



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

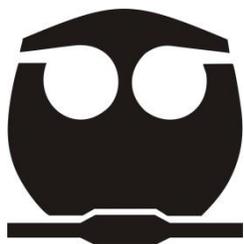
**“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS
(Cd, Cr, Mn, Pb y V) EN AGUA SUPERFICIAL DE
4 POBLADOS DE TAXCO DE ALARCÓN,
GUERRERO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA FARMACÉUTICA BIÓLOGA**

PRESENTA:

LAURA XOCHITL VALENCIA LÓPEZ



MÉXICO, D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: EUGENIO OCTAVIO REYES SALAS

VOCAL: Profesor: LUCIA HERNÁNDEZ GARCADIEGO

SECRETARIO: Profesor: ROCIO GARCÍA MARTÍNEZ

1er. SUPLENTE: Profesor: ADRIAN DE SANTIAGO ZARATE

2º SUPLENTE: Profesor: GEMA LUZ ANDRACA AYALA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: TAXCO DE ALARCÓN, GUERRERO Y EN EL CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

DRA. ROCÍO GARCÍA MARTÍNEZ

SUSTENTANTE (S):

LAURA XOCHITL VALENCIA LÓPEZ

ÍNDICE GENERAL

	Página
<i>Índice de tablas</i>	I
<i>Índice de figuras</i>	III
<i>Lista de abreviaturas</i>	V
RESUMEN	VI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	3
2.1. Taxco de Alarcón, Guerrero	3
2.1.1. El Horconcito	5
2.1.2. El Aguacatito	10
2.1.3. Huahuaxtla	11
2.1.4. Tlamacazapa	15
2.2. Justificación	20
2.3. Objetivo general	20
2.4. Objetivos particulares	20
CAPÍTULO 3. GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE METALES PESADOS	21
3.1. Procesos geoquímicos en el agua	21
3.2. Procesos geoquímicos en el suelo	22
3.3. Procesos geoquímicos en el aire	23
3.4. Geoquímica de residuos mineros	25
CAPÍTULO 4. METALES PESADOS	29
4.1. Propiedades físicas	29
4.2. Propiedades químicas	29
4.3. Fuentes de emisión	30
4.3.1. Fuentes naturales	30
4.3.2. Fuentes antropogénicas	32
4.4. Aspectos toxicológicos	34
4.4.1. Biodisponibilidad	35
4.5. Propiedades de metales específicos	36
4.5.1. Cadmio	36
4.5.2. Cromo	38
4.5.3. Manganeso	39
4.5.4. Plomo	41
4.5.5. Vanadio	42
4.6. Espectrofotometría de Absorción Atómica	44
4.6.1. Espectrofotometría de Absorción Atómica (flama)	45
4.6.2. Espectroscopia de Absorción Atómica (Horno de grafito)	48
4.7. Normas de calidad de agua	50

CAPÍTULO 5. ACTIVIDAD MINERA EN LA REGIÓN DE TAXCO DE ALARCÓN, GUERRERO	52
CAPÍTULO 6. DISEÑO EXPERIMENTAL	56
6.1. Diseño del muestreo	56
6.2. Ubicación de los sitios de muestreo	56
6.2.1. El Horconcito	56
6.2.2. El Aguacatito	59
6.2.3. Huahuaxtla	60
6.2.4. Tlamacazapa	62
6.3. Metodología	64
6.4. Preparación de material de vidrio para el muestreo y análisis	64
6.5. Análisis químico	65
6.6. Aseguramiento de calidad	67
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
7.1. Resultados	71
7.2. Análisis estadístico de datos	78
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	94
PERSPECTIVAS	96
BIBLIOGRAFÍA	97

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y concentración de metales pesados en muestras de agua del poblado El Horconcito.	9
Tabla 2. Concentración de metales alcalinos y metales alcalinotérreos en muestras de agua del poblado El Horconcito.	9
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y concentración de metales pesados en muestras de agua del poblado El Horconcito.	10
Tabla 4. Concentración de metales alcalinos y metales alcalinotérreos en muestras de agua del poblado el Horconcito.	10
Tabla 5. Caracterización de jales mineros mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X en Huahuaxtla.	15
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos y concentración de metales pesados en muestras de agua de Tlamacazapa.	18
Tabla 7. Concentración de metales alcalinos y metales alcalinotérreos en muestras de agua de Tlamacazapa.	19
Tabla 8. Metales pesados asociados a minerales primarios sulfurados.	30
Tabla 9. Metales pesados asociados a minerales secundarios.	30
Tabla 10. Niveles medios de elementos potencialmente tóxicos en rocas y suelos (mg/Kg).	31
Tabla 11. Elementos más importantes en agua derivados de fuentes naturales.	31
Tabla 12. Fuentes antropogénicas de metales pesados en suelos.	33
Tabla 13. Elementos más importantes en agua derivados de fuentes antropogénicas.	33
Tabla 14. Principales riesgos de intoxicación por Cd.	37
Tabla 15. Principales riesgos de intoxicación por Cr.	38
Tabla 16. Principales riesgos de intoxicación por Mn.	40
Tabla 17. Principales riesgos de intoxicación por Pb.	41
Tabla 18. Principales riesgos de intoxicación por V.	43
Tabla 19. Diferencias entre la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con atomización de flama y espectrofotometría de horno de grafito.	45

Tabla 20. Tipos de flama.	48
Tabla 21. Valores normados y límites máximos permitidos para los parámetros fisicoquímicos, metales alcalinos, metales alcalinotérreos y metales pesados en agua.	51
Tabla 22. Temperaturas de calcinación y atomización del espectrofotómetro de Absorción Atómica (horno de grafito) GBC, modelo Avanta Σ , así como las longitudes de onda utilizadas para los análisis de metales pesados.	66
Tabla 23. Longitud de onda de las lámparas utilizadas en este estudio.	67
Tabla 24. Parámetros fisicoquímicos obtenidos en cada sitio de muestreo. Los valores que rebasaron los límites establecidos en la NOM 127-SSA1-1994 se encuentran en negritas.	71
Tabla 25. Concentraciones de Cd, Cr, Mn, Pb y V en agua superficial en $\mu\text{g L}^{-1}$.	72
Tabla 26. Concentraciones de K, Na, Ca y Mg y CaCO_3 (dureza total) en agua superficial en mg L^{-1} , los valores en negritas rebasaron el límite establecido en la NOM 127-SSA1-1994.	76
Tabla 27. Concentraciones promedio (CP), mínimo (Mín) y máximo (Máx) desviación estándar de la concentración promedio (DECP), de los resultados de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos en agua colectada del poblado El Horconcito.	78
Tabla 28. Concentraciones promedio (CP), mínimo (Mín) y máximo (Máx) desviación estándar de la concentración promedio (DECP), de los resultados de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos en agua colectada del poblado El Aguacatito.	79
Tabla 29. Concentraciones promedio (CP), mínimo (Mín) y máximo (Máx) desviación estándar de la concentración promedio (DECP), de los resultados de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos en agua colectada del poblado Huahuaxtla.	79
Tabla 30. Concentraciones promedio (CP), mínimo (Mín) y máximo (Máx) desviación estándar de la concentración promedio (DECP), de los resultados de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos en agua colectada del poblado Tlamacazapa.	80
Tabla 31. Análisis factorial, relación entre los efectos (tiempo, sitio y tiempo/sitio) con los parámetros fisicoquímicos, concentración de metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos.	83
Tabla 32. Matriz de Correlación de Spearman para el poblado "El Horconcito".	90
Tabla 33. Matriz de Correlación de Spearman para el poblado "Tlamacazapa".	92

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Mapa de ubicación de Taxco de Alarcón, Guerrero.	4
Figura 2. Mapa de ubicación de El Horconcito.	6
Figura 3. Mapa hidrológico de El Horconcito.	8
Figura 4. Mapa fisiográfico de Huahuaxtla.	12
Figura 5. Mapa de ubicación de las acumulaciones de desechos mineros representados con una "X" en la región de Huahuaxtla.	14
Figura 6. Mapa de las provincias fisiográficas de la República Mexicana, el área se localiza en la cuenca de Balsas-Mezcala (Raisz E., 1964).	16
Figura 7. Diagrama de la relación entre la actividad minera y sus efectos en el medio ambiente.	21
Figura 8. Espectrómetro de absorción atómica en flama.	46
Figura 9. Sección transversal de un atomizador electrotérmico.	49
Figura 10. Ubicación de las muestras tomadas en el poblado "El Horconcito".	57
Figura 11. Fotos de los puntos de muestreo del poblado El Horconcito.	58
Figura 12. Ubicación del poblado "El Aguacatito".	59
Figura 13. Foto del sitio de muestreo del poblado El Aguacatito.	59
Figura 14. Mapa de ubicación de las muestras del poblado "Huahuaxtla".	60
Figura 15. Fotos de los puntos de muestreo del poblado Huahuaxtla.	61
Figura 16. Mapa de ubicación del poblado "Tlamacazapa".	62
Figura 17. Fotos de los puntos de muestreo del poblado Tlamacazapa.	63
Figura 18. Espectrofotómetro de Absorción Atómica (horno de grafito) GBC, modelo Avanta Σ .	66
Figura 19. Espectrofotómetro de Absorción Atómica (flama) GBC modelo 932 AA.	67
Figura 20. Curva de calibración de Cr obtenida durante el análisis.	69
Figura 21. Curva de calibración de Na obtenida durante el análisis.	70

Figura 22. Comparación de pH de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994. Intervalo permisible 6.5-8.5.	73
Figura 23. Comparación de la concentración de Cd de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994.	73
Figura 24. Comparación de la concentración de Cr de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994.	74
Figura 25. Comparación de la concentración de Mn de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994.	74
Figura 26. Comparación de la concentración de Pb de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994.	75
Figura 27. Comparación de la concentración de V de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994.	75
Figura 28. Comparación de la concentración de Na de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994.	77
Figura 29. Comparación de la dureza total (CaCO_3) de las muestras con el límite máximo establecido en la NOM-127-SSA1-1994.	77
Figura 30. Gráficas de dependencia efecto-variable.	83
Figura 31. Gráficas de correlación de Tlamacazapa.	93

LISTA DE ABREVIATURAS

DAM	Drenaje ácido de mina
mg L ⁻¹	Miligramos sobre litro
µS cm ⁻¹	Microsiemens sobre centímetro
mS cm ⁻¹	Milisiemens sobre centímetro
msnm	Metro sobre nivel del mar
N.D.	No Determinado
ng L ⁻¹	Nanogramo sobre litro
NMX-AA-003	NMX-AA-003-1980, "Aguas residuales-Muestreo".
NMX-AA-051	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".
NOM-014	NOM 014-SSA1-1993, "Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados".
NOM-127	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".
OMS	Organización Mundial de la Salud
ppb	Partes por billón
ppt	Partes por trillón
UTM	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator.

RESUMEN

La alta toxicidad, amplia distribución y uso extensivo de metales pesados en diversas actividades antropogénicas, así como las fuentes naturales hacen necesario un monitoreo continuo de sus concentraciones en el agua de consumo humano.

Este trabajo es parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) del proyecto titulado “Distribución de mercurio (Hg) en agua de lluvia y aerosoles atmosféricos, su migración y su relación con mercurio (Hg) en suelos, en una zona minera de Taxco de Alarcón, Guerrero”.

Esta tesis se basa en el estudio y determinación de 5 metales pesados (Cd, Cr, Mn, Pb y V), en 4 poblados de Taxco de Alarcón, Guerrero: El Horconcito, El Aguacatito, Huahuaxtla y Tlamacazapa, en muestras de agua que los pobladores utilizan para consumo humano.

Este estudio consistió en tres partes fundamentalmente: trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete. En el trabajo de campo se colectaron 26 muestras en total, de manantiales, norias y ríos, durante 3 muestreos: Octubre 2011 (post lluvias), Febrero (estiaje) y Agosto (lluvias) 2012; a cada muestra se le determinaron parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH y conductividad). En el laboratorio se analizaron mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica, donde se cuantificaron Cd, Cr, Mn, Pb y V en horno de grafito y K, Na, Ca y Mg por flama.

El trabajo de gabinete consistió en la elaboración de mapas con los programas Surfer y Global mapper, además del análisis estadístico de los datos mediante los programas Statistica versión 2007 y JMP 7.0 versión 2007.

Los resultados se compararon con los límites permisibles establecidos en la modificación de la NOM 127-SSA1-1994; en los poblados El Horconcito y Tlamacazapa se encontraron muestras que no estaban dentro del intervalo establecido para pH. En los 4 poblados la cantidad de metales no sobrepasó el límite permisible establecido. En cuanto a la dureza total hubo 4 muestras que pasaron el límite máximo permisible en el poblado de Tlamacazapa.

Al hacer la comparación con estudios previos se corroboró que: el Cd fue el metal con menor concentración en los poblados; en este estudio el Mn fue el metal más abundante de los poblados aunque en estudios previos no se detectó, los poblados con mayor cantidad de Pb y V fueron El Horconcito y Tlamacazapa, respectivamente

Los factores que influyeron en la concentración de metales fueron: tiempo (Cr y Mn) y sitio (Pb y V).

Se realizó la prueba no paramétrica de correlación de Spearman, para los poblados de El Horconcito y Tlamacazapa, encontrando diferentes niveles de correlación entre las variables analizadas (parámetros fisicoquímicos, concentración de metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos).

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para el sustento de la vida y de acuerdo a su origen se puede dividir en agua superficial y subterránea. La superficial es agua de precipitación que no se infiltra en el suelo o que no regresa a la atmósfera, por evaporación o transpiración; se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra; algunos ejemplos son: ríos, arroyos, estanques, lagos, lagunas, pantanos, charcos y humedales, entre otros.

El agua subterránea se define como el agua subsuperficial que aparece justo bajo el nivel freático en suelos y formaciones geológicas completamente saturadas. (Arizabalo R. D. y Díaz G., 1991).

En el país se utiliza tanto agua superficial como subterránea para diversas actividades. Por ejemplo: en la agricultura el 67% de agua que se usa procede de agua superficial, para abastecimiento público se utiliza el 62% de agua subterránea y la industria utiliza 74% del caudal que se extrae del agua superficial. (CONAGUA, 2008).

Debido al incremento poblacional, cada vez existe una mayor demanda de agua con calidad adecuada para uso doméstico y consumo humano, para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y las relacionadas con elementos tóxicos, los cuales tienden a ser absorbidos y concentrados por los seres vivos (NOM-127-SSA1-1994).

En los últimos años se ha encontrado que existen varias causas potenciales del deterioro de la calidad del agua como: agua residual industrial, contaminación urbana, agricultura, ganadería, granjas avícolas, minería, entre otras.

La minería ha sido de gran importancia y ha influido en el desarrollo económico-social a través de la generación de empleos y de materias primas; en Taxco comenzó desde 1428, sin embargo, es una de las actividades que ha producido mayor grado de contaminación con residuos tóxicos (desechos sólidos y líquidos) los cuales contienen metales pesados que resultan dañinos para la biota y el medio ambiente (Fergusson, 1990; Salomons 1990).

Durante el procesamiento de los minerales se forman jales, residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (NOM-141-SEMARNAT-2003).

El jal puede generar lixiviado que se define como el líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción química, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos. En el caso de los lixiviados generados por el jal, éstos se conocen como drenaje ácido de mina (DAM) (NOM-141-SEMARNAT-2003).

En la mayoría de las minas, los jales son acumulados en presas construidas sobre arroyos y barrancas alrededor de las minas, por lo que se encuentran en interacción constante con el aire y la lluvia, produciendo la oxidación de los minerales sulfurados, generando el drenaje ácido de mina y permitiendo la dispersión mecánica por arrastre del particulado por la lluvia o por transporte eólico hacia los recursos naturales del entorno (Salomons, 1995).

Aunque por lo general las concentraciones totales de metales en los jales mineros son muy elevadas, sólo una fracción es susceptible de ser liberada a través de procesos simples como la lixiviación. La tasa de liberación es una función de la acción de procesos de oxidación-reducción, disolución-precipitación y sorción-desorción.

El tipo de contaminantes químicos y el grado de contaminación del agua subterránea y superficial depende de la geología y edafología por donde el agua fluye antes de llegar a los mantos acuíferos.

Por lo anterior en la actualidad la mayor preocupación sobre la seguridad del agua de poblados mineros es la presencia potencial de contaminantes químicos. Y se debe de realizar un monitoreo del agua para analizar diferentes parámetros con el fin de asegurar y preservar la calidad de esta antes de que se distribuya y se suministre a los hogares (Manahan 2007).

El agua que se consume debe de reunir las siguientes características: estar libre de contaminantes tóxicos y microorganismos patógenos, ser transparente y carente de colores, olores y sabores extraños (NOM-127-SSA1-1994).

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

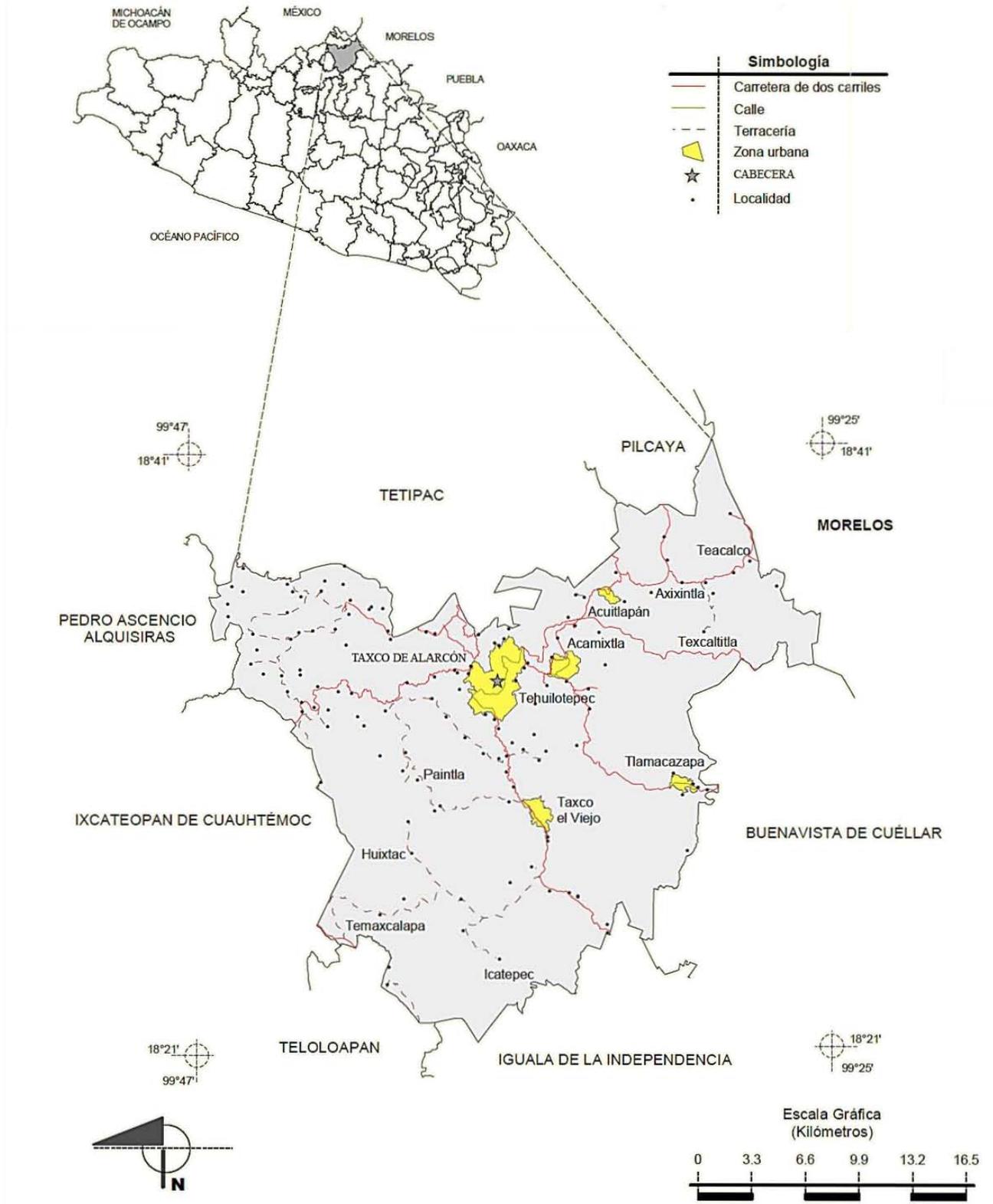
2.1. Taxco de Alarcón, Guerrero

Taxco de Alarcón, Guerrero, tiene una superficie continental de 650.79 km², se localiza entre las coordenadas 18° 54' - 16° 18' latitud norte, 97° 57' - 102° 11' longitud oeste. La cabecera municipal se encuentra entre las coordenadas 18° 33' latitud norte, 99° 36' longitud oeste respecto al meridiano de Greenwich. Con una altitud de 1,800 msnm. Colinda al norte con los municipios de Tetipac, Pilcaya y el Estado de Morelos; al este con el Estado de Morelos y el municipio de Buenavista de Cuéllar; al sur con los municipios de Buenavista de Cuéllar, Iguala de la Independencia, Teloloapan e Ixcateopan de Cuauhtémoc; al oeste con los municipios de Ixcateopan de Cuauhtémoc, Pedro Ascencio Alquisiras y Tetipac (Figura 1).

Clima

En el municipio el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (26.42%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (25.45%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (20.86%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (15.93%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (11.27%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (0.07%). La temperatura anual promedio es de 18°C en la zona montañosa y mayor a 20°C en zonas planas, los meses más calurosos son marzo, abril y mayo, el más frío es diciembre.

Figura 1. Mapa ubicación de Taxco de Alarcón, Guerrero.



Tomado de INEGI. Marco geostatístico municipal 2005, versión 3.1.

Suelo

Los tipos de suelo son: chernozem (tipo de suelo zonal con un horizonte superficial negro con abundancia en materia orgánica, que deriva hacia un horizonte más claro, calcificado, aptos para la agricultura por la alta cantidad de humus, potasio, fósforo) negro y café grisáceo, café rojizo y amarillo y arcillo arenoso.

Los cuerpos de mineral de Taxco son de tres tipos: (i) minerales en relleno de fracturas (vetas formadas por fluidos hidrotermales); (ii) cuerpos minerales de remplazamiento en rocas calcáreas; y (iii) chimeneas (stockworks).

El distrito minero de Taxco ha sido dividido en tres zonas mineralizadas para su mejor descripción, la zona mineralizada Huahuaxtla, la zona mineralizada Coxcatlán-Tlamacazapa y la zona mineralizada Buenavista de Cuellar (Servicio Geológico Mexicano, 2004).

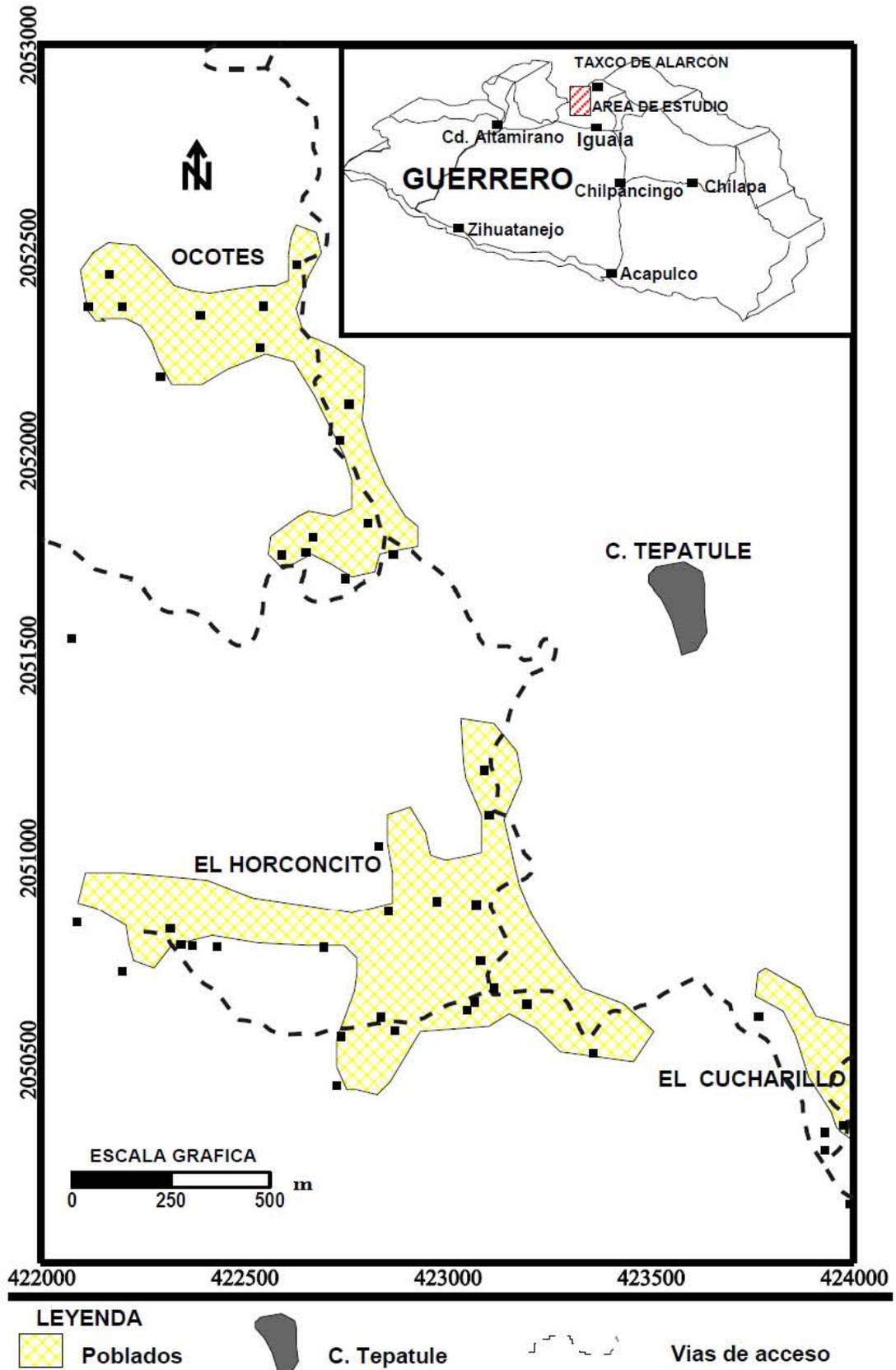
Orografía

La configuración del suelo del municipio de Taxco presenta tres tipos de relieve: zonas accidentadas (75 %), zonas semiplanas (20 %) y zonas planas (5 %). Las elevaciones de las zonas accidentadas varían entre 1500 y 2300 msnm, las zonas planas y semiplanas se ubican entre 1000 y 1500 msnm.

2.1.1. El Horconcito

Se localiza en el norte del Estado de Guerrero, entre los municipios de Taxco de Alarcón e Ixcateopan de Cuauhtémoc. La vía de acceso es por la Carretera Federal Taxco-Ixcateopan, atraviesa los poblados: El Aguacatito, la Cascada, San Pedro, El Vergel, Chichila, Barrio La Mora y Plaza de Gallos, hay una desviación hacia el norte - este, donde se encuentra el Cucharillo y finalmente se llega a El Horconcito (Figura 2). La distancia entre, la cabecera municipal de Taxco de Alarcón y El Poblado El Horconcito es de ~27 km y de Ixcateopan de Cuauhtémoc es de 7 km. El área de estudio se encuentra entre las coordenadas UTM 2053000-2049000 de latitud norte y 420000-426000 de longitud oeste.

Figura 2. Mapa de ubicación de El Horconcito



Fisiografía

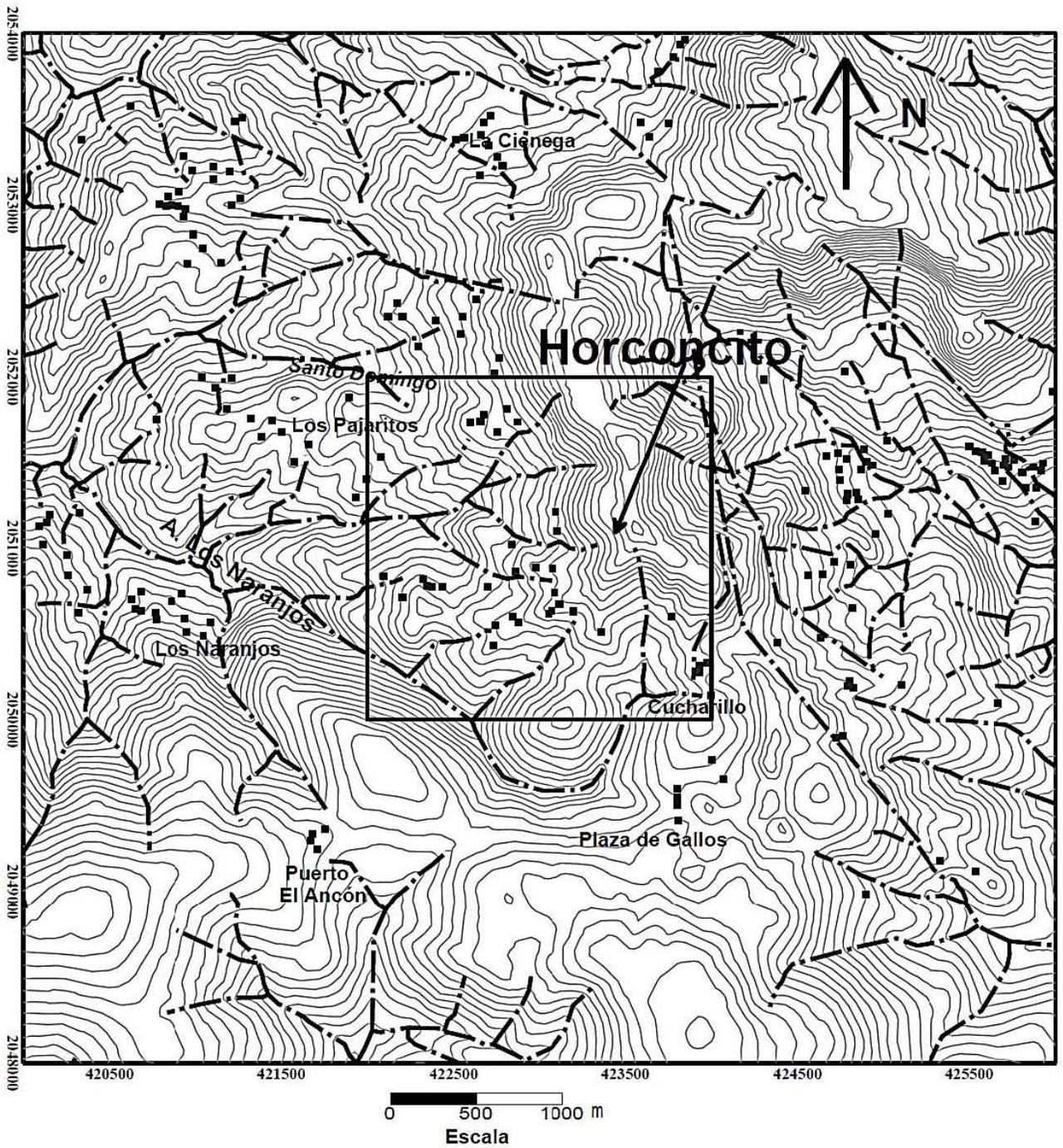
El área de estudio se ubica en la parte norte de la Cuenca del Balsas-Mezcala, dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, la cual se caracteriza por ser una cuenca conformada por arroyos discontinuos, presentes en rocas de edad Mesozoica de la plataforma marina carbonatada denominada Guerrero-Morelos (Campa, 1978; Campa y Ramírez, 1979). Las rocas de la plataforma marina Carbonatada Guerrero-Morelos son cubiertas por rocas volcánicas como riolitas e ignimbritas.

