



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Evaluación de la contaminación por metales en
sedimentos y agua del río Taxco**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA



P R E S E N T A

Eva Carmina Serrano Balderas

MÉXICO, D.F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



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: José Luz González Chávez

VOCAL: Erika María Ramírez Maya

SECRETARIO: María Aurora Armienta Hernández

1er. SUPLENTE: Ernesto Sánchez Mendoza

2do. SUPLENTE: Adriana Ramírez Hernández

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Instituto de Geofísica, Laboratorio de Química Analítica

ASESOR DEL TEMA:

María Aurora Armienta Hernández

FIRMA

SUSTENTANTE:

Eva Carmina Serrano Balderas

FIRMA

Dedicatoria

Este trabajo esta dedicado especialmente a mis padres, quienes me apoyaron y han sido pacientes en todo momento y quienes estuvieron siempre presentes a lo largo de mis estudios, los quiero mucho...

También lo dedico a mis hermanas, Sandra y Alejandra, por su compañía, apoyo, por aguantar mis múltiples cambios de humor y por todos los momentos que hemos pasado juntas. A mi sobrino quien trajo alegría a la casa.

Lo dedico a Dios, quien me ha dado la fuerza, el coraje y la oportunidad de finalizar esta importante etapa de mi vida, que aunque con muchos esfuerzos he llevado a su conclusión.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de la DGAPA, proyecto PAPIIT: Movilidad de metales y metaloides tóxicos en el río Taxco. IN114908.

Por su paciencia, amistad, apoyo, por sus comentarios constructivos vaya un agradecimiento especial a la Dra. Maria Aurora Armienta quien me brindó la oportunidad de colaborar en su equipo de trabajo en el Laboratorio de Química Analítica y que gracias a su asesoría y valiosa dirección desarrollé el trabajo de tesis.

Por su ayuda, consejo, estímulo, paciencia y compañía, todos ellos valiosísimos, estoy en deuda con las químicas: Alejandra Aguayo, Olivia Cruz, Nora Cenicerros y Aurelia Juárez.

Muy especialmente agradezco a Myriam Méndez por sus comentarios constructivos, por su apoyo, compañía y por la amistad que me ha brindado, muchas gracias Myriam.

Sí, pese a la ayuda y el apoyo de todas las buenas personas que me apoyaron durante el desarrollo y culminación de este trabajo, he cometido muchos errores son enteramente culpa mía y doy las gracias de antemano a los lectores que me corrigieron.

**No conozco hecho más alentador
que el de la incuestionable capacidad del hombre
para elevar su vida mediante un esfuerzo consciente.**

Henry David Thoreau.

ÍNDICE GENERAL	PÁGINA
Índice de tablas	III
Índice de figuras	IV
Índice de gráficas	V
Dedicatoria	
Agradecimientos	
Resumen	
Capítulo 1. Introducción	
Introducción	1
Objetivos	3
Objetivos generales	3
Objetivos particulares	3
Hipótesis	3
Capítulo 2. Marco teórico	
Metales pesados en el medio ambiente	4
Fuentes naturales	4
Fuentes antropogénicas	5
Proceso minero y beneficio de minerales de mena	6
Biodisponibilidad	8
Toxicidad	10
Arsénico (As)	11
Cadmio (Cd)	14
Hierro (Fe)	15
Plomo (Pb)	16
Zinc (Zn)	17
Métodos de análisis	18
Espectrofotómetro de absorción atómica	19
Espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito	25
Espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros	26

Capítulo 3. Área de estudio	
Descripción del área de estudio	28
Capítulo 4. Metodología	
Recolección y almacenamiento de sedimentos y agua	34
Determinaciones de parámetros fisicoquímicos y especies mayores	35
Determinaciones “in situ”	35
Determinación de especies mayores	35
Cuantificación de metales en agua y sedimentos	36
Digestión total	36
Cuantificación total de metales	36
Control de calidad	37
Capítulo 5. Resultados y Discusión	
Muestreo	39
pH, conductividad y especies mayores	40
Determinación de metales en agua	43
Arsénico (As)	45
Cadmio (Cd)	46
Hierro (Fe)	46
Plomo (Pb)	48
Zinc (Zn)	48
Determinación de metales en sedimentos	50
Arsénico (As)	51
Cadmio (Cd)	52
Hierro (Fe)	54
Plomo (Pb)	55
Zinc (Zn)	57
Capítulo 6. Conclusiones	60
Anexo	
Bibliografía	

Índice de tablas	Página
Tabla 1. Concentraciones naturales de metales en rocas, suelos y vegetales.	5
Tabla 2. Efectos tóxicos del arsénico al encontrarse en niveles elevados en el ser humano	13
Tabla 3. Concentraciones certificadas de los elementos presentes en el estándar Buffalo River Sediment	37
Tabla 4. Concentraciones certificadas de los elementos presentes en el estándar Montana Soil clase NIST (no. 2710).	38
Tabla 5. Concentraciones certificadas de los elementos presentes en el estándar Montana Soil clase NIST (no. 2711)	38
Tabla 6. Resultado de las determinaciones realizadas <i>in situ</i> en el primer muestreo (época de lluvias)	39
Tabla 7. Resultados de las determinaciones realizadas <i>in situ</i> en el segundo muestreo (época de estiaje)	39
Tabla 8. Resultados de pH, conductividad y especies mayores obtenidos a partir de las muestras filtradas sin acidificar provenientes del primer muestreo (época de lluvias).	40
Tabla 9. Resultados de pH, conductividad y especies mayores obtenidos a partir de las muestras filtradas sin acidificar provenientes del segundo muestreo (época de estiaje).	40
Tabla 10. Resultados del análisis de metales en las muestras filtradas y acidificadas, provenientes del primer muestreo (época de lluvias).	43
Tabla 11. Resultados del análisis de metales en las muestras acidificadas sin filtrar, provenientes del primer muestreo (época de lluvias)	43
Tabla 12. Resultados del análisis de metales en las muestras filtradas y acidificadas, provenientes del segundo muestreo (época de estiaje)	44
Tabla 13. Resultados del análisis de metales en las muestras acidificadas sin filtrar, provenientes del segundo muestreo (época de estiaje).	44
Tabla 14. Resultados del análisis de metales en sedimentos, provenientes del primer muestreo (época de lluvias).	50
Tabla 15. Resultados del análisis de metales en sedimentos, provenientes del segundo muestreo (época de estiaje).	50
Tabla 16. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar	i
Tabla 17. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar	i
Tabla 18. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar	i
Tabla 19. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar	i
Tabla 20. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar	i

Índice de figuras

Página

Figura 1. Ciclo biogeoquímico general de los metales pesados	10
Figura 2. Factores que influyen la toxicidad de los metales en solución	11
Figura 3. Quemador de flujo laminar.	22
Figura 4. Terrenos tectonoestratigráficos del estado de Guerrero (<i>Monografía Geológico Minera del Estado de Guerrero. SECOFI, 1991</i>).	29
Figura 6. Ubicación de los sitios de muestreo	31
Figura 7. Mapa hidrográfico del municipio de Taxco.	32
Figura 8. Distrito minero de Taxco	33

Índice de gráficas	Página
Gráfica 1. Concentración total de Arsénico en sedimentos del río Taxco. Época de llluvias	51
Gráfica 2. Concentración total de Arsénico en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje	51
Gráfica 3. Concentración total de Cadmio en sedimentos del río Taxco. Época de llluvias.	52
Gráfica 4. Concentración total de Cadmio en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje	53
Gráfica 5. Concentración total de Hierro en sedimentos del río Taxco. Época de llluvias	54
Gráfica 6. Concentración total de Hierro en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje.	54
Gráfica 7. Concentración total de Plomo en sedimentos del río Taxco. Época de llluvias	55
Gráfica 8. Concentración total de Plomo en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje	56
Gráfica 9. Concentración total de Zinc en sedimentos del río Taxco. Época de llluvias	57
Gráfica 10. Concentración total de Zinc en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje	57

Evaluación de la contaminación por metales en sedimentos y agua del río Taxco.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el contenido de metales presentes en el río Taxco provenientes de los residuos mineros, industriales y afluentes urbanos con base en el análisis de agua y sedimentos. La problemática en particular del río Taxco es la recepción de las aguas residuales que provienen de la cabecera municipal y de los diferentes asentamientos humanos aledaños, aunado a las actividades industriales y mineras de la zona. Estudios previos por Cenicero et al (2003), Espinosa (2003) y Armienta et al (2004), han reportado altas concentraciones de As, Fe, Pb y Zn en jales adyacentes a uno de los afluentes del río, los cuales son liberados de éstos, mediante procesos de erosión y oxidación.

Para evaluar el contenido de metales presentes en el agua y sedimentos del río Taxco se llevó a cabo la recolección de muestras, determinación de parámetros fisicoquímicos y especies mayores, secado y tamizado de sedimentos, digestión de sedimentos y cuantificación total de metales; procedimientos que se describen a continuación.

Recolección de muestras

Se realizaron dos muestreos, en época de lluvias y estiaje sobre los afluentes del río Taxco, obteniéndose un total de 7 muestras por cada muestreo, las cuales fueron colectadas de acuerdo a la Asociación Americana de Salud Pública (APHA, 2005).

Determinación de parámetros fisicoquímicos y especies mayores

Para determinar el pH de las muestras se empleó un potenciómetro marca ORION, calibrándolo con soluciones buffer de pH = 4, 7 y 10. Para medir la conductividad de las muestras se calibró un conductímetro marca conductronic PC-18 con una solución estándar de 1990 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Posteriormente se realizaron los análisis de especies mayores de acuerdo a la APHA (2005) y Armienta et al (1987). Se determinó alcalinidad (CO_3^{2-} , HCO_3^-), boro, dureza (Ca, Mg), cloruros, fluoruros, potasio, sílice, sodio y sulfatos.

Secado y tamizado de muestras

Los sedimentos colectados en los muestreos se secaron a temperatura ambiente y fueron tamizados en una malla de teflón de 0,063 mm.

Digestión de sedimentos

La digestión ácida total se llevó a cabo de acuerdo a Siaka et al (1998), de acuerdo con ésta, se pesaron 0,5 g de muestra seca y se agregaron 10 mL de agua regia inversa (HNO_3 : HCl ; 3:1 v/v), para posteriormente efectuar la digestión en un horno de microondas. Además se emplearon como muestras control los suelos Montana Highly Elevated Trace Element Concentration (clase NIST no. 2710), Montana Moderated Elevated Trace Element Concentration (clase NIST no. 2711) y Búfalo River Sediment (clase NIST no. 8704).

Cuantificación total de metales

Para el análisis de metales en las muestras se empleó el espectrofotómetro de absorción atómica generador de hidruros modelo 2380 marca Perkin Elmer, así como el espectrofotómetro de absorción atómica AAnalyst 100 marca Perkin Elmer y el espectrofotómetro de absorción atómica por horno de grafito modelo HGA 850 marca Perkin Elmer.

Finalmente los resultados obtenidos se compararon con los límites permisibles para el agua potable y valores de referencia de sedimentos. Los resultados del análisis en agua tanto en época de lluvias como en época de estiaje reflejaron que las muestras TX2, TX3, TX4 y TX6 rebasaron en varios órdenes de magnitud los valores límites permisibles de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2000, la NOM-001-ECOL-1996 y la Organización Mundial de la Salud (WHO). Las muestras TX3, localizadas cerca de los jales mineros, presentan las mayores concentraciones de los metales Fe y Cd, seguido de las muestras TX4, mientras que las muestras TX2 tomadas en época de estiaje contienen las concentraciones más altas de Pb y Zn, finalmente las muestras TX6, aledañas a una zona minera, contienen las más altas concentraciones de arsénico.

Los resultados del análisis de sedimentos, manifiestan que las menores concentraciones de As, Cd, Fe, Pb y Zn totales se encuentran en las muestras

TX2, TX4 y TX5. Por otra parte, las muestras TX3 presentan las mayores concentraciones de los metales mencionados, lo cual evidencia la influencia que los jales mineros ejercen sobre las concentraciones de metales en sedimentos. Las muestras obtenidas en el río Taxco antes y después de su unión con el río Cacalotenango, indican que el mayor aporte de As, Cd, Pb y Zn, es a través del río Cacalotenango. Las concentraciones totales de metales en las muestras analizadas rebasan en varios órdenes de magnitud los valores de fondo establecidos por la NOAA (1999), incluyendo las muestras ubicadas en áreas alejadas de las actividades mineras y de los depósitos de jales.

