0.0014	0.697	0.6976	0.0009	0.041	0.0421	0.0012
M19	0.382			0.698			0.043		
M20	0.485	0.4844	0.0012	0.829	0.8295	0.0011	0.031	0.0316	0.0005
M20	0.484			0.830			0.032		
M21	0.292	0.2938	0.0025	0.432	0.4349	0.0048	0.030	0.0289	0.0012

M21	0.296			0.438			0.028		
M22	0.390	0.3928	0.0035	0.794	0.7943	0.0007	0.076	0.0734	0.0041
M22	0.395			0.795			0.071		
M23	0.407	0.4025	0.0064	0.849	0.8486	0.0005	0.102	0.0951	0.0101
M23	0.398			0.848			0.088		
M24	0.435	0.4290	0.0088	0.838	0.8368	0.0014	0.089	0.0896	0.0012
M24	0.423			0.836			0.091		

12.1.4. Jale Los Gómez

Cuadro 16. Resultados análisis de laboratorio para el Jale Los Gómez.

Tratamiento	Cu	Promedio	Desv Est	Pb	Promedio	Desv Est	Fe	Promedio	Desv Est
M1	0.070	0.0695	0.0007	0.123	0.1238	0.0018	1.716	1.7125	0.0049
M1	0.069			0.125			1.709		
M2	0.013	0.0113	0.0018	0.180	0.1788	0.0018	0.323	0.3413	0.0265
M2	0.010			0.178			0.360		
M3	0.025	0.0238	0.0018	0.188	0.1963	0.0124	0.273	0.2513	0.0301
M3	0.023			0.205			0.230		
M4	0.046	0.0500	0.0053	0.928	0.9250	0.0035	0.993	0.9888	0.0053
M4	0.054			0.923			0.985		
M5	0.031	0.0293	0.0018	0.693	0.6938	0.0018	0.468	0.4775	0.0141
M5	0.028			0.695			0.488		
M6	0.037	0.0365	0.0007	0.123	0.1238	0.0018	0.429	0.4281	0.0012
M6	0.036			0.125			0.427		
M7	0.027	0.0256	0.0016	0.738	0.7538	0.0230	1.699	1.6986	0.0005
M7	0.025			0.770			1.698		
M8	0.021	0.0205	0.0011	0.111	0.1103	0.0014	1.189	1.1879	0.0009
M8	0.020			0.109			1.187		
M9	0.022	0.0228	0.0018	0.047	0.0465	0.0011	1.048	1.0625	0.0212
M9	0.024			0.046			1.078		
M10	0.022	0.0209	0.0016	0.683	0.6875	0.0071	0.526	0.5240	0.0028
M10	0.020			0.693			0.522		
M11	0.043	0.0428	0.0000	0.094	0.0948	0.0018	0.901	0.9264	0.0366
M11	0.043			0.096			0.952		
M12	0.046	0.0450	0.0014	0.075	0.0758	0.0018	0.748	0.7413	0.0088
M12	0.044			0.077			0.735		
M13	0.030	0.0290	0.0011	0.878	0.8675	0.0141	0.804	0.8118	0.0113
M13	0.028			0.858			0.820		
M14	0.038	0.0393	0.0014	0.104	0.1201	0.0228	0.745	0.7753	0.0431
M14	0.040			0.136			0.806		
M15	0.043	0.0451	0.0027	0.543	0.5435	0.0011	0.939	0.9395	0.0014
M15	0.047			0.544			0.941		
M16	0.050	0.0489	0.0009	0.928	0.9163	0.0159	0.839	0.8404	0.0023
M16	0.048			0.905			0.842		
M17	0.048	0.0489	0.0009	0.900	0.8998	0.0007	1.341	1.3395	0.0021
M17	0.050			0.899			1.338		
M18	0.052	0.0504	0.0023	0.207	0.2088	0.0025	0.993	0.9920	0.0014
M18	0.049			0.211			0.991		
M19	0.058	0.0576	0.0009	0.893	0.8939	0.0012	0.931	0.9295	0.0021
M19	0.057			0.895			0.928		
M20	0.052	0.0491	0.0041	0.693	0.6936	0.0012	0.935	0.9298	0.0071

M20	0.046			0.695			0.925		
M21	0.050	0.0503	0.0000	0.697	0.7010	0.0053	1.121	1.1195	0.0021
M21	0.050			0.705			1.118		
M22	0.045	0.0458	0.0007	0.568	0.5686	0.0012	1.206	1.2026	0.0041
M22	0.046			0.570			1.200		
M23	0.050	0.0490	0.0018	0.940	0.9395	0.0004	1.341	1.3403	0.0011
M23	0.048			0.939			1.340		
M24	0.058	0.0591	0.0019	0.948	0.9499	0.0030	2.386	2.3851	0.0005
M24	0.061			0.952			2.385		

Cuadro 16. Continúa...