Hidrología

El Horconcito está dentro de la Sierra de Taxco que tiene una dirección general este-oeste, incluye elevaciones de 1 300 – 2 300 msnm y lomeríos altos de 1 600 -1 800 msnm. El funcionamiento hidrológico de la subcuenca Taxco-Cocula, comienza en las cercanías de El Horconcito que es la zona de recarga de toda la cuenca con altura máxima ~ 2 300 msnm. La trayectoria de los principales afluentes de la zona Norte del Estado de Guerrero es sobre rocas de la plataforma marina carbonatada constituida por calizas y lutitas de las Formaciones Morelos y Mezcala. (Figura 3).

El Horconcito se encuentra en la cuenca hidrológica del Río Balsas, los ríos y arroyos son tributarios de este, tienen una dirección norte-sur, perpendicular a la cuenca; sin embargo, en la zona del poblado también existen arroyos que drenan el agua hacia el poniente, donde se inician corrientes fluviales; en la parte central del área de estudio se inician las corrientes fluviales de tipo dendrítico que van del Cerro Tepatule hacia el Arroyo Los Naranjos; este podría corresponder a una fractura que controla el drenaje. Hacia el suroeste - sureste los arroyos fluviales son de tipo rectangular, lo que evidencia cambios en las formaciones rocosas.

Figura 3. Mapa hidrológico de El Horconcito.



Estudios previos

En estudios realizados por González M. (2008) sobre la hidrología y geoquímica del sitio en otros manantiales de la misma región, se encontró que el agua de este poblado no es apta para consumo humano (Tabla 1 y 2), por la presencia de concentraciones de Pb >0.01 mg L⁻¹ el cual es el límite máximo establecido permitido según la NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y concentración de metales pesados en muestras de agua del poblado El Horconcito

Muestra	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	pH	Cd (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)
Los Sauces (HS-1)	16.8	552	7.0	-	0.09	-
Pascual (HS-2)	15.6	580	7.9	-	-	0.14
El Fresno (HS-3)	19.5	564	7.4	-	0.15	0.08
Aguacate seco (HS-4)	18.7	697	6.9	-	-	0.08
Norias del centro (HS-5)	17.6	532	8.1	-	-	0.05
Manantial Tepatule (HS-6)	14.8	502	7.8	-	-	0.04

*- : Debajo del límite de detección
Tomado de González M., 2008.

Tabla 2. Concentración de metales alcalinos y metales alcalinotérreos en muestras de agua del poblado El Horconcito

Muestra	K (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)
Los Sauces (HS-1)	0.7	9.3	81.3	8.5
Pascual (HS-2)	0.6	8.4	82.4	10.3
El Fresno (HS-3)	1	8.3	82.4	9.8
Aguacate seco (HS-4)	0.5	6.8	109.5	7.3
Norias del centro (HS-5)	1	7.2	69	2.8
Manantial Tepatule (HS-6)	2	3.4	5.2	0.3

Tomado de González M., 2008.

Así mismo Popoca N., (2011) hizo un estudio en el Horconcito para determinar la concentración de elementos potencialmente tóxicos en muestras de suelo, roca y manantiales, y determinar su posible relación. En una muestra de agua encontró plomo con una concentración de (0.43 mg L⁻¹), que sobrepasa el establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (0.01 mg L⁻¹) (Tablas 3 y 4). Al comparar los resultados de diversos parámetros medidos (agua, suelo y roca), dedujo que algunos elementos como el Pb,

son contenidos de forma natural en la roca y son liberados al entrar en contacto con el agua, enriqueciéndola con este elemento.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y concentración de metales pesados en muestras de agua del poblado El Horconcito.

Clave	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	pH	Cd (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	Mg (mg/L)
M. Coahuira (HA1)	14.3	417	6.9	-	-	-	1.85
M. Tepatule (HA2)	14.4	38	7.4	-	-	-	-
M. Ocote (HA3)	14	94	7.0	-	-	-	1.09
M. Don Joaquín (H4A)	15.5	121	8.0	-	-	0.43	1
M. los Ailes (HA5)	18.2	543	6.8	-	-	-	9.31
M. Don Álvaro (HA6)	23.9	602	7.8	-	0.04	-	12.15
M. plan Ocotes (HA7)	18.7	243	7.0	-	-	-	1.9

*- : Debajo del límite de detección
Tomado de Popoca N., 2011.

Tabla 4. Concentración de metales alcalinos y metales alcalinotérreos en muestras de agua del poblado El Horconcito.

Clave	K (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)
M. Coahuira (HA1)	1.6	3.14	87.03	1.85
M. Tepatule (HA2)	3.86	5.14	3.36	-
M. Ocote (HA3)	2.59	5.34	14.16	1.09
M. Don Joaquín (H4A)	1.78	5.1	17.12	1
M. los Ailes (HA5)	-	5.85	95.08	9.31
M. Don Álvaro (HA6)	1.07	8.68	96.38	12.15
M. plan Ocotes (HA7)	2.01	5.41	36.3	1.9

*- : Debajo del límite de detección
Tomado de Popoca, 2011.

2.1.2. El Aguacatito

Geográficamente se ubica dentro de las coordenadas 2035500-2036500 de latitud norte y 433500-434500 de longitud Oeste, a una altura de 2290 msnm.

Se tomaron muestras de El Aguacatito ya que no hay estudios previos para este poblado.

2.1.3. Huahuaxtla

Se localiza en el norte del Estado de Guerrero, entre las coordenadas UTM 2035000 – 2037000 de Latitud Norte y 433000 – 435000 de Longitud Este.

La vía de acceso es por la carretera federal No. 95 México – Acapulco, en el tramo que conecta a las ciudades de Taxco de Alarcón e Iguala de la Independencia. En el Km 106 a la altura de la comunidad de Puente Campuzano, está la desviación que comunica al poblado de Huahuaxtla.

Fisiografía

Se ubica en la Sierra Madre, el relieve está constituido por topofomas de alturas que oscilan entre 1, 000 msnm a 1,700 msnm, formando zonas de cuencas.

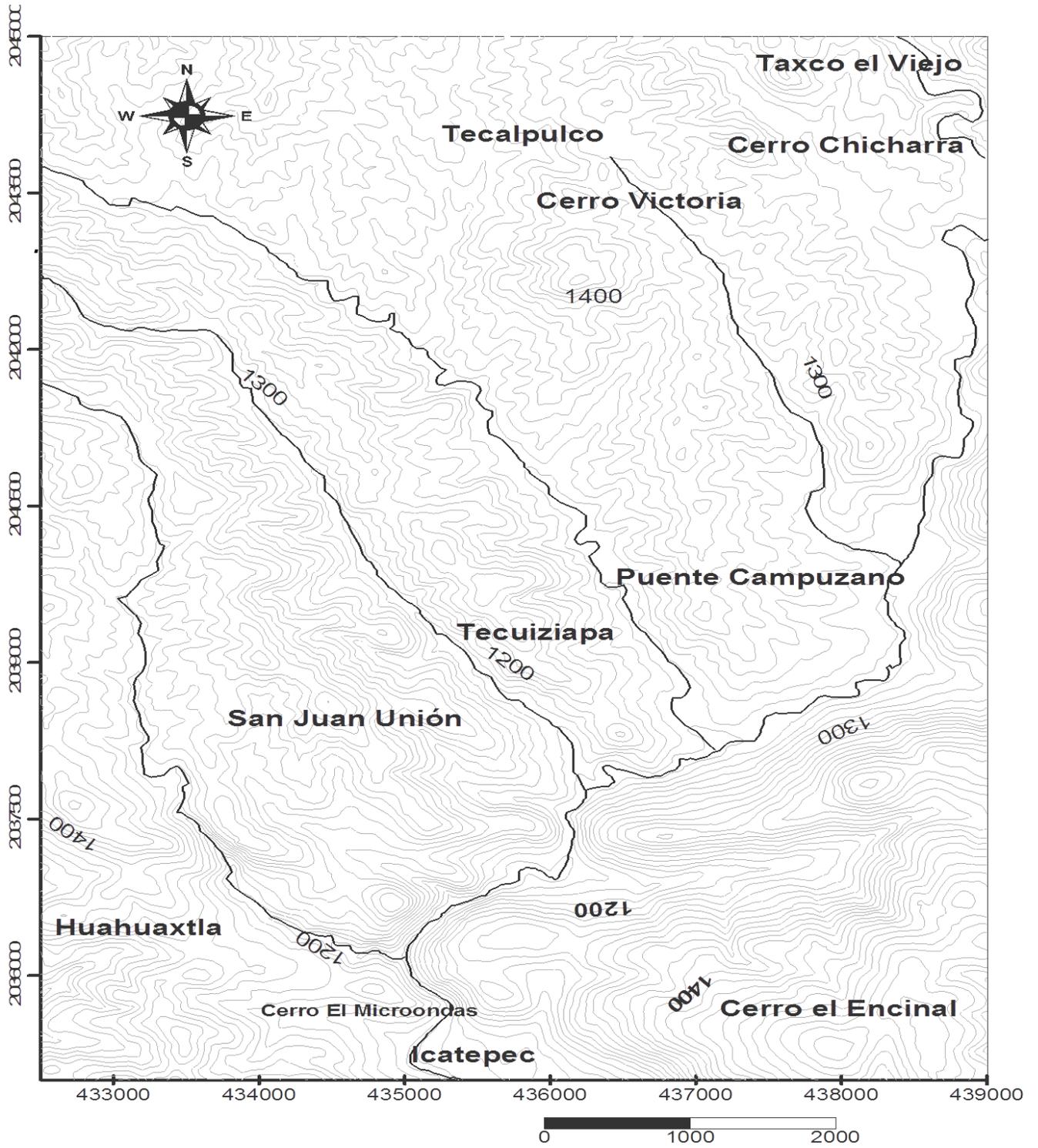
Las topofomas están delimitadas por una serie de cantiles y lomeríos; el área de estudio está constituida por cerros de baja pendiente,

La mayor altitud en el área de estudio es la Población de Taxco de Viejo, que se encuentra a una altura de 1,300 msnm, localizado al Norte de los poblados de Huahuaxtla y San Juan Unión, colindando al oeste con el cerro Victoria cuya altitud es de 1,400, el cerro del microondas tiene una altitud de 1,300 encontrándose al sur de Huahuaxtla y San Juan Unión, la altitud en el cerro El Encinal es de 1600 msnm, siendo estos las principales zonas de recargas para los ríos (Figura 4).

Hidrografía

Está en la parte norte de la Cuenca del Balsas-Mezcala, se caracteriza por ser una cuenca conformada por arroyos discontinuos, la trayectoria de los principales afluentes de la zona norte del Estado de Guerrero es sobre rocas de la ex-plataforma carbonatada constituida por calizas y lutitas de las formaciones Morelos y Mezcala (Espinoza-Pereña, 2004).

Figura 4. Mapa fisiográfico de Huahuaxtla



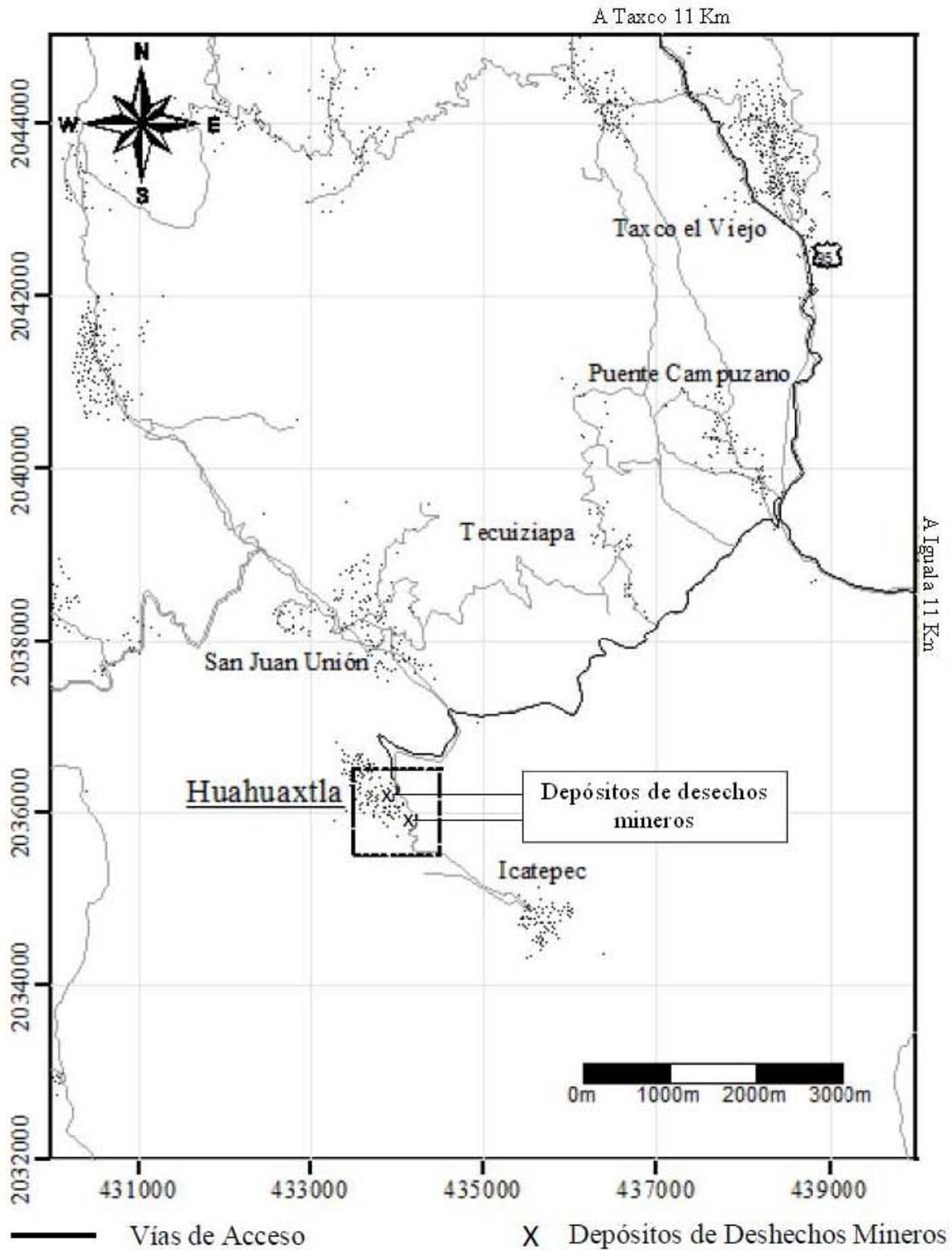
La mayoría de los arroyos presentes en el área de estudio, son arroyos de temporal, es decir que sólo llevan agua en temporada de lluvia. El río Taxco todo el año lleva agua ya que se alimenta de la sierra de Taxco teniendo su principal fuente en la zona de la Cascada, aportando agua a manantiales en la zona de Atzala, alimentando estas dos zonas al río Cacalotenango, el cual pasa por las comunidades del Fraile, Santa Rosa y Dolores, juntándose en la comunidad de Taxco el Viejo con el río Taxco, el cual pasa por el área de estudio.

Existen pequeños arroyos dentro de Huahuaxtla, los más representativos son: el arroyo Grande y el Acatlán; sin embargo, sus áreas de captación pluvial son del orden de 4.5 m² y 4 m², respectivamente, por lo que la capacidad de recolección de agua debe ser proporcional sin contar la capacidad de la roca de almacenar agua.

En Huahuaxtla los ríos presentan un drenaje Subdendrítico al tener una ramificación de arroyos, debido a la forma y altitud de los cerros el drenaje de los arroyos es de tipo intermitente no integrado. Dentro de la cuenca hidrológica del Río Balsas, las corrientes hidrológicas se componen principalmente del río Taxco, en el que se incorporan los arroyos Temixco, Acatlán, Tecapulco, Arrollo Grande, El Llano y Arrollo Amarillo. El recorrido de estos afluentes es sobre calizas, lutitas y areniscas de la Formación Morelos.

En la comunidad de Huahuaxtla hay dos depósitos de desechos mineros, Huahuaxtla Norte fue producido en el primer periodo de explotación entre los años 1923-1945; el segundo periodo se dio entre los años 1948-1962, dando como resultado el segundo depósito Huahuaxtla Sur, siendo esta la última etapa de explotación que se tiene registrada (Figura 5). La zona mineralizada Huahuaxtla está constituida principalmente por una mena de mercurio producto de un depósito tipo epitermal.

Figura 5. Mapa de ubicación de las acumulaciones de desechos mineros representados con una "X" en la región de Huahuaxtla.



Estudios previos

Ramírez J., (2013) analizó jales de Huahuaxtla por la técnica de Fluorescencia de Rayos X y caracterizó dos acumulaciones de desechos mineros productos de la explotación de mercurio (Tabla 5); concluyó que la presencia de As_2O_3 y Sb_2O_5 podrían presentar riesgo a los pobladores y al ambiente al disolverse en agua meteórica y ser lixiviados a los mantos freáticos.

Tabla 5. Caracterización de jales mineros mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X en Huahuaxtla.

Muestra	Huahuaxtla Sur				Huahuaxtla Norte			
	Hxs1	Hxs2	Hxs3	Hxs4	Hxs5	Hxs6	Hxs7	Hxs8
Óxidos % en masa								
SiO₂	61	46.1	46	58.3	56.2	51.1	40.5	62.2
TiO₂	1.02	0.75	ND	1.12	0.855	0.496	0.62	0.907
Fe₂O₃	11.1	5.63	5.01	6.38	5.4	2.82	7.99	7.51
MgO	2.04	2.86	6.04	5.7	6.32	7.79	7.97	4.37
CaO	6.14	25.8	23	12.5	12.8	16.9	19.3	11.6
Na₂O	ND	ND	ND	ND	ND	0.0944	ND	ND
K₂O	ND	ND	ND	ND	2.26	ND	ND	ND
P₂O₅	ND	0.117	0.111	ND	0.115	0.153	0.122	0.0898
SO₃	9.66	0.273	2.46	5.81	6.86	4.48	9.64	4.77
As₂O₃	0.947	ND	0.0537	0.0792	0.0541	0.0396	0.099	0.0784
Sb₂O₅	ND	ND	ND	0.0665	0.0387	ND	ND	ND
PXC	8.02	18.44	17.25	9.96	9.01	16.15	13.69	8.46
Total	100	99.97	99.92	99.92	99.91	100	99.3	99.9

*ND: No detectado

Tomado de Ramírez J., 2013.

2.1.4. Tlamacazapa

Se localiza en el norte del estado de Guerrero, a 15 km al SE de la Ciudad de Taxco de Alarcón y a 12 km al NW del municipio de Buena Vista de Cuéllar, entre las coordenadas UTM 2049000, 2040000, 444000 y 451000.

Las vías de acceso para llegar a la comunidad de Tlamacazapa son:

- 1) A partir de la Cd. de Taxco de Alarcón, por la carretera federal No. 95 México Acapulco, por la desviación que se encuentra a la altura del poblado de Tehuilotepec hacia el poblado de Juliantla y así llegar a la comunidad de Tlamacazapa. Este camino se encuentra pavimentado y en buenas condiciones todo el año.

2) A partir de Iguala de la Independencia por la carretera federal de cuota No. 96, que comunica con Cuernavaca. A la altura de Buenavista de Cuellar hay una desviación de terracería de aproximadamente 12 km que comunica al poblado de Coxcatlán. Siguiendo el mismo camino a 5 km del poblado antes mencionado se localiza el poblado de Tlamacazapa. Gran parte de la carretera se encuentra en buenas condiciones todo el año, excepto la terracería en temporadas de lluvia.

Fisiografía

Se encuentra dentro de la provincia de la Sierra Madre del Sur, en la subprovincia de la Sierra del Norte, la cual colinda al Norte con el Eje Neovolcánico y al sur con la subprovincia Depresión del Balsas (Figura 6).

Figura 6. Mapa de las provincias fisiográficas de la República Mexicana, el área se localiza en la cuenca de Balsas-Mezcala (Raisz E., 1964).



Orografía

Está formada principalmente por lomeríos, los escarpes se forman entre la caliza y el intrusivo; presenta un contraste con alturas de 2200 metros y depresiones que pueden llegar a los 1400 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Las sierras con cañadas se encuentran al NW del área de estudio, no abarcan gran parte del área. Las formas más predominantes son en su gran mayoría lomeríos de 1600 y 1800 msnm, formados por las calizas de la Formación Morelos, se pueden observar zonas escarpadas al SW del área de estudio. También hay zonas bajas que forman pequeñas mesetas con aproximadamente 1300 msnm rellenadas por aluvión en la parte norte y noreste del área de estudio.

Hidrografía

Se ubica en el norte del estado de Guerrero, a 15 km al SE de la Ciudad de Taxco de Alarcón y a 12 km al NW del municipio de Buena Vista de Cuéllar; a una altura de 1950 msnm, en la Sierra del Norte, la cual colinda al norte con el Eje Neovolcánico y al sur con la subprovidencia Depresión del Balsas. La orografía está formada principalmente por lomeríos se forman escarpes entre la caliza y el intrusivo.

El área de estudio se encuentra en la región hidrológica Río Balsas, en la cuenca del Río Balsas – Mezcala, la cual es la más importante en el Estado de Guerrero y cubre la Subcuenca del Alto Balsas (CRM, 1999), son tributarios al Río Balsas de dirección general Norte-Sur. Tlamacazapa se encuentra en una zona de recarga a unos 2200 msnm aproximadamente.

Estudios previos

En esta región se realizó un análisis hidrogeoquímico de las principales fuentes de abastecimiento de agua (Pérez S., 2009), en donde se determinó: Al, As, Ba y Cd obteniendo los siguientes valores para cada uno de ellos, 0.20, 0.05, 0.70, 0.005 mg L⁻¹, respectivamente, como se observa en las Tablas 6 y 7; estas concentraciones rebasaron los valores establecidos en la NOM-127-SSA1-1994. Se encontraron

variaciones en las concentraciones de NO_3^- , Cl^- y Na^+ , causadas probablemente por actividades antropogénicas. El tipo de agua tuvo una predominancia de $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ típicas de aguas en sistemas carbonatados y también se encontraron muestras con $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca-Na}$. Los cambios en los tipos de agua se atribuyen a la incorporación de desechos al agua por los pobladores de la comunidad.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos y concentración de metales pesados en muestras de agua de Tlamacazapa.

Clave	Temperatura (°C)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	pH	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)	V (mg/L)
Muestreo 1 (Octubre 2007)								
Los Sabinos (TL1a)	21.3	744	6.9	-	-	-	-	-
Hoxtocapa (TL2)	22.9	1608	7.54	-	-	-	-	-
Tlajilapa (TL3)	23.6	1199	8.34	-	-	-	-	0.025
Cuachicuapan (TL4)	22.5	1448	7.48	-	-	-	-	-
Tlamapa (TL5)	22.1	580	7.43	0.015	-	-	-	-
Iglesia Evangelista (TL6)	22.4	550	8.37	-	-	-	-	-
Muestreo 2 (Noviembre 2007)								
Los Sabinos (TL1b)	21.7	761	9.18	-	-	-	-	-
Tlajilapa (TL3)	21.8	1328	8.34	-	-	-	-	-
Cuachicuapan (TL4)	21.8	1516	7.53	-	-	-	-	-
Tlamapa (TL5)	21.8	605	8.05	-	-	-	-	-
Iglesia Evangelista (TL6)	19.8	566	7.62	-	-	-	-	-
Muestreo 3 (Julio 2008)								
Tlajilapa (TL3)	27.2	757	8.15	0.005	-	-	-	-
Cuachicuapan (TL4)	29.9	997	7.68	-	-	-	-	-
Tlamapa (TL5)	25	412	6.18	-	-	-	-	-
Iglesia Evangelista (TL6)	25.9	328	7.96	-	-	-	-	-
Muestreo 4 (Noviembre 2008)								
Los Sabinos (TL1d)	20	758	6.81	-	-	-	-	-
Tlajilapa (TL3)	23.1	1215	7.63	-	-	-	-	-
Cuachicuapan (TL4)	20.8	1640	6.89	-	-	-	-	-
Tlamapa (TL5)	19.9	597	7.11	-	-	-	-	-
Iglesia Evangelista (TL6)	18	519	7.7	-	-	-	-	-
Tlamapa 2 (TL7)	18.1	587	6.81	-	-	-	-	-

*- : Debajo del límite de detección
Tomado de Pérez S., 2009.

Tabla 7. Concentración de metales alcalinos y metales alcalinotérreos en muestras de agua de Tlamacazapa.

Clave	K (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)
Muestreo 1 (Octubre 2007)				
Los Sabinos (TL1a)	1.84	6.45	109	42.06
Hoxtocapa (TL2)	37.56	54.5	97.87	41.31
Tlajilapa (TL3)	57.01	91.25	111.5	44.05
Cuachicuapan (TL4)	1.68	4.6	68.61	33.15
Tlamapa (TL5)	-	-	66.83	36.76
Muestreo 2 (Noviembre 2007)				
Los Sabinos (TL1b)	-	-	107.7	40.82
Tlajilapa (TL3)	46.74	62.75	116.9	50.32
Cuachicuapan (TL4)	65.98	77	118.5	50.51
Tlamapa (TL5)	1.18	1.08	74.75	36.77
Iglesia Evangelista (TL6)	-	23.95	33.12	14.69
Muestreo 3 (Julio 2008)				
Tlajilapa (TL3)	73	92	161	10.7
Cuachicuapan (TL4)	65	77	109	14.1
Tlamapa (TL5)	1	-	38	10.5
Iglesia Evangelista (TL6)	-	>1	29.5	8.7
Muestreo 4 (Noviembre 2008)				
Los Sabinos (TL1d)	-	-	101	12.4
Tlajilapa (TL3)	41	56	105	15.9
Cuachicuapan (TL4)	1.1	1	129	10.98
Tlamapa (TL5)	-	>1	53.8	29.8
Iglesia Evangelista (TL6)	>1	>1	65.6	31

*- : Debajo del límite de detección

Tomado de Pérez S., 2009.

2.2. Justificación

Taxco de Alarcón, Guerrero se caracteriza por ser un municipio en el cual hubo un gran auge minero lo cual generó gran cantidad de jales; es una zona donde existen muchos poblados que no tienen acceso a agua potable y los habitantes se ven obligados a consumirla de bienes naturales o de norias que construyen para almacenarla. Al considerar estudios previos de hidrogeoquímica, en los cuales se demostró la existencia de metales pesados que sobrepasan los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, este trabajo pretende proporcionar información del contenido de 5 elementos potencialmente tóxicos (Cd, Cr, Mn, Pb y V), en agua superficial de cuatro poblados: El Horconcito, El Aguacatito, Huahuaxtla y Tlamacazapa y mostrar si existe diferencia en la calidad del agua en cuanto a la cantidad de metales.

2.3. Objetivo general

Determinar Cd, Cr, Mn, Pb y V (por su grado de toxicidad), en 3 periodos estacionales (post lluvias, estiaje y lluvias), en 4 poblados de Taxco de Alarcón Guerrero, y conocer la correlación entre estos.