Capítulo 1. Introducción

Las actividades mineras tienen impactos locales y regionales en los ecosistemas terrestres y acuáticos, siendo hoy en día una de las principales fuentes de contaminación por metales hacia el medio ambiente.

El estudio de metales traza es importante puesto que el mínimo cambio de su disponibilidad en el medio ambiente puede provocar que estos metales sean tóxicos para plantas y animales (Gismera *et al*, 2003; Förstner *et al*, 1979; Fergusson, 1990), además, las diversas especies en las que pueden estar presentes los metales en sistemas acuáticos (libres, formando complejos, hidróxidos, óxidos, carbonatos o adsorbidos a superficies de distintos compuestos sólidos), implican diferentes riesgos de afectación para el medio ambiente (Förstner *et al*, 1979; Bradly, 2005; Fergusson, 1990); es por ello que el presente proyecto se enfoca en evaluar el contenido total de As, Cd, Fe, Pb y Zn en el agua y sedimentos del río Taxco.

Las técnicas a emplear para el análisis de estos metales serán: Absorción Atómica por Flama (EAAF) y horno de grafito por ser las técnicas más ampliamente utilizadas en los estudios ambientales (APHA, 1993).

La solubilidad, los parámetros fisicoquímicos (pH, potencial redox, etc.) y el tamaño de partícula, permiten estimar el comportamiento de los metales de interés.

La industria minera se ha convertido en una de las fuentes primarias de metales pesados hacia el medio ambiente, afectando tanto ecosistemas terrestres como acuáticos. Los cambios en el paisaje, la destrucción de suelos agrícolas, el drenaje ácido de minas (DAM) originado por depósitos de residuos mineros, minas abandonadas y la contaminación del aire por transporte de partículas suspendidas son, entre otras, evidencias significativas del impacto ambiental que ha generado dicha industria (Salomons *et al*, 1995).

Taxco de Alarcón, Gro., ha tenido actividades mineras desde la época colonial, que además de tener una influencia en la historia económica del país, se

Capítulo 1. Introducción

caracteriza por la extracción de minerales que contienen plata, así como zinc y plomo (Coll -Hurtado, 2002). Sin embargo, el problema principal de la industria minera en esta zona es la generación de grandes cantidades de desechos sólidos que han sido depositados en lugares aledaños a los poblados y aguas superficiales, tal y como lo reportan estudios hechos por Armienta *et al* (2003) donde informan que existen más de 20 millones de toneladas de residuos sólidos en las inmediaciones de la ciudad de Taxco.

El río Taxco se extiende a través de los poblados de Taxco de Alarcón y Tehuilotepec, río abajo se le une el río Cacalotenango en el poblado de Taxco el viejo. A través de dicho trayecto se encuentran los jales Guerrero y los tiros El Solar y Guerrero, ubicados entre las vetas El Cobre y Babilonia (De Cerna y Fries, 1981).

La evaluación del contenido de metales en el agua y sedimentos del río Taxco permitirá conocer el grado de contaminación por metales que presenta la zona geográfica de estudio así como la influencia que los jales mineros aledaños tienen sobre ésta.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la concentración total del arsénico (As), cadmio (Cd), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn), en el agua y sedimentos del río Taxco, con el fin de evaluar su contenido en función de posibles fuentes contaminantes: residuos mineros, industriales y afluentes urbanos.

Objetivos particulares

- Determinar pH, potencial de óxido-reducción (ORP), conductividad, potencial redox y especies mayores en el río Taxco.
- Cuantificar la concentración total del As, Cd, Fe, Pb y Zn en el agua y sedimentos del río Taxco.
- Determinar la influencia que tienen las distintas fuentes contaminantes sobre el río Taxco.

Hipótesis

- Las mayores concentraciones de metales totales se localizarán en los puntos cercanos a los depósitos de jales.
- Se encontrarán diferencias significativas entre los dos muestreos, reflejando la influencia que tiene la época de lluvias sobre la solubilidad de los metales.
- Las muestras colectadas en época de estiaje presentarán mayor concentración de metales comparadas con las muestras colectadas en época de lluvias.

Capítulo 2. Marco Teórico

Metales pesados en el medio ambiente

La contaminación en los sistemas acuáticos, ocurre cuando se introducen sustancias o energía que causan deletéreos efectos, tales como daños a la salud y a los recursos naturales, restricción de actividades acuáticas y deterioro de la calidad del agua con respecto a su uso en agricultura, industria u otra actividad económica (Giuliano *et al.*, 2007, Rufo *et al* 2007).

La contaminación en los ríos se produce principalmente por la presencia de elementos o compuestos que normalmente no estarían sin la acción del hombre, o por un aumento o descenso de la concentración normal de las sustancias ya existentes debido ya sea por la acción humana o por la presencia de zonas mineralizadas. Algunos de los componentes químicos potencialmente más tóxicos son los metales pesados, entre ellos Sb, As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Se, Zn. El aporte de metales al ciclo hidrológico procede de diversas fuentes, siendo una de ellas de origen natural a partir de los minerales que por causas de erosión, lluvias, etc., son arrastrados al agua. Sin embargo el mayor aporte de metales es de origen antropogénico. La minería, los procesos industriales, los residuos domésticos, son fuente importante de contaminación por metales en el ecosistema (Bradl, 2005; Furness y Rainbow, 1990; Connell, 2005).

Fuentes naturales

Las fuentes naturales de los metales están constituidas por rocas y minerales metálicos, siendo las principales fuentes los polvos derivados de actividades volcánicas, la erosión e intemperismo de rocas y suelos, el humo de incendios forestales y finalmente los aerosoles y las partículas de superficies oceánicas (Connell, 2005). Se sabe que grandes cantidades de metales son emitidos por fuentes naturales (Bradl, 2005), sin embargo, estos niveles pueden ser rebasados en varios órdenes de magnitud por las emisiones antropogénicas.

Metal	Tipo de roca				Suelos		Vegetación	
	Granito	Basalto	Lutitas	Caliza	Suelos Cultivados	Suelos sin cultivar	Natural	En terreno mineralizado
Al (%)	7,2	8,2	8	0,42		1,1-6,5	0,1-3,9	
As	2	2,2	13	1	5,5-12	6,7-13		
Be	3	0,7	3	0,X	1-1,2	0,76-1,3		
Cd	0,13	0,21	0,3	0,3		0,1-0,13	0,95-20	
Co	4	47	20	0,1	1,3-10	1 --14	0,65-400	>50
Cr	10	185	100	11	15-70	1--78	2,2-22	
Cu	20	94	50	4	9,9-39	8,7-33	50-270	50-60 a 100-200 en ocasiones >1000
Fe (%)	1,42	8,6	5,1	0,38	1,4-2,8	0,47-4,3	0,08-0,93	
Hg (ppb)	0,03	0,09	0,4	0,04	30-69	45-160		
Mn (%)	0,045	0,18	0,09	0,11	0,099-0,74	0,006-0,11	0,05-1,4	
Mo	1	1,5	2,627	3		0,2-5	0,76-7,6	
Ni	10	145	60	20	1,8-18	4,4-23	0,81-130	>100 a veces 2000
Pb	17	7	20	9	2,6-27	2,6-25	24-480	
Sb	0,22	0,6	1,5	0,2		2		
Sc	7	27	16	1	2,8-9	2,1-13		
Se	0,05	0,05	0,6	0,08	0,28-0,74	0,27-0,73	0,01-0,42	
Sn	3	1,5	6	0,X		3--10		
Ti (%)	0,12	1,14	0,6	0,04	0,17-0,40	0,17-0,66	0,07-0,12	
Tl	2,3	0,21	1,4	0,0X				
V	50	225	1,4	20	20-93	15-110	2,6-23	
Zn	50	118	85	20	37-68	25-67	170-1800	

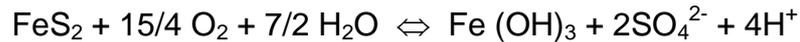
Tabla 1. Concentraciones naturales de metales en rocas, suelos y vegetales. Las concentraciones se expresan en ppm excepto para Hg (ppb), Fe (%), Mn (%), Ti (%) y Al (%) (Bradl, 2005).

Fuentes antropogénicas

La contaminación de origen antropogénico procede de la intervención humana en el ciclo biogeoquímico de los metales pesados (Callender, 2000). Las principales fuentes antropogénicas incluyen las actividades agrícolas, los desechos químicos, el uso de fertilizantes y pesticidas, desechos de animales, la descarga de aguas residuales y la combustión de escorias de la industria minera (Bradl, 2005).

En particular, la industria minera genera todo tipo de metales provenientes de los depósitos de los desechos mineros o jales, estos desechos generalmente contienen metales traza que se liberan hacia los ambientes fluviales (cuerpos de agua superficiales y subterráneos) y suelos. Incluso se llega a generar el drenaje ácido de mina (DAM). DAM es un fenómeno causado por la oxidación

de azufre proveniente de la pirita y por la subsiguiente oxidación y posible precipitación del hierro, tal y como se muestra en la siguiente reacción (Guliano *et al*, 2007).



Estas condiciones ácidas pueden movilizar metales pesados, que pueden causar problemas ambientales y de salud a través de la respiración o ingesta de agua y alimentos contaminados.

Existen numerosos ejemplos de contaminación ambiental producidos por la industria minera subrayando principalmente la presencia de Plomo, Cromo, Arsénico, Cadmio, Cobre, Zinc, Mercurio y Níquel (Förstner, 1995; Callender, 2004).

Proceso minero y beneficio de minerales de mena.

Durante los procesos mineros se llevan a cabo un conjunto de fases sucesivas tales como: extracción y beneficio, además de la prospección y exploración, pasos que se describen a continuación (USEPA¹, 1995; Coll-Hurtado, 2002).

Prospección. En esta etapa se buscan zonas geológicas susceptibles de explotación sobre zonas en las que se presume existe un yacimiento minero, se realiza a través de estudios de campo, del empleo de métodos geofísicos y del estudio geológico del área.

Exploración. Es la operación que se realiza para hacer posible el proceso de explotación. Incluye la evaluación física del área determinada a través de la prospección.

Explotación. En esta etapa se lleva a cabo la extracción de minerales contenidos en un yacimiento, donde se llevan a cabo actividades como la

¹ Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA)

perforación, construcción de galerías, uso de explosivos, acarreo y transporte de minerales fuera de la mina.

Beneficio. Este proceso se refiere al tratamiento de minerales extraídos para regular su tamaño (disminución de grano), remover impurezas (minerales de ganga), o para mejorar la pureza, calidad o grado del producto deseado. Los métodos típicos de este proceso son: lixiviación, gravedad, flotación selectiva, separación magnética, entre otros (USEPA, 1995).

Los minerales extraídos en el distrito minero de Taxco de Alarcón, son beneficiados a través del proceso denominado *flotación selectiva*, que se describe a continuación.

Flotación selectiva. Este proceso consiste en emplear agua y reactivos químicos colocados en un tanque para adherir un mineral o grupo de minerales hacia burbujas de aire producidas mediante la agitación. La adhesión de los minerales hacia las burbujas (flotación) ocasiona que los minerales de mena se separen de los minerales de ganga.

Los reactivos empleados durante la flotación selectiva incluyen colectores, espumantes, antiespumantes, activadores y depresores. Así, el empleo de un cierto reactivo químico dependerá de las características del mineral a recuperar y dependiendo de ello, los reactivos pueden contener ácido sulfúrico, compuestos cianurados, hidrocarburos, ácido clorhídrico, compuestos de cobre o polvos de zinc (USEPA, 1995).

En la planta El Solar, se procesan los minerales del distrito minero de Taxco, los cuales son beneficiados por el proceso descrito, esta planta, tiene una capacidad instalada de 3300 t/día. Hasta el año de 1999 la capacidad utilizada de la planta fue de 1682 t/día. En 1988, se beneficiaron 786420 t, para 1989 eran 889080 t, mientras que en 1996 se trataron 525072 t que produjeron 26674 t de concentrado. El producto final de los procesos de flotación son concentrados de plomo y concentrados de zinc, que se envían a Torreón y San Luis Potosí, respectivamente (SECOFI, 1999).

Los residuos generados durante los procesos de extracción y beneficio son tanto sólidos (residuos rocosos, minerales de ganga, jales, partículas suspendidas –polvo-) como líquidos (agua de mina, residuos líquidos provenientes de la extracción y concentración del mineral) (USEPA, 1995). Una vez generados estos desechos (jales) son depositados a las cercanías de las minas, esto dependiendo de la topografía y de las condiciones del sitio (permeabilidad), así como de los factores económicos (USEPA, 1995). En el distrito minero de Taxco, los jales se encuentran como rellenos de barrancas, relleno de algunos sistemas de minado (veta y mantos) o simplemente se depositan al aire libre (SECOFI, 1999).