Tratamiento	Mn	Promedio	Desv Est	Zn	Promedio	Desv Est	Cd	Promedio	Desv Est
M1	0.112	0.1113	0.0007	0.253	0.2520	0.0014	0.030	0.0313	0.0031
M1	0.111			0.251			0.033		
M2	0.125	0.1289	0.0062	0.878	0.8704	0.0104	0.043	0.0390	0.0039
M2	0.133			0.863			0.035		
M3	0.086	0.0890	0.0042	0.821	0.8206	0.0002	0.058	0.0525	0.0053
M3	0.092			0.821			0.048		
M4	0.363	0.3806	0.0256	0.849	0.8519	0.0044	0.054	0.0556	0.0056
M4	0.399			0.855			0.058		
M5	0.139	0.1383	0.0004	0.673	0.6275	0.0636	0.058	0.0613	0.0061
M5	0.138			0.583			0.065		
M6	0.112	0.1113	0.0007	0.633	0.6300	0.0035	0.030	0.0313	0.0031
M6	0.111			0.628			0.033		
M7	0.272	0.2705	0.0018	0.918	0.9225	0.0071	0.013	0.0111	0.0011
M7	0.269			0.928			0.010		
M8	0.299	0.2869	0.0171	0.110	0.1094	0.0009	0.017	0.0164	0.0016
M8	0.275			0.109			0.016		
M9	0.255	0.2520	0.0039	0.129	0.1255	0.0046	0.017	0.0166	0.0017
M9	0.249			0.122			0.016		
M10	0.151	0.1504	0.0012	0.068	0.0685	0.0014	0.025	0.0234	0.0023
M10	0.150			0.070			0.022		
M11	0.095	0.0945	0.0004	0.105	0.1055	0.0011	0.027	0.0268	0.0027
M11	0.094			0.106			0.026		
M12	0.218	0.2209	0.0037	0.460	0.4500	0.0141	0.030	0.0285	0.0029
M12	0.224			0.440			0.027		
M13	0.471	0.4726	0.0030	0.733	0.7250	0.0106	0.055	0.0438	0.0044
M13	0.475			0.718			0.033		
M14	0.448	0.4628	0.0212	0.551	0.5530	0.0035	0.057	0.0560	0.0056
M14	0.478			0.556			0.056		
M15	0.446	0.4499	0.0062	0.295	0.2941	0.0016	0.019	0.0179	0.0018
M15	0.454			0.293			0.017		
M16	0.395	0.4046	0.0143	0.351	0.3520	0.0011	0.052	0.0529	0.0053
M16	0.415			0.353			0.054		
M17	0.394	0.3801	0.0189	0.321	0.3193	0.0018	0.049	0.0516	0.0052
M17	0.367			0.318			0.054		
M18	0.395	0.3936	0.0012	0.899	0.9008	0.0028	0.082	0.0809	0.0081
M18	0.393			0.903			0.080		
M19	0.422	0.4201	0.0027	0.431	0.4329	0.0023	0.044	0.0454	0.0045
M19	0.418			0.435			0.047		
M20	0.412	0.4101	0.0027	1.060	1.0589	0.0012	0.091	0.0903	0.0090
M20	0.408			1.058			0.090		
M21	0.402	0.4039	0.0027	1.096	1.0941	0.0030	0.043	0.0423	0.0042

M21	0.406			1.092			0.042		
M22	0.220	0.2201	0.0009	0.740	0.7389	0.0012	0.109	0.1091	0.0011
M22	0.221			0.738			0.110		
M23	0.505	0.5014	0.0044	0.614	0.6091	0.0065	0.082	0.0814	0.0081
M23	0.498			0.605			0.081		
M24	0.475	0.4801	0.0080	0.795	0.7939	0.0012	0.089	0.0916	0.0092
M24	0.486			0.793			0.095		

12.1.5. Punto de Salida 1

Cuadro 17. Resultados análisis de laboratorio para el Punto de Salida 1.