2.4. Objetivos particulares

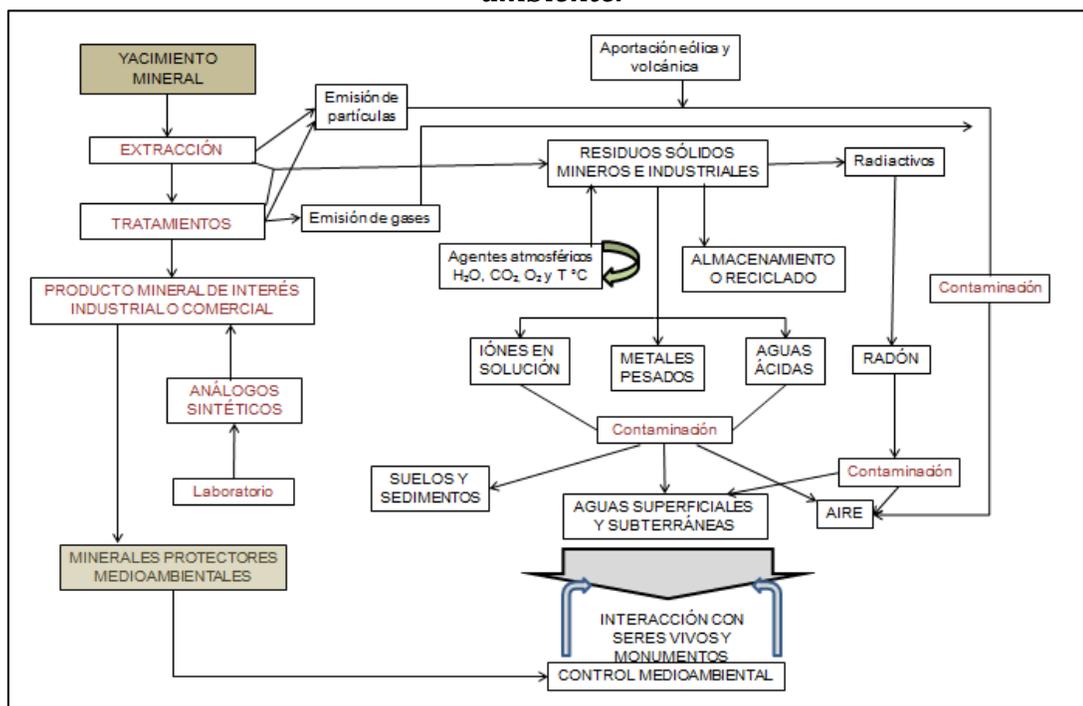
- 1) Determinar parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad y temperatura) en las muestras de agua.
- 2) Determinar la concentración de metales pesados (Cd, Cr, Mn, Pb y V) y de metales alcalinos y metales alcalinotérreos (Na, K, Ca y Mg).
- 3) Comparar los resultados de los análisis con los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 y estudios previos.
- 4) Conocer si el periodo de muestreo y el sitio influyen en los valores de parámetros fisicoquímicos y la concentración de metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos.

CAPÍTULO 3. GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE METALES PESADOS

Geoquímica es la ciencia que estudia las especies químicas, sus reacciones, los procesos en la litosfera y sus interacciones con la atmósfera y la hidrosfera.

La rama de la geoquímica que explora las interacciones complejas entre los sistemas de roca/agua/aire/vida que determinan las características químicas del medio ambiente de la superficie es la geoquímica ambiental (Figura 7) (Eby, 2004).

Figura 7. Diagrama de la relación entre la actividad minera y sus efectos en el medio ambiente.



Tomado y modificado de Carretero y Pozo, 2008.

3.1. Procesos geoquímicos en el agua

La mayoría de los metales se encuentran en concentraciones muy bajas en el agua natural ppb ($\mu\text{g L}^{-1}$) o ppt (ng L^{-1}). Cuando hay un aumento en la cantidad del metal, se presentan anomalías hidrogeoquímicas las cuales están condicionadas por: contraste

inicial, dilución y precipitación. El contraste inicial depende de la solubilidad de los elementos químicos en la fuente, la fisiografía y el clima. La dilución se debe al efecto del agua de afluentes con contenidos metálicos más bajos. Por último, la precipitación de los elementos está condicionada por las fases minerales de los sedimentos, el potencial redox, y el pH. Muchos metales divalentes (Cu, Zn, Ni, Co, Cd, Pb) y trivalentes (Fe, Al) muestran una correlación inversa con el pH, es decir su solubilidad aumenta a medida que disminuye éste. El aumento del potencial redox también influye en la formación de hidróxidos insolubles, así como en la formación de oxihidróxidos de Fe (goethita: $\text{FeO}(\text{OH})$) que pueden sustraer metales del agua (As, Pb). Las condiciones oxidantes pueden incrementar la movilidad de un elemento, como en el caso del uranio (ión uranilo: UO_2^{2+}), el cual precipita en condiciones reductoras.

Los metales pesados existen en el agua superficial en forma: coloidal, de partículas y fases disueltas, pero, las concentraciones en disolución son bajas generalmente. El metal en partículas y coloidal puede encontrarse en 1) hidróxidos, óxidos, silicatos o sulfuros, o 2) adsorbidos en arcilla, sílice o materia orgánica. Las formas solubles generalmente son iones, quelatos o complejos organometálicos no ionizables. La solubilidad de trazas de metales en agua superficial está controlado predominantemente por el pH, la concentración de los ligandos, el estado de oxidación de los componentes minerales y el ambiente redox del sistema.

Las anomalías hidrogeoquímicas también dependen de las variaciones climáticas (precipitaciones, temperatura) y por lo tanto de los cambios estacionales. La lluvia genera un aumento del caudal y por ende de la dilución. Sin embargo, si esto sucede después de un período seco el agua puede lixiviar materiales ricos y transportar los metales, generando una elevación en la concentración de estos. Esto se observa en regiones semiáridas del planeta.

3.2. Procesos geoquímicos en el suelo

El suelo es el receptor de la mayor parte de los residuos generados por el hombre, lo que produce su contaminación.

Los metales se distribuyen en el suelo entre fracciones con distinto grado de labilidad cambiables, ligados a materia orgánica, óxidos de hierro y manganeso y estructuras

minerales. El equilibrio dinámico que se establece entre estas fracciones determina la movilidad y biodisponibilidad, siendo el pH, potencial redox, la cantidad y tipo de coloides del suelo (materia orgánica, arcillas y óxidos) los factores edáficos más importantes en su control.

El transporte ambiental involucra movimientos de gases, líquidos y partículas sólidas dentro de un medio determinado y a través de las interfaces entre el aire, el agua, sedimento, suelo, plantas y animales.

Una de las anomalías biogeoquímicas que se generan al momento de la extracción, es el aumento de la cantidad de microelementos los cuales afectan negativamente la biota y calidad de suelo; estos afectan el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo, inhibiendo la descomposición de la materia orgánica del suelo (Wong 2003, Salomons 1995).

3.3. Procesos geoquímicos en el aire

La interfase entre la atmósfera y la tierra es un límite de intensa actividad ambiental. Los efectos combinados del aire y el agua tienden a causar cambios significativos en los materiales de la tierra en esta interfase. La capa superior de la tierra expuesta es susceptible al intemperismo físico y químico. La humedad y el aire al tener contacto con la roca, producen reacciones de oxidación. El ácido carbónico presente en el agua de lluvia por el CO₂ disuelto, ácido sulfúrico, sulfuroso, nítrico o clorhídrico contaminantes, pueden disolver porciones de algunos tipos de rocas. Los organismos como los líquenes crecen en la superficie de rocas, aspirando dióxido de carbono, oxígeno o nitrógeno del aire, dando lugar a un intemperismo adicional.

El viento es uno de los agentes que afecta a los sólidos expuestos de la geosfera en el límite atmósfera/geosfera.

Existen diferentes actividades naturales y antropogénicas asociadas a la contaminación del aire.

Las fuentes naturales comprenden las emisiones de contaminantes generados por la actividad natural de la geosfera, biosfera, atmósfera y la hidrosfera. Así:

- Erupciones volcánicas: aportan a la atmósfera compuestos de azufre (SO_2 , H_2S) y partículas que se diseminan como consecuencia de la acción del viento.
- Incendios forestales: emiten altas concentraciones de CO_2 , óxidos de nitrógeno, humo, polvo y cenizas.
- Ciertas actividades de los seres vivos, como: la respiración (incrementa la cantidad de CO_2), la reproducción y floración en plantas anemófilas (las que polinizan a través del aire), la descomposición anaerobia (fermentación) de la materia orgánica la cual genera metano, entre otras.
- Descargas eléctricas: generadas durante las tormentas y que dan lugar a la formación de óxidos de nitrógeno.
- Viento: transfiere partículas.

Entre las fuentes antropogénicas se encuentran:

- En el hogar: uso de calefacción y aparatos domésticos que emplean, como fuentes de generación de calor, combustibles de origen fósil (carbón, gasóleo, gas natural), así como al diseño y estado de conservación de los aparatos empleados.
- En el transporte: el automóvil y avión ocasionan mayor grado de contaminación.
- En la industria: el aporte de contaminación del aire depende del tipo de actividad, siendo las centrales térmicas, las cementeras, las siderometalúrgicas, las papeleras y las químicas las más contaminantes.
- En la agricultura y la ganadería: el uso de fertilizantes y la gran cantidad de ganado vacuno provocan un aumento en la atmósfera de gases de efecto invernadero, como el metano (CH_4). (Manahan, 2007).

La composición química del aire se mantiene constante debido a los procesos biogeoquímicos y a las transformaciones cíclicas en los que se integran sus componentes: los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre especialmente. Estos se autorregulan mediante diferentes mecanismos, pero las actividades humanas los aceleran, rompen su equilibrio y movilizan las reservas, ocasionando la presencia en la atmósfera de los contaminantes del aire.

La situación de la atmósfera determina el estado y movimiento de las masas de aire, lo que condiciona la estabilidad o inestabilidad atmosféricas. Entre los factores atmosféricos se deben tener en cuenta: temperatura del aire y sus variaciones con la altura, vientos, precipitaciones e insolación.

Las brisas (movimientos de las masas de aire de origen local) arrastran los contaminantes o provocan su acumulación. En las zonas costeras se originan sistemas de brisas marinas, que durante el día desplazan los contaminantes hacia el interior, durante la noche al invertirse la circulación de las mismas, la contaminación se desplaza hacia el mar, en un movimiento cíclico que se repite cada día.

En las zonas de la montaña se generan brisas de ladera y de valle, como consecuencia del diferente calentamiento de las laderas y valles del período día-noche.

En presencia de masas vegetales disminuye la cantidad de contaminación en el aire.

La presencia de núcleos urbanos dificulta la dispersión de los contaminantes, favoreciendo su concentración.

3.4. Geoquímica de residuos mineros

La industria minera afecta desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales; genera residuos que se derivan de cuatro fuentes principales:

- Los gases expulsados por las chimeneas de las fundiciones, cuyos compuestos precipitan en los suelos, a mayor o menor distancia de la fuente de emisión.
- Las escombreras, son fragmentos de rocas que están expuestos a las condiciones atmosféricas.
- Los relaves o cola, son subproductos provenientes de los procesos concentradores de minerales, usualmente es una mezcla de desechos de tierra, agua, rocas y minerales.
- Los estanques de solución, que pueden contener compuestos tan nocivos como el cianuro o ácido sulfúrico, y especies metálicas como el cobre y el hierro. Los estanques de solución son típicos de la moderna minería del oro (cianuración en pila) y del cobre (lixiviación ácida en pila).

Los residuos generados se relacionan con los siguientes fenómenos tóxicos:

- Destrucción de la capa de suelo, flora y fauna durante el descapote (etapa en la cual se remueve la capa vegetal o el suelo que no representa un beneficio económico a la empresa minera, para dejar descubierto el yacimiento). Formación de terreros y movimientos de sedimentos hacia cuencas del área.
- Oxidación de los minerales insolubles y formación de sustancias solubles ácidas con alto contenido de metales (Drenaje ácido de mina, DAM).
- Alto consumo de agua.
- Descarga de lixiviados con presencia de iones metálicos y reactivos tóxicos.
- Formación de jales.
- Generación de aceites gastados, llantas, disolventes, polímeros, etcétera.
- Generación de ruido y emisiones de polvos, gases y humos.

Las características de los residuos dependen de las especies minerales presentes en los yacimientos, del proceso al que se sometan y de la manera que se disponen; la movilidad en el ambiente involucra diversos factores fisicoquímicos que varían según el sitio, el metal, la forma química y/o mineralógica en que se encuentre. (Armienta, 2001).

Los problemas más importantes de la actividad minera en relación a los cursos fluviales consisten en el aumento de minerales desechos tóxicos lo cual ocasiona un desequilibrio con las condiciones fisicoquímicas del medio.

La explotación de menas tiene un alto contenido de disulfuro ferroso (FeS_2), principalmente en la pirita. Generalmente los jales son depositados al aire libre como relleno de barrancas o en presas, por lo que están en constante interacción con el oxígeno atmosférico y el agua de lluvia, produciendo la oxidación de los minerales sulfurados; este proceso se acelera cuando hay bacterias capaces de catalizar estas reacciones y que pueden conducir a la solubilización de cationes metálicos y metaloides de los minerales circundantes, los cuales pueden lixivarse, generando drenaje ácido de mina (DAM); los metales se liberan y dispersan por arrastre del particulado, agua de lluvia o transporte eólico y pueden llegar a los cuerpos de agua, provocando disminución del pH y causar la muerte de la flora y fauna acuática, El DAM se puede generar también por los desechos de operaciones de lixiviado, los jales y las unidades

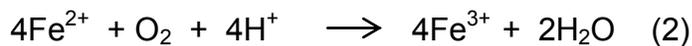
de las rocas de desecho, los muros de las minas a cielo abierto y las minas subterráneas.

De acuerdo con Ritcey (1989) y Evangelou (1995), la oxidación de la pirita (uno de los minerales sulfurados presente en todo residuo minero) en condiciones naturales, se produce de acuerdo con las siguientes reacciones:

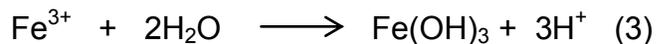
La pirita en contacto con el oxígeno, el agua libera iones ferrosos, genera iones sulfato y protones. El incremento de la concentración de este último produce una disminución del pH de las soluciones (generalmente $\text{pH} < 2$). Esta reacción se desarrolla en las partes superficiales de los jales mineros donde hay más oxígeno.



El ión ferroso con exceso de oxígeno y en condiciones ácidas se oxida a ión férrico



Finalmente, el ión férrico reacciona con el agua para generar diversos tipos de hidróxidos férricos liberando protones adicionales, lo cual incrementa la formación de DAM.



Debido a las características físico-químicas del DAM ($\text{pH} < 2.0$, potencial redox negativo, altos contenidos de aniones y cationes), la capacidad de disolución de los minerales sulfurados, carbonatos y oxi-hidróxidos de fierro se ve fuertemente incrementada lo que provoca mayor liberación de metales tóxicos. En la mayoría de los casos, los lixiviados así generados drenan fuera de las presas de jales llevando los metales disueltos y material particulado en suspensión. Cuando estos lixiviados alcanzan los lechos de los arroyos, las condiciones del medio son generalmente distintas a aquellas que favorecieron la formación de dichos lixiviados produciendo complejos procesos de precipitación, adsorción, desorción y redisolución. De esta forma, los contenidos de metales en los sedimentos de los arroyos y ríos cercanos son fuertemente incrementados.

Los suelos que quedan tras una explotación minera contienen todo tipo de materiales residuales, escombros, entre otros, lo que representa graves problemas para el desarrollo de la cubierta vegetal, siendo sus características más notables las siguientes: clase textural desequilibrada, baja presencia de la estructura edáfica, propiedades

químicas anómalas, disminución o desequilibrio en el contenido de nutrientes fundamentales, ruptura de los ciclos biogeoquímicos, baja profundidad efectiva, dificultad de enraizamiento de plantas, baja retención de agua y presencia de compuestos tóxicos (García y Dorronsoro, 2002)

Esto en lo que respecta a la minería, pero esta no es la única que genera residuos solubles susceptibles de ser movilizados, ya que prácticamente cualquier industria genera un rastro de residuos metálicos u orgánicos que solo en ocasiones son tratados previamente, y en general suelen llegar a suelos (y de ahí a las aguas subterráneas), ríos, lagos o al mar.

CAPÍTULO 4. METALES PESADOS

Estos elementos tienen masas atómicas elevadas, por ejemplo: arsénico, cadmio, cromo, mercurio y plomo; pueden ser nocivos para los seres vivos en pequeñas concentraciones y tienden a acumularse en la cadena alimenticia. (EPA, 2014)

4.1. Propiedades físicas

Los metales (excepto el mercurio) son sólidos a temperatura ambiente, pueden ser lisos y limpios, brillantes, tener alta densidad, dúctiles y maleables, punto de fusión alto, duros, buenos conductores de calor y electricidad.

4.2. Propiedades químicas

Estos metales son importantes por su alta toxicidad para los seres vivos, ya que presentan gran estabilidad química ante los procesos de biodegradación, generando una contaminación por bioacumulación y un efecto multiplicador en la concentración del contaminante en la cadena trófica (Mancera y Álvarez, 2006).

Tienen una densidad superior a 5 g/cm^3 y número atómico mayor a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos, con masas atómicas entre 63.546 y 299.590. Cuando están en forma elemental tienen de 1 a 3 electrones de valencia, sus átomos son poco electronegativos y tienen una baja energía de ionización (García y Dorronsoro, 2005).

Los metales pesados están constituidos por elementos de transición y post-transición incluyendo algunos metaloides como el arsénico y selenio; tienen una gravedad específica superior a la del sodio, calcio y otros metales ligeros. Por otro lado, se presentan en diferente estado de oxidación en agua, aire y suelo y tienen diversos grados de reactividad y solubilidad en agua. También se denominan “elementos tóxicos”, e incluyen: arsénico, cromo, cadmio, mercurio, selenio y plomo, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). (INECC, 2009).

4.3. Fuentes de emisión

4.3.1. Fuentes naturales

La mayoría de los elementos del planeta están distribuidos en la litósfera, hidrósfera y atmósfera. Los metales son constituyentes típicos de la corteza terrestre, forman parte de los minerales que conforman las rocas, arenas y arcillas, del suelo del fondo de los océanos; también se encuentran en cuerpos de agua natural, como océanos, ríos, lagunas y arroyos. (Hernández, 2009).

Las emisiones de metales pesados por fuentes naturales, provienen de: los volcanes (emisión de arsénico, mercurio, selenio, entre otros), edafogénesis (formación del suelo), transporte por medio de huracanes, evaporación de agua superficial natural, incendios forestales, descomposición de la materia orgánica en el suelo por la acción de bacterias. (Tiller, 1989).

La presencia de Cd, Co, Cr, Mn, Ni y V se debe a la alteración de materiales originales o primarios. (Manta et al. 2002).

Los minerales primarios son los constituyentes de las rocas y los minerales secundarios son la cristalización de los productos del intemperismo (coloides) (Tablas 8 y 9).

Tabla 8. Metales pesados asociados a minerales primarios sulfurosos.

Minerales primarios sulfurosos	Metales pesados asociados
Galena (PbS)	Plata, oro, arsénico, bario, cromo, mercurio y níquel.
Esfarelita (ZnS)	Antimonio, estroncio, telurio y talio.
Calcopirita (CuFeS₂)	Plata, cobalto, germanio, indio, manganeso, níquel, selenio y estroncio.
Pirita (FeS₂)	Plata, arsénico, oro, cobalto, cobre, níquel, plomo, titanio y talio.
Arsenopirita (FeAsS)	Cobalto, manganeso y níquel.

Tomado de Bautista, 1999.

Tabla 9. Metales pesados asociados a minerales secundarios.

Minerales secundarios	Metales pesados asociados
Óxidos de hierro	Vanadio, manganeso, cobre, zinc y molibdeno.
Óxidos de manganeso	Hierro, cobalto, níquel, zinc y plomo.
Carbonatos de calcio	Vanadio, manganeso, hierro, cobalto, cadmio y plomo.
Esmectitas	Titanio, vanadio, cromo, manganeso, hierro, cobalto y níquel.
Vermiculitas	Titanio, manganeso y hierro.

Tomado de Bautista, 1999.

También existe una relación entre los tipos de rocas y los minerales con los metales que se pueden encontrar en estas (Tabla 10).

Tabla 10. Niveles medios de elementos potencialmente tóxicos en rocas y suelos (mg/Kg).

Elemento	Rocas Ígneas		Rocas sedimentarias	Suelos	
	Basalto	Granito		Intervalo	Media
As	1.5	1.5	7.7	0.1 - 40	6.0
Bi	0.031	0.065	0.4	0.1 – 0.4	0.2
Cd	0.13	0.09	0.17	0.01 – 2	0.35
Hg	0.012	0.08	0.19	0.01 – 0.5	0.06
In	0.058	0.04	0.044	0.2 – 10	0.2
Pb	3.0	24.0	19.0	2.0 – 300	19.0
Sb	0.2	0.2	1.2	0.2 – 10	1.0
Se	0.05	0.05	0.42	0.05	0.4
Te	<0.1	<0.1			
Tl	0.08	1.1	0.95	0.1 – 0.8	0.2

Tomado de Fergusson, 1990.

En la tabla 11 se muestran los elementos más importantes encontrados en agua por fuentes naturales.

Tabla 11. Elementos más importantes en agua derivados de fuentes naturales.

Elemento	Fuentes	Efectos e importancia
Flúor	Fuentes geológicas naturales.	Previene la caída de los dientes aproximadamente alrededor de 1 mg/mL. Tóxico a niveles superiores.
Hierro	Fuentes geológicas naturales.	Nutriente esencial, daña piezas sanitarias (tuberías) formando manchas.
Manganeso	Fuentes geológicas naturales.	Tóxico a las plantas, daña piezas sanitarias (tuberías) formando manchas.
Molibdeno	Fuentes naturales.	Esencial para las plantas, tóxico para los animales.
Yodo	Salmueras naturales, intrusiones salinas.	Previene el bocio.
Selenio	Fuentes naturales.	Esencial a bajos niveles, tóxicos a niveles superiores.

La presencia de metales pesados en partículas atmosféricas, se encuentra asociada a: polvo terrestre, aerosol marino, emisiones volcánicas e incendios forestales (García 2007).

4.3.2. Fuentes antropogénicas

Los metales pesados se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas.

La inadecuada disposición de residuos metálicos ha ocasionado la contaminación del suelo, agua superficial y subterránea y de ambientes acuáticos.

Las fuentes antropogénicas se pueden clasificar en puntuales (fijas) y no puntuales (móviles) dependiendo de su procedencia.

Dentro de las puntuales se encuentran las industrias, carreteras, entre otras; se expiden de manera fija y continua. Dentro de las no puntuales están los lodos residuales, fertilizantes, cenizas, humos (transportados a través del viento de manera esporádica), etc.

Los metales pesados se usan en pinturas, materiales para la construcción, cosméticos, medicamentos, plásticos, gomas y pesticidas. El plomo es el más utilizado industrialmente, seguido por el arsénico y el antimonio.

Existen tres tipos principales de fuentes de emisión de metales en el ambiente. El más evidente es el proceso de extracción y purificación: minería, fundición y refinación. El segundo, es la emisión de metales al quemarse combustibles fósiles como el carbón. Tales combustibles contienen cadmio, plomo, mercurio, níquel, vanadio, cromo y cobre. La tercera fuente, es la producción y utilización de productos industriales que contienen metales, que aumenta al descubrirse nuevas tecnologías y aplicaciones (Tabla 12).

Los metales pesados normalmente aparecen en el agua superficial procedentes de las actividades comerciales e industriales (Tabla 13).

Las emisiones de metales a la atmósfera provienen de procesos industriales, de la combustión de gasolina, incineración de residuos, en minería del carbón y actividades agrícolas (uso de pesticidas) (García, 2007).

Tabla 12. Fuentes antropogénicas de metales pesados en suelos.

Fuentes	Metales pesados
Lodos residuales	Cd, Pb, As, Cr, Zn, Co, B, Ba, Be, Br, Ce, Cu, Mn, Co, Ge, Hg, Mo, Ni, Rb, Sn, Sr, V y Zr.
Riego	Cd, Pb, Se
Fundidoras	Pb, Cd, Sb, As, Se, In y Hg
Plaguicidas	Pb, As, Hg, Br, Cu, V y Zn
Fertilizantes	Cd, Pb, B, Ba, Br, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Sc, Se, Sn, Sr, Te, U, V y Zn
Minas	Pb, Cd, As, Hg, etc.
Abonos	As, Se, Ba, Br, Co, Cr, Cu, F, Ge, Mn, Ni, Pb, Sr, Zn y Zr
Automóviles	Pb
Pinturas	Pb, Cd
Carbonatos	As, B, Ba, Ce, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, V, Zn y Zr
Combustión de carbón	As, Se, Sb, Pb

Tomado de Bautista, 1999.

Tabla 13. Elementos más importantes en agua derivados de fuentes antropogénicas.

Elemento	Fuentes	Efectos e importancia
Arsénico	Subproductos mineros, residuales químicos.	Tóxico, posiblemente carcinogénico.
Berilio	Carbón, residuos industriales.	Tóxico
Boro	Carbón, detergentes, residuos líquidos.	Tóxico
Cobre	Recubrimientos metálicos, minería, residuos industriales.	Elemento traza esencial, tóxico para las plantas y algas a niveles altos.
Cromo	Recubrimientos metálicos.	Esencial como Cr ³⁺ , tóxico como Cr ⁶⁺
Hierro	Residuos industriales, corrosión, DAM.	Nutriente esencial, daña tuberías sanitarias formando manchas.
Manganeso	Residuos industriales, drenajes o DAM.	Tóxico a las plantas, daña tuberías sanitarias formando manchas.
Mercurio	Residuos industriales, minería y carbón.	Tóxico, se moviliza como compuestos metilados de mercurio por bacterias anaerobias.
Molibdeno	Residuos industriales.	Esencial para las plantas, tóxico para los animales.
Plomo	Residuos industriales, minería, combustible.	Tóxico, dañino a la fauna.
Zinc	Residuos industriales, recubrimientos de metales.	Elemento esencial, tóxico para las plantas a altos niveles.

4.4. Aspectos toxicológicos

La toxicología estudia las interacciones dañinas entre sustancias químicas y sistemas biológicos; así como los efectos bioquímicos, fisiológicos y patológicos de tales agentes.

La toxicidad de los metales suele resultar:

- Cuando el organismo se ve sometido a una concentración excesiva del metal durante un periodo prolongado.
- El metal se presenta en forma bioquímica. Algunos ejemplos son los siguientes:
 - a) La combinación de un metal con un compuesto orgánico puede aumentar o disminuir sus efectos tóxicos sobre las células. Unión a biomoléculas, bloqueando la actividad enzimática. Los aminoácidos serina-OH, cisteína-SH, e histidina-N, con frecuencia forman parte de los sitios activos de las enzimas. El Hg^{2+} se une a la cisteína-SH, bloqueando la actividad enzimática.
 - b) Modificando la conformación activa de las biomoléculas, especialmente enzimas y polinucleótidos, se llevan a cabo por enlaces de coordinación de los metales con la biomolécula.
 - c) Alterando la integridad estructural de las biomembranas. Los compuestos metálicos se pueden unir a la porción de carga negativa de los fosfolípidos, alterando sus características de permeabilidad.
 - d) Modificando la actividad biológica de algunos compuestos orgánicos, por ejemplo: el Cd^{2+} y el Pb^{2+} potencian la actividad de toxinas producidas por bacterias, al bloquear las enzimas que degradan a estos compuestos tóxicos.
 - e) Uniéndose con aniones endógenos, especialmente PO_4^{3-} , provocando una disminución en su concentración, o un desplazamiento de cationes esenciales de los biominerales, por ejemplo: el Pb^{2+} puede disminuir las concentraciones de los iones fosfatos del citoplasma de las células o puede reemplazar al Ca^{2+} de los depósitos óseos.
- Cuando hay exposición: medioambiental, ocupacional, accidental o iatrogénica

Sin embargo, los seres vivos necesitan elementos en pequeñas cantidades que son benéficos e indispensables para los procesos vitales, por ejemplo: cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio y zinc.

Los elementos pesados son ampliamente usados en la industria, lo cual aumenta la exposición del hombre a estos contaminantes (plomo, arsénico, selenio, cadmio, mercurio, antimonio, talio, indio, bismuto y telurio), perjudicando la salud humana y alterando el equilibrio de los ciclos biogeoquímicos si las concentraciones son excesivas en el agua, suelo y aire. (Fergusson, 1990).

4.4.1. Biodisponibilidad

La biodisponibilidad se refiere a la fracción de metales pesados que están disponibles para la absorción por los seres vivos. Existen diferentes factores y procesos fisicoquímicos que afectan la biodisponibilidad de los metales de acuerdo a la matriz en la que se encuentren (agua, suelo y aire); en suelos depende de la solubilidad de los metales y de su capacidad de adsorción en la fracción coloidal del suelo. La interacción entre distintos procesos como intercambio catiónico, adsorción/desorción, precipitación/disolución y formación de complejos, afecta la distribución de metales entre la solución suelo y la fase sólida siendo responsables de su movilidad y biodisponibilidad (Rieuwerts *et al.*, 1998; Silveira *et al.*, 2003; Basta, 2004).

En el agua superficial los metales pesados existen en forma de: coloides, partículas y fases disueltas, pero las concentraciones en disolución son bajas generalmente. El metal en partículas y coloidal puede encontrarse en: hidróxidos, óxidos, silicatos o sulfuros, o adsorbidos en la arcilla, sílice o materia orgánica. Las formas solubles generalmente son iones, quelatos o complejos organometálicos. La solubilidad de trazas de metales en el agua está controlada predominantemente por el pH, la concentración de los ligandos con los cuales los metales pueden formar complejos, el estado de oxidación de los componentes minerales y el ambiente redox del sistema.

La acidez y alcalinidad de la lluvia, influyen sobre la incorporación y biodisponibilidad de los metales en la precipitación pluvial en los suelos, debido al efecto buffer que caracteriza a los mismos, por otro lado, en general el agua en los lagos es más ácida que el agua subterránea, por la función de filtro que desempeña el suelo, removiendo

así gran parte de los metales en medio ácido, siendo capaces de disolverse y estar presentes como compuestos de SO_4^{2-} , NO_3^- , óxidos, etc. (García et al., 2006).

Para los seres vivos la unión de un metal a un compuesto puede aumentar o disminuir sus efectos tóxicos sobre las células. Cuando se combina un compuesto orgánico con un metal puede aumentar el efecto tóxico, pero cuando se une un metal con el azufre, en forma de sulfuro, da lugar a un compuesto menos tóxico que el hidróxido u óxido correspondiente, debido a que el sulfuro es menos soluble en los fluidos corporales que el óxido.

Un aumento de iones OH^- incrementa la afinidad de los ligandos por los metales, con la consecuente baja en la concentración del metal libre; la disminución en el pH tendrá el efecto opuesto a la captación y concentración de metales pesados.

La presencia de otros metales, por ejemplo otros cationes (sales de calcio y magnesio) afectan la biodisponibilidad de: Cu, Zn, Cd y Hg por precipitación o competencia.