Biodisponibilidad

Los metales como contaminantes en sistemas acuáticos pueden existir en diferentes formas químicas (iones libres, complejos inorgánicos, complejos orgánicos, óxidos, hidróxidos, silicatos, carbonatos, coloides, etc.). Para que un metal ejerza efectos tóxicos debe ser biodisponible, lo que significa que debe estar disponible para la ingesta, acumulación e introducción vía todas las rutas de acceso disponibles hacia los seres vivos (Figura 1). Los iones libres son generalmente considerados como los más biodisponibles y es por eso que tienen los efectos tóxicos más graves (Connell, 2005).

Los metales tienen tres vías principales de entrada en el medio acuático:

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

Por otra parte, las tres principales vías a través de las cuales los metales pueden introducirse a los organismos vivos son:

- a) Vía atmosférica o deposición atmosférica de metales en agua y suelo.
- b) Vía ingestión de agua contaminada o de alimentos que han sido irrigados o preparados con agua contaminada.
- c) Vía acumulación en tejidos de plantas o animales (Bradl, 2005).

Respiración

Los metales pesados pueden encontrarse en la atmósfera como compuestos volátiles o particulados, los cuales pueden entrar al organismo mediante procesos biológicos naturales como la respiración. La respiración de polvos contaminados por metales es una de las causas más graves en que los metales se introducen al ser humano, causando enfermedades graves como: “pulmón negro”, silicosis, cáncer, enfermedades del riñón, hígado, abortos, daños visuales y neurológicos, entre otras (Bradl, 2005).

Agua

La segunda vía de entrada para los metales hacia los organismos vivos es a través del uso y consumo de agua contaminada, la cual puede ser ingerida directa o indirectamente usando esta agua ya sea para la preparación de alimentos o para la irrigación de plantas.

Cadena alimenticia

La tercera vía es a través de la comida que contiene concentraciones elevadas de metales, ya sean obtenidos de forma natural o debido a procesos de bioacumulación. La introducción de los metales hacia los vegetales comestibles depende de cómo esté ligado el metal al suelo, la fase del suelo a la que está ligada y su forma química. Los contaminantes, entiéndase metales, pueden estar presentes en el suelo como partículas, películas líquidas, iones adsorbidos o absorbidos en la fase líquida de los poros (Bradl, 2005).

La biodisponibilidad está influenciada principalmente por la solubilidad y la movilidad de los metales, que a su vez están controladas por variables como el pH, materia orgánica, potencial redox, presencia de oxihidróxidos de Fe/Mn y

probablemente los procesos de biometilación (Bradl, 2005; Connell, 2005). Por otro lado en los sistemas acuáticos la solubilidad y la movilidad están controladas por las variables como el pH, materia orgánica disuelta, material particulado suspendido, fuerza iónica, alcalinidad y salinidad (Bradl, 2005).

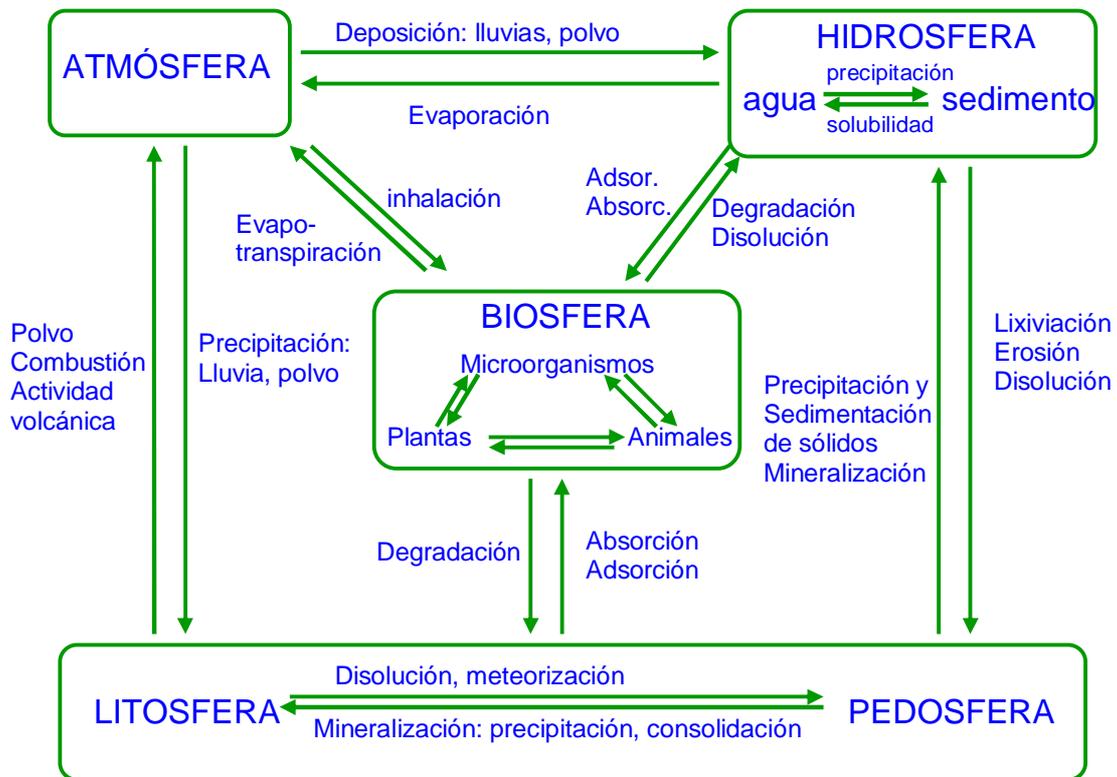


Figura 1. Ciclo biogeoquímico general de los metales pesados (Fergusson, 1990).

Toxicidad

Los mecanismos de toxicidad de los iones metálicos pueden ser clasificados dentro de las siguientes tres categorías: 1) bloqueando el funcionamiento biológico esencial de grupos de biomoléculas (vg., enzimas y proteínas), 2) desplazando el ion metálico principal de las biomoléculas y 3) modificando la conformación activa de biomoléculas (Connell, 2005).

Las reacciones de los metales están influenciadas por reacciones de óxido-reducción que ocurren en sistemas acuáticos afectados por los efluentes de las

minas. Por lo tanto, las especies que tienen más de un estado de oxidación (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^+ , Cu^{2+} , As^{3+} , As^{5+}) son más móviles, reactivas y exhiben diferencias en el grado de toxicidad (Figura 2) (Förstner *et al*, 1979; Fergusson, 1990).

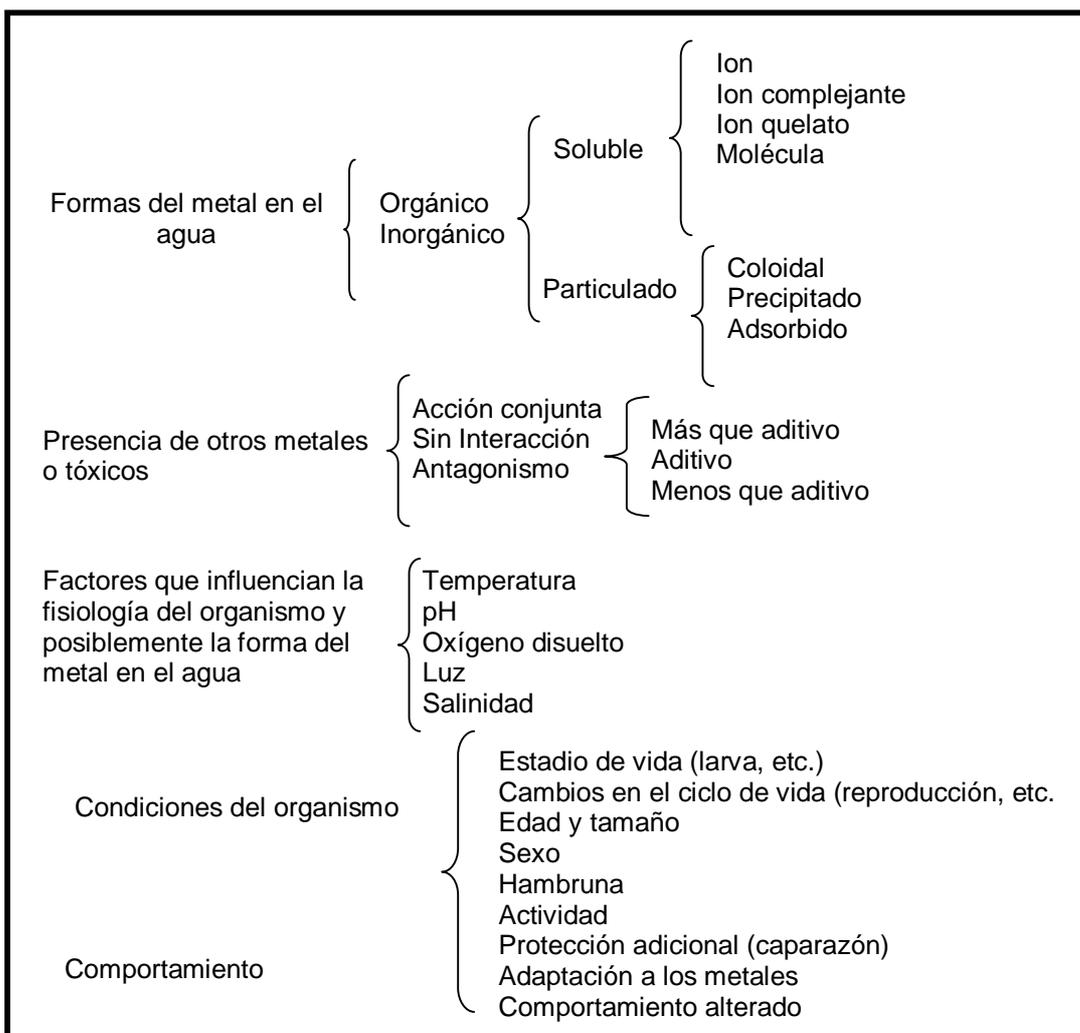


Figura 2. Factores que influyen la toxicidad de los metales en solución (Förstner *et al*, 1979).

Arsénico (As). El arsénico es un metaloide cristalino con tres formas alotrópicas de colores amarillo, negro y gris, tiene número atómico 33 y un peso atómico de 74,92, pertenece al grupo V-A de la tabla periódica y tiene afinidad química por el fósforo. La densidad en su forma ordinaria (As gris) es $5,73 \text{ g/cm}^3$. Su temperatura de fusión es de 1090 K y sublima a 887 K, sus estados de oxidación comunes son III-, 0, III+ y V+. El arsénico se enlaza de forma covalente con los elementos no-metálicos y metálicos, para formar

compuestos estables con sus estados trivalente y pentavalente (Clemens *et al*, 1998).

La movilidad y biodisponibilidad del As están primordialmente influenciadas por las especies químicas del As ya sea por suelos o pH de agua subterráneas, presencia de óxidos de manganeso o hierro y minerales de arcilla, potencial redox o compitiendo por iones. Las especies primarias del As en suelos y aguas naturales son arseniato, As (V), y arsenito, As (III). As (III) es el más móvil y soluble y por eso la especie más tóxica. La solubilidad del arsénico es controlada por la formación de $Mn_3(AsO_4)_2$, $FeAsO_4$, y $Ca_3(AsO_4)_2$. En el agua, As (V) es la especie más común, la cual se forma preferentemente bajo altas concentraciones de oxígeno disuelto, pH alcalino, alto potencial redox y contenido reducido de materia orgánica. Por otro lado la formación de las especies de As (III) son favorecidas bajo las condiciones opuestas (Bradl, 2005).

En su estado natural, el arsénico es comúnmente asociado con minerales sulfurados. Los principales minerales del As incluyen: la arsenopirita ($FeAsS$), nicolita ($NiAsS$), cobaltito ($CoAsS$), tenantita ($Cu_{12}As_4S_{13}$), enargita (Cu_3AsS_4) y arsénico nativo. Los principales compuestos de arsénico producidos son el trióxido de arsénico (As_2O_3) y el metal arsénico a partir de los cuales se producen otros productos. Cerca del 70 % de arsénico se usa para la producción de pesticidas, principalmente los siguientes:

- Metanarsenato monosódico (MSMA) – $HAsO_3CH_3Na$
- Metanarsenato disódico (DSMA) – $Na_2AsO_3CH_3$
- Ácido arsénico – H_3AsO_4
- Ácido dimetilarsínico – $(CH_3)_2AsO_2H$

El arsénico y los compuestos del arsénico se usan también como preservativos para la madera, manufactura de vidrio, aleaciones, aparatos electrónicos, catálisis, aditivos de alimentos y productos químicos para veterinaria.