Tratamiento	Cu	Promedio	Desv Est	Pb	Promedio	Desv Est	Fe	Promedio	Desv Est
M1	0.0073	0.0075	0.0004	0.105	0.1200	0.0212	0.246	0.2480	0.0035
M1	0.0078			0.135			0.251		
M2	0.0225	0.0250	0.0035	0.113	0.1088	0.0053	0.323	0.3350	0.0177
M2	0.0275			0.105			0.348		
M3	0.0125	0.0138	0.0018	0.108	0.1213	0.0194	0.223	0.2150	0.0106
M3	0.0150			0.135			0.208		
M4	0.0825	0.0881	0.0080	0.314	0.3125	0.0018	1.925	1.9125	0.0177
M4	0.0938			0.311			1.900		
M5	0.0075	0.0075	0.0000	0.550	0.5250	0.0354	0.988	0.9843	0.0049
M5	0.0075			0.500			0.981		
M6	0.0073	0.0075	0.0004	0.105	0.1200	0.0212	0.246	0.2480	0.0035
M6	0.0078			0.135			0.251		
M7	0.0175	0.0174	0.0002	0.348	0.3500	0.0035	0.530	0.5294	0.0012
M7	0.0173			0.353			0.529		
M8	0.0308	0.0306	0.0002	0.395	0.3850	0.0141	0.811	0.8099	0.0012
M8	0.0305			0.375			0.809		
M9	0.0303	0.0275	0.0039	0.578	0.5925	0.0212	0.926	0.9250	0.0011
M9	0.0248			0.608			0.924		
M10	0.0290	0.0281	0.0012	0.495	0.5038	0.0124	0.675	0.6895	0.0209
M10	0.0273			0.513			0.704		
M11	0.0260	0.0269	0.0012	0.925	0.9138	0.0159	0.496	0.4993	0.0042
M11	0.0278			0.903			0.502		
M12	0.0778	0.0814	0.0051	0.673	0.6875	0.0212	0.936	0.9349	0.0012
M12	0.0850			0.703			0.934		
M13	0.0465	0.0455	0.0014	0.465	0.4900	0.0354	0.996	0.9956	0.0005
M13	0.0445			0.515			0.995		
M14	0.0485	0.0490	0.0007	0.293	0.5538	0.3695	0.690	0.7110	0.0301
M14	0.0495			0.815			0.732		
M15	0.0498	0.0496	0.0002	0.140	0.1039	0.0514	0.970	0.9618	0.0120
M15	0.0495			0.068			0.953		
M16	0.0578	0.0586	0.0012	0.082	0.0821	0.0002	0.728	0.7286	0.0016
M16	0.0595			0.082			0.730		
M17	0.0473	0.0485	0.0018	0.928	0.9298	0.0028	0.853	0.8430	0.0138
M17	0.0498			0.932			0.833		
M18	0.0353	0.0374	0.0030	0.585	0.5834	0.0019	2.095	2.0788	0.0233
M18	0.0395			0.582			2.062		
M19	0.0380	0.0375	0.0007	0.383	0.3823	0.0007	0.850	0.8493	0.0014
M19	0.0370			0.382			0.848		
M20	0.0488	0.0491	0.0005	0.497	0.4946	0.0037	2.048	2.0475	0.0004

M20	0.0495			0.492			2.047		
M21	0.0580	0.0570	0.0014	0.938	0.9398	0.0028	0.978	0.9801	0.0030
M21	0.0560			0.942			0.982		
M22	0.0638	0.0629	0.0012	0.940	0.9404	0.0009	0.938	0.9363	0.0021
M22	0.0620			0.941			0.935		
M23	0.0630	0.0645	0.0021	1.372	1.3715	0.0011	1.918	1.9226	0.0065
M23	0.0660			1.371			1.927		
M24	0.0513	0.0491	0.0030	0.787	0.7889	0.0023	1.355	1.3569	0.0023
M24	0.0470			0.791			1.359		

Cuadro 17. Continúa...