4.5. Propiedades de metales específicos

4.5.1. Cadmio

Es un metal blanco metálico, algo azulado. Tiene una densidad de 8.64 g/mL, su punto de fusión es de 321°C y el de ebullición de 765°C; muy maleable. Calentado a temperaturas elevadas, arde desprendiendo vapores amarillos rojizos de óxido de cadmio. Se oxida lentamente en el aire en presencia de humedad, insoluble en agua y disolventes orgánicos; reacciona fácilmente con los ácidos.

Se emplea en la fabricación de baterías, en la galvanoplastia, aleaciones, producción de pigmentos, estabilizador térmico en plásticos, en barras de control de fisión nuclear. El óxido se usa como catalizador (hidrogenación y síntesis de metano) y fabricación de esmaltes. El hidróxido se usa en galvanotecnia y fabricación de electrodos negativos de baterías de níquel-cadmio. El cloruro (incolore) se utiliza en galvanotecnia, fotografía, tintorería y como absorbente de H_2S . Algunas de estas actividades representan fuentes de riesgo de intoxicación con cadmio pero existen otras, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Principales riesgos de intoxicación por Cd.

Riesgos laborales	Riesgos no laborales
<ul style="list-style-type: none"> - Soldadura: inhalación de vapores (óxidos). - Metalurgia (de Zn, Cd y Pb). - Fabricación y uso de pigmentos (amarillo y rojo de cadmio). -Elaboración de Pinturas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Agua y aire ambiental. - Alimentación: pescados, crustáceos, lácteos, cereales, carnes, vegetales, frutos, semillas, granos: café, germen de trigo, arroz (son plantas que absorben y almacenan el Cd cuando se encuentra en altas concentraciones en el suelo y agua). - Tabaco. - Abonos (superfosfatos), fertilizantes. - Baterías Recargables de Níquel/Cadmio (Ni/Cd). - Pigmentos y Estabilizadores en Plástico y PVC. - Pigmentos en Pinturas. - Galvanización. - Aleaciones. - Actividades industriales.

Daños a la salud

Las vías de absorción del Cd son: gastrointestinal, respiratoria y cutánea. La acumulación de Cd en los humanos ocurre en el hígado y el riñón; es dañino para todas las células del organismo.

Causa: inflamación gastrointestinal intensa, lesión hepática y renal y enfisema. (Robertson, 1988). Tiene relación con la hipertensión, que puede originar enfermedades cardiacas (Dickson, 1999). El riñón es más susceptible al Cd que el pulmón y el hígado, su deterioro se caracteriza por alteración de la infiltración glomerular. El Cd induce el Síndrome de Fanconi, que se caracteriza por diuresis, glucosuria, aminoaciduria, proteinuria, incremento de Na, K, Ca, Mg y fosfato, disminución de los niveles de ATP y de la actividad de la bomba Na+K+ATPasa, lo que trae como consecuencia la reducción del transporte en el túbulo proximal. El Cd ha sido asociado con la aparición de cáncer de próstata en humanos. Afecta diversamente varias enzimas importantes, puede causar osteomalacia (enfermedad de los huesos). La inhalación de polvos y humos de óxido de cadmio, produce la neumonitis del cadmio, caracterizada por edema y necrosis del epitelio pulmonar (la muerte del tejido que recubre los pulmones).

Daños ambientales

El Cd es fuertemente adsorbido por la materia orgánica del suelo. Las lombrices son muy vulnerables al envenenamiento por este metal, pueden morir a muy bajas concentraciones alterando la estructura y composición del suelo. Animales que comen o beben Cd se ven afectados con presión sanguínea alta, daños del hígado, en el sistema nervioso y el cerebro. (LENNTECH, 2008).

4.5.2. Cromo

Es un metal duro, brillante, de color grisáceo, muy resistente a la corrosión. Tiene una densidad de 7.19 g/mL, funde a 1857°C y su punto de ebullición es 2672 °C. Presenta diferentes estados de oxidación, el más alto es el +6, estos compuestos son muy oxidantes. Los estados de oxidación +4 y +5 son poco frecuentes, los estados más estables son +2 y +3. En estado natural se encuentra en forma de sales.

Se usa en la industria del acero, en galvanoplastia, en el curtido del cuero, en el tratamiento de madera y como anticorrosivo en radiadores. En la Tabla 15 se muestran actividades que pueden ser fuentes de riesgo de intoxicación por cromo.

Tabla 15. Principales riesgos de intoxicación por Cr

Riesgos laborales	Riesgos no laborales
- Industrias metalúrgicas y de curtido.	- Ocasionalmente se detecta cromo en agua subterránea, agua potable o suelo. - El aire rural o suburbano contiene concentraciones de cromo más bajas que el aire urbano (menos de 10 ng/m ³ en áreas rurales; 0 a 30 ng/m ³ en áreas urbanas). - El cromo se puede liberar al aire desde: industrias que usan o manufacturan cromo y/o sitios de desechos que contienen cromo. - Humo de cigarrillo - En algunos alimentos se puede encontrar niveles bajos de cromo (III): frutas, hortalizas, nueces, bebidas y carnes.

Daños a la salud

La toxicidad del Cr depende de su estado de oxidación; en forma trivalente no se le atribuyen efectos tóxicos y en la forma hexavalente causa irritación y corrosión. (INHEM, 1992).

El cromo y los cromatos pueden causar: erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético, cáncer de pulmón y muerte. Envenenamiento agudo (por ingestión): vértigo, sed intensa, dolor abdominal, vómito; la muerte es por uremia o nefritis hemorrágica.

Envenenamiento crónico: el contacto cutáneo produce dermatitis y la inhalación de vapores de cromo causa ulceración indolora, hemorragia, perforación del tabique nasal, conjuntivitis y hepatitis aguda.

Daños ambientales

El Cromo entra en contacto con el aire, agua y suelo en forma de Cr (III) y Cr (VI) a través de procesos naturales y actividades humanas.

Las plantas usualmente absorben sólo Cr (III), el cual es esencial, pero cuando las concentraciones exceden cierto valor pueden ocurrir efectos negativos; la acidificación del suelo también puede influir en su captación.

En altas concentraciones el Cr, debido a la disponibilidad de metales en el agua superficial, puede dañar las branquias de los peces que nadan cerca del punto de vertido; en animales puede causar problemas respiratorios, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores. (LENNTECH, 2008).

4.5.3. Manganeseo

Tiene una densidad de 7.43 g/mL, el punto de fusión es 1245°C y el de ebullición de 2150°C. Se oxida con facilidad en el aire y a temperaturas elevadas. Cuando se calienta el polvo en presencia de aire u oxígeno forma un óxido mixto de manganeseo (Mn_3O_4). Con agua a temperatura ambiente se forman hidróxido de manganeseo (II)

(Mn(OH)₂). El manganeso reacciona a temperaturas elevadas con S, N, C, Si, P, B y los halógenos. Presenta estados de oxidación de 1+ hasta 7+. Los más comunes son 2+, 4+ y 7+.

El dióxido de manganeso se usa como: agente desecante, catalizador y decolorante. El permanganato de potasio se emplea como blanqueador para decoloración de aceites y como agente oxidante en química analítica y preparativa. El Mn es de gran importancia en la fabricación de acero. Estas y otras actividades son fuentes de riesgo de intoxicación por manganeso (Tabla 16).

Tabla 16. Principales riesgos de intoxicación por Mn

Riesgos laborales	Riesgos no laborales
<ul style="list-style-type: none"> - Soldadura. - Fabricación de acero. 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveles bajos de manganeso se detectan rutinariamente en agua subterránea, agua potable y en el suelo. - Alimentos o suplementos dietéticos tales como: granos, habichuelas y nueces.

Daños a la salud

Los efectos en el exceso del Mn ocurren principalmente en el tracto respiratorio y el cerebro. Los síntomas por envenenamiento con Mn son alucinaciones, amnesia temporal transitoria, daños en el sistema nervioso, esquizofrenia, depresión, debilidad muscular, dolor de cabeza e insomnio. Puede causar Parkinson, embolia y bronquitis.

Daños ambientales

Concentraciones excesivas de Mn en suelo pueden causar daños en la pared celular de los microorganismos y plantas, éstas al ser consumidas por algunos animales les provoca deficiencias en los pulmones, hígado, disminución de la presión sanguínea, problemas en el desarrollo del feto y daño cerebral. (LENNTECH, 2008).

4.5.4. Plomo

Es un metal blanco, gris plateado, tiene una densidad de 11.4 g/mL, funde a 327.5°C, su punto de ebullición es de 1725°C, maleable, resistente a la corrosión. Forma aleaciones con otros elementos, sales con ácidos orgánicos y compuestos orgánicos estables. Con excepción de los cloratos, nitratos y cloruros, las sales de Pb orgánicas e inorgánicas, como carbonatos, sulfatos y sulfuros presentan una solubilidad baja.

El Pb es un elemento que existe en forma natural en la corteza terrestre, se distribuye como plomo metálico, compuestos inorgánicos y compuestos organometálicos.

Actualmente el Pb se produce prácticamente en proporciones iguales a partir del beneficio de minerales y del reciclado de materiales.

Sus aplicaciones se encuentran relacionadas con: la microelectrónica, los superconductores, el asfalto, los recubrimientos para detener radiaciones de radón y los contenedores de materiales radioactivos. Se usa para la fabricación de baterías, pigmentos, aleaciones, cerámicas, plásticos, municiones, soldaduras, cubiertas de cables y armamento; en la elaboración de equipo para la fabricación de ácido sulfúrico, refinación de petróleo y procesos de halogenación.

Sin embargo, estas y otras actividades pueden ser fuentes de riesgo de intoxicación por Pb (Tabla 17).

Tabla 17. Principales riesgos de intoxicación por Pb

Riesgos laborales	Riesgos no laborales
<ul style="list-style-type: none">- Extracción de minas- En fundiciones de Pb.<ul style="list-style-type: none">- Fábrica de acumuladores.	<ul style="list-style-type: none">- Agua contaminada.- Actividad volcánica y erosión.- Gasolina- Fuentes fijas: fundidoras y la industria de metales no ferrosos.- Alimentos preparados o almacenados en recipientes de barro vidriado, de los cuales se desprende plomo.- En casas antiguas las tuberías de plomo, pintura de las paredes con carbonato de plomo y óxido de plomo (intoxicación crónica).- Acumuladores, juguetes de plomo, cenizas y humo de madera pintada, desechos de joyería.

Daños a la salud

Inhibe la síntesis de hemoglobina, afecta el sistema nervioso central y periférico y a los riñones.

La intoxicación aguda se presenta como: alteraciones digestivas, dolores epigástricos y abdominales, vómitos, alteraciones renales y hepáticas, convulsión y coma.

La intoxicación crónica causa: neuropatías, debilidad y dolor muscular, fatiga, cefalea, alteraciones del comportamiento, parestesias, alteraciones renales, aminoaciduria, hiperfosfaturia, glucosuria, nefritis crónica, encefalopatía, irritabilidad, temblor, alucinaciones con pérdida de memoria, cólicos, alteraciones hepáticas, entre otros.

Daños al ambiente

Cuando alcanza niveles tóxicos en las plantas provoca: la disminución de la fotosíntesis, reducción en el crecimiento, biomasa y transpiración; lesiones cromosómicas, inhibición de la división celular e interferencia con enzimas ligadas al metabolismo del nitrógeno; en mamíferos promueve el desarrollo de anemia.

4.5.5. Vanadio

Se encuentra en la naturaleza como un metal blanco-grisáceo, en forma de cristales, tiene una densidad de 4.51 g/mL, el punto de fusión es 1900°C y el punto de ebullición es de 3450°C. Forma muchos compuestos que con frecuencia son complejos por su valencia variable. Tiene varios estados de oxidación: 0, II, III, IV y V. En su forma pura es blando y dúctil. Puede trabajarse en caliente y frío fácilmente, pero debe calentarse en una atmósfera inerte o al vacío a causa de que se oxida rápido a temperaturas por encima del punto de fusión de su óxido. El acero que tiene cantidades de vanadio es resistente a la corrosión por ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y agua salada.

Varios de los compuestos de vanadio se emplean en la industria química, sobre todo en la fabricación de catalizadores de oxidación, y en la industria cerámica como agentes

colorantes; se usa en la producción de resortes y herramientas de acero de alta velocidad resistentes a la corrosión y en la producción de imanes superconductores.

En la tabla 18 se muestran las principales actividades que pueden ser fuentes de riesgo de intoxicación por V.

Tabla 18. Principales riesgos de intoxicación por V

Riesgos laborales	Riesgos no laborales
<ul style="list-style-type: none"> - Extracción de minas. - Industrias que usen petróleo o carbón. 	<ul style="list-style-type: none"> - Agua contaminada por estar cerca de sitios contaminados de desechos o vertederos que contienen vanadio. - Actividad volcánica y erosión. - Alimentos: mariscos y algunos suplementos alimenticios.

Daños a la salud

Cuando hay una alta concentración de Vanadio en el aire, puede causar daños a la salud ocasionando bronquitis y neumonía; si se ingiere los efectos en la salud son: daños en el sistema cardiovascular y nervioso, inflamación del estómago e intestinos, sangrado de nariz, hígado y riñones, irritación de la piel, temblores severos, parálisis, vértigo, dolor de cabeza y cambios de comportamiento.

Daños al ambiente

El Vanadio se encuentra en algas, plantas, invertebrados, peces y muchas otras especies. Se acumula en mejillones y cangrejos en concentraciones de 105 a 106 veces mayores que las del agua salada.

Causa la inhibición de ciertas enzimas de animales, lo cual tiene varios efectos neurológicos, desordenes respiratorios, parálisis y efectos negativos en el hígado y los riñones. (LENTECH, 2008).

4.6. Espectrofotometría de Absorción Atómica

La “espectrofotometría” es un término general para la ciencia que estudia las distintas interacciones de la radiación con la materia. Las interacciones de interés se producen entre la materia y diferentes formas de energía como la de la radiación electromagnética, las ondas acústicas, los haces de partículas como iones o electrones. La espectrometría y los métodos espectrométricos hacen referencia a la medida de la intensidad de la radiación electromagnética mediante un detector fotoeléctrico o con otro tipo de dispositivo electrónico. Los métodos espectrométricos más ampliamente utilizados son los relacionados con la radiación electromagnética (Skoog 2009, Rubinson 2001).

La radiación electromagnética es una perturbación energética que se propaga en el espacio y es producida por el movimiento de partículas cargadas, la carga produce campos eléctricos y magnéticos variables. La cantidad de radiación absorbida por una muestra es proporcional a la cantidad de las especies absorbentes en la muestra. Existe una relación lineal entre absorbancia y concentración, de acuerdo a la ley de Lambert y Beer. Dicha ley se expresa mediante la ecuación $A = \epsilon lc$, donde A es la absorbancia medida, ϵ es el coeficiente de absorción molar, l es la longitud del paso óptico (la distancia que atraviesa la luz dentro de la muestra) y c es la concentración de la especie absorbente (Skoog 2009).

Las técnicas espectroscópicas atómicas consisten en transformar al analito en átomos en estado de vapor (atomización) y medir la radiación electromagnética absorbida por dichos átomos. La absorción atómica es el proceso que ocurre cuando átomos de un elemento en estado fundamental absorben energía radiante a una longitud de onda específica. Un espectro de absorción atómica consta de líneas espectrales, que se producen como consecuencias de transiciones del estado fundamental a niveles superiores. La cantidad de radiación absorbida aumenta al hacerlo el número de átomos del elemento presente en el paso óptico, utilizándose esto con fines analíticos cuantitativos (Skoog 2009).

Existen diferentes técnicas analíticas para la determinación de metales pesados, entre las más comunes se encuentran: la espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) por horno de grafito y la espectroscopia de absorción atómica con flama (Tabla 19).

Tabla 19. Diferencias entre la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con atomización de flama y espectrofotometría de horno de grafito.

Atomización de flama	Horno de grafito
La muestra aspirada es convertida en pequeñas gotas (spray) que tienen un tamaño lo suficientemente pequeño para llegar al quemador, donde el solvente es evaporado y el sólido resultante se funde y vaporiza para formar moléculas volátiles y disociarse en átomos.	Se utiliza un tubo de grafito como medio de atomización. La muestra es colocada en este tubo y por calentamiento por el paso de una corriente eléctrica por el horno, la temperatura aumenta para realizar el proceso en un tiempo mayor que el de la flama.
La cantidad de átomos que se encuentran en la flama es constante una vez alcanzado el equilibrio.	Los átomos son formados por una sola vez y en corto tiempo.
El control de temperatura depende de la flama.	El control de temperatura depende de un programa de temperaturas.
Los elementos contenidos en el spray que llegan al quemador no son convertidos eficientemente en átomos, pues el tiempo del proceso es muy corto en la flama.	Se dispone de más tiempo y de una forma más eficiente de transferir energía térmica a la muestra, lo que permite la formación de átomos de manera completa.
Los intervalos de detección son del orden de ppm.	Los intervalos de detección son de ppb, lo que hace que la técnica sea más sensible.

4.6.1. Espectrofotometría de Absorción Atómica (flama)

La espectroscopia de absorción atómica con flama es una técnica ampliamente utilizada para determinar elementos metálicos y metaloides.

Los equipos de absorción atómica por flama constan principalmente de los siguientes elementos:

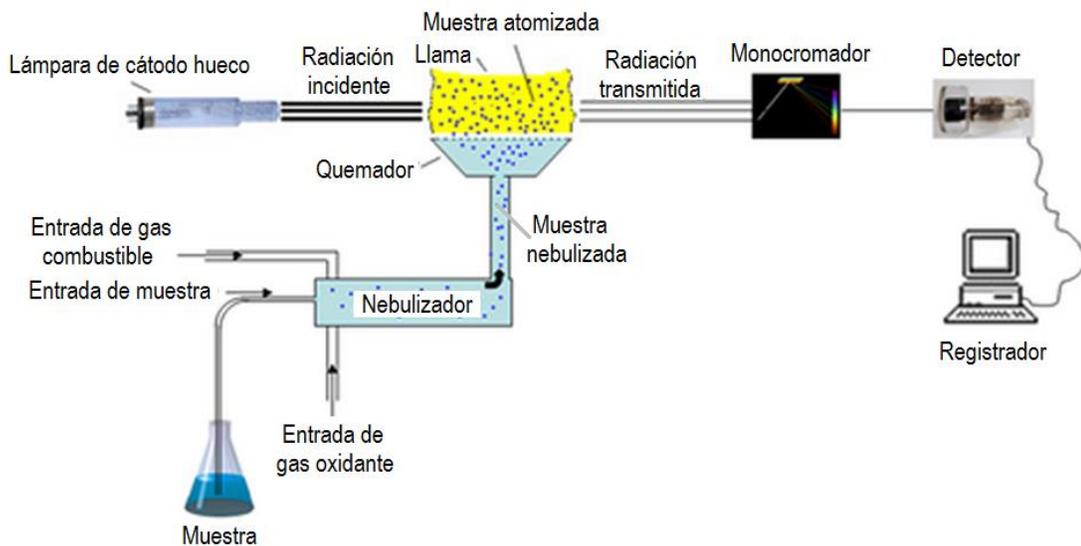
- Fuente de radiación: es un dispositivo para generar radiación electromagnética con ciertas propiedades.
- Lámpara de cátodo hueco: es el tipo de fuente de radiación más ampliamente utilizado, es una lámpara espectral que posee un cátodo hueco, de forma cilíndrica, fabricado o cubierto de uno o más elementos a ser analizados. El

ánodo es por lo general de tungsteno o níquel. El cilindro de vidrio de la lámpara, se llena con gas inerte (neón o argón).

- Fuentes continuas: en estas la radiación se distribuye continuamente sobre un intervalo bastante amplio de longitudes de onda. Son utilizadas como correctores de fondo espectral.
- Nebulizador: ayuda a proporcionar un flujo uniforme del aerosol hacia una flama que produce la atomización.
- Atomizador: proporciona una flama relativamente estable y larga.
- Monocromador: aísla longitudes de onda a partir de un espectro amplio de radiación.

El método involucra el uso de un nebulizador pre-quemador y un quemador con forma de ranura que suministra una flama con una longitud de trayecto más larga. Los átomos formados absorben cualitativamente la radiación emitida por la lámpara de cátodo hueco y la cantidad de radiación absorbida está en función de la concentración del analito. Una vez que la señal de la lámpara pasa por la flama llega a un monocromador, que discrimina todas las señales que acompañan la línea de interés. Esta señal de radiación electromagnética llega a un detector o transductor y pasa a un amplificador y por último a un sistema de lectura. Este proceso se muestra en la Figura 8 (Bender, 1992).

Figura 8. Espectrómetro de absorción atómica en flama



Nebulización: es el proceso de convertir una muestra líquida en un aerosol de finas gotas. Un mecanismo que nebulice una muestra líquida requiere un flujo rápido de gas para que interactúe con una corriente relativamente lenta de líquido y así lo rompa en finas gotas. Las gotas líquidas las transporta la corriente de gas hacia la cabeza del quemador.

Atomización: es el proceso por el que la muestra se convierte en un vapor atómico. Los tipos más comunes de atomizadores son: en llama, vaporización electrotérmica y plasma de argón de acoplamiento inductivo. En un atomizador en llama, la disolución de las muestras es nebulizada mediante un flujo de gas oxidante mezclado con el gas combustible, y se transporta en una llama donde se produce la atomización. Primero ocurre la desolvatación (se evapora el disolvente hasta producir un aerosol molecular sólido finamente dividido), después la disociación de la mayoría de estas moléculas produce un gas atómico. La mayoría de los átomos así formados se ionizan originando cationes y electrones (Skoog 2009).

Para generar una llama pueden utilizarse una gran variedad de combustibles y oxidantes. La elección depende de la temperatura que se desea alcanzar y de los elementos que se desean determinar. El tipo de combustible y oxidante y la relación entre ellos, varían el aspecto y tamaño de la flama, las regiones más importantes de la flama son la zona de combustión primaria, secundaria y zona interzonal (es la más rica en átomos libres y la más utilizada).

La temperatura máxima se localiza aproximadamente 1 cm por encima de la zona de combustión primaria. En la tabla 20 se muestran los tipos de flama según el combustible y el oxidante, el intervalo de temperatura y la velocidad de combustión. Las velocidades de combustión son importantes porque las flamas son estables sólo en ciertos intervalos de flujos de gas. A velocidades más altas, la flama sube y alcanza con el tiempo un punto donde se desprende del quemador y lo apaga. Actualmente las combinaciones que más se utilizan son: aire-propano, aire-acetileno, óxido nitroso-acetileno (Bender, 1992).

Tabla 20. Tipos de flama

Combustible	Oxidante	Temperatura (°C)	Velocidad de combustión (cm s ⁻¹)
Gas LP	Aire	1700-1900	39-43
Gas LP	Oxígeno	2700-2800	370-390
Hidrógeno	Aire	2000-2100	300-440
Hidrógeno	Oxígeno	2550-2700	900-1400
Acetileno	Aire	2100-2400	158-266
Acetileno	Oxígeno	3050-3150	1100-2480
Acetileno	Óxido nitroso	2600-2800	285

Una vez que han sido formados los átomos, la flama tiene la misma función que una celda en espectroscopía visible o ultravioleta. Los átomos de la flama absorben radiación de acuerdo a la Ley de Beer si esta corresponde a la diferencia en energía entre los niveles energéticos de algunos de los átomos presentes por la selectividad que se presenta con la lámpara de cátodo hueco, de lo contrario la radiación pasa por la flama sin disminuir la potencia del haz como efecto de los átomos contenidos en ella (Skoog 2009).

4.6.2. Espectroscopia de Absorción Atómica (Horno de grafito)

Principales partes del equipo de absorción atómica con horno de grafito:

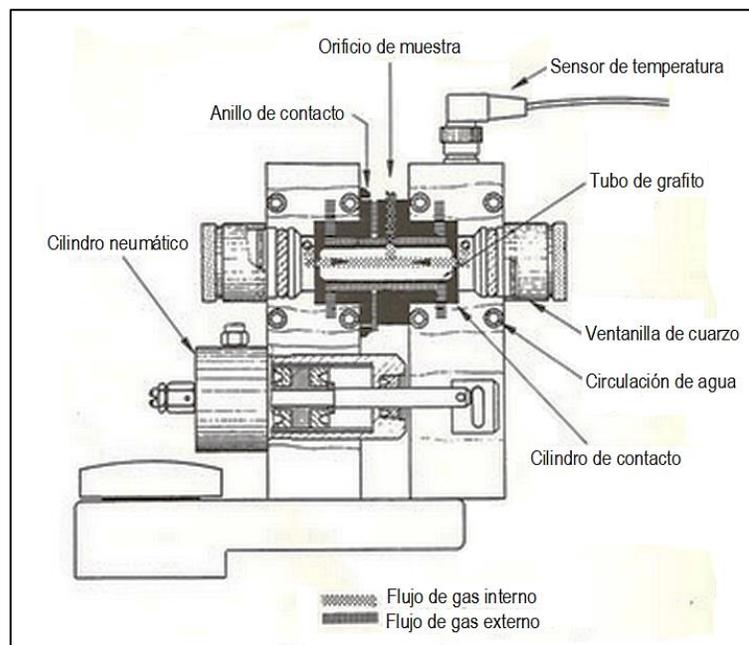
- Fuente de radiación. La más utilizada es la lámpara de cátodo hueco. Tiene un ánodo de tungsteno y un cátodo cilíndrico sellado en un tubo de vidrio que contiene gas inerte. El cátodo está elaborado con el metal del analito o puede servir como soporte para un recubrimiento de ese metal.
- Monocromador: restringe la radiación que se va a medir a una banda estrecha para que se absorba por el analito. Aumenta la selectividad y sensibilidad. Para las mediciones de absorción, la banda estrecha aumenta la posibilidad de respuesta lineal con la concentración del analito. Existen dos tipos: el primero utiliza una red para dispersar la radiación en sus longitudes de onda individuales y el otro emplea un prisma para este fin.
- Atomizador electrotérmico: es un tubo cilíndrico de grafito, abierto en ambos extremos, tiene un agujero central para la introducción de la muestra. El tubo intercambiable se fija dentro de un par de contactos eléctricos cilíndricos

localizados en los extremos del tubo. Estos contactos se encuentran dentro de un recipiente enfriado con agua. Se proporcionana dos corrientes de gas inerte (argón); la corriente externa previene la entrada de aire y la consecuente incineración del tubo mientras que la corriente interna, fluye dentro de los extremos del tubo y fuera de la entrada central de la muestra y ayuda a la expulsión de los vapores liberados durante las primeras etapas de calentamiento (Skoog, 2009).

- Detector. El detector de luz de los espectrómetros convierten la luz que le llega en energía eléctrica.

En la espectroscopía de absorción atómica con tubo de grafito, la muestra analizada se somete a un proceso de secado, el cual ocurre una vez que se ha inyectado la muestra (2-20 mL) en el tubo de grafito, esta se calienta a una temperatura algo inferior al punto de ebullición del solvente (usualmente entre 80 a 180 °C), se evapora el solvente y los componentes volátiles de la matriz (Figura 9).

Figura 9. Sección transversal de un atomizador electrotérmico



Enseguida se realiza el proceso de calcinado por incremento de la temperatura, para remover la mayor cantidad de material (materia orgánica) de la muestra sin pérdidas del

analito. La temperatura de calcinación usada varía en el intervalo de 350 a 1600 °C. Posteriormente se lleva a cabo la atomización, el horno es calentado rápidamente a altas temperaturas (1800-2800 °C) para vaporizar los residuos del paso de calcinado. La temperatura de atomización depende de la volatilidad del elemento. En esta técnica se emplean atomizadores electrotérmicos, el tubo de grafito se ajusta a un par de contactos eléctricos. Estos se mantienen dentro de una caja refrigerada por agua (Skoog 2009).

La atomización de la muestra se produce en un periodo de pocos milisegundos a segundos, se mide la absorción de las partículas atomizadas en la zona situada inmediatamente por encima de la superficie calentada. A la longitud de onda a la que tiene lugar la absorción, la señal del detector aumenta al máximo algunos segundos después de la ignición y cae rápidamente a cero cuando los productos de atomización salen del tubo. Los análisis cuantitativos se basan por lo general en la medida de la altura de pico, aunque también se ha utilizado el área de pico.

La etapa final de este proceso es la limpieza del horno a una temperatura superior a la de atomización y así evitar el efecto de memoria (Skoog 2009).

4.7. Normas de calidad de agua

Existen varias organizaciones encargadas de proteger la salud de los seres humanos y el medio ambiente. En este apartado se hará una comparación de los valores máximos permisibles de parámetros fisicoquímicos y los límites máximos permisibles para los metales analizados en este trabajo de acuerdo a 4 diferentes organismos (Tabla 21).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), establece directrices para la calidad de agua potable que son el punto de referencia internacional para estándares de diferentes elementos o sustancias en esta. Las últimas directrices publicadas por la OMS son las acordadas en Génova, 1993. Para algunos elementos y sustancias no existe directriz, ya que no existen suficientes estudios relativos a los efectos de esta sustancia en el organismo, y por lo tanto no es posible definir un valor límite; en

otros casos, no existe debido a que es imposible que el elemento o sustancia alcance una concentración peligrosa en el agua, por la insolubilidad o escasez.

En México se estableció la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Su objetivo es establecer los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

En Estados Unidos se implementa el Reglamento de Agua Potable Primaria Nacional, el cual se aplica a los sistemas públicos de agua y se especifican los límites máximos permisibles para microorganismos, desinfectantes, productos químicos inorgánicos, productos químicos orgánicos y radionucleidos.

La Unión Europea elaboró la Directiva 98/83/EC, mediante la revisión de valores de los parámetros de la antigua Directiva del Agua Potable de 1980; proporciona una base sólida para los consumidores y proveedores de agua potable en la UE.

Tabla 21. Valores normados y límites máximos permitidos para los parámetros fisicoquímicos, metales alcalinos, metales alcalinotérreos y metales pesados en agua.