Existen diversas formas del arsénico de importancia ambiental, incluyendo ácidos arseniosos (H_3AsO_3 , $H_2AsO_3^-$), ácidos arsénicos (H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$), arsenitos, arsenatos, ácido metilarsénico ($HAs(CH_3)_2$) y trimetilarsina ($As(CH_3)_3$) (Barbara, 1988).

Se ha encontrado que los arsenitos y los arsenatos son absorbidos por el tracto digestivo, la cavidad abdominal y el tejido muscular. Además, en la orina, la excreción del arsenato es más rápida que la del arsenito. El arsenato tiene un bajo orden de toxicidad y no inhibe ninguna enzima, debido a su falta de afinidad hacia los grupos hidroxilo y tiol, sin embargo, la síntesis de ATP es inhibida por AsO_4^{3-} provocando el desacoplamiento de la fosforilación oxidativa y reemplazando el grupo fosforilo. Por otro lado, el arsenito inhibe las enzimas tiol-dependientes y se enlaza a tejidos proteínicos como la queratina en el cabello, uñas y piel y es retenido en el cuerpo por un periodo prolongado (Förstner, 1979; Fergusson, 1990).

Los síntomas de exposición crónica en humanos, incluyen hiperqueratosis (especialmente en las palmas de las manos y la planta de los pies), hiperpigmentación, enfermedades de la piel, arteriosclerosis periférica, cáncer de piel (en zonas no expuestas al sol), hígado, vejiga, enfermedad del pie negro –arteriosclerosis periférica y gangrena- (Fergusson, 1990).

Área Afectada	Efectos tóxicos
Piel	Hiperpigmentación, hiperqueratosis, enfermedad del pie negro, gangrena, cáncer de piel.
Pulmones	Cáncer de pulmón (se necesita confirmar).
Hígado	Cirrosis.
Riñones	Problemas de reabsorción renal.
Sangre	Inhibe la biosíntesis de porfirina, afecta a los glóbulos blancos.
Sistema reproductivo	Abortos espontáneos.
Sistema nervioso periférico	Neuropatías periféricas, parálisis, pérdida del oído.
Enzimas	Inhibe algunas enzimas.
Tracto gastrointestinal	Daños al intestino, intenso dolor.

Tabla 2. Efectos tóxicos del arsénico al encontrarse en niveles elevados en el ser humano (Fergusson, 1990).

Cadmio (Cd). El cadmio es un metal, suave, dúctil, plateado y lustroso con un peso atómico de 112,4, cuyo número atómico es 48, su densidad es de 8,64 g/cm³, su punto de fusión es de 594,22 K. El cadmio es un metal de transición del grupo II-B de la tabla periódica, casi siempre es divalente en compuestos estables y forma hidróxidos e iones complejos con amoníaco y cianuro e incluso una variedad de complejos de aminas orgánicas, quelatos y complejos de azufre y cloro. El Cd forma precipitados con los carbonatos, arseniatos, fosfatos, oxalatos y ferrocianuros. Es soluble en ácido nítrico y es ampliamente usado en aleaciones. La movilidad y biodisponibilidad del Cd dependen principalmente de sus especies químicas (Bradl *et al*, 2005; Clemens, 1998).

La salinidad y dureza del agua, así como el pH, determinan la especiación del cadmio en aguas naturales. Aunque la especiación del cadmio es similar a la del zinc, el Cd tiene mayor afinidad para formar complejos con Cl⁻. En agua dulce a valores de pH de 6 – 8, Cd²⁺ es la especie predominante, mientras que en agua de mar las especies predominantes son los cloro-complejos de Cd (CdCl⁺, CdCl₂). La especiación de Cd no es afectada por los niveles de ligantes orgánicos normalmente encontrados en aguas naturales. Sin embargo, en aguas contaminadas donde existen altas concentraciones de materia orgánica, la forma en la que el cadmio está presente puede verse afectada (Barbara, 1988).

El único estado de oxidación de importancia para cadmio bajo condiciones ambientales es 2+. El sulfuro de cadmio se forma bajo un amplio rango de pH y bajo condiciones reductoras en la presencia de iones sulfuro. La precipitación del sulfuro puede ser un importante control en la movilidad del cadmio en ambientes reductores. La movilidad del cadmio es menor en condiciones reductoras que en condiciones oxidantes (Bradl *et al*, 2005).

El cadmio es un subproducto de la industria del Zn, el cual es recuperado de los concentrados de Zn provenientes de las fundidoras y refineras. El cadmio se usa principalmente en aleaciones, en galvanoplastia, en pigmentos, en baterías, y para proteger hierro y acero de la corrosión. Aunque su uso ha sido restringido debido a consideraciones ambientales, el Cd puede encontrarse en

productos de consumo humano e incluso es usado como fungicida (Bradl *et al*, 2005).

La toxicidad del cadmio se debe a su afinidad por los grupos sulfhidrilo, compitiendo así con el zinc para poder enlazarse a las enzimas. En los humanos, el Cd interfiere con el metabolismo de Ca, la vitamina D, el colágeno y causa degradación en los huesos como la osteoporosis. La exposición prolongada al Cd afecta los riñones y los pulmones, descenso en el índice de filtración glomerular y enfisema (Barbara, 1988).

Hierro (Fe). El hierro, es el elemento número 26 de la tabla periódica, tiene un peso atómico de 55,845, su punto de fusión lo alcanza a los 1811 K. Tiene una gravedad específica de 7,874 g/cm³, es maleable y se presenta como un metal gris-plateado o como un polvo grisáceo (Clemens, 1998). En la naturaleza existe como Fe²⁺ (Fe ferroso) y Fe³⁺ (Fe férrico). Se puede encontrar en minerales como la pirita, pirrotita, magnetita e ilmenita. En rocas sedimentarias el Fe se presenta generalmente en su forma oxidada, en estado férrico en minerales como hematita, goetita, siderita y magnetita. También puede estar en su forma reducida en rocas sedimentarias (Fe²⁺) en minerales como la pirita y marcasita (Clemens, 1998; Barbara, 1988).

Las reacciones del hierro en los procesos de alteración atmosférica dependen del sistema potencial redox-pH (Eh-pH) del medio ambiente y del estado de oxidación de sus compuestos. Bajos valores de pH y bajos niveles de potencial redox favorecen la forma Fe²⁺, por otra parte, altos valores de pH y altos niveles de potencial redox crean un ambiente estable para Fe³⁺.

En el medio ambiente se liberan cantidades significativas de hierro como resultado de los trabajos de minado. Durante estas operaciones, la pirita (FeS₂), encontrada en las vetas, se expone al aire y al agua, para después ser oxidada mediante reacciones químicas y bacteriológicas. Este proceso libera hierro ferroso y aumenta la acidez en el drenaje de mina, posteriormente el hierro ferroso reacciona con oxígeno para formar hierro férrico el cual se hidroliza para formar (Fe(OH)₃) insoluble. El hidróxido de hierro depositado en la mina y en los arroyos, actúa como depósito para el Fe³⁺ soluble, que posteriormente reacciona con la pirita para generar Fe²⁺ soluble (Cotton, 1999).

En aguas naturales, el hierro puede estar presente en diferentes especies, formando complejos tanto con materiales inorgánicos como con materiales orgánicos, siendo el Fe^{3+} el que forma complejos más estables que el Fe^{2+} . En aguas y ríos el agua contenida en la superficie está en contacto con el oxígeno atmosférico y logra un nivel alto de Eh, además estas aguas pueden contener altas concentraciones de hierro ferroso disuelto.

Las principales variables que afectan la solubilidad del hierro incluyen el pH, potencial redox (Eh) y las concentraciones de CO_2 disuelto (Barbara, 1988).

El Fe al ser inhalado como óxidos de Fe puede causar irritación del tracto respiratorio y el humo de los óxidos ocasiona fiebre caracterizada por un sabor metálico en la boca, garganta seca e irritada, accesos de tos, falta de aliento, debilidad, fatiga, fiebre, frío, sudoraciones y dolor en los músculos y articulaciones. El metal caliente ocasiona quemaduras e irritación en la piel. El polvo puede causar irritación e inflamación en los ojos. La ingesta de grandes cantidades de Fe causa somnolencia, languidecimiento, palidez, incremento en los latidos del corazón e intervalos de respiración, choque, vómito y diarrea sanguinolenta (Pohanish, 2001).

Plomo (Pb). El plomo de número atómico 82, es un metal blanco-azulado, con lustre brillante, es suave, muy maleable, dúctil, pobre conductor de electricidad y resistente a la corrosión. El plomo pertenece al grupo IV-A de la tabla periódica, tiene un peso atómico de 207,2, tiene un punto de fusión de 600,6 K y una densidad de $11,342 \text{ g/cm}^3$. Tiene dos estados de oxidación más comunes en la naturaleza (Pb^{2+} y Pb^{4+}). Los cloruros y bromuros son ligeramente solubles en agua, mientras que los carbonatos e hidróxidos son casi insolubles (Bradl, 2005; Clemens, 1998).

El Pb es el elemento pesado más abundante en la naturaleza. Los minerales más comunes del Pb son galena (PbS), cerusita (PbCO_3) y anglesita (PbSO_4). En los sistemas acuáticos el Pb se compleja tanto con ligantes inorgánicos (vg., OH^- , CO_3^{2-} , Cl^-) como con ligantes orgánicos (vg., ácidos húmico y fúlvico). Aunque para el Pb los estados de oxidación 0, 2+ y 4+, son posibles, el Pb^{4+} únicamente existe bajo condiciones de oxidación extremas, las cuales no son comúnmente encontradas en el medio ambiente. El Pb^{2+} forma compuestos de

baja solubilidad con la mayoría de los aniones presentes en ambientes naturales (vg., CO_3^{2-} , OH^- , S^{2-} , SO_4^{2-} y PO_4^{3-}). Los productos de solubilidad de algunas especies sólidas son $10^{-27.5}$ para PbS , $10^{-13.1}$ para PbCO_3 , $10^{-7.79}$ para PbSO_4 , $10^{-43.5}$ para $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ y $10^{-84.4}$ para $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$. Dependiendo de las condiciones redox y de pH, además de los iones presentes, cualquiera de las especies sólidas de baja solubilidad mencionadas pueden controlar el Pb^{2+} total disuelto en el sistema (Barbara, 1988).

El plomo, es principalmente usado en la producción de baterías, pigmentos, cableado, aleaciones, municiones y aditivos para gasolina (Bradl, 2005).

El plomo es considerado altamente tóxico para los humanos. La forma en la que el Pb entra al cuerpo humano depende de sus formas físicas y químicas. El plomo inorgánico es principalmente inhalado e ingerido, y no sufre ninguna transformación biológica, mientras que el plomo orgánico, como el tetraetil plomo (usado como agente antidetonante en la gasolina), entra en el cuerpo por la inhalación y contacto con la piel y es metabolizado en el hígado. Una vez que el plomo se encuentra en la sangre, es distribuido en tres compartimentos principales, sangre, tejidos suaves (riñones, hígado, cerebro y médula espinal) y tejidos mineralizados (huesos y dientes). Los síntomas típicos de envenenamiento por plomo incluyen náuseas, vómito, dolor abdominal, anorexia, constipación, insomnio, irritabilidad, pérdida de coordinación, alteración de la conducta y en casos más severos, agitación, hiperactividad, confusión y deterioro de la memoria, todo esto conlleva a la persona a entrar en coma y posteriormente la muerte (Bradl, 2005). Otras afecciones que el plomo puede ocasionar es la muerte de cuna, en mujeres embarazadas incrementa el riesgo de sufrir hipertensión y defectos congénitos; glándulas como la tiroides y la suprarrenal pueden deteriorarse en algunos casos, debido a los altos niveles de plomo (Fergusson, 1990).

Zinc (Zn). El zinc de número atómico 30, tiene un color blanco-azulado, su peso atómico es de 65,38 y su punto de fusión es de 692,68 K. El zinc, es un metal divalente y pertenece al grupo II-B de la tabla periódica, su estado de oxidación natural es 2+. Siendo un anfótero en la naturaleza, el zinc forma

compuestos solubles en agua tales como cloratos, cloruros, sulfatos y nitratos, mientras que los óxidos, carbonatos, fosfatos y silicatos son relativamente insolubles en agua (Clemens, 1998).