Tratamiento	Mn	Promedio	Desv Est	Zn	Promedio	Desv Est	Cd	Promedio	Desv Est
M1	0.025	0.0243	0.0004	0.042	0.0420	0.0004	0.035	0.0338	0.0018
M1	0.024			0.042			0.033		
M2	0.237	0.2255	0.0156	0.102	0.1135	0.0159	0.009	0.0089	0.0002
M2	0.215			0.125			0.009		
M3	0.068	0.0674	0.0005	0.069	0.0599	0.0122	0.005	0.0038	0.0011
M3	0.067			0.051			0.003		
M4	0.378	0.3913	0.0194	0.256	0.2475	0.0124	0.045	0.0438	0.0018
M4	0.405			0.239			0.043		
M5	0.132	0.1324	0.0012	0.470	0.4600	0.0141	0.092	0.0944	0.0041
M5	0.133			0.450			0.097		
M6	0.025	0.0243	0.0004	0.418	0.4200	0.0035	0.035	0.0338	0.0018
M6	0.024			0.423			0.033		
M7	0.251	0.2454	0.0072	0.789	0.7878	0.0014	0.007	0.0078	0.0018
M7	0.240			0.787			0.009		
M8	0.067	0.0709	0.0058	1.100	1.0971	0.0034	0.016	0.0159	0.0002
M8	0.075			1.095			0.016		
M9	0.247	0.2473	0.0011	0.915	0.8800	0.0495	0.021	0.0205	0.0011
M9	0.248			0.845			0.020		
M10	0.212	0.2093	0.0042	0.097	0.1001	0.0041	0.024	0.0238	0.0000
M10	0.206			0.103			0.024		
M11	0.225	0.2235	0.0014	0.705	0.6925	0.0177	0.016	0.0156	0.0002
M11	0.223			0.680			0.016		
M12	0.253	0.2521	0.0016	0.778	0.7688	0.0124	0.017	0.0161	0.0012
M12	0.251			0.760			0.015		
M13	0.438	0.4564	0.0267	0.655	0.6950	0.0566	0.032	0.0313	0.0014
M13	0.475			0.735			0.030		
M14	0.461	0.4661	0.0076	1.197	1.2029	0.0080	0.057	0.0578	0.0018
M14	0.472			1.209			0.059		
M15	0.417	0.4209	0.0055	0.114	0.1138	0.0004	0.024	0.0231	0.0012
M15	0.425			0.114			0.022		
M16	0.385	0.3901	0.0069	0.201	0.2103	0.0134	0.050	0.0509	0.0016
M16	0.395			0.220			0.052		
M17	0.361	0.3593	0.0028	0.194	0.1923	0.0025	0.053	0.0518	0.0018
M17	0.357			0.191			0.051		
M18	0.410	0.4088	0.0021	0.231	0.2340	0.0046	0.040	0.0421	0.0034
M18	0.407			0.237			0.045		
M19	0.421	0.4193	0.0028	0.174	0.1748	0.0006	0.060	0.0591	0.0016
M19	0.417			0.175			0.058		
M20	0.384	0.3830	0.0011	1.091	1.0926	0.0027	0.075	0.0790	0.0060
M20	0.382			1.095			0.083		
M21	0.484	0.4833	0.0007	1.184	1.1833	0.0014	0.080	0.0816	0.0019

M21	0.483			1.182			0.083		
M22	0.396	0.3943	0.0028	0.203	0.2024	0.0005	0.095	0.0928	0.0028
M22	0.392			0.202			0.091		
M23	0.491	0.4926	0.0019	0.312	0.3103	0.0021	0.075	0.0700	0.0074
M23	0.494			0.309			0.065		
M24	0.591	0.5921	0.0012	1.275	1.2786	0.0048	0.091	0.0910	0.0004
M24	0.593			1.282			0.091		

12.1.6. Punto de Salida 2

Cuadro 18. Resultados análisis de laboratorio para el Punto de Salida 2.

Tratamiento	Cu	Promedio	Desv Est	Pb	Promedio	Desv Est	Fe	Promedio	Desv Est
M14	0.028	0.029	0.001	0.484	0.482	0.0025	0.733	0.734	0.001
M14	0.030			0.480			0.735		
M16	0.024	0.023	0.002	0.294	0.293	0.0011	0.855	0.845	0.014
M16	0.021			0.292			0.835		
M18	0.040	0.039	0.001	0.344	0.345	0.0018	0.784	0.783	0.001
M18	0.039			0.346			0.782		
M20	0.042	0.043	0.001	0.256	0.255	0.0014	0.978	0.975	0.004
M20	0.044			0.254			0.972		
M22	0.042	0.042	0.001	0.183	0.182	0.0014	0.923	0.927	0.006
M22	0.043			0.181			0.932		
M24	0.034	0.034	0.000	0.534	0.534	0.0004	0.895	0.894	0.001
M24	0.034			0.534			0.893		

Cuadro 18. Continúa...

Tratamiento	Mn	Promedio	Desv Est	Zn	Promedio	Desv Est	Cd	Promedio	Desv Est
M14	0.351	0.350	0.0007	0.481	0.482	0.0021	0.0340	0.032	0.0027
M14	0.350			0.484			0.0303		
M16	0.391	0.391	0.0004	0.393	0.392	0.0011	0.0275	0.028	0.0011
M16	0.391			0.391			0.0290		
M18	0.295	0.294	0.0018	0.393	0.395	0.0032	0.0298	0.031	0.0011
M18	0.293			0.397			0.0313		
M20	0.185	0.184	0.0009	0.560	0.561	0.0011	0.0495	0.049	0.0005
M20	0.184			0.562			0.0489		
M22	0.284	0.285	0.0014	0.633	0.632	0.0011	0.0533	0.052	0.0013
M22	0.286			0.631			0.0514		
M24	0.284	0.284	0.0001	0.495	0.492	0.0046	0.0433	0.043	0.0002
M24	0.284			0.489			0.0430		

12.1.7. Punto de Salida 3

Cuadro 19. Resultados análisis de laboratorio para el Punto de Salida 3.