	Estándares de la OMS (1993)	Estándares en México (NOM-127-SSA1-1994)	Estándares EPA	Estándares europeos (1998)
pH	No hay directriz	6.5-8.5	6.05 a 8.05	6.5-9.5
Conductividad	250 μ S/cm	No se menciona	No se menciona	2500 μ S/cm
Ca (mg/L)	No se menciona	No se menciona	No se menciona	No se menciona
Mg (mg/L)	No se menciona	No se menciona	No se menciona	No se menciona
Dureza total como CaCO₃ (mg/L)	500	500	500	500
K (mg/L)	No se menciona	No se menciona	No se menciona	No se menciona
Na (mg/L)	200	200.00	No se menciona	200
Cd (mg/L)	0.005	0.005	0.005	0.005
Cr (mg/L)	0.05	0.05 (total)	0.1	0.05
Mn(mg/L)	0.5	0.15	0.05	0.05
Pb (mg/L)	0.01	0.025 (0.01)*	Cero	0.05
V (mg/L)	No se menciona	No se menciona	No se menciona	No se menciona

* En la modificación de la NOM-127 (año 2000) el valor máximo permitido para Pb es 0.01.

CAPÍTULO 5. ACTIVIDAD MINERA EN LA REGIÓN DE TAXCO DE ALARCÓN, GUERRERO

Desde el período de los olmecas (< 1000 A.C.) se empezó con la explotación de cinabrio y jadeíta. En la cultura teotihuacana, se introdujeron las técnicas de moldeado y de cera perdida. En Guerrero se conocen minas prehispánicas en las regiones de Tierra Caliente y Norte, donde se trabajaba cobre, oro, plata y estaño antes de la conquista. La provincia de Tepecoacuilco, que incluía pueblos como Chilapa, Yohuilan (hoy Iguala) y Oziman, tributaba a Tenochtitlán mantas, camisas de mujer, vestidos de guerreros con escudos, maíz, frijol, chía, copal, miel y hachas de cobre. De la provincia de Tlapan, enviaban minerales y tributaban oro. Los depósitos de oro y plata de Taxco se trabajaron a pequeña escala, probablemente en tiempos de Iztcóatl (1428-1440) o Moctezuma Ilhuicamina (1440-1468).

El pueblo conocido con el nombre de Taxco el Viejo, situado aproximadamente a 10 km al sur de Taxco, fue el asentamiento más importante en toda la comarca.

A finales de 1520 Hernán Cortes mandó reconocer la región de Taxco para localizar metales y fundir piezas de artillería. En 1521, Rodrigo de Castañeda tomó el sector minero de Taxco y en 1522 se abrió la primera mina de América: el “Socavón del Río” (también llamado el Socavón del Rey o de Cortés) en Tehuilotepec.

Para 1530, eran explotadas las minas de Zumpango y 40 años después se fundaron como “Real de Minas”: Tetelcingo, Taxco, Cantarranas, Tenango, Izcapulzalco, Topila, Cuetzala, Tepecoacuilco, Huitzucó, Chilapa y Zumpango.

El Taxco actual está en el lugar que se conocía como Tetelcingo y fue habitado por primera vez en 1534 por los conquistadores Juan Cabras y Juan Salcedo Muriel.

La primera bonanza ocurrió en 1542 en una mina de Luis de Castilla, alcalde mayor de Taxco. También es posible que se explotara cobre y estaño.

En 1557 la minería en Nueva España cobró mayor importancia por la introducción del sistema de amalgamación. Cinco años después, ya se contaba con muchas haciendas de beneficio, en donde los minerales se trataban con azogue, el cual fue monopolizado

por los reyes de España. En 1742, Don José de la Borda llegó a Taxco y explotó las minas de “El Pedregal”, “El Coyote”, “San Ignacio” y “Cerro Perdido”.

De 1748 a 1762, se descubrieron las bonanzas en las minas de “La Borda”, “La Lajuela” y “Yoamigo” en Taxco, encontrándose los yacimientos de plata más ricos de México, obteniendo 168 kilos de plata por tonelada. Esto permitió a De la Borda, construir la Parroquia de Santa Prisca.

Después de 1802, cuando la noria de San Felipe no tuvo agua, las actividades mineras disminuyeron paulatinamente, hasta quedar el distrito paralizado en 1811, cuando José María Morelos tomó Taxco.

La guerra de independencia provocó una aguda crisis en la minería y el desplome de la producción en virtud de que las minas se inundaron al ser abandonadas.

Al término de la guerra, los distintos gobiernos buscaron atraer el interés de inversionistas extranjeros hacia la minería, a fin de habilitar las antiguas minas. En Taxco hubo actividad minera con inversiones criollas.

En 1853 el Ing. Agustín Font, informó de la existencia de yacimientos en la región de “Placeres de Oro” y en 1854 Antonio López de Santa Ana decretó la concesión para explotar oro en esa región en la Sierra Madre del Sur.

En 1869, ocurre el descubrimiento de los criaderos de mercurio en Huitzucu, por Thevenet, encontrándose en ellos un mineral nuevo, livingstonita, que es un sulfuro de mercurio y antimonio.

Durante el Porfiriato, como consecuencia de la reactivación económica propiciada por la entrada de capitales extranjeros, principalmente norteamericanos, llegaron a funcionar en la entidad más de 460 minas registradas; sobresalieron los yacimientos de Taxco y Huitzucu, en la región Norte, y de Campo Morado y San Nicolás de Oro, en Tierra Caliente, en los cuales, además de oro y plata, se extraían mercurio, cobre, antimonio, plomo y zinc. Además de las inversiones, hubo nueva tecnología, se introdujo la fuerza hidroeléctrica que comenzó a desarrollarse en 1890, se redujeron los gastos y se mecanizaron los procesos.

En esta época, se construyó la vía de ferrocarril Balsas-Cuernavaca, para dar salida al mineral de la región Balsas, con el ramal de Naranja, que llegaba a 26 km de Taxco.

De 1908 a 1911, se abrieron las minas en el distrito minero de San Vicente. Al estallar la revolución, la actividad minera en el Estado sufrió un desplome enorme, lo que fue

agravado por la expropiación de muchas minas en 1914 por el gobierno del general Jesús H. Salgado.

Salvo pequeños trabajos, las actividades mineras estuvieron en suspenso aproximadamente hasta 1920, cuando el distrito se reactivó con la explotación de menas de sulfuros complejos de plomo, zinc, cobre, plata y oro; debido a la implementación del sistema de amalgamación en frío por cianuración, permitiendo extraer minerales de baja ley. En 1920, se instaló la primera planta de beneficio por flotación selectiva y empezó la explotación moderna de las minas de la región.

Durante la segunda guerra mundial, la minería inició una nueva etapa de auge, por la necesidad de abastecer al mercado norteamericano. En esta época, se reactivaron las minas de mercurio y antimonio de Huitzucó y Huahuaxtla, descubiertas en 1923. La empresa American Smelting and Refining Company (ASARCO, hoy en día Industria Minera México, S.A. de C.V.) llegó a Taxco en 1942 y poco a poco adquirió los principales feudos de la zona. En 1976, se inauguró la nueva "Unidad Taxco", con todas las minas comunicadas en forma subterránea a fin de concentrar el mineral producido en un solo punto: "El Solar". También se adquirió equipo moderno para incrementar la eficiencia en las minas y comenzó a funcionar una nueva planta de beneficio de 2200 toneladas diarias de capacidad. Entre 1979 y 1981, se amplió la capacidad de beneficio de 2200 a 3300 toneladas por día.

La producción minera de este distrito fue la más importante de toda la entidad, según los Sumarios Estadísticos de la Minería Mexicana 1983-1987, 1993, 1995 y 1996 del Consejo de Recursos Minerales.

En la actualidad las empresas que trabajan en Taxco son: Grupo México S.A.B de C.V., Southern Copper Corp, Minera México S.A. de C.V., y la Industria Minera de México S.A. de C.V.; sin embargo están en suspensión temporal. El complejo incluye minas subterráneas y una planta de flotación; la cual produce concentrados de plomo y zinc, con algunas cantidades de oro y plata. Existen tres tipos de depósitos de mineral: vetas de relleno de fisuras, vetas y cuerpos de reemplazamiento (llamados mantos). El mineral incluye galena argentífera, esfalerita, pirargirita y otras sulfosales. La mineralización es más intensiva en la base de las calizas y consiste de esfalerita, galena, pirita y magnetita.

Las minas emplean como métodos de minado en Taxco:

- Shrinkage: consiste en utilizar el mineral quebrado como piso de trabajo para seguir explotando de manera ascendente.
- Corte y relleno: es un método ascendente. El mineral se extrae por franjas horizontales y/o verticales empezando por la parte inferior de un tajo y avanzando verticalmente. Cuando se ha extraído la franja completa, se rellena el volumen correspondiente con material estéril, que sirve de piso de trabajo a los obreros y al mismo tiempo permite sostener las paredes, y en algunos casos especiales el techo.
- Cámaras y pilares: método de explotación en minería en el que se excavan grandes cámaras, dejando pilares de mineral de mena o roca o carbón para sostener el techo. (Diccionario Ciencias de la Tierra, 2000)

La planta tiene una capacidad de 2,000 toneladas de mineral por día. (MÉXICO INFOMINE, 2014).

CAPITULO 6. DISEÑO EXPERIMENTAL

6.1. Diseño del muestreo

Los muestreos se realizaron en tres periodos: el primero fue el 26 de octubre 2011 (post lluvias), el segundo el 8 de febrero 2012 (estiaje) y el tercero el 22 de agosto (lluvias) de 2012. En total se recolectaron 26 muestras. Los sitios de muestreo se seleccionaron en base a estudios previos en los que se reportaron concentraciones que pasaron los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

Se realizaron los mapas para cada poblado en donde se muestran los puntos de muestreo; se utilizaron como base 3 cartas topográficas del INEGI escala 1:50000 (Teloloapan, Taxco e Iguala), para delimitar las áreas, se usó el programa Global Mapper versión 7.0 y para editarlos el programa Surfer versión 8.0.

6.2. Ubicación de los sitios de muestreo

6.2.1. El Horconcito

Se tomaron un total de 7 muestras por los dos manantiales y se les asignaron los siguientes nombres y claves: Horconcito bajo nacimiento (HBN), Horconcito bajo (HB) y Horconcito alto (HA) (Figura 10).

Figura 10. Ubicación de las muestras tomadas en el poblado "El Horconcito"

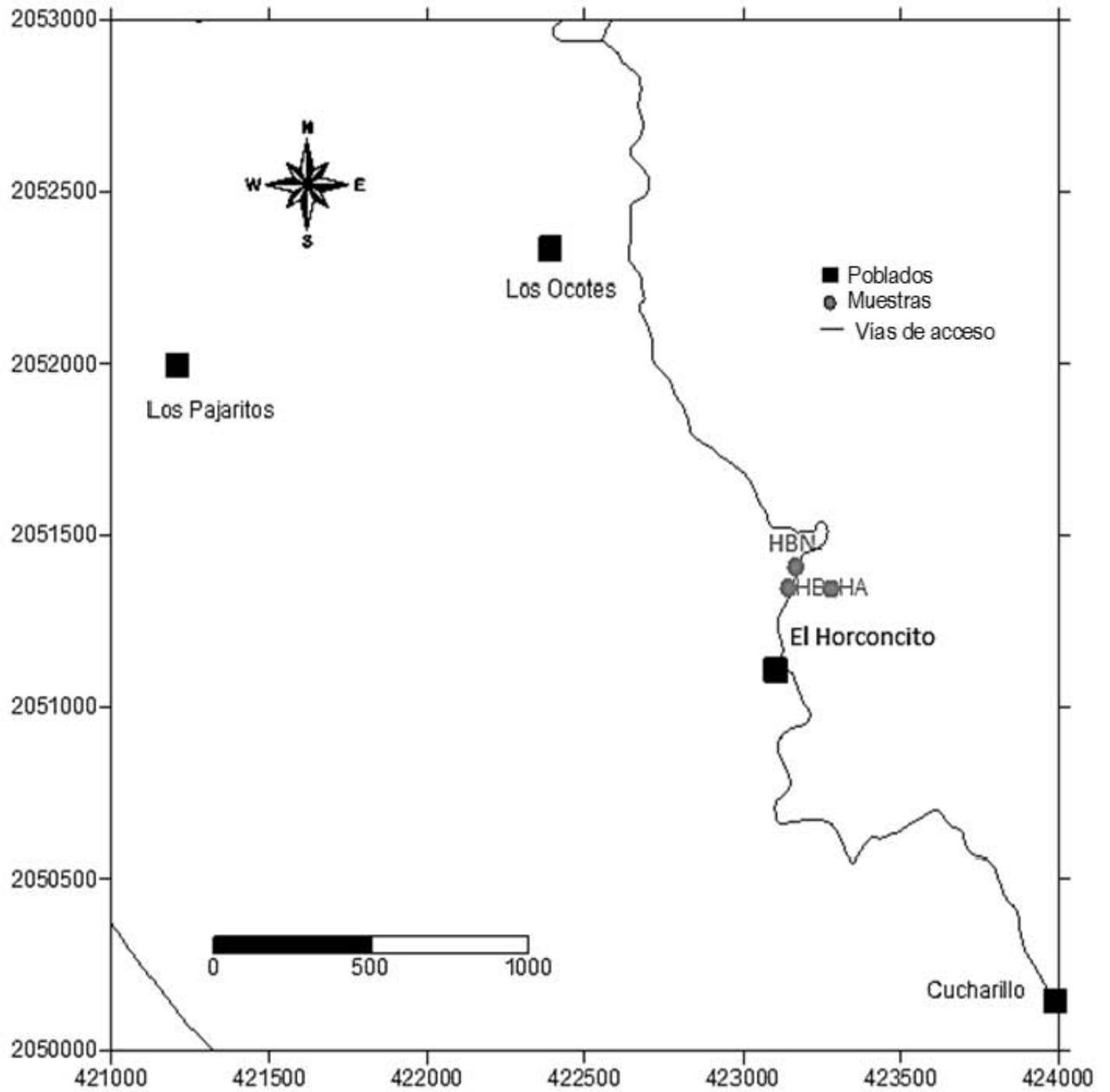


Figura 11. Fotos de los puntos de muestreo del poblado El Horconcito.



Horconcito bajo
nacimiento (HBN)



Horconcito bajo (HB)



Horconcito alto (HA)

6.2.2. El Aguacatito

Se tomaron 2 muestras de un río y se asignó con el nombre y clave El Aguacatito (EA).

Figura 12. Ubicación de las muestras del poblado “El Aguacatito”

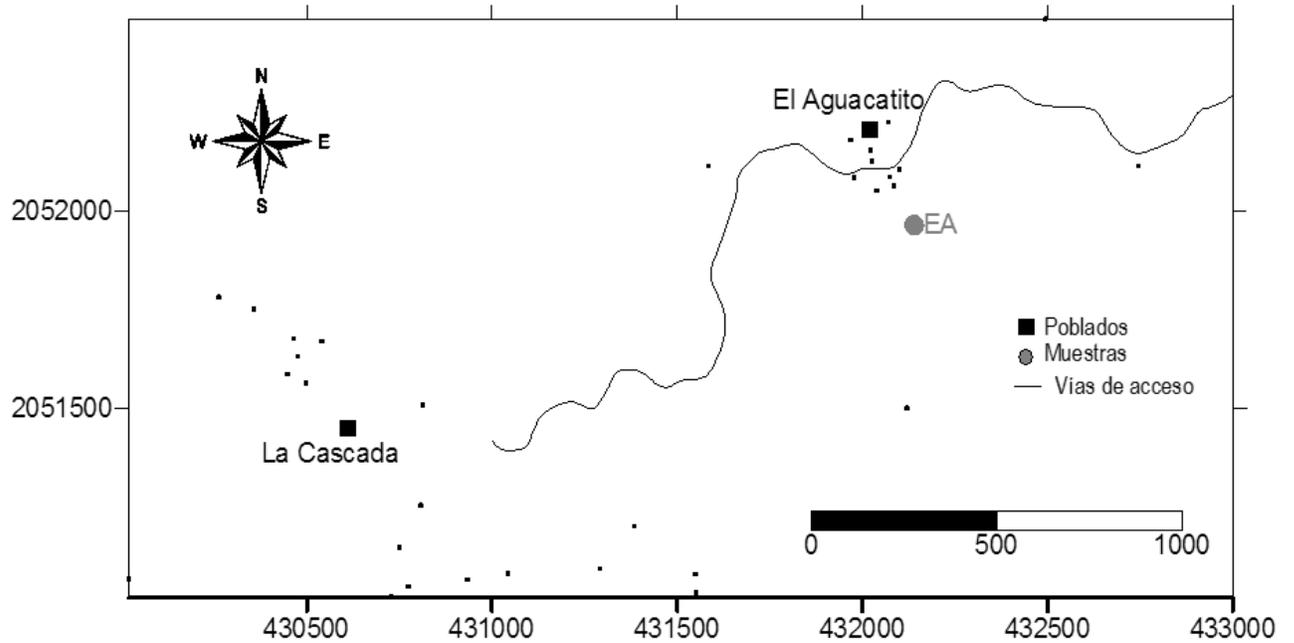


Figura 13. Foto del sitio de muestreo del poblado El Aguacatito.



Río en El Aguacatito (EA)

6.2.3. Huahuaxtla

Se tomaron 4 muestras, 2 de un manantial y 2 de un río, se le asignaron los siguientes nombres y claves: Pozo 1 (P1) y Pozo 2 (P2), respectivamente.

Figura 14. Mapa de ubicación de las muestras del poblado "Huahuaxtla"

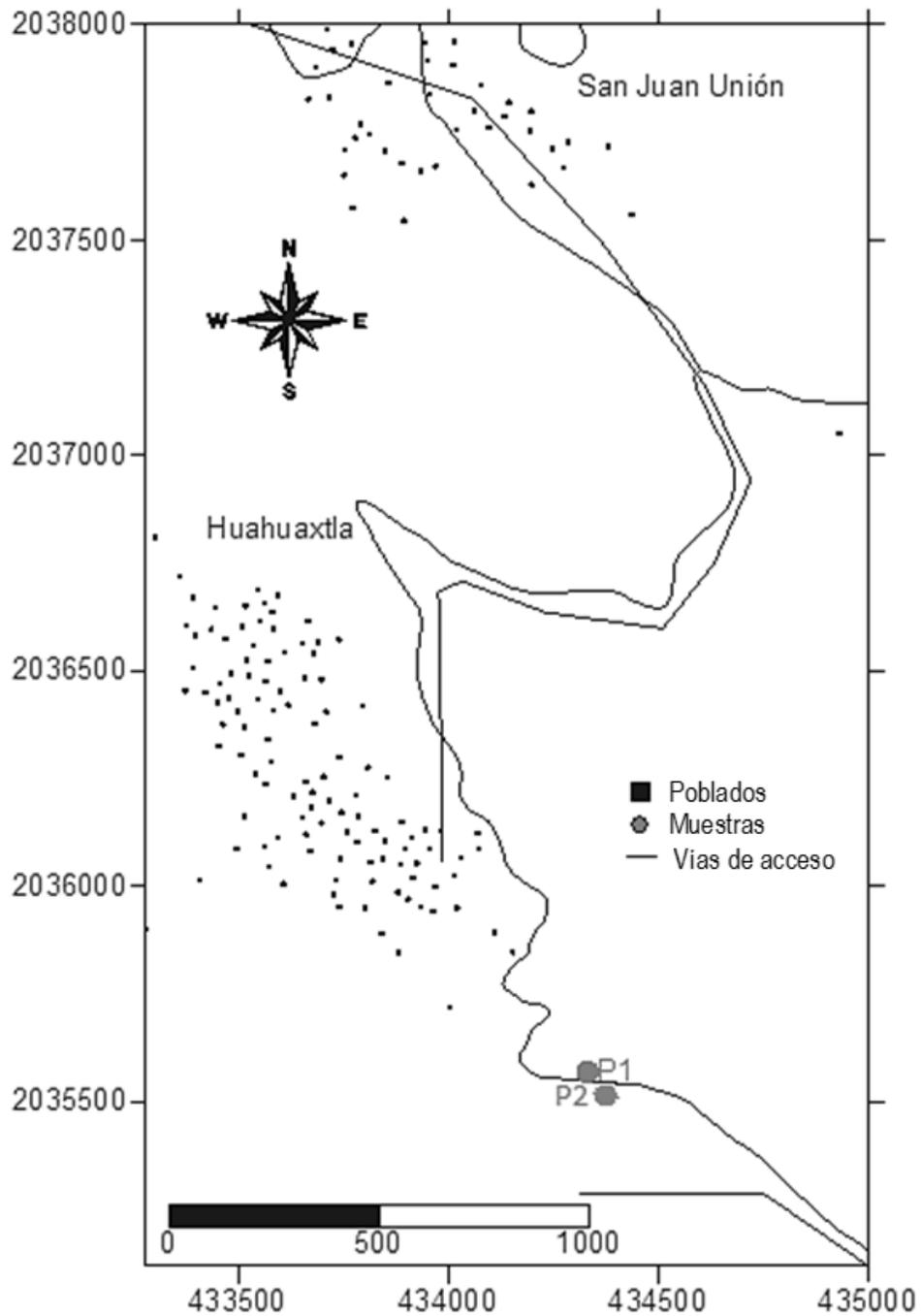


Figura 15. Fotos de los puntos de muestreo del poblado Huahuaxtla.



Pozo 1 (P1): manantial



Pozo 1, exterior



Pozo 2 (P2): río

6.2.4. Tlamacazapa

Se tomaron 13 muestras en total de 5 norias y se les asignaron los siguientes nombres y claves: Hoxteocapa (H), Tlajilapa baja (TB), Tlajilapa alta (TA), La Cruz (LC) y La Presa (LP).

Figura 16. Mapa de ubicación del poblado "Tlamacazapa"

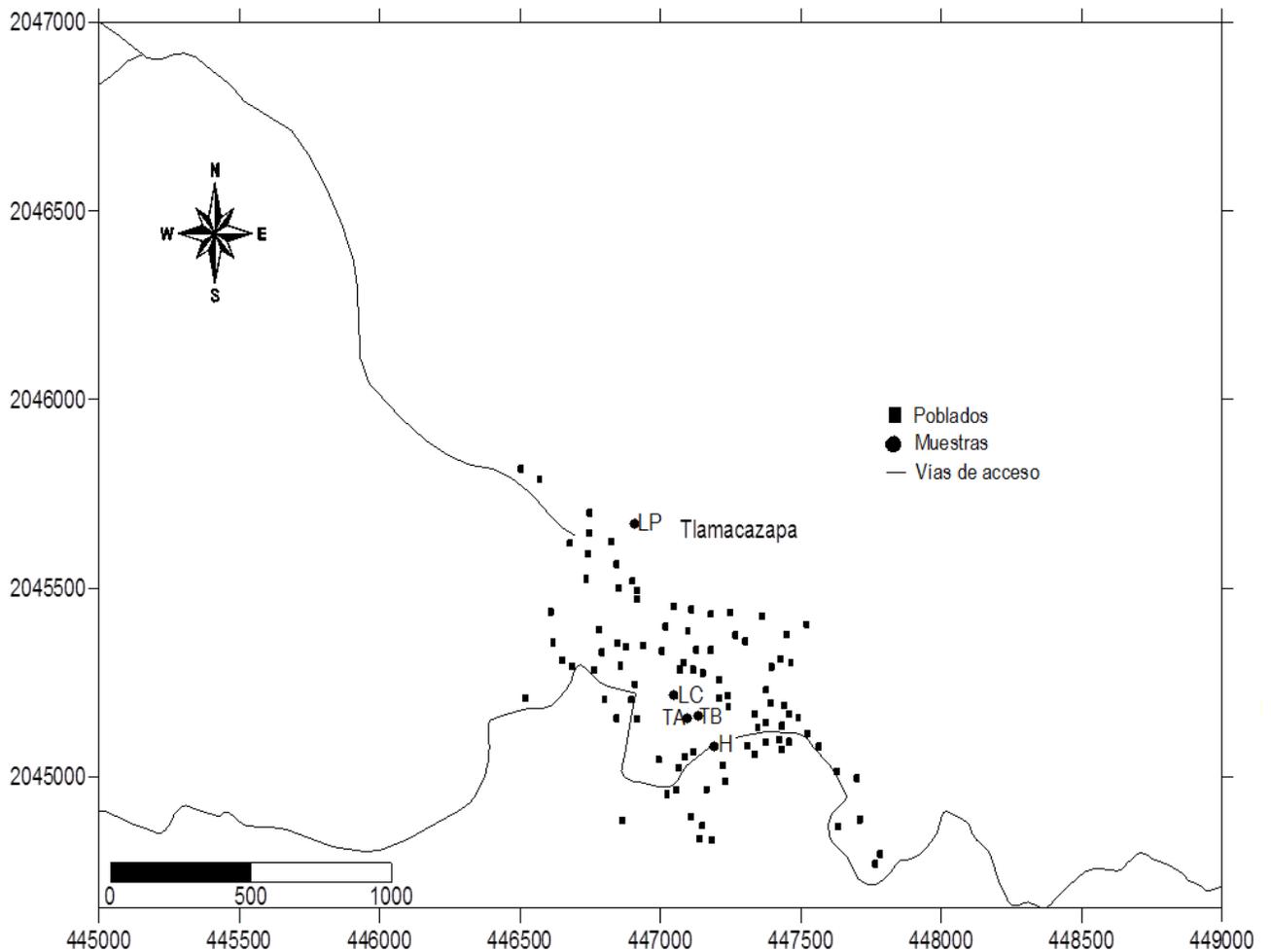


Figura 17. Fotos de los puntos de muestreo del poblado Tlamacazapa.



Hoxtocapa (H): agua con materia orgánica.



Tlajilapa bajo (TB): agua con alto contenido de materia orgánica.



Tlajilapa alto (TA): mangueras conectadas para abastecimiento directo de agua.



La Cruz: poblador recolectando agua para uso doméstico.



La Presa: agua con gran cantidad de materia orgánica.

6.3. Metodología

El muestreo se llevó a cabo de acuerdo a la NOM 014-SSA1-1993 “Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados” y a la NMX-AA-003-1980 “Aguas residuales-Muestreo” ya que no existe una NOM o una NMX que especifique cómo se debe tomar muestras de agua de bienes nacionales o sitios de almacenamiento, utilizados para consumo humano. Para continuar con el sistema de aseguramiento de control de calidad.

6.4. Preparación de material utilizado para el muestreo y muestreo

Para llevar a cabo el muestreo se utilizaron botellas de polietileno de alta densidad (HDPE) las cuales se lavaron con detergente especial que evita interferencias de análisis (Extran), se enjuagaron con agua destilada, se llenaron con ácido nítrico al 20 %v/v, después de 24 horas se vació el ácido y se enjuagó con agua desionizada, finalmente la botella se llenó $\frac{3}{4}$ con agua desionizada y se dejó así hasta su uso. Antes de tomar las muestras se realizó un ligero enjuague tres veces con la misma, para ambientar las botellas y evitar cualquier tipo de contaminación. Posteriormente, se etiquetaron para llevar un control sistemático del muestreo. Se determinaron los siguientes parámetros: temperatura, conductividad y pH ya que estos pueden cambiar con el tiempo. Se utilizó un Conductronic PCI8 digital pH- μ S- $^{\circ}$ C meter. Para la determinación del pH se calibró el instrumento en el laboratorio y en el sitio de muestreo, con buffer de pH 4, 7 y 10. Para determinar conductividad se calibró el instrumento en el laboratorio y en el sitio de muestreo con una disolución de KCl de 500 μ S.

Se tomaron muestras por duplicado; una fue para el análisis de metales pesados a la cual se le añadió HNO₃ concentrado (grado suprapuro) hasta obtener un pH <2 con el objeto de preservar la muestra, la segunda muestra colectada fue para el análisis de metales alcalinos y metales alcalinotérreos. Las muestras fueron llevadas al laboratorio en donde se mantuvieron en refrigeración (4 $^{\circ}$ C) hasta su análisis.

Las muestras se filtraron al vacío con un sistema de filtración magnético (Gelman de 47 mm) utilizando filtros de membrana de policarbonato de 0.4 μm . Las muestras se mantuvieron en refrigeración (4 °C) hasta el análisis para cada metal.

Es importante mencionar que al material utilizado se le realizó el siguiente procedimiento de limpieza:

- La cristalería se lavó con detergente (Extran) y se enjuagó con agua de la llave, en seguida se enjuagó varias veces con agua destilada.
- La cristalería se llenó con ácido nítrico al 20% v/v, se taparon y se dejaron remojando durante 48 horas.
- Se quitó el ácido y se enjuagó con agua desionizada.
- Se llenó con agua desionizada el material de laboratorio, se tapó y se dejó reposar durante 24 horas.
- Se descartó el lixiviado y se enjuagó con agua desionizada.
- Se llenó con agua desionizada, se tapó y se almacenó.
- El material de laboratorio se enjuagó con agua desionizada antes de su uso.

6.5. Análisis Químico

Todas las muestras fueron determinadas por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) considerando la NMX-AA-051-SCFI-2001 “Análisis de agua – Determinación de metales pesados por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas”.

En el Laboratorio de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera se cuenta con un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica de Horno de Grafito marca GBC marca Avanta Σ , con horno de grafito acoplado a una fuente de poder y auto-muestreador automático modelo PAL3000, ambos controlados por una computadora (Figura 18). Se empleó una lámpara de deuterio con corrección de fondo, tubos de grafito pirolíticamente recubiertos y lámparas de cátodo hueco (Photron Super lamp). Los metales analizados fueron: Cd, Cr, Mn, Pb y V; los cuales se analizaron con

su correspondiente lámpara y a la longitud de onda característica de la línea de emisión de cada metal.

Los límites de detección son: Cd=0.07, Cr=0.38, Mn=0.46, Pb=1.14 y V=3.12, en ppb ($\mu\text{g L}^{-1}$).

Figura 18. Espectrofotómetro de Absorción Atómica (horno de grafito) GBC, modelo Avanta Σ .



En la tabla 22 se muestra la longitud de onda para las lámparas y las temperaturas de calcinación y atomización de cada metal analizando.

Tabla 22. Temperaturas de calcinación y atomización del espectrofotómetro de Absorción Atómica (horno de grafito) GBC, modelo Avanta Σ , así como las longitudes de onda utilizadas para los análisis de metales pesados.