El estado de oxidación de mayor importancia para el Zn bajo condiciones ambientales es 2+. Sin embargo, la especiación de ligantes que reaccionan con Zn^{2+} (vg., azufre) puede ser afectada por el Eh. La solubilidad del zinc, en aguas naturales está fuertemente afectada por el pH, el potencial redox, la temperatura y la presencia de ligantes complejos (Barbara, 1988).

El zinc, es ampliamente utilizado en la industria automotriz, en cosméticos, ungüentos, antisépticos, pinturas, barnices, caucho y linóleo (Bradl, 2005).

El Zn es esencial tanto para plantas como para animales. En las plantas está involucrado en distintas metaloenzimas, es catalizador en procesos de oxidación y síntesis de proteínas, así como en la transformación de carbohidratos. La deficiencia del Zn en los humanos puede provocar dermatitis, anemias, hipogonadismo y disfunciones neurofisiológicas. Por otro lado, los efectos tóxicos del Zn en humanos son muy raros y solamente se han reportado efectos en la metabolización del colesterol cuando se ingieren altas dosis de zinc (Bradl, 2005).

Métodos de análisis

Para evaluar la concentración total de metales pesados presentes en el agua del río Taxco, se emplearon métodos ópticos de análisis. Los métodos ópticos de análisis miden las interacciones entre la energía radiante y la materia (Bauer, 2000). La energía radiante que se utiliza para estas mediciones puede variar desde los rayos X, pasando por la luz visible, hasta las ondas de radio. El parámetro usado más frecuentemente para caracterizar la energía de radiación es la longitud de onda, que es la distancia entre las crestas adyacentes de la onda de un haz de radiación. La energía de radiación también está formada por fotones o paquetes de energía que pueden interactuar con la materia. La energía de un fotón se relaciona con su longitud de onda de la siguiente manera: $E = hc/\lambda$; donde h es la constante de Planck = $6.63 \cdot 10^{-27}$ ergios·s y c

es la velocidad de la luz, $c= 3 \cdot 10^{10}$ cm/s (Lucas, 2002). Esta ecuación indica que los rayos X, de longitud de onda corta, son relativamente de alta energía y por esta razón pueden producir cambios marcados en la materia, y que las microondas y las ondas de radio tienen longitudes de onda largas y son relativamente de baja energía; los cambios que pueden ocasionar al interactuar con la materia son muy leves y difíciles de detectar. El uso de radiaciones de diferente contenido energético permite determinar las diferentes propiedades de los materiales (Meyers, 2000; Bauer, 2000).

La cantidad de luz absorbida por una muestra es proporcional a la concentración de las especies absorbentes en la muestra. De esta manera existe una relación lineal entre absorbancia y concentración, la cual se define mejor con la ley de Lambert-Beer. La cantidad de luz absorbida o transmitida por una disolución es una función de la concentración de la sustancia y la longitud de onda absorbida por la muestra. La ley de Lambert-Beer se expresa como sigue: $A = \lambda bc$, donde A es la absorbancia, λ es la longitud de onda absorbida por la muestra, b es el coeficiente de absorción y c es la concentración de las especies absorbentes en la celda de absorción.

Los métodos ópticos empleados en este estudio miden la capacidad de un material o de una solución para absorber energía de radiación cuando son excitados por una fuente de energía (Meyers, 2000).

Espectrofotómetro de absorción atómica

La espectroscopia de absorción atómica (EAA), tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada. Esta radiación es absorbida selectivamente por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponda en valor a la energía de los fotones incidentes. La cantidad de fotones absorbidos, está determinada por la ley de Beer, que relaciona ésta pérdida de poder radiante, con la concentración de la especie absorbente y con el espesor de la celda o recipiente que contiene los átomos absorbedores.

En general la instrumentación en absorción atómica contiene una fuente de energía, una celda de muestreo con flama, un monocromador, un detector y un sistema de procesamiento de datos (Manahan, 2005).

Función de las flamas de combustión en la espectroscopia de absorción atómica

Las flamas o llamas de combustión son un medio para convertir analitos disueltos en átomos dentro de la fase vapor, liberados de su entorno químico. Entonces dichos átomos libres son promovidos a estados electrónicos de excitación por uno de dos métodos: absorción de energía térmica adicional desde la misma flama, o absorción de energía radiante que proviene de una fuente externa de radiación.

En la espectroscopia de absorción atómica (EAA), la flama que contiene los átomos libres se convierte en una simple celda. Los átomos libres absorben la radiación enfocada en la celda desde una fuente externa a la flama. La radiación incidente absorbida por los átomos libres al ir desde el estado basal al de excitación, da lugar a los datos analíticos.

En la EAA de flama, la muestra disuelta se introduce en forma de aerosol dentro de la flama, en donde los iones del analito se convierten en átomos libres. Una vez formados, los átomos libres se detectan y se determinan cuantitativamente por EAA (Willard, 1991).

Instrumentación para los métodos espectrométricos de flama

Los componentes básicos de los instrumentos espectrométricos de flama cubren las funciones siguientes: (1) liberar el analito a la flama, (2) inducir las transiciones espectrales que se necesitan para la determinación del analito, (3) aislar las líneas espectrales que se requieren para el análisis, (4) detectar el incremento o el decremento de la intensidad de la radiación en las líneas aisladas y (5) registrar estos datos de intensidad (Skoog, 1994).

Liberación de la muestra

El método de muestreo más popular es la nebulización de una muestra líquida para aportar un flujo aerosólico estacionario dentro de una flama. Un sistema de introducción de muestras líquidas consta de tres componentes: (1) un nebulizador, que dispersa el líquido en gotas pequeñas, (2) un modificador de

aerosol (o cámara de rocío), que saca las gotitas más grandes de la corriente para permitir que sólo pasen las que son menores que cierto tamaño y (3) la flama o el atomizador, que convierte al analito en átomos libres.

Nebulización

En la nebulización, la muestra de la disolución se introduce a través de un orificio en un surtidor a base de gas de alta velocidad, generalmente oxidante. La corriente de la muestra puede confluir con la corriente del gas paralela o perpendicularmente. El líquido es aspirado al capilar de la muestra por la diferencia de presiones generada por el paso de la corriente de gas de alta velocidad por encima del orificio de la muestra. La corriente de líquido comienza a oscilar, produciendo filamentos. Por último estos filamentos se colapsan para formar una nube de gotillas en el modificador aerosólico o cámara de rocío. En dicha cámara las gotitas más grandes se eliminan de la corriente de la muestra con paletas mezcladoras o se dispersan a gotas más pequeñas por bolillas de impacto, o por colisión con superficies de pared. El aerosol final, que ahora es una niebla fina, se combina con la mezcla oxidante/combustible y es transportado hacia el quemador (Willard, 1991).

Atomización

La etapa de atomización debe convertir al analito, dentro del aerosol, en átomos libres en estado basal, para los análisis de EAA.

Atomizadores de flama. En la atomización con flama, una disolución de la muestra se volatiliza en una flama mediante un nebulizador, el cual transforma la disolución de la muestra en un aerosol constituido por diminutas gotitas de líquido. A continuación ocurren una serie de procesos encadenados, estos procesos al final dan como resultado una mezcla de átomos del analito, iones del analito, moléculas de la muestra, moléculas de óxido del analito y con seguridad una variedad de especies moleculares y atómicas que se forman por reacciones entre el combustible, el oxidante y la muestra.

Los atomizadores de llama se emplean para las medidas de emisión, absorción y fluorescencia atómica. Un atomizador de llama consiste en un nebulizador neumático, que transforma la disolución de la muestra en una niebla, o aerosol, que se introduce en un quemador. El tipo más común de nebulizador es el tubo concéntrico, en el que la muestra líquida se aspira a través de un tubo capilar mediante un flujo de gas a alta presión alrededor de la punta del capilar. Debido a la alta velocidad del gas en el extremo del capilar, el líquido se dispersa en finas gotitas de varios tamaños, las cuales se introducen en la llama. También se emplean los nebulizadores de flujo cruzado en los que el gas a alta presión atraviesa el extremo del capilar en ángulo recto. Con frecuencia en este tipo de nebulizador se bombea a través del capilar. En la mayoría de atomizadores, el gas a alta presión es el oxidante, de este modo el aerosol que se forma contiene el oxidante y a continuación se mezcla con el combustible (Figura 3)(Skoog, 1994).

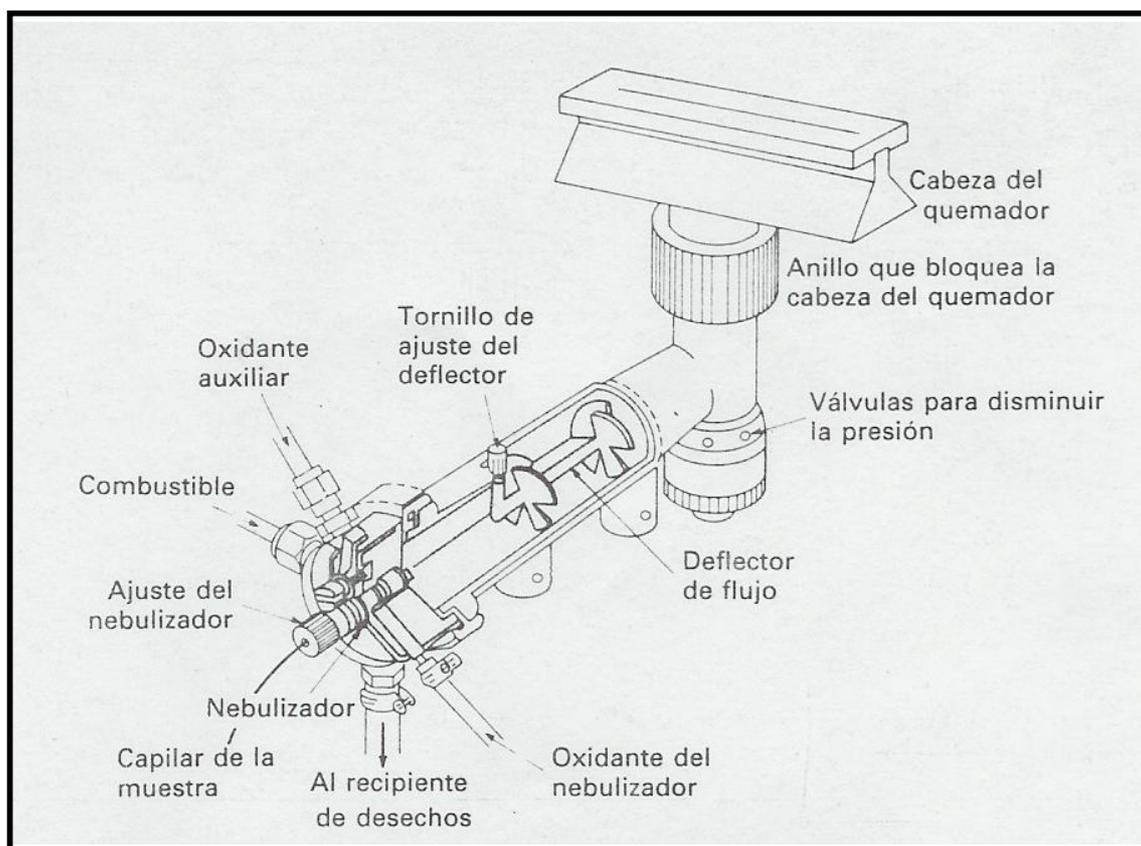


Figura 3. Quemador de flujo laminar. (Skoog, 1994).

Atomizadores electrotérmicos. Los atomizadores electrotérmicos proporcionan en general una mayor sensibilidad debido a que toda la muestra se atomiza en un periodo muy breve y el tiempo promedio de residencia de los átomos en el camino óptico es de un segundo o más. En los atomizadores electrotérmicos se evaporan primero unos pocos microlitros de muestra a baja temperatura y luego se calcinan a una temperatura algo más alta en un tubo o cubeta de grafito calentado eléctricamente. Después de la calcinación, la corriente se incrementa a varios cientos de amperios, lo que eleva la temperatura aproximadamente a unos 2000 ó 3000 °C, la atomización de la muestra se produce en un periodo de unos pocos milisegundos a segundos. En estas condiciones, se mide la absorción de las partículas atomizadas en la zona situada inmediatamente por encima de la superficie calentada (Skoog, 1994).