Tratamiento	Cu	Promedio	Desv Est	Pb	Promedio	Desv Est	Fe	Promedio	Desv Est
M15	0.0170	0.0178	0.0011	0.284	0.2834	0.0005	0.733	0.7340	0.0011
M15	0.0185			0.283			0.735		
M17	0.0198	0.0201	0.0005	0.196	0.1940	0.0032	0.716	0.7193	0.0042
M17	0.0205			0.192			0.722		
M19	0.0188	0.0183	0.0007	0.328	0.3276	0.0005	0.631	0.6321	0.0023
M19	0.0178			0.327			0.634		
M21	0.0256	0.0252	0.0006	0.291	0.2926	0.0030	0.702	0.7018	0.0007
M21	0.0248			0.295			0.701		
M23	0.0208	0.0203	0.0007	0.305	0.3185	0.0194	0.500	0.5023	0.0035
M23	0.0198			0.332			0.505		

Cuadro 19. Continúa...

Tratamiento	Mn	Promedio	Desv Est	Zn	Promedio	Desv Est	Cd	Promedio	Desv Est
M15	0.195	0.1934	0.0016	0.381	0.3824	0.0027	0.0133	0.0193	0.0085
M15	0.192			0.384			0.0253		
M17	0.284	0.2835	0.0007	0.286	0.2845	0.0014	0.0188	0.0183	0.0006
M17	0.283			0.284			0.0179		
M19	0.296	0.2945	0.0021	0.295	0.2945	0.0004	0.0204	0.0202	0.0003
M19	0.293			0.294			0.0200		
M21	0.284	0.2833	0.0004	0.366	0.3671	0.0012	0.0231	0.0239	0.0013
M21	0.283			0.368			0.0248		
M23	0.214	0.2145	0.0014	0.396	0.3946	0.0023	0.0231	0.0263	0.0046
M23	0.216			0.393			0.0295		

12.2. Formato utilizado en los aforos de los sitios de muestreo (Libreta de campo)

	Colegio de Postgraduados Campus Montecillos.					
COLEGIO DE POSTGRADUADOS	LIBRETA DE CAMPO. Toma de datos de las estaciones de aforo, distrito minero de Zimapán, Hidalgo.					
Estacion de Aforo: Hora de observacion: Aforador:						
Seccion Trasversal del cauce.						
Parte Inicial		Parte Media		Parte Final		Observaciones
Distancia (cm)	Profundidad (cm)	Distancia (cm)	Profundidad (cm)	Distancia (cm)	Profundidad (cm)	
Medición de la velocidad del flujo.						
Repetición	Distancia de recorrido (m)	Tiempo (s)	Observaciones			
1	10					
2	10					
3	10					
4	10					
5	10					
6	10					
7	10					
8	10					
9	10					
10	10					

12.3. Determinación del periodo de lluvias máximo en Zimapán, Hidalgo

Según el Servicio Meteorológico Nacional, la estación climática más cercana al municipio (17.3 km) y que presenta datos climáticos más completos (datos hasta el 2007) es la Estación Meteorológica Encarnación, Zimapán. Los datos de ubicación de esta estación son:

- Clave: 13065
- Latitud N: 20° 53' 0"
- Longitud W: 99° 12' 0"
- Altitud: 2,140

El análisis para determinar el comportamiento de la precipitación está basado en un periodo de análisis de 9 años, información que se muestra en la siguiente tabla:

Cuadro 20. Comportamiento de la precipitación media en Zimapán Hidalgo para un periodo de 9 años de análisis.