Metal	Longitud de onda (nm)	Temperatura de calcinación ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura de atomización ($^{\circ}\text{C}$)
Cadmio	228.8	300	1800
Cromo	357.9	1100	2500
Manganeso	279.5	700	2400
Plomo	217.0	400	2000
Vanadio	318.3	1200	2700

El equipo analítico empleado para determinar Ca, K, Mg y Na fue el Espectrofotómetro de Absorción Atómica (flama) marca GBC, modelo 932 AA (Figura 19), por lo que se utilizaron las lámparas de cátodo hueco para cada elemento. Los límites de detección son: Ca=0.01, K=0.006, Mg=0.003 y Na=0.002, en ppm (mg L^{-1}).

Figura 19. Espectrofotómetro de Absorción Atómica (flama) GBC, modelo 932 AA.



Para la determinación de Ca, K, Mg y Na, se tomaron 10 mL de muestra por duplicado, se adicionó 1 mL de cloruro de cesio (para evitar interferencias de ionización) a las muestras en las que se analizaron Na y K y un 1 mL de óxido de lantano (para evitar interferencias de ionización) para las muestras en las que se analizó Ca y Mg.

En la tabla 23 se muestra la longitud de onda para las lámparas de cada metal analizando.

Tabla 23. Longitud de onda de las lámparas utilizadas en este estudio.

Metal	Longitud de onda (nm)
Calcio	422.7
Potasio	766.5
Magnesio	285.2
Sodio	589.0

6.6.1. Aseguramiento de Calidad

Para al análisis de muestras de cada muestreo se realizó una la curva de calibración por el método de estándar externo correspondiente al elemento analizado, la cual estuvo conformada por el blanco y de 4 a 5 estándares en diferentes intervalos de concentración, partiendo de una disolución de 100 µg/L proveniente de la dilución de la

disolución estándar monoelemental de la marca High Purity Standards de 1000 µg/L; las curvas de calibración se prepararon cada día de análisis

Con el propósito de llevar un control de calidad después de 10 muestras analizadas se realizó el proceso de verificación de la calibración (automática o manual según el equipo utilizado), lo cual consistió en analizar el blanco y uno de los estándares intermedios de la curva de calibración para conocer si no disminuyó la linealidad de la curva de calibración.

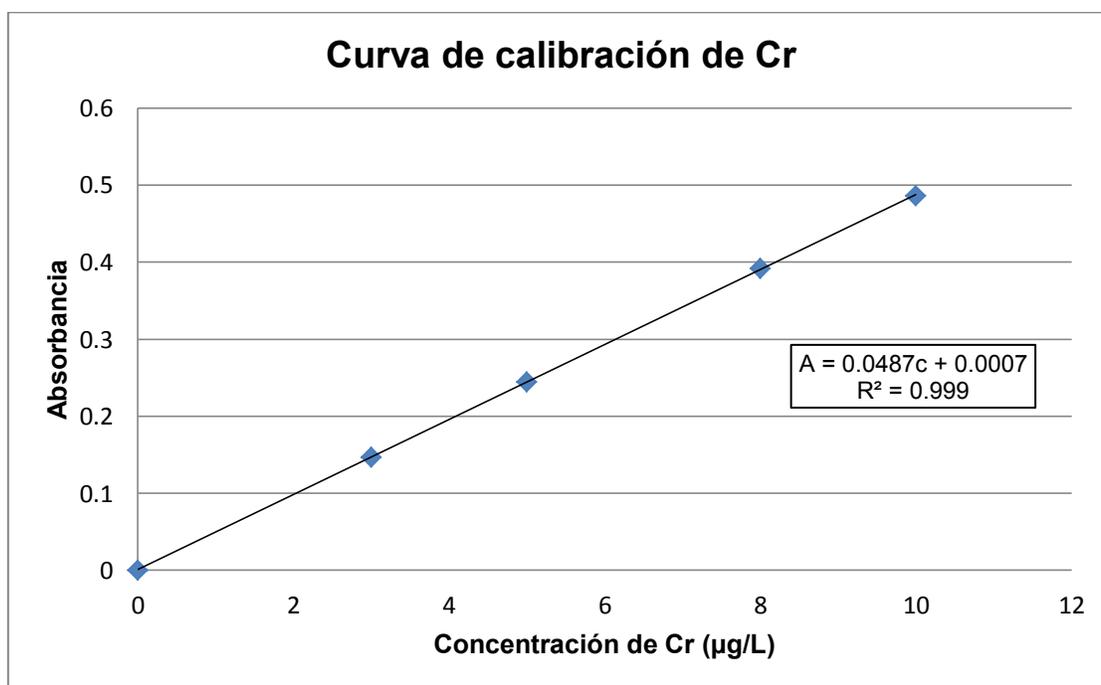
Las disoluciones estándar utilizadas para la realización de las curvas de calibración de enlistan a continuación:

- a. Disolución estándar de Cd concentración 1000 ± 3 µg/mL marca High-Purity Standards, con 2 % HNO₃.
- b. Disolución estándar de Cr concentración 1000 ± 3 µg/mL marca High-Purity Standards, con 2 % HNO₃.
- c. Disolución estándar de Mn concentración 1000 ± 3 µg/mL marca High-Purity Standards, con 2 % HNO₃.
- d. Disolución estándar de Pb concentración $1000 + 3$ µg/mL marca High-Purity Standards, con 2 % HNO₃.
- e. Disolución estándar de V concentración $1000 + 3$ µg/mL marca High-Purity Standards, con 2 % HNO₃.
- f. Disolución estándar de K concentración 1000 µg/mL marca High-Purity Standards, con agua.
- g. Disolución estándar de Na concentración 1000 µg/mL marca High-Purity Standards, con agua.
- h. Disolución estándar de Ca concentración 1000 µg/mL marca High-Purity Standards, con agua.
- i. Disolución estándar de Mg concentración 1000 µg/mL marca High-Purity Standards, con agua.

En la figura 20 se muestra un ejemplo de curva de calibración obtenida para cuantificación de Cr en la muestra LC (22/08/2012).

Etiqueta	Concentración (µg/L)	Absorbancia
Estándar 1	3	0.1471
Estándar 2	5	0.2443
Estándar 3	8	0.3916
Estándar 4	10	0.486

Figura 20. Curva de calibración de Cr obtenida durante el análisis.



$$\text{Concentración} = \frac{\text{Absorbancia} - 0.0007}{0.0487}$$

Muestra: La Cruz (22/08/2012)

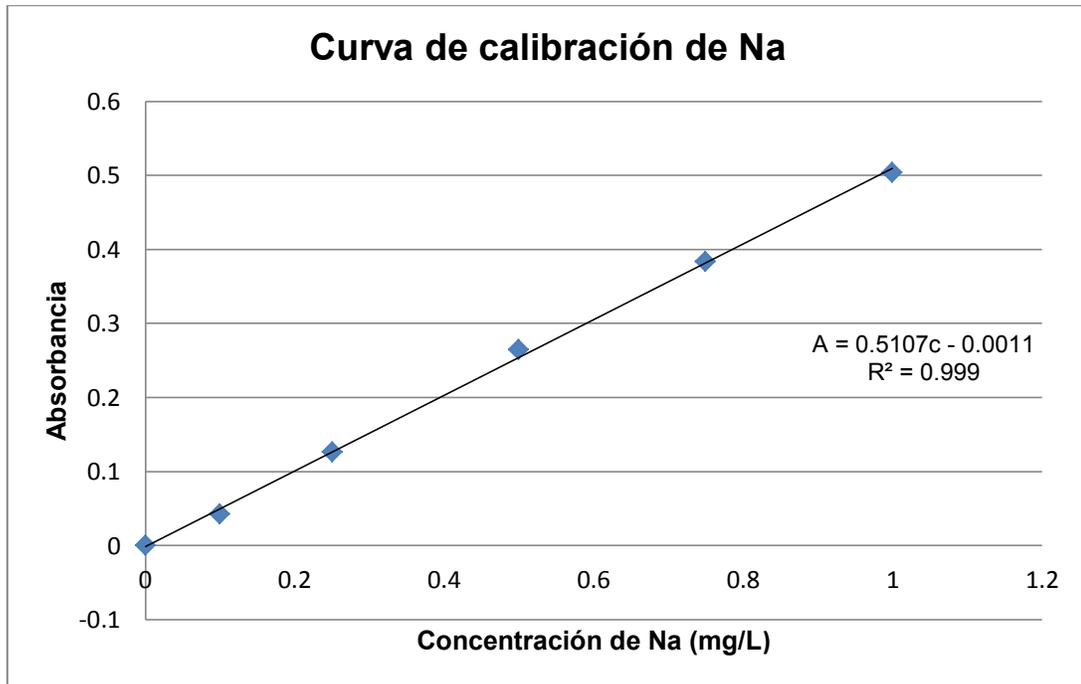
Abs: 0.1984

$$\text{Concentración} = \frac{0.1984 - 0.0007}{0.0487} = 4.06 \mu\text{g/L}$$

Ejemplo de curva de calibración obtenida para cuantificación de Na (Figura 21).

Etiqueta	Concentración (mg/L)	Absorbancia
Estándar 1	0.100	0.0428
Estándar 2	0.250	0.1263
Estándar 3	0.500	0.2646
Estándar 4	0.750	0.3836
Estándar 5	1.000	0.5040

Figura 21. Curva de calibración de Na obtenida durante el análisis.



$$\text{Concentración} = \frac{\text{Absorbancia} + 0.0011}{0.5107}$$

CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Resultados

Durante cada muestreo se tomaron *in situ* los parámetros fisicoquímicos: temperatura, conductividad y pH (tabla 24), los valores en negritas presentaron discrepancia con lo reportado en la NOM-127.

Tabla 24. Parámetros fisicoquímicos obtenidos en cada sitio de muestreo. Los valores que rebasaron los límites establecidos en la NOM 127-SSA1-1994 se encuentran en negritas.

Parámetros fisicoquímicos				
Clave	Fecha de muestreo	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	pH
HBN	26/10/2011	15.7	229.0	5.71
	22/08/2012	16.3	35.4	6.90
HB	26/10/2011	15.4	211.0	6.28
	08/02/2012	16.6	137.0	6.40
	22/08/2012	16.3	6.7	7.00
HA	26/10/2011	15.3	222.0	6.52
	22/08/2012	15.4	32.7	7.40
EA	08/02/2012	22.4	139.8	6.80
	22/08/2012	20.9	57.6	7.00
P1	08/02/2012	22.4	69.0	7.16
	22/08/2012	23.0	1.0	6.50
P2	08/02/2012	28.9	74.1	6.90
	22/08/2012	24.2	11.8	6.80
H	26/10/2011	24.2	2.9	7.85
	08/02/2012	21.0	2.3	7.00
	22/08/2012	21.3	11.8	7.00
TB	26/10/2011	25.2	2.4	9.16
	08/02/2012	19.5	17.1	9.46
	22/08/2012	20.8	57.8	8.10
TA	26/10/2011	25.1	2.6	8.06
	08/02/2012	20.0	2.1	7.32
	22/08/2012	21.3	28.3	7.60
LC	08/02/2012	19.3	2.5	6.47
	22/08/2012	21.9	11.8	6.20
LP	08/02/2012	20.7	96.0	6.25
	22/08/2012	22.6	23.2	7.50

En la tabla 25 se presentan los valores obtenidos de Cd, Cr, Mn, Pb y V en microgramos por Litro ($\mu\text{g L}^{-1}$), analizados por Espectrofotometría por Absorción Atómica (horno de grafito) de acuerdo a la NMX-AA-051.

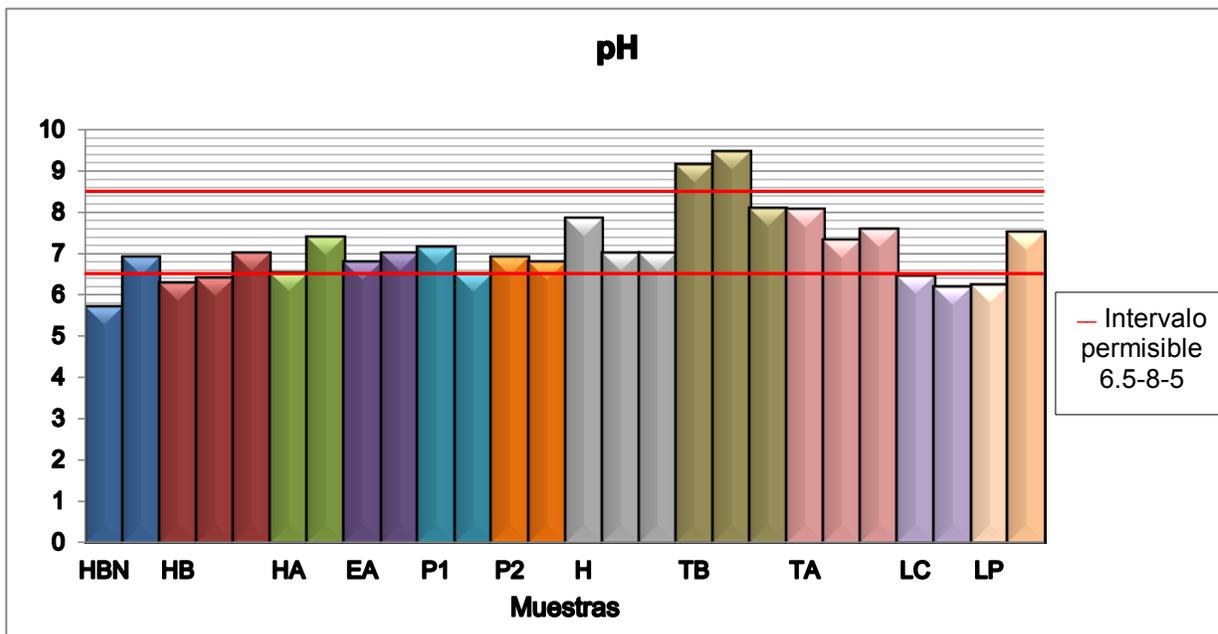
Tabla 25. Concentraciones de Cd, Cr, Mn, Pb y V en agua superficial en $\mu\text{g L}^{-1}$.

Clave	Fecha de muestreo	Metal				
		Cd	Cr	Mn	Pb	V
HBN	26/10/2011	0.33	4.335	7.345	4.13	17.915
	22/08/2012	0.115	0.66	22.84	2.18	8.709
HB	26/10/2011	0.038	3.952	6.342	0.385*	2.642*
	08/02/2012	0.013	0.35*	4.974	0.156*	12.1
	22/08/2012	0.1	1.8	20.31	0.422*	10.001
HA	26/10/2011	0.078	0.473	10.335	0.553*	4.25
	22/08/2012	0.133	1.29	73.64	1.5	2.173*
EA	08/02/2012	0.055*	0.351*	4.335	0.13*	1.289*
	22/08/2012	0.07	2.09	37.09	0.197*	7.12
P1	08/02/2012	0.04*	0.44	18.924	0.101*	3.29
	22/08/2012	0.035*	2.87	27.355	0.1*	8.108
P2	08/02/2012	0.056*	0.193*	2.592	0.201*	2.155*
	22/08/2012	0.102	0.91	22.57	0.317*	7.21
H	26/10/2011	0.03*	4.914	21.78	0.212*	40.879
	08/02/2012	0.07	0.419	1.044	0.137*	36.303
	22/08/2012	0.209	1.86	8.02	0.15*	32.617
TB	26/10/2011	0.032*	1.744	11.046	0.171*	28.45
	08/02/2012	0.064*	0.441	2.172	0.108*	21.985
	22/08/2012	0.05*	3.85	31.45	0.134*	17.845
TA	26/10/2011	0.033*	2.003	30.054	0.267*	23.55
	08/02/2012	0.062*	0.28*	8.427	0.137*	28.276
	22/08/2012	0.233	1.18	52.37	0.365*	21.426
LC	08/02/2012	0.051*	0.55	13.752	0.11*	22.269
	22/08/2012	0.157	4.06	16.4	0.349*	21.614
LP	08/02/2012	0.047*	0.402	1.797	0.135*	4.875
	22/08/2012	0.344	3.61	46.01	0.42*	5.523

*: Valores debajo del límite de detección (pág. 67), estos valores se reportaron para realizar análisis estadístico.

En la Figura 22 se presenta la gráfica de barras para pH.

Figura 22. Comparación de pH de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994. Intervalo permisible 6.5-8.5



En las figuras 23 a 27, se muestran las gráficas de barras para Cd, Cr, Mn, Pb y V, y los límites permisibles por la NOM-127.

Figura 23. Comparación de la concentración de Cd de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

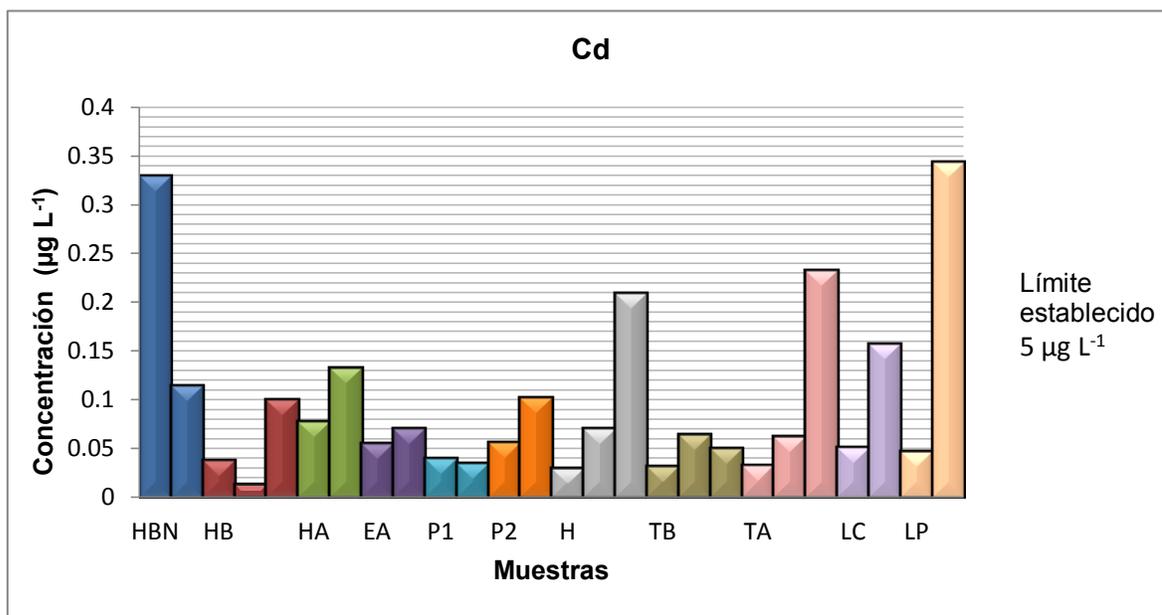


Figura 24. Comparación de la concentración de Cr de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994

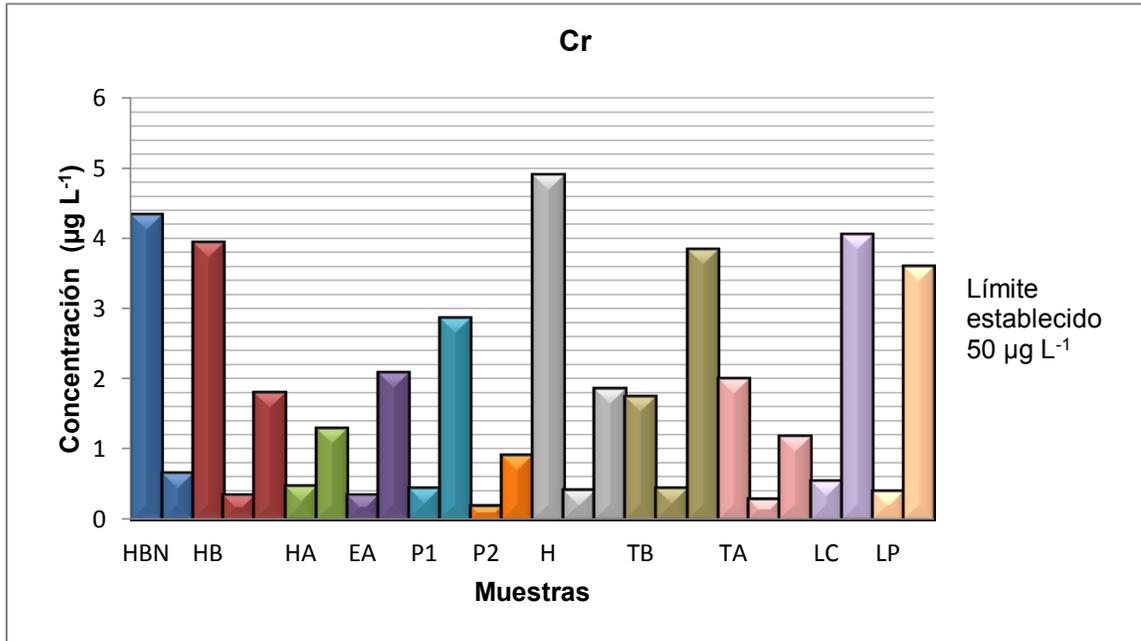


Figura 25. Comparación de la concentración de Mn de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994

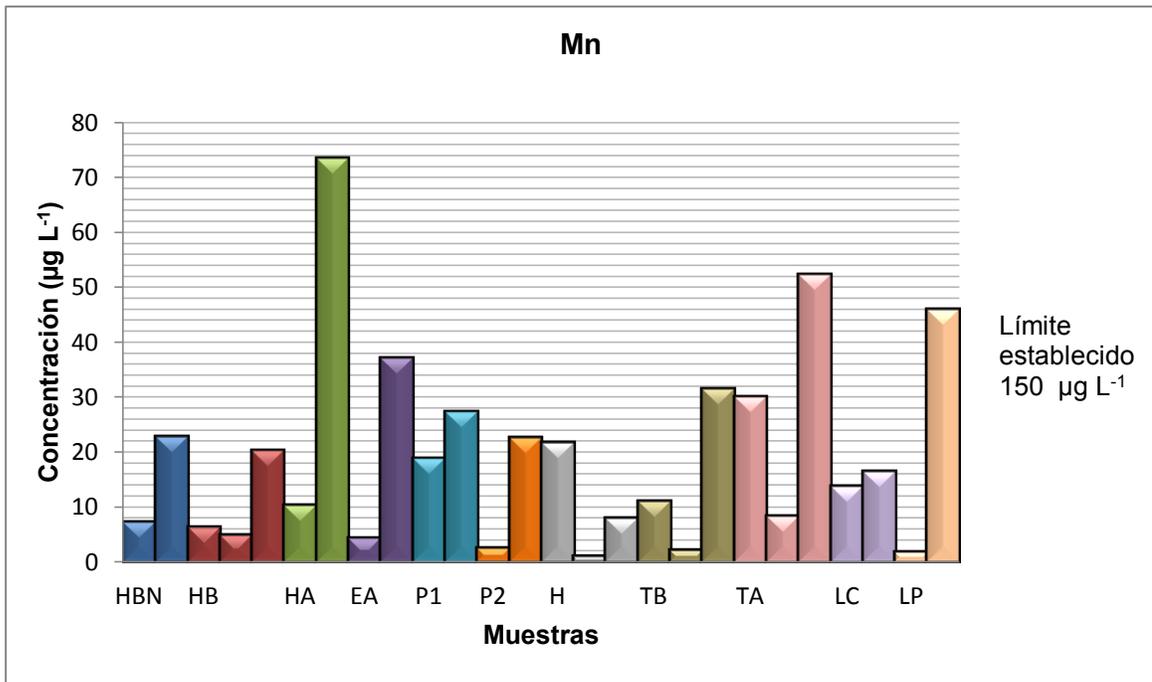


Figura 26. Comparación de la concentración de Pb de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994

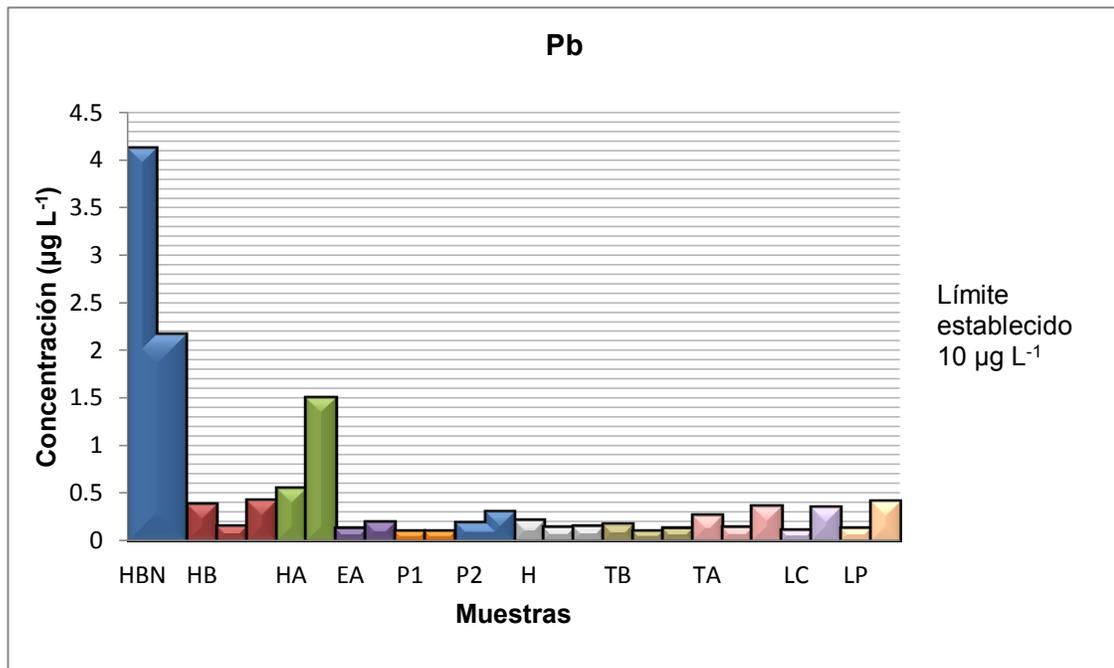
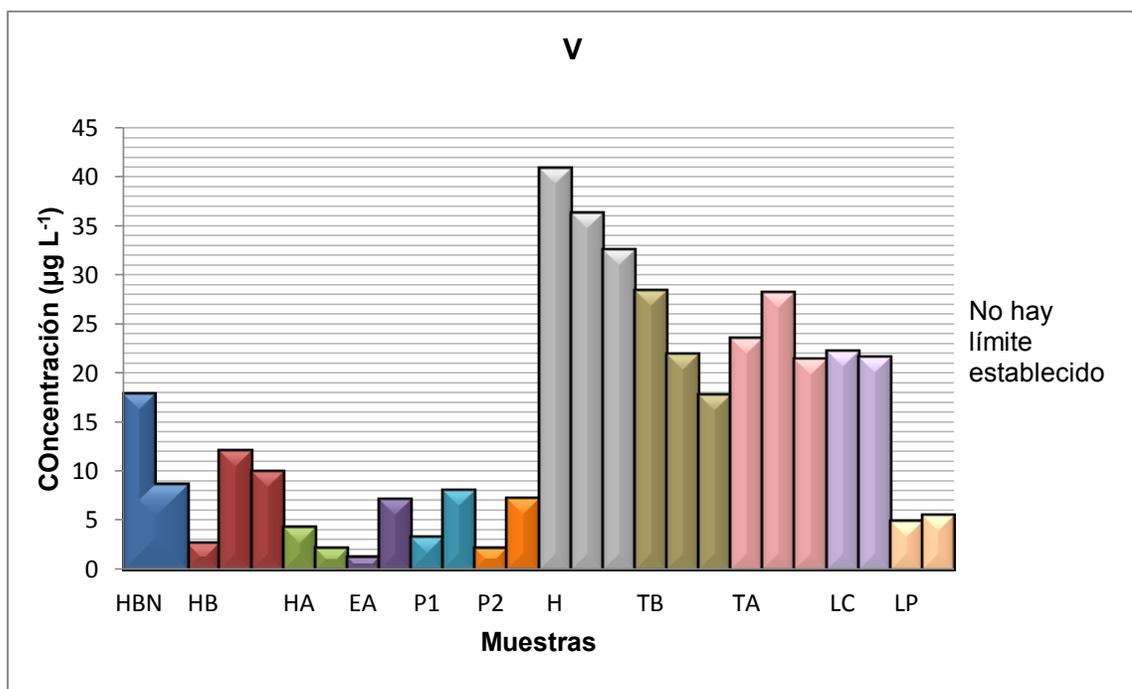


Figura 27. Concentración de V de las 26 muestras



En la tabla 26 se presentan los valores obtenidos de los metales alcalinos y metales alcalinotérreos analizados en miligramos por Litro (mg L^{-1}) por Espectrofotometría por Absorción Atómica (por flama) de acuerdo a la NMX- 051 y se muestra el límite establecido en el NOM-127.

Tabla 26. Concentraciones de K, Na, Ca y Mg y dureza total (CaCO_3) en agua superficial en mg L^{-1} , los valores en negritas rebasaron el límite establecido en la NOM-127.