La atomización electrotérmica tiene lugar en un tubo cilíndrico de grafito abierto por ambos extremos, y que tiene un orificio central para la introducción de la muestra mediante una micro pipeta. Con frecuencia la denominada plataforma de L'vov se utiliza en los hornos de grafito, dicha plataforma también es de grafito y se encuentra debajo del orificio de entrada de la muestra. La muestra se evapora y calcina sobre la plataforma de manera usual. Sin embargo, cuando la temperatura se eleva con rapidez, la atomización no se completa por que la muestra no está el suficiente tiempo en contacto directo con la pared del horno. En consecuencia, la atomización tiene lugar en un medio en el cual no se produce un cambio tan rápido de temperatura y de este modo se obtienen picos más reproducibles.

Un aparato de atomización electrotérmica consta de tres componentes: la cabeza atomizadora, la fuente de alimentación y los controles para el suministro de gas inerte. La cabeza atomizadora reemplaza al conjunto nebulizador-quemador en el espectrómetro de absorción atómica por flama. La fuente de alimentación suministra la corriente de operación al voltaje propio de la cabeza atomizadora. El control por computadora de la cámara atomizadora asegura la producibilidad en las condiciones de calentamiento, lo que es necesario para el análisis. La unidad de control de gas mide y controla el flujo de un gas inerte, dentro de la cabeza atomizadora y en su rededor, durante el análisis. Este ambiente inerte evita la destrucción del grafito a temperaturas elevadas por oxidación con el aire (Skoog, 1994; Willard, 1991).

Proceso de absorción atómica

El fenómeno que estudia la EAA puede dividirse en dos procesos principales: (1) la producción de átomos libres de la muestra y (2) la absorción de la radiación de una fuente externa por estos átomos.

La técnica de absorción atómica en flama parte de una muestra en forma líquida la cual es aspirada a través de un tubo capilar y conducida a un nebulizador donde ésta se desintegra y forma un rocío o pequeñas gotas de líquido.

Las gotas formadas son conducidas a una flama, donde se produce una serie de eventos que originan la formación de átomos. Estos átomos absorben cualitativamente la radiación emitida por la lámpara y la cantidad de radiación absorbida está en función de su concentración.

La señal de la lámpara una vez que pasa por la flama llega a un monocromador, que tiene como finalidad el discriminar todas las señales que acompañan la línea de interés. Esta señal de radiación electromagnética llega aun detector o transductor y pasa a un amplificador y por último a un sistema de lectura.

Como se ha mencionado, la etapa de atomización debe convertir al analito, dentro del aerosol, en átomos libres en estado basal.

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, de lo contrario, la radiación pasa por la flama sin disminuir la potencia de haz como efecto de los átomos contenidos en ella.

En la flama, la absorción de radiación por átomos libres (aquellos átomos del analito desprovistos de su ambiente químico pero no ionizados) involucra una transición de estos átomos desde el altamente poblado estado basal hasta un estado electrónico excitado.

Un átomo absorbe luz a discretas longitudes de onda. Para medir esta estrecha absorción de luz con máxima sensibilidad es necesario usar una fuente de luz que emita longitudes de onda específicas, las cuales puedan ser absorbidas

por el átomo. En otras palabras, la luz emitida por la lámpara debe ser exactamente la luz requerida para el análisis en particular. Para satisfacer este criterio, los átomos del elemento a analizar están presentes en la lámpara.

La fuente más común para las medidas de absorción atómica es la lámpara de cátodo hueco (Meyers, 2000; Manahan, 2005; Willard, 1991).

Espectrofotometría de Absorción Atómica por horno de grafito

El espectrofotómetro de absorción atómica equipado con un horno de grafito o con un atomizador de calentamiento eléctrico, en lugar de un quemador, ofrece la mejor opción en cuanto a sensibilidad y un límite de detección inferior comparado al método de la flama. La sensibilidad en el horno de grafito, es una cualidad ideal para el análisis de metales traza. Muchos elementos pueden ser determinados a concentraciones tan bajas como 1,0 µg/l. Por lo que el tamaño de las muestras es de microlitros.

El principio del espectrofotómetro de absorción atómica por horno de grafito está basado en el mismo principio que el espectrofotómetro por absorción atómica con flama. En esta técnica, un tubo de grafito se localiza en el compartimiento de muestra del espectrofotómetro de absorción atómica, donde atraviesa el haz de luz. Un volumen pequeño de la solución de la muestra se coloca dentro del tubo, el cual está localizado al centro del orificio. El tubo se calienta hasta que la muestra se disocia en átomos. Posteriormente estos átomos absorben radiación monocromática, cuando los átomos son creados y difundidos a través del tubo, se crean señales en forma de pico, correspondientes al aumento y disminución de las absorbencias. El área del pico se usa como signo analítico para la cuantificación (Bauer, 2000; Meyers, 2000; Manahan, 2005).

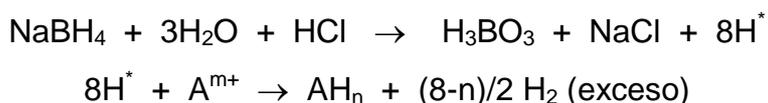
Espectrofotometría de Absorción Atómica por generación de hidruros.

En la absorción atómica por generación de hidruros las muestras se hacen reaccionar con un agente reductor (comúnmente boro hidruro de sodio) dentro de un recipiente externo. Los productos gaseosos de la reacción son

transportados hacia una celda de muestreo en dirección a la trayectoria de luz del espectrofotómetro de absorción atómica. Los productos gaseosos de la reacción no son átomos libres sino hidruros volátiles, estas especies moleculares no son capaces de causar absorción atómica. Para disociar el gas hidruro en átomos libres, la celda de la muestra debe calentarse.

En algunos sistemas, la celda de absorción se monta sobre el quemador del espectrofotómetro de absorción atómica y la celda es calentada por una flama de aire-acetileno. En otros sistemas, la celda es calentada eléctricamente. En cualquier caso, dentro de la celda de calentamiento el gas hidruro es disociado a átomos libres, y la absorción atómica asciende o desciende de acuerdo con la creación y liberación de los átomos provenientes de la celda de absorción. La lectura más alta de absorción se toma como señal analítica (Skoog, 1994; Willard, 1991).

La técnica de EAA-GH consta de tres etapas fundamentales: la generación y volatilización del hidruro, la transferencia del mismo y su posterior atomización en el espectrómetro de AA. La generación del hidruro se consigue tratando la muestra que contiene arsénico con una disolución de boro hidruro de sodio (NaBH_4) en medio ácido (HCl).



Donde H^* es el hidrógeno nascente, "A" es el elemento formador de hidruro y "m" su estado de oxidación (que puede o no coincidir con "n", el índice de coordinación).

Entre los sistemas de generación de hidruros, los que combinan las ventajas de la inyección en flujo, con la posterior detección por espectrometría por absorción atómica, es de las más usadas en la determinación total de arsénico, por que es sensible, rápido y minimiza los efectos de las interferencias, si se le compara con los métodos tradicionales, además resulta ser más cómodo de usar y apropiado para el análisis.

Los métodos continuos de análisis (Flow Injection Analysis) se refieren a aquellos procesos analíticos en los que la concentración del analito es medida

Capítulo 2. Marco Teórico

sin interrumpir un flujo de líquido o gas. La mezcla del hidruro con el resto de la dilución es bombeada a un separador gas-líquido, donde una corriente de gas inerte (generalmente argón) impulsa el hidruro hacia la llama liberándolo de la disolución. La atomización del hidruro se realiza en un tubo de cuarzo en forma de "T" que, calentado por la llama, aumenta el tiempo de residencia de los átomos y evita la dispersión de los mismos y el ruido de fondo. La señal generada se almacena en un registrador de tipo continuo (Meyers, 2000).

Capítulo 3. Área de estudio

Descripción del área de estudio

Taxco, Gro., se encuentra localizado al norte del estado de Guerrero a 150 km al suroeste de la Ciudad de México y delimitado por los paralelos 18° 41' y 18° 21' de latitud norte; y los meridianos 99° 25' y 99° 46' de longitud oeste.

El municipio de Taxco 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 Cuellar; al sur con los municipios Buenavista de Cuellar, Iguala de la Independencia, Teloloapan e Ixcateopan de Cuauhtémoc; al oeste con los municipios de Ixcateopan de Cuauhtémoc, Pedro Ascencio Alquisiras y Tetipac (Fuente: www.guerrero.gob.mx).

El clima predominante en Taxco de Alarcón es cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (INEGI, 1999). La época de estiaje se extiende desde diciembre hasta finales de mayo, la época de lluvias comprende el periodo de junio a septiembre y el de post-lluvias de octubre a diciembre (CONAGUA, 2001). La vegetación es predominantemente selva baja caducifolia, donde los árboles son de altura baja (menos de 15 m).

Geológicamente el área de estudio se localiza en el terreno Mixteco (Figura 4), dentro de la provincia llamada Plataforma Guerrero-Morelos (SECOFI, 1999), la cual de acuerdo con Campa y Ramírez (1979) se compone de cinco unidades litoestratigráficas diferentes (Esquisto Taxco, Roca Verde Taxco Viejo, Formación Morelos, Formación Mexcala y Formación Balsas) compuestas de diversos minerales originados de acuerdo a su historia geológica, depósitos vulcanosedimentarios y sedimentos marinos y continentales (Figura 5).

Las principales corrientes hidrológicas son el río Taxco y Temixco, así como los arroyos Tecapulco, Granados, San Juan, Plan de Campos, Las Huertas y Acatlán.

El río Taxco se origina al noroeste en el poblado homónimo, de la región de Taxco de Alarcón; es alimentado por varios afluentes (San Juan, Los

Capítulo 3. Área de estudio

Aguacates, Cacalotenango y Temixco) y se extiende hasta la ciudad de Iguala ubicada a unos 100 km hacia el sur (Figura 7). A lo largo del trayecto del río Taxco se encuentran los jales El fraile, Guerrero, además de las minas el Solar y Guerrero, siendo las únicas minas activas en el área y que explotan la veta El Cobre (Figura 8).

En las vetas explotadas por lo general se presentan los siguientes minerales:

- Epídota, ilvaíta, actinolita y tremolita.
- Minerales argentíferos (polibasita, proustita, pirargirita y plata nativa).
- Sulfuros (galena, esfalerita, pirita y calcopirita).
- Magnetita y especuladita.

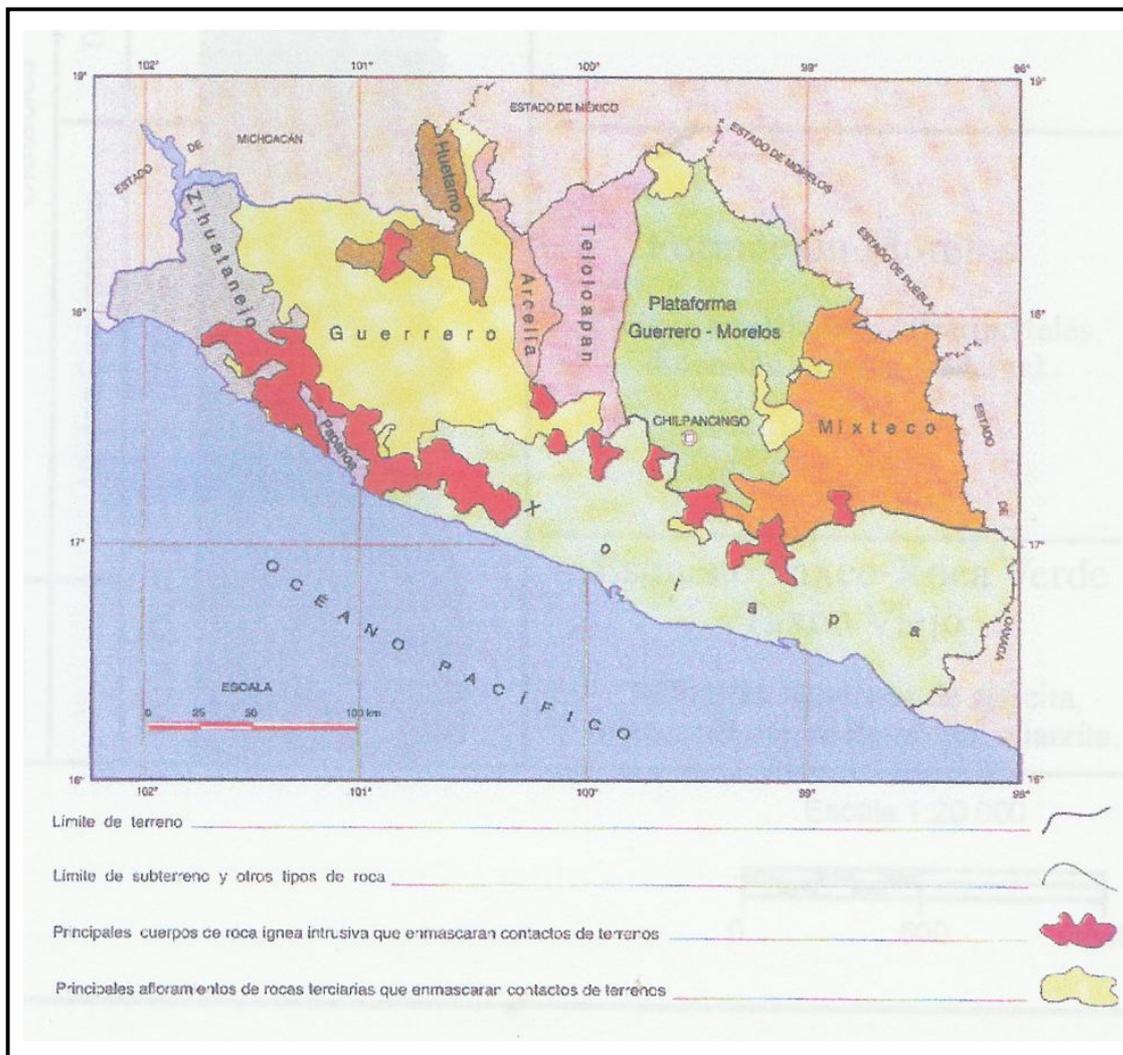


Figura 4. Terrenos tectonoestratigráficos del estado de Guerrero (*Monografía Geológica Minera del Estado de Guerrero. SECOFI, 1991*).