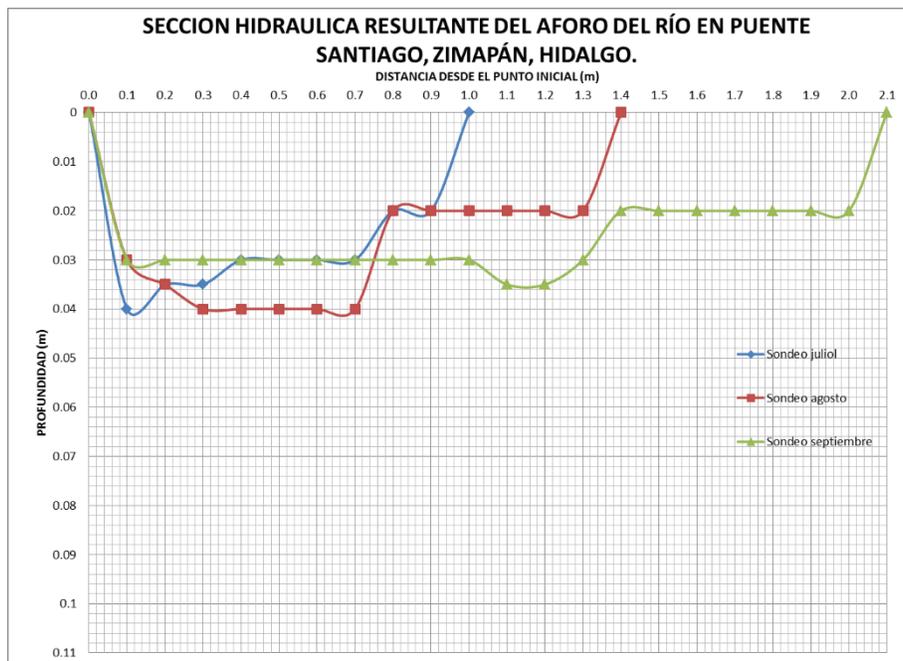
Mes	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Prom PP
Ene	0	12.5	12.5	39.5	57.5	35	18.5	7	0	20
Feb	8	8.5	26	7	1.5	10	8.5	3	102	19
Mar	7	11	14	7.5	0	62	6.5	31.5	21	18
Abr	0	24	40	16.5	9.5	13	24.5	34	61	25
May	6	19	103	64	17.5	48.5	78.5	64	19	47
Jun	134	132.5	112.5	211.5	98	168.5	65.5	57	149.5	125
Jul	160.5	33.5	151	127	211.7	164.5	312.5	38	101.5	*144
Ago	138	201.5	176	92	106.5	93.5	168.5	208.5	49.5	*137
Sep	363	166.5	333.5	210	427.2	123.8	99	319	182	*247
Oct	156.8	66	117.5	105	111.5	144.5	85.6	179.5	44	112
Nov	52	15	16.5	64.5	83.5	0	95	181	3.5	57
Dic	0	25.5	3	2.5	10.5	7	28.1	18.5	3	11
Anual	1,025	716	1,106	947	1,135	870	991	1,141	736	963

*Precipitación máxima en los meses de julio, agosto y septiembre en Zimapán, Hidalgo.

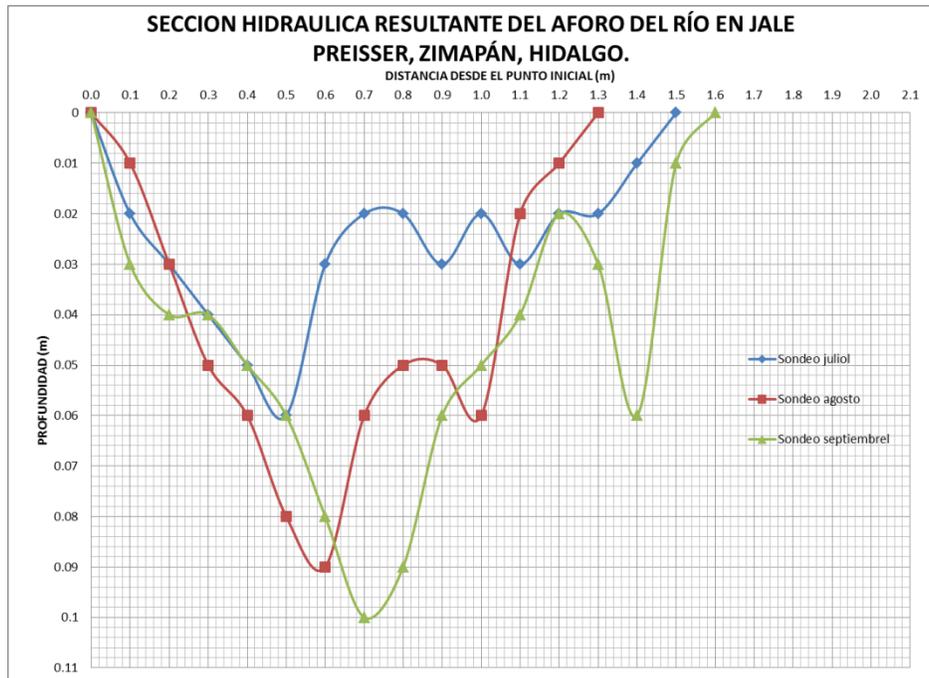
12.4. Sección transversal de los sitios de muestreo analizados

Se presenta la sección hidráulica transversal de los aforos realizados en los sitio de muestreo, mostrando en cada caso la sección del mes de julio, agosto y septiembre.