Clave	Fecha de muestreo	Alcalinos				Dureza total
		K (mg L^{-1})	Na (mg L^{-1})	Ca (mg L^{-1})	Mg (mg L^{-1})	CaCO_3 (mg L^{-1})
HBN	26/10/2011	43.25	12.749	35.98	33.96	229.9
	22/08/2012	3.25	6.2	15	1.7	44.5
HB	26/10/2011	45.49	13.28	30.4	32.92	211.6
	08/02/2012	2.86	6.1	13.35	1.5	39.6
	22/08/2012	2.91	5.9	13.15	1.5	39.1
HA	26/10/2011	33.8	14.011	40.6	30.63	227.7
	22/08/2012	10.97	8.15	10.2	1.3	30.9
EA	08/02/2012	2.05	7.4	11.1	2.15	36.6
	22/08/2012	1.85	6.55	13.9	2.5	45.1
P1	08/02/2012	1.3	11.25	149.4	9.45	412.4
	22/08/2012	9.67	9.3	120.2	10	341.7
P2	08/02/2012	2.13	9.4	129.65	10.85	368.8
	22/08/2012	4.44	8.15	131.55	10.55	372.3
H	26/10/2011	139.58	17.168	94.98	124.95	752.2
	08/02/2012	50.05	18.25	112.45	43.5	460.3
	22/08/2012	58.41	21.83	114.7	90.5	659.6
TB	26/10/2011	87.72	12.183	99.79	105.9	685.8
	08/02/2012	41.95	17.25	107	42	440.5
	22/08/2012	33.45	44.3	74.7	62	442.2
TA	26/10/2011	90.98	127.1	120.91	115.83	779.5
	08/02/2012	46.5	135.75	61.6	41.5	325.0
	22/08/2012	40.15	52.95	95.2	32.25	370.9
LC	08/02/2012	82.08	20.66	121.8	46.75	497.1
	22/08/2012	62.91	21.16	105.9	55.75	494.4
LP	08/02/2012	9.27	2.6	67.5	76.75	485.0
	22/08/2012	6.96	9.4	63.05	27.75	272.0

En la figura 28 se muestra la gráfica de barras para Na, en la Figura 29 se muestra la gráfica de barras de los valores de dureza total, ya que estos tienen límite máximo establecido en la NOM-127.

Figura 28. Comparación de la concentración de Na de las muestras con el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

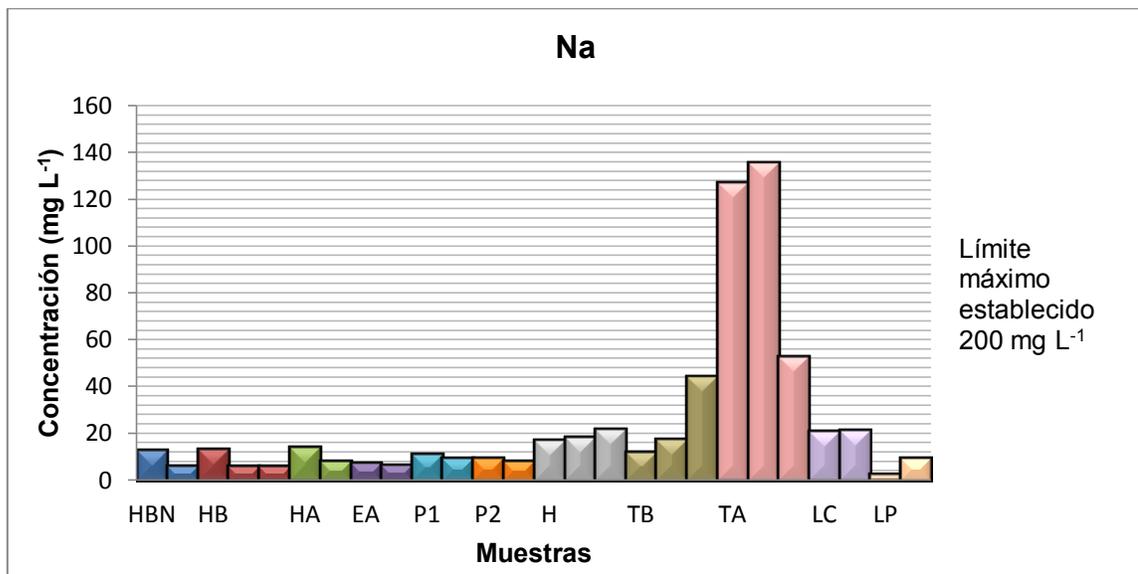
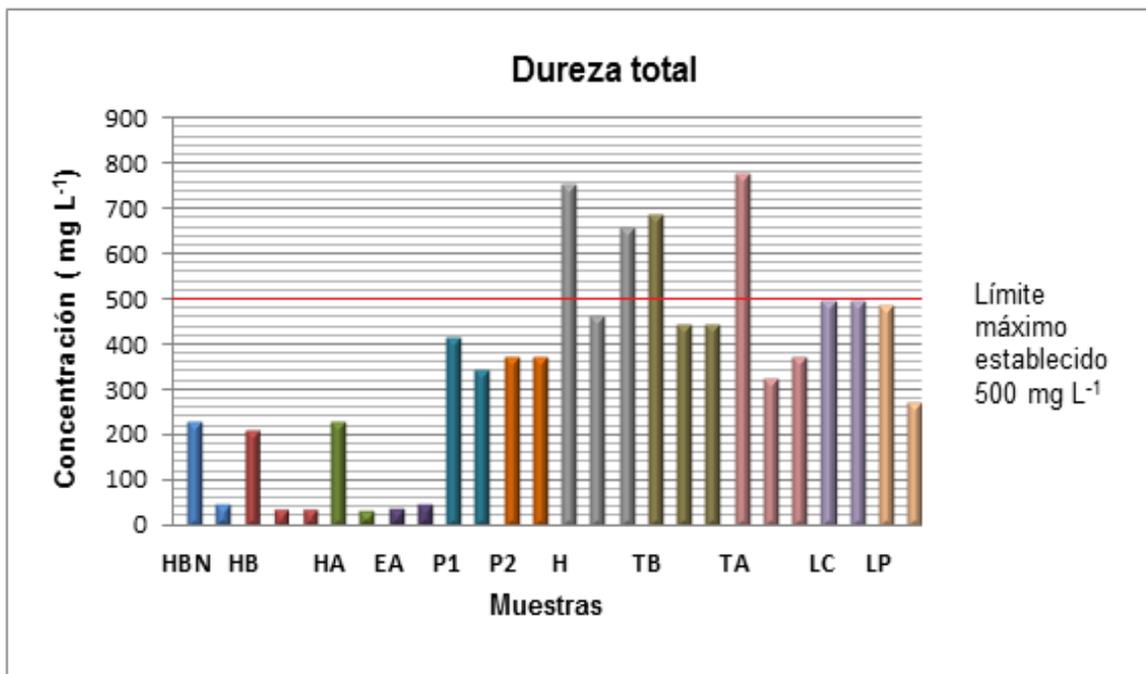


Figura 29. Comparación de la dureza total (CaCO₃) de las muestras con el límite máximo establecido en la NOM-127-SSA1-1994.



7.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS

A los datos obtenidos se aplicó un análisis estadístico de medidas de localización, tendencia central y grado de variabilidad, con la finalidad de ver la ubicación de los datos y su dispersión con respecto a la media. Se realizó un análisis factorial para sintetizar la interrelación entre un conjunto de variables y los efectos. Se aplicaron pruebas de correlación (Spearman), para conocer la asociación entre los parámetros fisicoquímicos, la concentración de metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos; también se puede determinar si existe una fuente común entre metales alcalinos, metales alcalinotérreos y metales pesados. Esto se hizo para las muestras de los poblados de El Horconcito y Tlamacazapa.

Se utilizaron los programas estadísticos siguientes: Statistica versión 2007 para realizar las pruebas de correlación de Spearman y JMP 7.0 versión 2007 para análisis factorial.

Para los datos de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos, se determinó: concentración promedio (CP), mínimo (Mín), máximo (Máx) y desviación estándar de la concentración promedio (DECP), para cada uno de los poblados.

Tabla 27. Concentraciones promedio (CP), mínimo (Mín) y máximo (Máx) desviación estándar de la concentración promedio (DECP), de los resultados de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos en agua colectada del poblado El Horconcito.

	N	CP	Mín	Máx	DECP
Temperatura (°C)	7	15.857	15.300	16.600	0.532
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	7	124.829	6.700	229.000	98.579
pH	7	6.601	5.710	7.400	0.552
Cd ($\mu\text{g L}^{-1}$)	7	0.115	0.013	0.330	0.104
Cr ($\mu\text{g L}^{-1}$)	7	1.837	0.350	4.335	1.657
Mn ($\mu\text{g L}^{-1}$)	7	20.827	4.974	73.640	24.312
Pb ($\mu\text{g L}^{-1}$)	7	1.332	0.156	4.130	1.431
V ($\mu\text{g L}^{-1}$)	7	8.256	2.173	17.915	5.714
K (mg L^{-1})	7	20.361	2.860	45.490	19.697
Na (mg L^{-1})	7	9.484	5.900	14.011	3.706
Ca (mg L^{-1})	7	22.669	10.200	40.600	12.584
Mg (mg L^{-1})	7	14.787	1.300	33.960	16.602

Tabla 28. Concentraciones promedio (CP), mínimo (Mín) y máximo (Máx) desviación estándar de la concentración promedio (DECP), de los resultados de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos en agua colectada del poblado El Aguacatito

	N	CP	Mín	Máx	DECP
Cd ($\mu\text{g L}^{-1}$)	2	0.063	0.055	0.070	0.011
Cr ($\mu\text{g L}^{-1}$)	2	1.221	0.351	2.090	1.230
Mn ($\mu\text{g L}^{-1}$)	2	20.713	4.335	37.090	23.161
Pb ($\mu\text{g L}^{-1}$)	2	0.164	0.130	0.197	0.047
V ($\mu\text{g L}^{-1}$)	2	4.205	1.289	7.120	4.123
K (mg L^{-1})	2	1.950	1.850	2.050	0.141
Na (mg L^{-1})	2	6.975	6.550	7.400	0.601
Ca (mg L^{-1})	2	12.500	11.100	13.900	1.980
Mg (mg L^{-1})	2	2.325	2.150	2.500	0.247
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	2	21.650	20.900	22.400	1.061
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	2	98.700	57.600	139.800	58.124
pH	2	6.900	6.800	7.000	0.141

Tabla 29. Concentraciones promedio (CP), mínimo (Mín) y máximo (Máx) desviación estándar de la concentración promedio (DECP), de los resultados de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos en agua colectada del poblado Huahuaxtla

Metal/Ion	N	CP	Mín	Máx	DECP
Cd ($\mu\text{g L}^{-1}$)	4	0.058	0.035	0.102	0.031
Cr ($\mu\text{g L}^{-1}$)	4	1.103	0.193	2.870	1.215
Mn ($\mu\text{g L}^{-1}$)	4	17.860	2.592	27.355	10.748
Pb ($\mu\text{g L}^{-1}$)	4	0.180	0.100	0.317	0.103
V ($\mu\text{g L}^{-1}$)	4	5.191	2.155	8.108	2.911
K (mg L^{-1})	4	4.385	1.300	9.670	3.765
Na (mg L^{-1})	4	9.525	8.150	11.250	1.282
Ca (mg L^{-1})	4	132.700	120.200	149.400	12.190
Mg (mg L^{-1})	4	10.213	9.450	10.850	0.618
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	4	24.625	22.400	28.900	2.947
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	4	38.975	1.000	74.100	37.929
pH	4	6.840	6.500	7.160	0.273

Tabla 30. Concentraciones promedio (CP), mínimo (Mín) y máximo (Máx) desviación estándar de la concentración promedio (DECP), de los resultados de parámetros fisicoquímicos, metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos en agua colectada del poblado Tlamacazapa.

	N	CP	Mín	Máx	DECP
Cd ($\mu\text{g L}^{-1}$)	13	0.106	0.030	0.344	0.099
Cr ($\mu\text{g L}^{-1}$)	13	1.947	0.280	4.914	1.633
Mn ($\mu\text{g L}^{-1}$)	13	18.794	1.044	52.370	16.731
Pb ($\mu\text{g L}^{-1}$)	13	0.207	0.108	0.420	0.107
V ($\mu\text{g L}^{-1}$)	13	23.509	4.875	40.879	10.449
K (mg L^{-1})	13	57.695	6.960	139.600	36.040
Na (mg L^{-1})	13	38.508	2.600	135.750	43.389
Ca (mg L^{-1})	13	95.352	61.600	121.800	21.739
Mg (mg L^{-1})	13	66.572	27.750	124.950	32.962
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	13	21.762	19.300	25.200	1.978
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	13	20.062	2.100	96.000	27.796
pH	13	7.536	6.200	9.460	1.010

pH: es uno de los parámetros físico-químicos que mayor influencia tiene en la química del agua. El agua con valores de pH inferiores a 7 se considera ácida y cuando tiene un valor mayor a 7 se denomina básica. Los valores de pH registrados en las muestras analizadas presentan variaciones significativas oscilando entre 5.7 y 9.4 (Tabla 24). El pH fue el único que presentó valores fuera de lo establecido en la norma (6.5-8.5), en la figura 22 se observan las muestras que no están dentro del límite. En el primer muestreo (26/10/2011) las muestras ácidas fueron: HBN pH= 5.7, HB pH= 6.28, en el segundo (08/02/2012): HB pH 6.4, LC pH 6.47, LP pH 6.25, y en el tercero (22/08/2012): LC pH= 6.2 Las muestras básicas en el primer muestreo (26/10/2011) fueron: TB pH= 9.1 y en el segundo (08/02/2012): TB pH 9.4.

En comparación con trabajos previos en diferentes meses de muestreo en El Horconcito (Tabla 1 y 3), se encontró cierta similitud en los resultados ya que el pH en general fue neutro. Para el poblado de Tlamacazapa tampoco se encontró mucha variación entre este trabajo y estudios previos (Tabla 24).

Cd: el límite establecido en la NOM 127 es de $5 \mu\text{g L}^{-1}$, en la Figura 23 se observa que ninguna de las muestras lo rebasó.

En estudios previos en El Horconcito (Tabla 1 y 3) los resultados obtenidos se encontraron debajo del límite de detección. En el poblado de Tlamacazapa hubo Cd en dos muestras, una del mes de octubre y la otra en julio. En este estudio el Cd fue el metal que estuvo en menor cantidad en comparación con los otros 4 metales, en los 4 poblados.

Cr: el límite establecido en la NOM 127 es de $50 \mu\text{g L}^{-1}$, en la Figura 24 se observa que ninguna de las muestras lo rebasó.

Al compararlo con estudios previos en Tlamacazapa (Tabla 6) se observa que no se pudo determinar la concentración de Cr, debido a que se encontró por debajo del límite de detección.

Mn: el límite establecido en la NOM 127 es de $150 \mu\text{g L}^{-1}$, en la gráfica 25 se observa que ninguna de las muestras lo rebasó.

En estudios previos en el Horconcito (Tablas 1 y 3), se encontró Mn en dos muestras del mes de abril y una en diciembre. En este estudio, en todas las muestras hubo presencia de este metal. En Tlamacazapa no se pudo cuantificar Mn en las muestras ya que los valores obtenidos estuvieron debajo del límite de detección (Tabla 6). En este estudio los valores obtenidos variaron para todos los poblados; fue el segundo metal con mayor concentración.

Pb: el límite establecido en la NOM 127 es de $10 \mu\text{g/L}$, en la Gráfica 26 se muestra que ninguna de las muestras rebasa el límite establecido.

Sin embargo, El Horconcito fue el poblado que presentó mayor cantidad de este metal, lo cual coincide con estudios previos (Tabla 1); en el mes de diciembre (Tabla 3) solo en una muestra se encontró Pb. Debido a que las muestras se encontraron por debajo del límite de detección en Tlamacazapa no hubo presencia significativa de este elemento.

V: no hay límite establecido en la NOM 127. Sin embargo, Tlamacazapa fue el poblado que presentó mayor cantidad de este metal.

Comparado con estudios previos (Tabla 6), se observa que solo se pudo cuantificar este metal en dos muestras de diferentes muestreos en Tlamacazapa.

Na: el límite máximo establecido en la NOM 127 es de 200 mg L^{-1} , en la Figura 28 se observa que ninguna de las muestras rebaso el límite establecido. El poblado que presentó mayor concentración de este metal fue Tlamacazapa al compararlo con estudios previos se encuentra similitud, ya que el poblado que tuvo menor cantidad de Na fue El Horconcito y el que tuvo mayor cantidad fue Tlamacazapa (Tabla 7).

Ca y Mg: de acuerdo a la NOM-127 que establece que el límite máximo permisible es de 500 mg L^{-1} para dureza total, se encontraron 4 muestras en el Poblado de Tlamacazapa que pasaron este límite (Tabla 26).

Al compararlo con estudios previos (Tabla 7) se encontró similitud con este estudio ya que el Ca tuvo mayor concentración que el Mg, y estos dos metales se encontraron en mayor cantidad en el poblado de Tlamacazapa en comparación con el poblado de El Horconcito (Tablas 2, 4 y 30).

Análisis factorial

El análisis factorial es una técnica de reducción de datos que sirve para encontrar grupos homogéneos de variables a partir de un conjunto numeroso de estas. Sintetiza la interrelación observada entre un conjunto de variables en forma concisa.

Para realizar este análisis se utilizó el programa JMP 7.0 versión 2007 creado por SAS; es un software utilizado para la visualización interactiva y el análisis estadístico que permite explorar, analizar, investigar patrones ocultos y mostrar gráficamente datos y resultados.

Al realizar el análisis factorial se consideraron 3 efectos: tiempo (3 niveles: 3 fechas de muestreo), sitio (4 niveles: 4 sitios de muestreo) y sitio/tiempo. En la Tabla 31 se resumen este análisis en el cual los que tienen el símbolo * presentaron un efecto significativo (p) el cual muestra la correlación entre los parámetros fisicoquímicos, las

concentraciones de metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos determinados en términos de los factores.

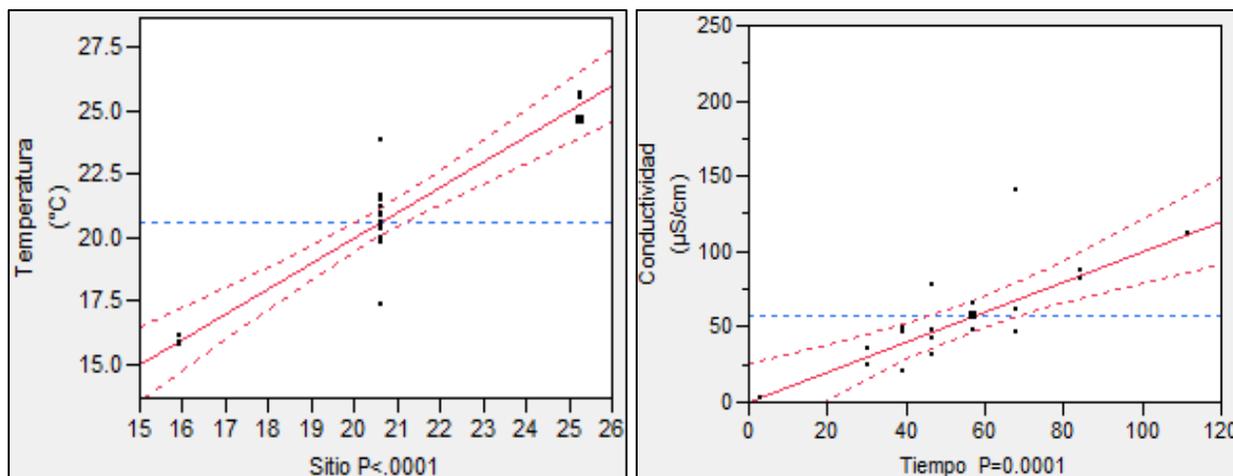
Tabla 31. Análisis factorial, relación entre los efectos (tiempo, sitio y tiempo/sitio) con los parámetros físicoquímicos, concentración de metales pesados, metales alcalinos y metales alcalinotérreos.

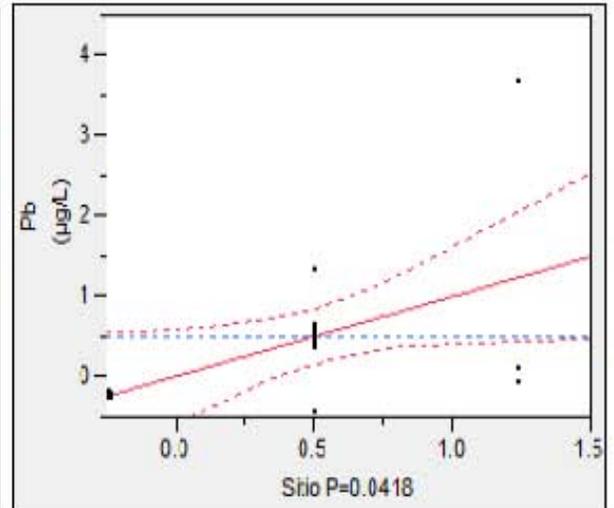
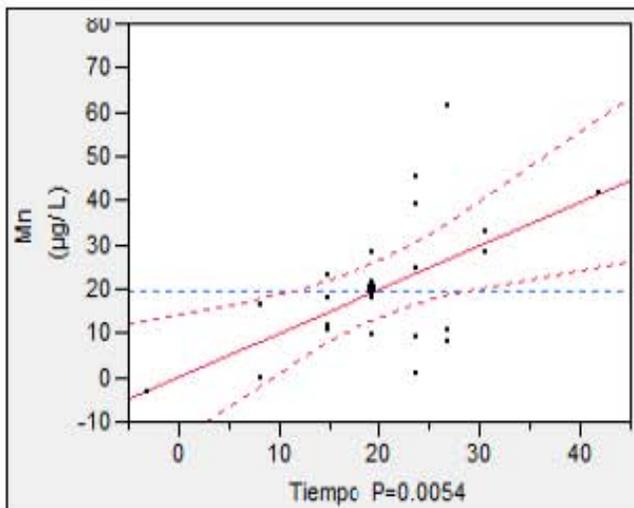
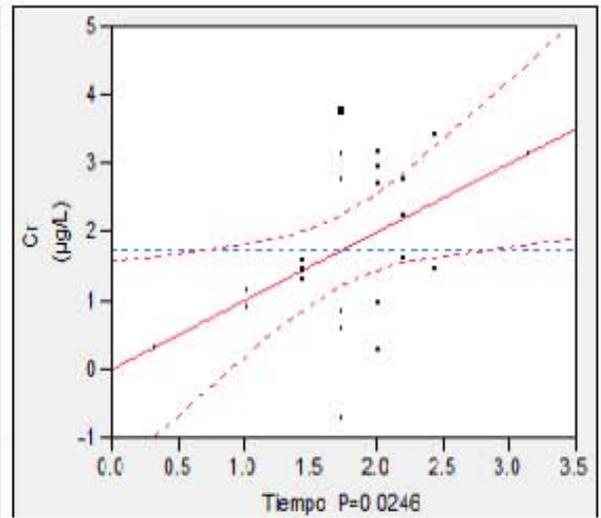
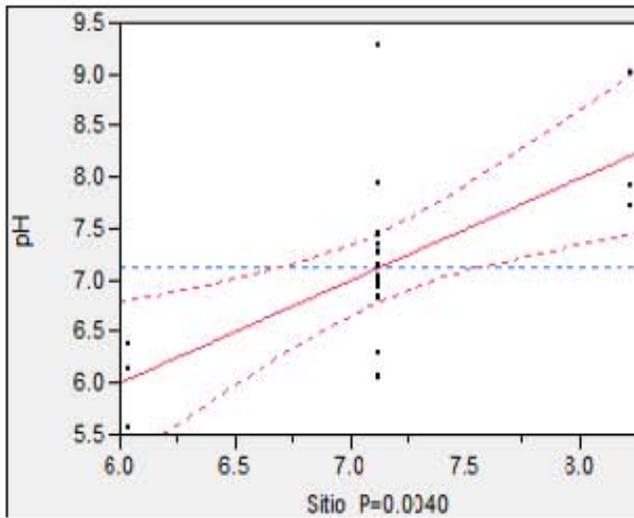
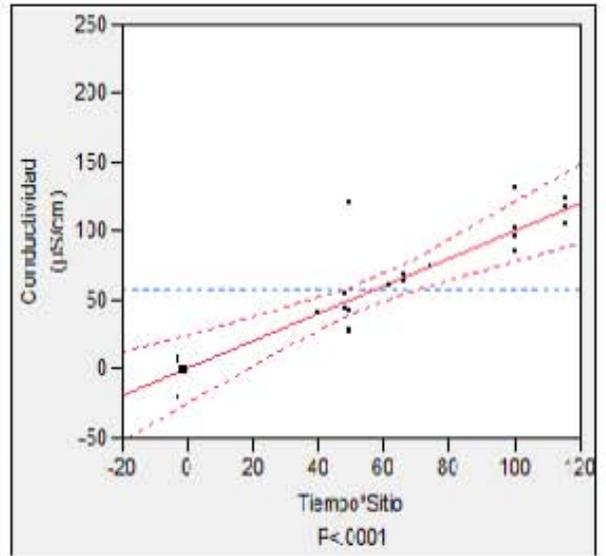
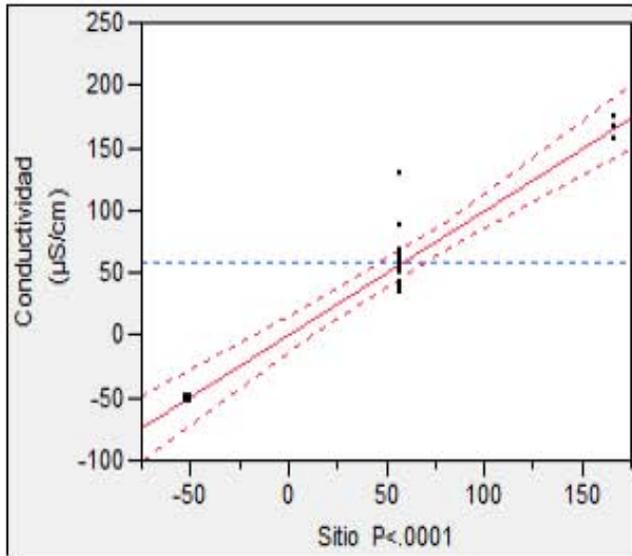
Efecto	Temperatura	Conductividad	pH	Cd	Cr	Mn	Pb	V	K	Na	Ca	Mg
Tiempo		*			*	*						
Sitio	*	*	*				*	*	*		*	*
Tiempo/ Sitio	*	*										

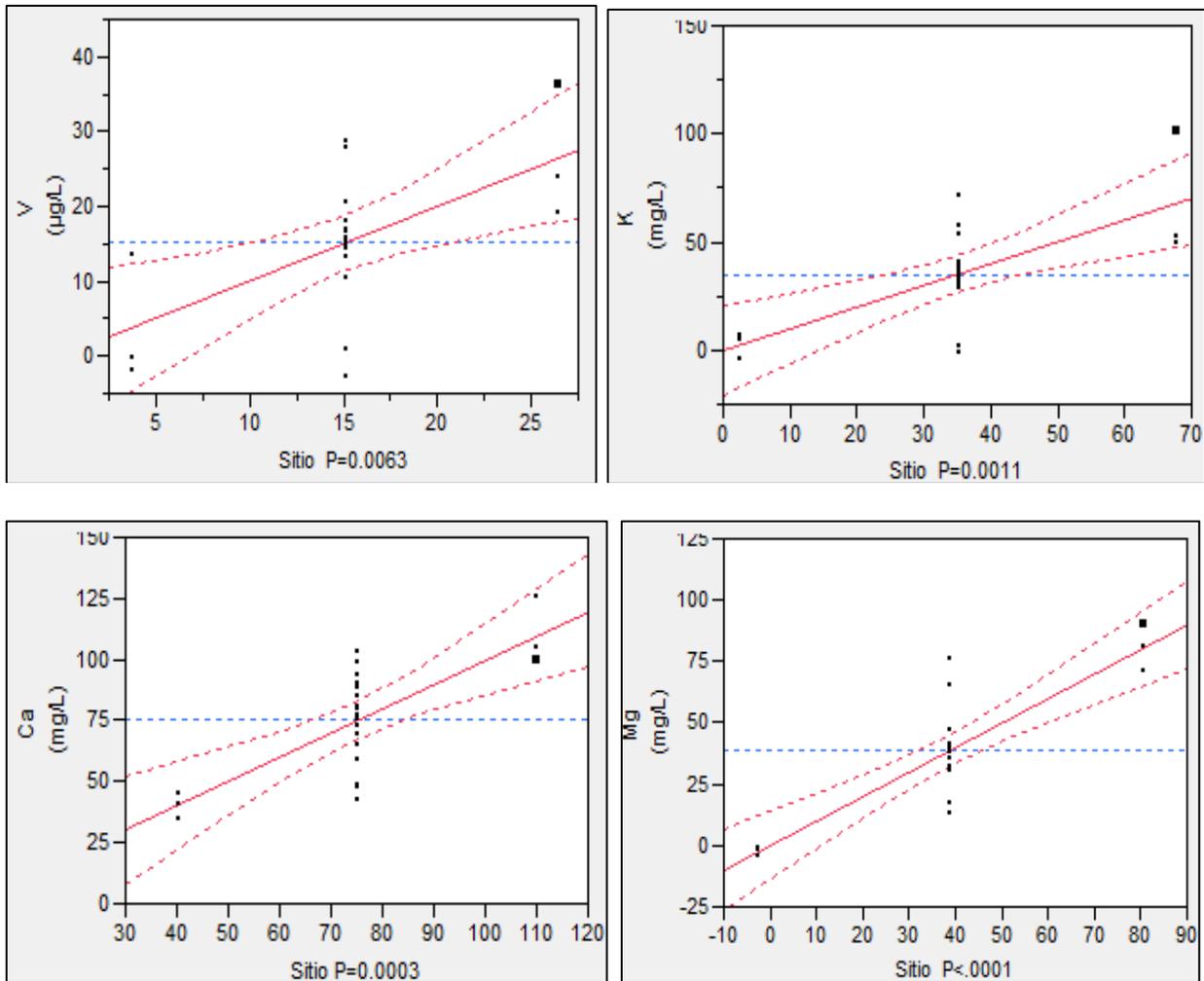
Se obtuvieron gráficas para mostrar de una manera más descriptiva el modelo y el efecto cuando es significativo. Se consideró una dependencia entre los efectos y las variables cuando se presentó un valor de $p < [0.05]$.

En la Figura 30 se muestran las gráficas que presentaron este valor.

Figura 30. Gráficas de dependencia efecto-variable.







De acuerdo a la Tabla 31 se observó que el efecto que tuvo mayor influencia sobre la variación de los parámetros fisicoquímicos, concentración de metales, metales alcalinos y metales alcalinotérreos fue el sitio. Esto se encuentra asociado a las actividades humanas, al estilo de vida que se lleva en cada poblado, la fuente de almacenamiento donde se tomó la muestra y la interacción agua-roca.