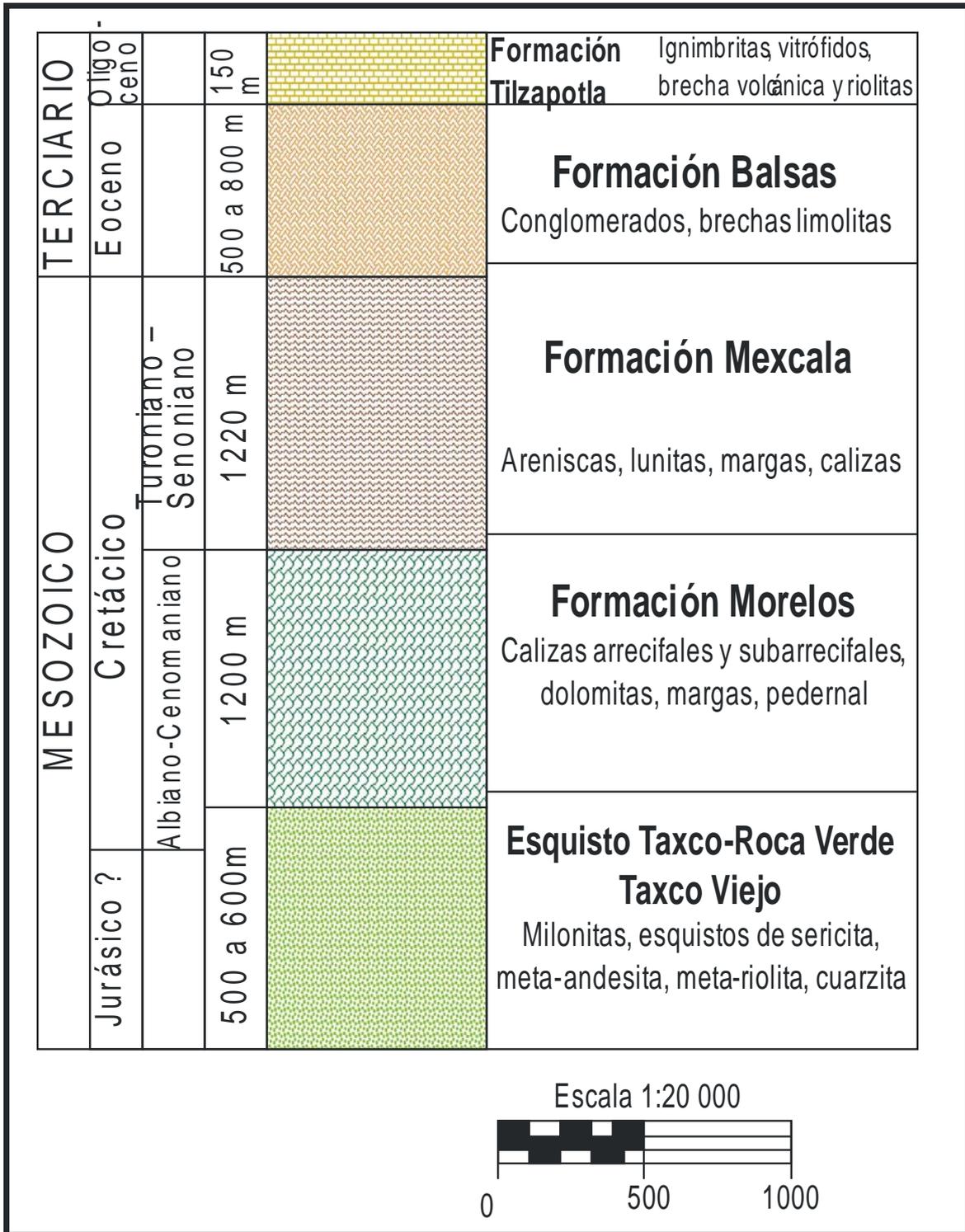


Figura 5. Columna estratigráfica, tomada de Campa y Ramírez (1979).

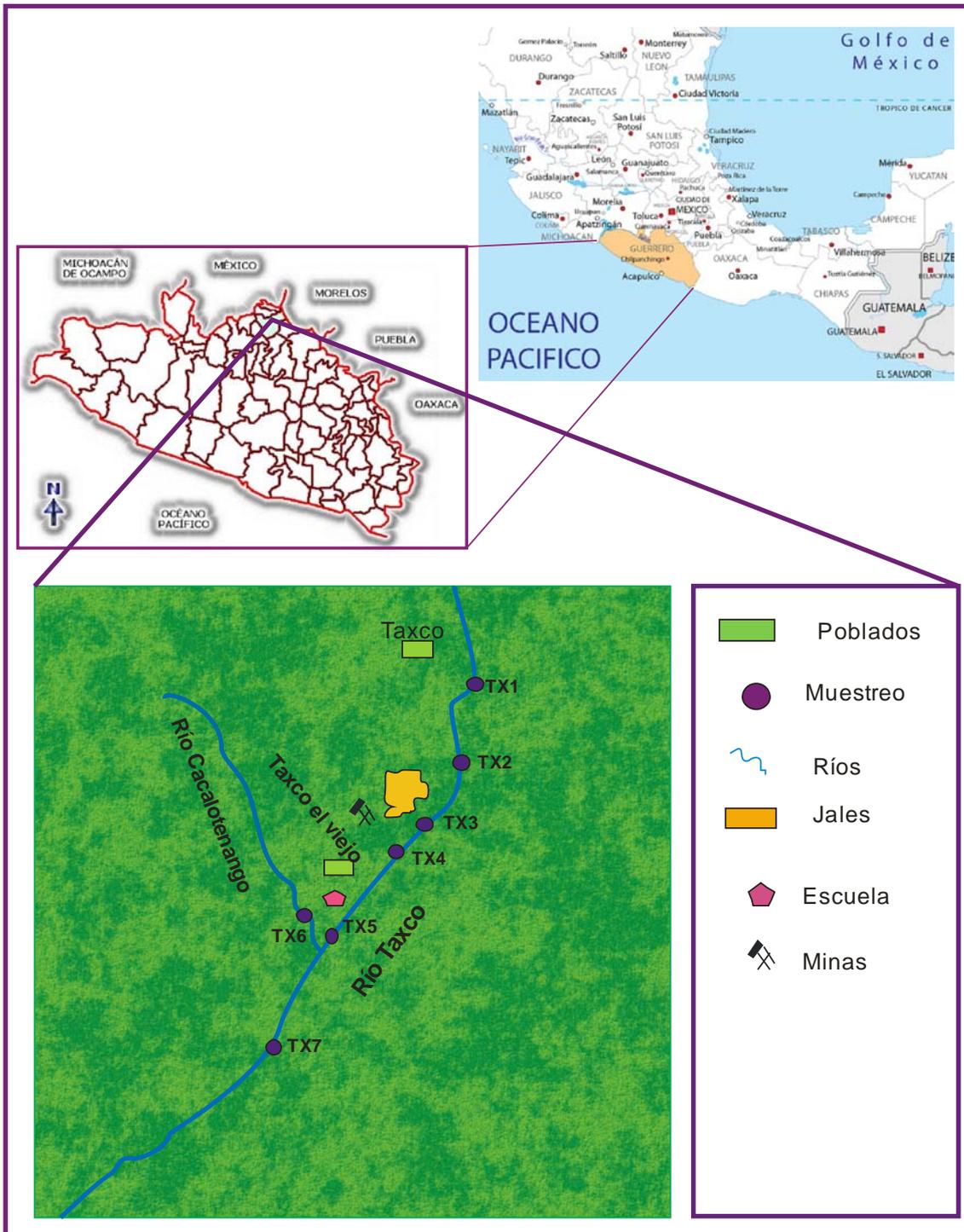


Figura 6. Ubicación de los sitios de muestreo. En este mapa se señalan los puntos de muestreo a lo largo del cauce del río Taxco.

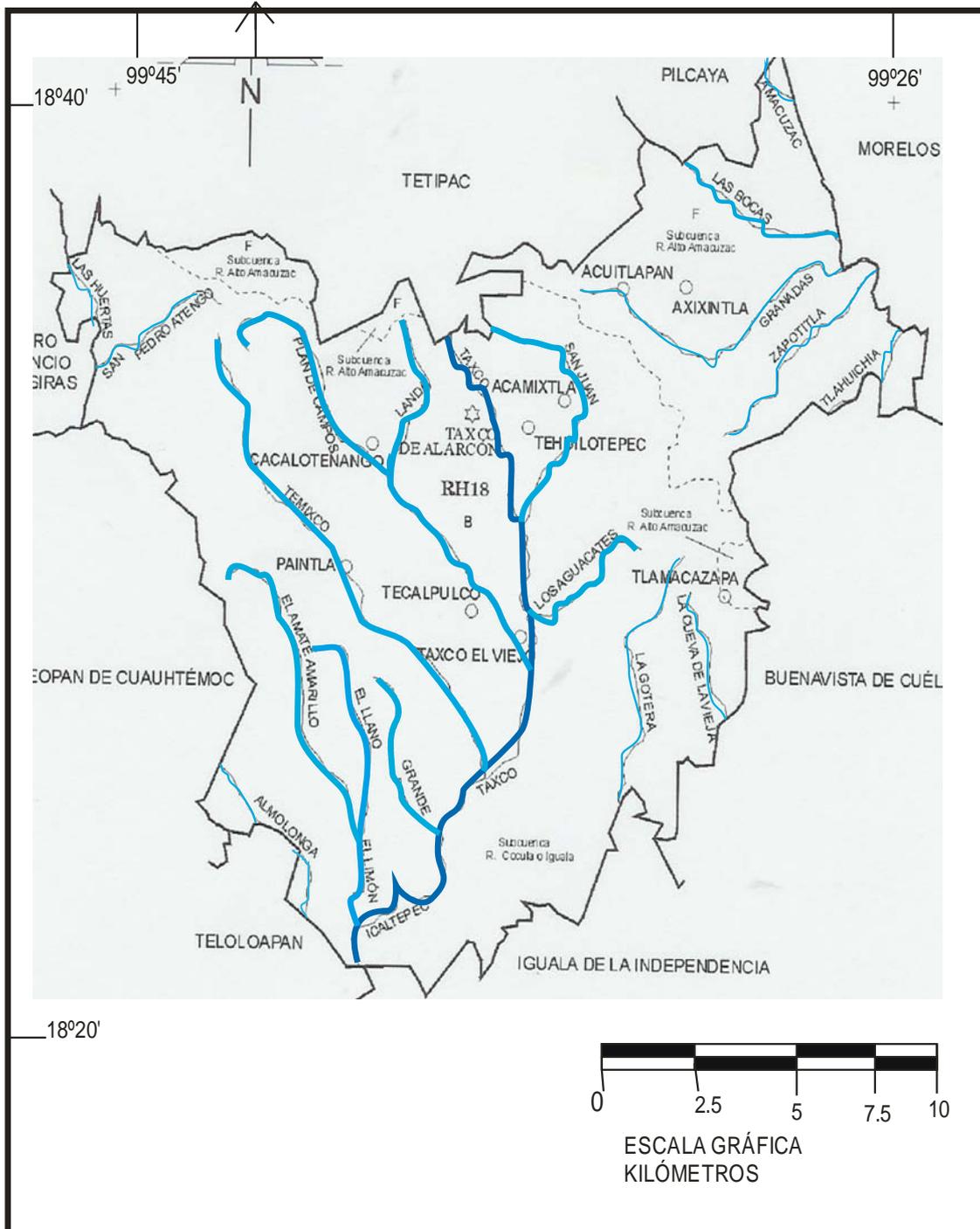


Figura 7. Mapa hidrográfico del municipio de Taxco. (INEGI, 1995)