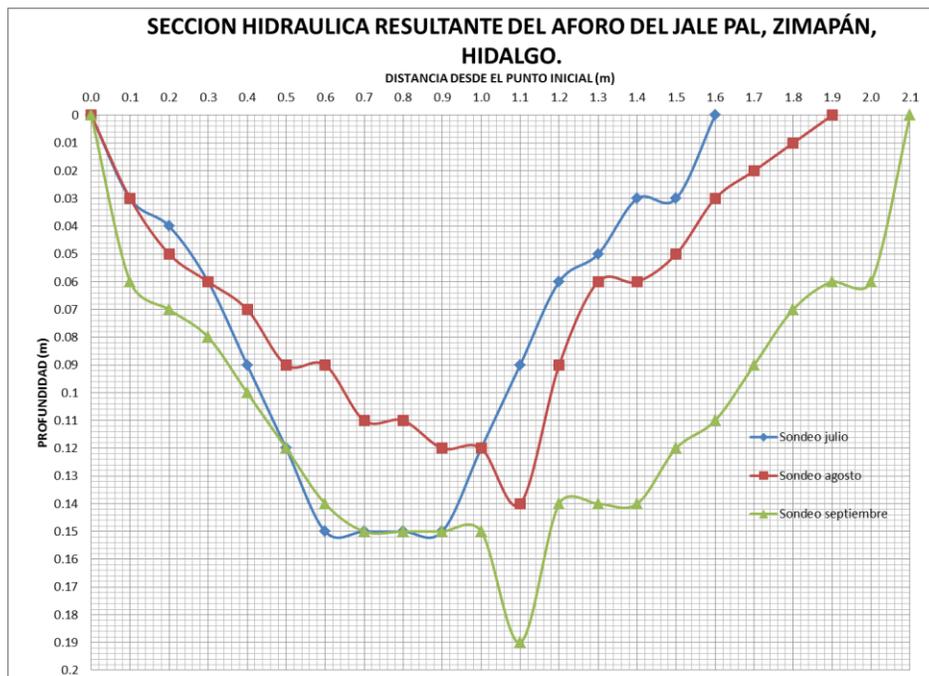
12.4.1. Sección Hidráulica resultante de julio, agosto y septiembre para el Puente Santiago



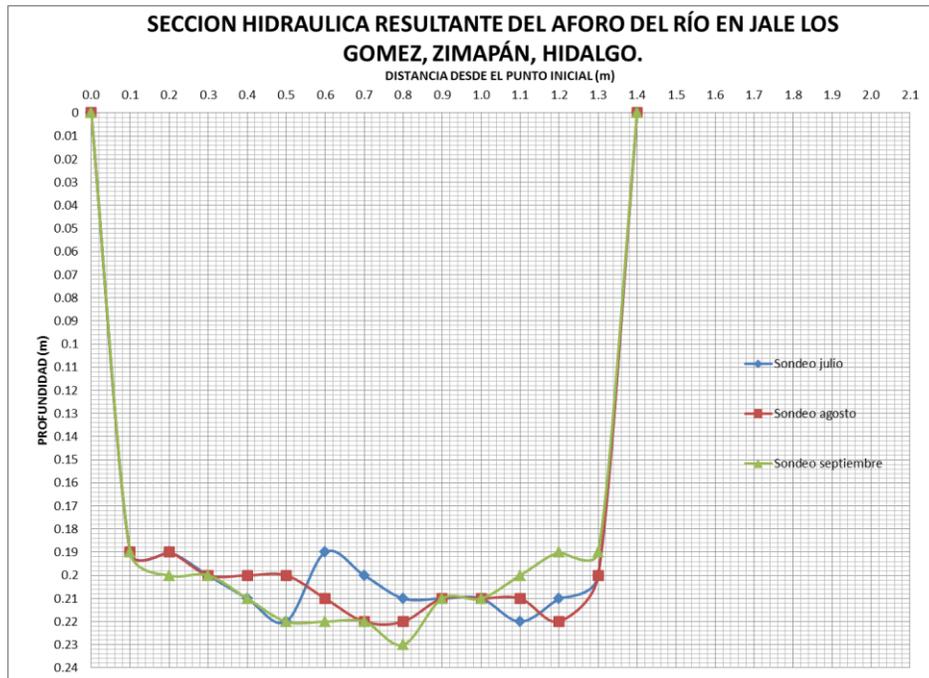
12.4.2. Sección Hidráulica resultante de julio, agosto y septiembre para el Jale Preisser