A continuación se discuten las variaciones encontradas en dichos parámetros de acuerdo a los efectos y se plantean los posibles factores involucrados.

Parámetros fisicoquímicos *in situ*.

Se determinaron los parámetros fisicoquímicos ya que con estos se pueden conocer las condiciones en las cuales se encontrarán los metales. La temperatura puede favorecer ciertas reacciones fisicoquímicas, con el pH se puede conocer si el metal estará soluble

o precipitado, los valores de conductividad se relacionan con la concentración total de iones presentes en la muestra.

La temperatura presentó una relación entre los factores tiempo y el tiempo/sitio, debido a que el agua es superficial se encuentra a temperatura ambiente y por lo tanto depende de la hora a la que se realizó el muestreo; al tomarse las muestras en diferentes periodos la temperatura no fue la misma, siendo la más baja en el mes de agosto y octubre y la más alta en el mes de febrero (Tabla 24).

La influencia del factor tiempo/sitio se puede deber a factores antropogénicos que intervienen en el incremento de temperatura ya que están relacionados con la presencia de sólidos en el agua y estos absorben la radiación solar (muestras de norias) por lo tanto suelen tener una temperatura diferente a la de los ríos, cambiando directamente la temperatura del agua mediante contaminación térmica. Para las muestras de ríos y manantiales al tener una corriente se favorecen las variaciones espaciales de temperatura, la corriente suele incrementarse durante las lluvias por lo que hubo más fluctuaciones durante dicha temporada (Heuer y Laberti, 2007).

La conductividad es un valor que representa la facilidad con la cual las cargas eléctricas pueden ser transportadas a través de un conductor (Dickson, 1980). Se relaciona con la concentración iónica total y se reporta en unidades de mS cm^{-1} .

La conductividad se encontró influenciada por los 3 efectos, ya que está dada por la altura, la cantidad de sólidos totales disueltos y estos a su vez por la cantidad de sales y residuos iónicos.

El efecto sitio tiene que ver con diferentes factores involucrados. El Horconcito es el poblado que presentó mayor conductividad (Tabla 24). Debido a la actividad agrícola (plantación de aguacate) lo cual favorece la erosión del suelo y por lo tanto el arrastre de sólidos hacia el agua, las muestras de Huahuaxtla provienen de un río y el agua se almacena de un pozo, por lo que el agua tiene contacto con diferentes tipos de minerales, además de interactuar con los materiales de la composición del pozo. En El Aguacatito al ser muestra de río está en contacto directo con el suelo y mediante la corriente hay arrastre de sólidos. El agua de Tlamacazapa tiene diferentes orígenes pero todos tienen en común la forma de almacenarse (norias). Los valores más

elevados de conductividad indican la presencia de altos contenidos de sólidos conductores.

La conductividad cambia de acuerdo a la variación estacional, en Tlamacazapa en la época de lluvias la conductividad aumentó, lo cual indica que en estas formas de almacenamiento de agua, el proceso de aporte de elementos por las lluvias y el lavado de los suelos es más eficiente por el proceso de dilución por el aumento de caudal. En el caso de los poblados El Horconcito, El Aguacatito y Huahuaxtla la conductividad fue mayor en época de estiaje, debido a que en el agua hay evaporación y por lo tanto la concentración de sales aumenta.

El pH presentó efecto significativo en el factor sitio posiblemente por la intensidad de procesos biológicos como la fotosíntesis, respiración y actividades de descomposición de materia orgánica en los cuerpos de agua, fenómenos físicos como la aeración natural o inducida, a la capacidad amortiguadora del sistema de alcalinidad carbonato-bicarbonato, composición de los suelos adyacentes, depósitos superficiales, fuentes de contaminación.

Metales pesados

En general la presencia de los metales pesados puede deberse al lixiviado en el cual los minerales se desplazan con el agua y llegan a las fuentes de almacenamiento. El transporte fluvial puede intervenir al llevar partículas de minerales desde su origen a través de arroyos. En época de lluvia el material es transportado por escurrimientos superficiales hasta que se introduce al subsuelo a través de fracturas geológicas.

Dentro de los metales pesados, el Cd no presentó efectos significativos en ningún factor. Para Cr y Mn sólo se observó efectos significativos en el factor tiempo, el cual influyó en la concentración de acuerdo a los diferentes periodos de muestreo. En el segundo muestreo la concentración de Cr y Mn fue menor en comparación con los otros dos; para Mn en todas las muestras (excepto 2) la concentración aumento en el periodo de lluvias.

La variación en la concentración de metales para cada muestreo podría deberse a la dispersión y migración, en los cuales los elementos contenidos en un depósito disminuyen de concentración, debido a que son destruidos mecánicamente por la erosión, debido a diferentes fenómenos, como la migración que genera cambios en las características físico-químicas del agua de pozos y manantiales, además de provocar la precipitación de ciertos elementos en solución, lo que en condiciones ideales puede resultar en la formación de un nuevo depósito mineral, o en el enriquecimiento de un depósito mineral ya formado.

En el caso de las muestras en las cuales la concentración de Mn y Cr varía de acuerdo a la temporada estacional, puede deberse a que el agua desplaza grandes cantidades de material mineral a lo largo de la corriente y acumula los minerales no disueltos al fondo. Esto puede ser provocado por la dispersión en el cual los elementos contenidos en un depósito disminuyen de concentración, debido a que está siendo destruido química o mecánicamente por erosión. Para Pb y V se observaron efectos significativos en el factor sitio posiblemente debido al diferente tipo de litologías presentes en el área de estudio (zonas mineralizadas no expuestas en el área de estudio). La cantidad de Pb en El Horconcito podría deberse a la concentración alta de este en rocas, lo que indica que el Pb se comporta de manera móvil en el ambiente y que el agua atmosférica al entrar en contacto con la roca, libera este elemento (Popoca N., 2011).

El Horconcito tiene la característica, como se describió anteriormente, de ser una zona montañosa en la cual hay alta precipitación pluvial, por lo que la erosión física es extremadamente rápida y los detritos son removidos antes de que puedan ser intemperizados; el viento, las corrientes de agua, el desprendimiento de tierras, el deslizamiento de suelos y otros procesos son muy activos, siendo la disgregación física la de mayor actividad y el intemperismo químico de menor participación.

Lo contrario sucede en Huahuaxtla que se encuentra en una zona semiplana, en la cual hay abundante precipitación en época de lluvias, pero existe poco escurrimiento superficial, mientras que la infiltración es máxima y los productos solubles no se mueven libremente por lo que el intemperismo químico es inhibido. Se puede llevar a

cabo intemperismo químico el cual involucra la descomposición de rocas y minerales y la dispersión de los elementos liberados son generalmente por agua, algunas veces a distancias considerables de la roca fuente.

Metales alcalinos y metales alcalinotérreos

Dentro de los alcalinos y alcalinotérreos (K, Ca y Mg) se observaron efectos significativos en el factor sitio posiblemente debido a las diferentes formas del almacenamiento de agua. Para el caso del K que es liberado con mayor dificultad de los minerales silicatados y presenta una tendencia a incorporarse dentro de los productos intemperizados, especialmente en arcillas (Serrano, 2007), lo que podría explicar los resultados obtenidos en Tlamacazapa siendo las muestras de este poblado las de mayor cantidad de este ion, seguido del Horconcito, después el Aguacate y por último Huahuaxtla.

La forma más común del Ca en las rocas sedimentarias son los carbonatos, de manera cristalina en calcita y aragonita (CaCO_3); los poblados con mayor concentración de Ca fueron Huahuaxtla y Tlamacazapa posiblemente por la roca con la que está en contacto.

Mg es el mayor constituyente de los minerales formadores de rocas ígneas básicas. Sin embargo, en los poblados donde las concentraciones fueron bajas se evidencia el equilibrio con la roca o la ausencia de esta (Serrano, 2007), como en los poblados de El Aguacate y Huahuaxtla. No se presentó efecto del sitio ni muestreo en la cantidad de Na.

Coefficiente de correlación de Spearman

La correlación es el procedimiento estadístico para estudiar la existencia de una asociación entre variables (parámetros fisicoquímicos, concentración de metales pesados, alcalinos y alcalinotérreos) cuantitativas. Para medir o cuantificar el grado de asociación entre las variables se debe calcular el coeficiente de correlación correspondiente. El coeficiente de correlación de Spearman es un estimador no paramétrico que se utiliza en aquellos casos donde las variables examinadas no

cumplen necesariamente criterios de normalidad. Este método estima la asociación entre variables de manera general. Se mide en un intervalo de -1 y 1. Cuando el valor es cercano a 1 indica que las variables están relacionadas de manera directa (cuando una variable aumenta la otra también aumentará), cuando es cercano a 0 indica que no existe asociación entre las variables, si el valor es cercano a -1 indica una correlación inversa en la cual si una variable aumenta la otra disminuirá y viceversa. El grado de asociación es débil si tiene valores menores de 0.3, moderada con valores entre 0.3 y 0.7 e intensa con valores mayores a 0.7.

Esta última prueba estadística se aplicó solo para los poblados El Horconcito y Tlamacazapa, ya que Huahuaxtla y El Aguacate tuvieron pocas muestras para poder realizarla.

Los valores en negritas muestran que existe una tendencia-relación-correlación) estos son los que la prueba estadística arrojó como los más significativos); es decir, cuando este valor es positivo entonces si los valores de “X” son altos los valores de “Y” también serán altos y si los valores de “X” son bajos los valores de “Y” también lo serán. Cuando el valor de correlación es negativo indica que si los valores de “X” son altos entonces los valores de “Y” serán bajos, y si los valores de “X” son bajos los valores de “Y” serán altos.

Tabla 32. Matriz de Correlación de Spearman para el poblado “El Horconcito”

	T	Cond	pH	Cd	Cr	Mn	Pb	V	K	Na	Ca	Mg
T	1.000											
Cond	-0.382	1.000										
pH	0.000	-0.857	1.000									
Cd	-0.164	0.000	0.179	1.000								
Cr	-0.218	0.179	-0.321	0.536	1.000							
Mn	-0.218	-0.571	0.821	0.643	0.036	1.000						
Pb	-0.218	0.214	0.036	0.929	0.393	0.571	1.000					
V	0.655	0.286	-0.500	0.071	0.071	-0.464	0.107	1.000				
K	-0.764	0.643	-0.500	0.250	0.643	-0.107	0.321	-0.321	1.000			
Na	-0.873	0.750	-0.429	0.036	0.179	-0.143	0.214	-0.393	0.857	1.000		
Ca	-0.436	0.893	-0.714	-0.071	0.107	-0.429	0.214	0.214	0.607	0.750	1.000	
Mg	-0.303	0.847	-0.847	0.090	0.505	-0.468	0.288	0.306	0.739	0.631	0.883	1.000

T: Temperatura

Cond: Conductividad

En la Tabla 32 se observa una correlación inversa de temperatura-K, temperatura-Na y pH-Mg, lo cual indica que al aumentar una de las variables la otra disminuirá.

Podemos observar que se presentó correlación directa entre las variables: conductividad-Ca y conductividad-Mg, aunque estos fueron los valores que presentaron una correlación muy intensa, las otras variables en general también presentaron correlación directa moderada, lo cual nos indica en general que la conductividad está dada por la cantidad de iones presentes en la muestra y si aumenta la concentración de iones entonces aumentará la conductividad.

La correlación inversa entre Mg-pH fue muy intensa, lo cual nos indica que a menor pH la concentración del ion será mayor, esto se debe a que cuando el pH es ácido los metales y iones se encuentran disueltos y cuando el pH es básico los metales y iones tienden a precipitar. Para las correlaciones de las otras variables en relación con el pH se observa también una correlación inversa moderada.

Se encontró una correlación directa muy intensa entre Pb-Cd posiblemente esto se debe a las composición de las rocas con las que interactúa el agua, las cuales pueden estar compuestas de estos dos metales.

K-Na tuvieron una correlación directa intensa ya que generalmente se encuentran en el mismo tipo de minerales que interactúan con el agua.

La correlación entre Ca-Mg fue directa intensa y se puede deber al tipo de rocas (aragonita) lo cual indica una fuente de origen común.

En la Tabla 33 se observa que el comportamiento y las correlaciones entre las variables son diferentes a las observadas en el poblado de El Horconcito.

Tabla 33. Matriz de Correlación de Spearman para el poblado "Tlamacazapa"

	T	Cond	pH	Cd	Cr	Mn	Pb	V	K	Na	Ca	Mg
T	1.000											
Cond	-0.092	1.000										
pH	0.263	0.023	1.000									
Cd	-0.184	0.234	-0.330	1.000								
Cr	0.633	0.242	0.173	-0.077	1.000							
Mn	0.421	0.319	0.272	0.126	0.648	1.000						
Pb	0.782	0.052	-0.070	0.314	0.512	0.611	1.000					
V	0.256	-0.776	0.124	-0.302	0.027	-0.335	-0.030	1.000				
K	0.424	-0.646	0.085	-0.544	0.313	-0.038	0.096	0.758	1.000			
Na	-0.121	-0.245	0.047	0.148	-0.022	0.280	0.052	0.148	0.159	1.000		
Ca	-0.008	-0.311	-0.063	-0.022	0.038	-0.203	-0.184	0.396	0.571	0.181	1.000	
Mg	0.468	-0.113	0.129	-0.764	0.401	-0.110	-0.044	0.434	0.681	-0.099	0.302	1.000

T: Temperatura

Cond: Conductividad

Se encontró una correlación directa intensa entre temperatura-Cr y temperatura-Pb.

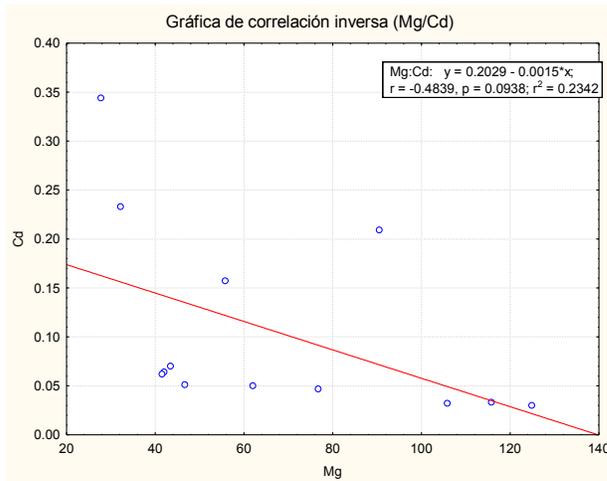
Para Conductividad-V y Conductividad-K se encontró una correlación inversa intensa.

Hubo correlación inversa intensa entre Mg-Cd.

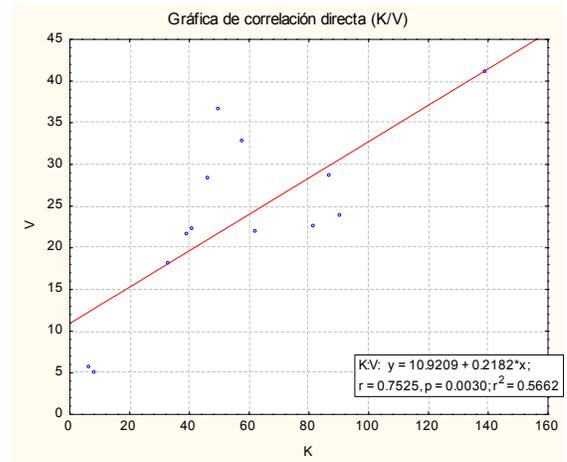
Y se presentó correlación directa intensa entre Mn-Cr, Mn-Pb, K-V, Ca-K y Mg-K lo cual podría indicar una fuente de origen en común entre cada correlación mencionada.

En la Figura 31 se muestra 3 gráficas que describen la tendencia mostrada en la prueba de Spearman y se observan los diferentes tipos de correlación que se pueden presentar, la primera muestra una correlación inversa entre el Mg-Cd, en la segunda una correlación positiva entre el K-V y la última es una gráfica en la cual no existe correlación de acuerdo al valor de r. La dependencia entre las variables se expresó mediante gráficas de regresión lineal. Para la realización de las gráficas se parte de que la variable independiente, es el ion de mayor concentración conjeturando que este domina el proceso.

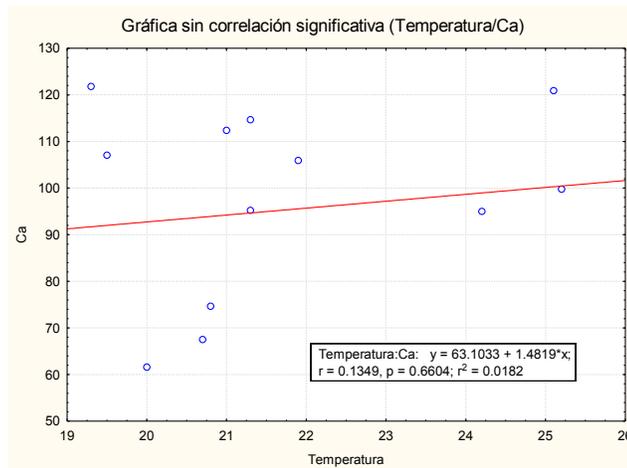
Figura 31. Gráficas de correlación de Tlamacazapa



Gráfica de correlación inversa entre el Mg y Cd en el poblado de Tlamacazapa, si la concentración de uno aumenta la concentración del otro disminuirá.



Gráfica de correlación directa entre K y V en el poblado de Tlamacazapa, si aumenta la concentración de uno también aumentará la concentración del otro.



Gráfica sin correlación significativa entre la temperatura y la concentración de Ca, el cambio de temperatura no influye en la concentración de Ca.

CAPITULO 8. CONCLUSIONES

Se determinaron los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH y conductividad) *in situ* los cuales están involucrados en procesos químicos que podrían alterar la disponibilidad de metales en el agua.

Por medio del método de absorción atómica se determinaron las concentraciones de metales pesados en agua con el equipo GBC modelo Avanta Σ con horno de grafito y se determinaron alcalinos y alcalinotérreos con el equipo GBC modelo 932 AA por flama. En general el Mn fue el metal que se encontró en mayor cantidad en los 4 poblados. El Cd fue el metal que tuvo concentraciones más bajas en comparación de los otros 4 metales analizados en los 4 poblados. El Ca fue el que tuvo mayor concentración en los 4 poblados en comparación con Mg, K y Na.

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, se encontraron muchas muestras fuera del intervalo establecido para pH; ningún metal rebasó los límites establecidos; con la concentración de Ca y Mg se calculó la dureza total en las muestras, se observó que 4 de estas del municipio de Tlamacazapa pasaron el límite máximo establecido en la NOM-127.

El Pb se encontró en mayor cantidad en el poblado El Horconcito comparándolo con los otros tres sitios lo cual coincide con estudios previos. Para el caso de Cd, Cr, Mn y V en trabajos anteriores no se reportaron concentraciones con los métodos de análisis que emplearon, ya que estaban debajo del límite de detección, por lo que con este estudio se puede dar una idea general de la presencia o ausencia de estos metales en concentraciones más bajas. Se encontró similitud con estudios previos en el cual la cantidad de Ca es mayor en el poblado de Tlamacazapa en comparación con el poblado El Horconcito.

Se consideró que el factor que influyó más en los parámetros fisicoquímicos, concentración de metales, alcalinos y alcalinotérreos fue el sitio, esto se puede deber a las características de los suelos con los cuales interactúa el agua, así como la forma de almacenamiento y las actividades antropogénicas.

En cuanto a la cantidad de iones inorgánicos se encontró variación en la concentración de estos de acuerdo al sitio. Huahuaxtla y Tlamacazapa tuvieron la mayor concentración de calcio y magnesio debido a la interacción agua-roca (carbonatadas: calizas y dolomitas).

La concentración de potasio también varió de acuerdo al sitio de muestreo y se encontró una correlación intensa con el sodio.

Un aspecto que se debe resaltar es que incluso al hacer pocos periodos de muestreos en el de lluvias no hay una disminución de metales por dilución. Sin embargo, se observa una reconcentración por evaporación en la época de estiaje.

Los niveles de correlación entre las distintas variables temperatura, pH y conductividad, no fueron iguales para los poblados de El Horconcito y Tlamacazapa, esto podría indicar que el tipo de agua varía, al tener diversos factores involucrados.

Considerando los resultados obtenidos se encontró que el poblado que tiene mejor calidad de agua es El Aguacatito y el que presentó valores que pasaron algunos límites establecidos en la NOM-127 es Tlamacazapa; sin embargo, no se encontró una concentración significativa de metales pesados en alguna de las muestras.

PERSPECTIVAS

- Para completar este estudio, se propone realizar un estudio del suelo y rocas que se encuentran en contacto con el agua analizada, con esto se podría dar a conocer si son la fuente de algunos metales pesados, alcalinos y alcalinotérreos.
- Realizar un estudio para cuantificar otros metales pesados y detectar si la concentración de estos sobrepasa los límites establecidos en la NOM-127 y por lo tanto presentar un peligro en la población que consuma el agua.
- Ya que en los poblados esta agua es para consumo humano se recomendaría hacer un tratamiento previo para mejorar su calidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. APHA. [1989]. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 17th. Edition. Port City Press. Baltimore, Maryland.
2. Arizabalo R. D. y Díaz G. [1991]. La contaminación del agua subterránea y su transporte en medios porosos. Cuadernos del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pág. 9
3. Armienta, et. al., [2001]. *The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapan Valley, México: Environmental Geology*.
4. Baird, C. [2001]. *Química ambiental: versión española por Xavier Domenech Antunez*. Barcelona. México: Reverté. pp. 391-429.
5. Basta, N.T. [2004]. *Heavy metal and trace element chemistry in residual-treated soil: Implications on metal bioavailability and sustainable land application*. In: sustainable land application conference, January, 4-8. Florida; university of Florida.
6. Campa, M.F., [1978], *La evolución tectónica de Tierra Caliente, Guerrero*.
7. Campa, M. y Ramírez, J. [1979]. *La evolución Geológica y la Metalogénesis del Noroccidente de Guerrero, Chilpancingo, Guerrero*.
8. Carretero, L. M., Manuel P. R. [2007]. *Mineralogía aplicada: salud y medio ambiente*. Madrid; México: International Thomson.
9. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA [2008]. Usos de agua, sistema nacional de información de agua (SINA) estadística del agua en México 2011.
10. Corey, G., Galvao, L.A.C. [1989]. *Plomo. Serie vigilancia*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud, OMS.
11. Dickson T. R. [1980]. *Química: enfoque ecológico*. Limusa,
12. EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). [2014]. *Definición de metales pesados*. Glosario.
13. Evangelou V. P. [1995] *Pyrite oxidation and its control*. CRC Press, Boca Raton.
14. Fergusson J.E. [1990]. *The heavy elements, Chemistry, environmental impact and Health Effects*. Pergamon Press, Pxford, 614 pp.
15. Fyfe W. S. [1981]. *Introducción a la geoquímica*. Reverté: España

16. García, I. y Dorronsoro, C. [2005]. *Contaminación por metales pesados. En: Tecnología de suelos*. Departamento de edafología y Química Agrícola, Universidad de Granada, Granada, España.
17. García, J. A., [2008]. *Determinación de la capacidad de adsorción de Cd, Cu y Pb por el sedimento de la presa José Antonio Alzate en el Estado de México*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México
18. García, M. R. [2007]. *“Determinación de Metales Pesados en la Precipitación Pluvial de una zona Urbana (Ciudad de México) y una Rural (Rancho Viejo, Edo. de México)”*. Tesis Doctoral en Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
19. García, R., Torres, Ma. del C., Padilla, H., Belmont, R., Azpra, E., Arcega-Cabrera, M., Báez, A., [2006]. *Mesasurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of Mexico, Mexico*. Atmospheric Environment. 40(32): 6088-6100.
20. GBC. [2000]. *Instrumentación. Propuesta técnica, espectrofotómetro marca GBC serie Avanta, modelo Avanta Σ*. GBC Instrumentation S.A. de C.V., México, D.F.
21. González, T. Ma. de los A. [2009]. *“Hidrología del área de El Horconcito, Municipio de Taxco de Alarcón, estudio de prefactibilidad para abastecimiento de agua potable”*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Guerrero.
22. Huato, S.J., Trejo, L.P., Jiménez, C., Ogura, T. [1998]. *Arsenic, lead and other heavy metals in lime and tortilla in México*. Revista de la sociedad Química de México. 40(5), 210-214.
23. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [2009]. *Metales pesados, definición, emisión y daño a la salud*.
24. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). [2010]. *Información poblacional del municipio de Taxco de Alarcón, Guerrero*.
25. Manahan S. E. [2007]. *Introducción a la química ambiental*. Reverté. España. 145.152, 31-48
26. Manta, D. S., Angelone, M., Bellanca, A., Neri, R., Sprovieri, M. [2002]. *Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy*. The Science of the Total Environment 300, 229-243.
27. Murray, J.V. [1995]. *Toxic teeth; the chronic mercury poisoning of modern man. Chemistry and Industry*. January, 14-17.
28. Ochial, E. [1995]. *Toxicity of heavy metals and biological defense*. Journal of Chemical Education; 72 (6), 479-484.
29. Pérez, C. S. [2009]. *“Hidrogeoquímica de las fuentes de abastecimiento de la comunidad de Tlamacazapa, Guerrero”*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Guerrero.

30. Pocok, S.J., Smith, M., Baghurst, P. [1994]. *Environmental lead and children's intelligence: A systematic review of the epidemiological literature*. British Medical Journal. 309, 1189-1197.
31. Popoca, V. F. N. [2011]. *"Elementos potencialmente tóxicos en agua, suelo y roca del poblado El Horconcito, Municipio de Taxco, Gro."*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Guerrero.
32. Ramírez, J. J. C. [2014]. *"Caracterización de desechos mineros en Huahuaxtla, Guerrero, por los métodos de fluorescencia y difracción de Rayos X"*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Guerrero.
33. Reyes, R. J. A. [2005]. *"Emisiones industriales a la atmósfera de metales pesados tóxicos y su determinación en partículas suspendidas"*. Tesis de licenciatura, UNAM.
34. Rieuwerts J.s., Thonton I., Farago M.E and Ashmore M.R. [1998]. *Factors influencing metals bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals*. Chemical speciation and bioavailability, Pp 61-75
35. Ritcey G. M. [1989] *Tailings management problems and solutions in the mining industries*. Elsevier, Amsterdam.
36. Salomons, W. [1995]. *Environmental impact of metals derived from mining activities: process, prediction, prevention; journal of geochemical exploration*, pp. 5-23, Amsterdam.
37. Sánchez, B. A. [2006]. *Agua: un recurso escaso*. ArCiBel Editores, España, Pp. 182-183.
38. Schelmer G., Radzuik B. [1999]. *Analytical Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry. A laboratory guide*. Birkhäuser Verlag. Berlín.
39. Servicio Geológico Mexicano (SGM). [2014]. *Panorama Minero del Estado de Guerrero*.
40. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [2003]. NOM-141-SEMARNAT-2003 norma oficial mexicana, establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.
41. Secretaria de Salud. [1994]. *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION*.
42. Silbergeld, E.K. [1991]. *Lead in bone: implications for toxicology during pregnancy and lactation*. Environmental health Perspectives. 89, 13-19.
43. Silviera M.L.A., LRLFL Alleoni, and L.R.G. Guilherme. [2003]. *Biosolids and heavy metals in soils*. Scientia Agricola 60 (4): 793-806.
44. Skoog D., West D., Holler J., Crouch S. [2009]. *"Fundamentos de Química Analítica"*. 8a ed, CENGAGE Learning.

45. Tucker M. Ray, Hardy David H. and Stokes Catherine E. [2005]. *Heavy Metals in North Carolina Soils Occurrence & Significance*. NCDA&CS Agronomic Division.
46. Tyler, G. M. [2002]. *Ciencia ambiental, México*. Thomson, pág. 334.
47. U.S. EPA. [1999]. *Digestion Procedure for Microwave Extraction for Ambient Filter Samples, Methd IO-3.1*. Office of Research and Development, Washington, D.C.
48. USEPA (United States Environmental Protection Agency). [1999]. *Partition coefficients for metals in surface water solid and waste*. Office of Solid Waste. Washington DC, 74 pp.
49. Viarengo, A., Nicotera. P. [1991]. *Possible role of Ca in heavy metal citotoxicity*. Comparative Biochemical Physiology. 81-84.
50. Zago C., Giblin A.E. and Bergamasco A. [2001]. *Changes in the metal content of surficial sediments of Boston Harbor since the cessation of sludge discharge*. Marine Environmental Research. 389-415.

Páginas Web

Besoain Eduardo, *Mineralogía de arcillas de Suelos*. [En línea], Costa Rica, 1985, IICA. Disponible en:

<https://books.google.com.mx/books?isbn=9290390670>

Ferro, N. A. *Proyectos mineros y aguas subterráneas en México: El caso de acuífero Vizcaíno*. [En línea], México, 2010. Disponible en:

http://www.ceja.org.mx/IMG/Proyectos_mineros_y_aguas_subterranneas_.pdf

Guzmán, A. M. C., *La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales*, [En línea], España, 2007. Disponible en:

<http://books.google.com.mx/books?id=KPcJItVcQRoC&pg=PA52&dq=fuentes+de+metales+pesados&hl=es&sa=X&ei=kT0eU66tFMGe2AXd2YDADA&ved=0CDAQ6AEwAQ#v=onepage&q=fuentes%20de%20metales%20pesados&f=false>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. [En línea], México, INEGI 2009. Disponible en:

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/12/12055.pdf>

MÉXICO INFOMINE. Disponible en:

<http://www.infomine.com/intelligence/property/35248/taxco/>

Servicio Geológico Mexicano, *Panorama Minero del Estado de Guerrero*. [En línea], México, 2011. Disponible en:

<http://www.sgm.gob.mx/pdfs/GUERRERO.pdf>

Universidad Autónoma de Zacatecas, *Evaluación de riesgos ambientales por plomo en la población de Vetagrande, Zacatecas*. [En línea], México, 2005 Disponible en:

http://www.ine.gob.mx/descargas/sqre/inf_vetagrande_final_1004_e_ine_final.pdf