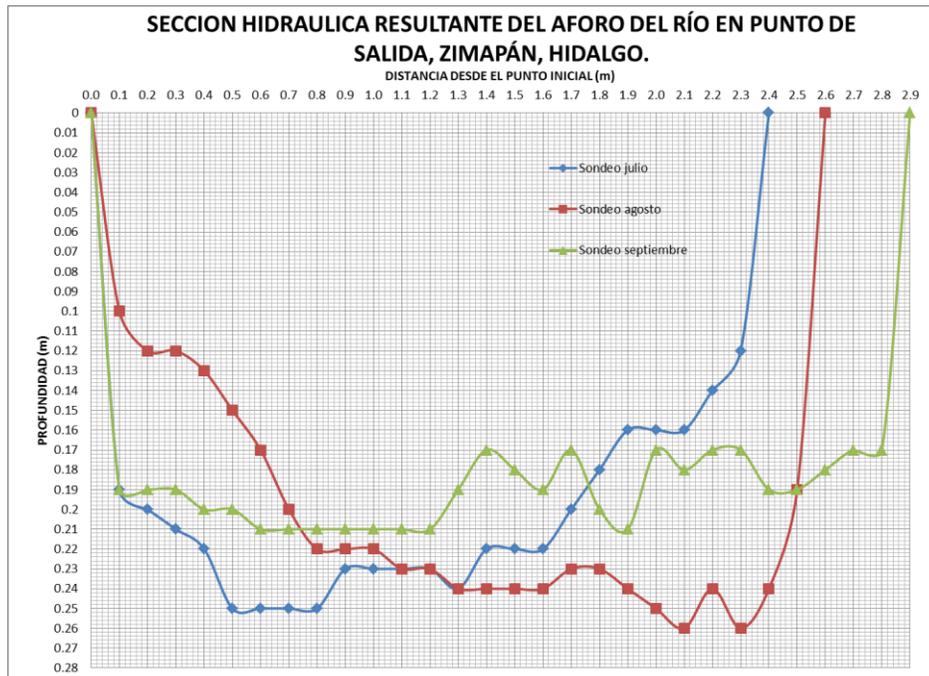
12.4.3. Sección Hidráulica resultante de julio, agosto y septiembre para el Jale Pal



12.4.4. Sección Hidráulica resultante de julio, agosto y septiembre para el Jale Los Gómez



12.4.5. Sección Hidráulica resultante de julio, agosto y septiembre para el Punto de salida 1



12.5. Variables analizadas

12.5.1. Variables Hidrológicas

- Gasto hidráulico total.
- Gasto hidráulico parcial.
- Área total.
- Área parcial.
- Velocidad parcial.
- Velocidad media de corriente.
- Tiempo de recorrido.
- Distancia.
- Profundidad.

12.6.2. Variables Químicas

- Concentración de metales pesados.
- Límite máximo permisible.
- Volumen de muestra.
- Diluciones.

12.6.3. Variables Estadísticas

- Promedio
- Desviación estándar
- Varianza
- Correlación.

12.7. Nomenclatura

- Q_T = Gasto hidráulico total
- Q_P = Gasto hidráulico parcial
- A_T = Área total
- A_P = Área parcial
- V_P = Velocidad parcial

- V_M = Velocidad media de corriente
- u = Numero de orden.
- L_u = Longitud de la corriente de la cuenca.
- km = kilómetros.
- km^2 = kilómetros cuadrados.
- kg = kilogramo.
- g = gramo.
- mg = miligramo.
- μg = microgramo.
- $msnm$ = metros sobre el nivel del mar.
- $\%$ = porcentaje.
- km/km^2 = kilómetro por kilómetro cuadrado.
- $drenajes/km^2$ = drenaje por kilómetro cuadrado.
- km^2/km = kilómetro cuadrado por kilómetro.
- mg/l = miligramos por litro.
- ml = mililitros.
- ppm = partes por millón.
- V = volumen.
- m^3 = metros cúbicos.
- m^2 = metros cuadrados.
- m = metros.
- l/s = litros por segundo.
- m/s = metros por segundo.
- $\mu g/kg$ = microgramo por kilogramo.
- $\mu g/l$ = microgramo por litro.
- mg/kg = miligramo por kilogramo.
- lb = libra.
- s = segundos.
- t = tiempo.
- h = profundidad.

- d = distancia.
- MP = metales pesados.
- d4 = distancia horizontal de la profundidad 4.
- d3 = distancia horizontal de la profundidad 3.
- d2 = distancia horizontal de la profundidad 2.
- h4 = profundidad 4.
- h3 = profundidad 3.
- h2 = profundidad 2.
- Cu = Cobre.
- Pb = Plomo.
- Fe = Hierro.
- Mn = Manganeso.
- Zn = Zinc.
- Cd = Cadmio.
- Ba = Bario.
- Cr = Cromo.
- Sr = Estroncio.
- Li = Litio.
- Ni = Níquel.
- Ar = Arsénico.
- P = fosforo.
- Cl = cloro.
- Ca = calcio.
- ZnS = Esfalerita.
- CdCO₃ = Carbonato de cadmio.
- Cd(OH)₂ = Hidroxido de cadmio.
- CdCl₂ = Cloruro de cadmio
- CdSO₄ = Sulfato de cadmio.
- PbS = Galena.
- MnS₁₂O₃ = Braunita.
- MnO₂ = Pirolusita.
- Fe₂O₃ = hematita.

- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ = limonita.
- FeS_2 = piritas.
- $\text{Fe}(\text{CrO}_2)_2$ = cromita.
- PbCO_3 = cerusita.
- PbSO_4 = anglesita.
- $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ = piromorfita.