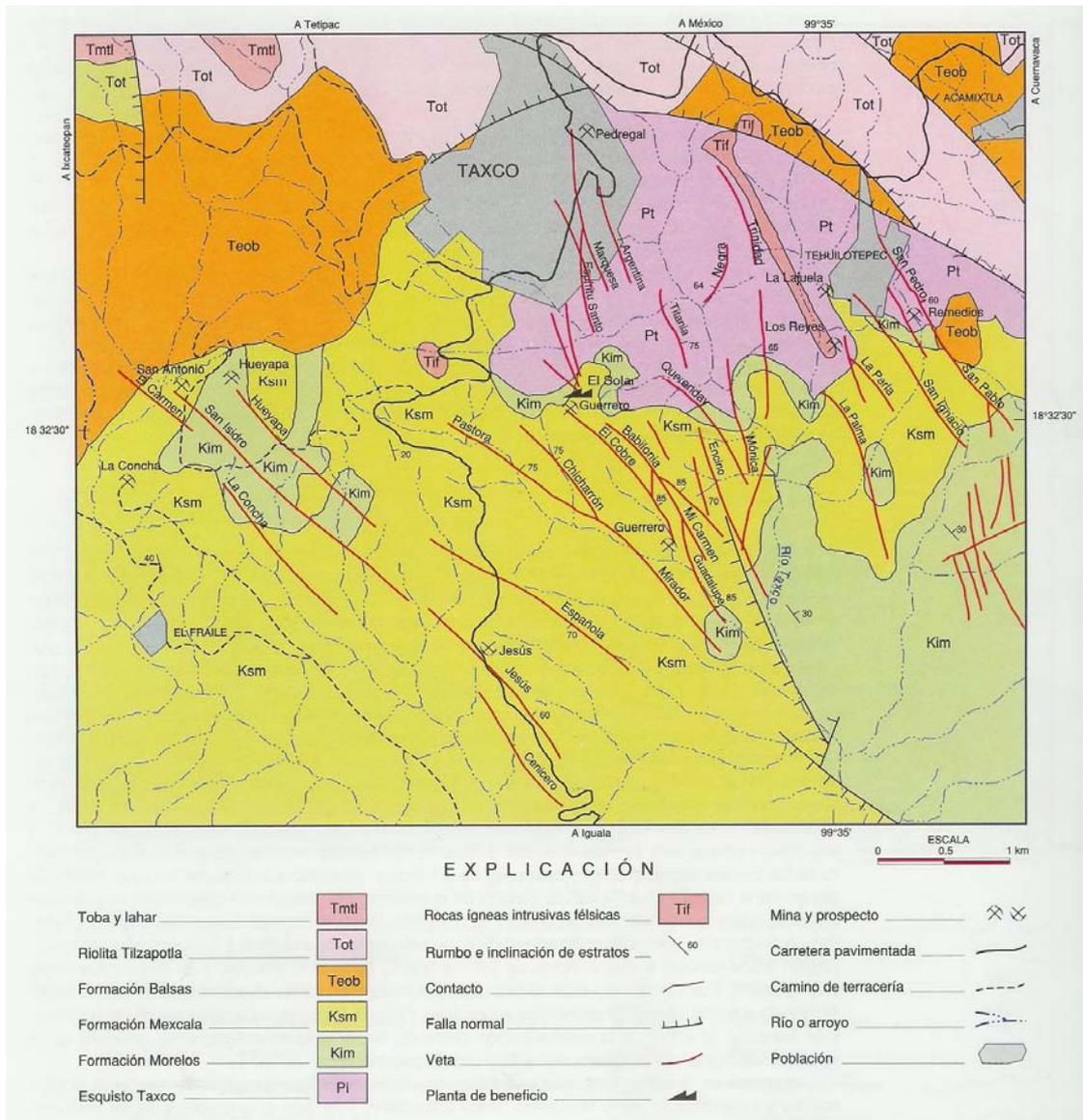


Figura 8. Distrito minero de Taxco (SECOFI, 1999).

Capítulo 4. Metodología

Recolección y almacenamiento de sedimentos y agua

Con el fin de evaluar el contenido de metales en los sedimentos y el agua del río Taxco provenientes de residuos mineros, industriales y afluentes urbanos, se consideró pertinente la recolección de muestras a lo largo del cauce del río en zonas no influenciadas por las actividades mineras, en zonas con descargas de afluentes urbanos y en zonas cercanas a los depósitos de jales y minas.

Se realizaron dos muestreos, uno en época de estiaje y otro en época de lluvias, esto con el fin de determinar los cambios en concentración de acuerdo con las variaciones en cada época.

En la figura 6, se presenta la ubicación de los sitios de muestreo.

Las muestras TX1 y TX7, se obtuvieron con el objeto de representar las zonas no impactadas por el aporte de jales mineros. Las muestras TX3 se encuentran en una zona impactada por el aporte de jales mineros. Por otra parte las muestras TX2 y TX4 están influenciadas por las descargas de afluentes urbanos. La muestra TX6 se obtuvo con el fin de determinar la influencia que el río Cacalotenango ejerce sobre los afluentes del río Taxco. Además la muestra TX5 se localiza justo antes de la unión con el río Cacalotenango.

Tomando en cuenta las variaciones aleatorias, tanto en los procedimientos analíticos como en la presencia de componentes en el lugar de la toma de la muestra, las muestras de agua fueron tomadas por triplicado.

Las muestras de agua fueron colectadas de acuerdo a la APHA (2005). Los envases utilizados se lavaron y se enjuagaron varias veces con agua potable, después se lavaron con agua destilada y con HCl al 10 % y posteriormente con agua destilada para finalmente dejarlos secar. Los envases empleados eran de plástico con tapa y contratapa.

Para conservar las muestras se acidificaron con ácido nítrico hasta un pH inferior a 2,0 con la finalidad de reducir al máximo la precipitación de los cationes de interés, así como la adsorción en las paredes del envase. Finalmente las muestras fueron trasladadas al laboratorio en una nevera a una temperatura de 4 °C, con la finalidad de evitar posibles alteraciones químicas de las mismas durante el tiempo que transcurre entre la toma de muestra y su análisis.

Los sedimentos fueron colectados de acuerdo con Loring y Rantala (1992). Se tomaron los primeros 5 cm de la columna de sedimentos con ayuda de una pala plástica y se recolectaron en bolsas de plástico. Para tomar las muestras se marcó un punto central y se recolectaron los sedimentos alrededor de éste para obtener una muestra radial, obteniéndose un total de cuatro núcleos para cada estación de muestreo.

Determinaciones de parámetros fisicoquímicos y especies mayores

Determinaciones “in situ”

Para que los resultados tengan una evaluación de la naturaleza real de la muestra, se realizaron simultáneamente a la toma de la muestra los siguientes parámetros: temperatura, pH, Eh y conductividad. Para determinar el pH de las muestras se empleó un potenciómetro marca ORION, calibrándolo con soluciones buffer de pH = 4, 7 y 10. Para medir la conductividad de las muestras se calibró un conductímetro marca conductronic PC-18 con una solución estándar de 1990 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Determinación de especies mayores

Una vez en el laboratorio las muestras colectadas se presentaron en dos grupos, el primero lo formaban las muestras acidificadas con ácido nítrico (empleadas para determinar el contenido de metales totales) y el segundo grupo no contenía ácido nítrico. Las muestras sin acidificar se filtraron y se dividieron en dos partes; las muestras filtradas acidificadas con ácido nítrico

(empleadas para determinar metales disueltos) y las muestras filtradas sin acidificar. Posteriormente se realizaron los análisis de especies mayores de acuerdo a la APHA (2005) y Armienta et al (1987). Se determinó alcalinidad (CO_3^{2-} , HCO_3^-) mediante el método de titulación, boro mediante el método del carmín, dureza (Ca, Mg) mediante el método titulométrico de EDTA, cloruros y fluoruros se determinaron por el método potenciométrico, sodio y potasio mediante espectroscopia de absorción atómica, sílice mediante el método del molibdosilicato y sulfatos mediante el método turbidimétrico.

Cuantificación de metales en agua y sedimentos

Para la determinación de metales en agua, se analizaron las muestras de agua filtradas y acidificadas así como las muestras acidificadas sin filtrar, mediante Espectroscopia de Absorción Atómica.

Digestión total

Las muestras de sedimentos colectadas de los distintos puntos de muestreo fueron secadas a temperatura ambiente y tamizadas en una malla de 0,063 mm, para posteriormente realizar la digestión ácida total de acuerdo a Siaka et al (1998), para la cual se pesaron 0,5 g de muestra seca y se agregaron 10 mL de agua regia inversa (HNO_3 : HCl 3:1 v/v), para posteriormente llevar a cabo la digestión en un horno de microondas marca CEM modelo MDS2000 bajo las siguientes condiciones: tiempo 45 min., fan cero (0), presión 90 psi., el residuo obtenido se llevó a 50 mL con agua desionizada, se filtró y se analizó por EAA. Se realizaron tres réplicas para cada una de las muestras.

Cuantificación total de metales.

La cuantificación de Arsénico en agua y sedimentos se llevó a cabo mediante espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros, para lo cual se empleó el espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo 2380 y se usó como combustible una mezcla de aire-acetileno.

La generación del hidruro se consiguió tratando la muestra con una disolución de boro hidruro de sodio (NaBH₄) en medio ácido (HCl).

Para la cuantificación de Plomo en agua se empleó el espectrofotómetro de absorción atómica por horno de grafito marca Perkin Elmer modelo HGA 850 y para la determinación Cadmio, Hierro, Plomo (en sedimentos) y Zinc en agua y sedimentos se empleó el espectrofotómetro de absorción atómica por flama AAnalyst 100 marca Perkin Elmer.

Control de calidad

Durante el análisis de metales totales se llevó a cabo el control de calidad, empleando como suelos estándar los suelos patrón Montana Highly Elevated Trace Element Concentration (clase NIST No. 2710), Montana Moderated Elevated Trace Element Concentration (clase NIST No. 2711) y Búfalo River Sediment (clase NIST No. 8704). Los cuales fueron tratados de manera similar a la descrita en el apartado de digestión total. En las siguientes tablas se muestran las concentraciones certificadas de los elementos de interés, así como de algunos de los elementos que contienen los suelos estándar mencionados.

Bufalo River Sediment	
Elemento	Conc. Certificada (mg/kg)
Al (%)	6,10 ± 0,18
Fe (%)	3,97 ± 0,10
Sb	3,07 ± 0,32
As	17
Cd	2,94 ± 0,29
Cr	121,9 ± 3,8
Co	13,57 ± 0,43
Pb	150 ± 17
Ni	42,9 ± 3,7
V	94,6 ± 4,0
Zn	408 ± 15

Tabla 3. Concentraciones certificadas de los elementos presentes en el estándar Buffalo River Sediment. Los elementos en rojo corresponden a los analizados en este estudio.

Montana Soil Highly Elevated Trace Element Concentration	
Elemento	Conc. Certificada (mg/Kg)
Al (%)	6,44 ± 0,08
Fe (%)	3,38 ± 0,10
Sb	38,4 ± 3,0
As	626 ± 38
Cd	21,8 ± 0,2
Cu	2950 ± 130
Pb	5532 ± 80
Ni	14,3 ± 1,0
V	76,6 ± 2,3
Zn	6952 ± 91

Tabla 4. Concentraciones certificadas de los elementos presentes en el estándar Montana Soil clase NIST (No. 2710). Los elementos en rojo corresponden a los analizados en este estudio.

Montana Soil Moderated Elevated Trace Element Concentration	
Elemento	Conc. Certificada (µg/g)
Al (%)	6,53 ± 0,09
Fe (%)	2,89 ± 0,06
Sb	19,4 ± 1,8
As	105 ± 8
Cd	41,70 ± 0,25
Cu	114 ± 2
Pb	1162 ± 31
Ni	20,6 ± 1,1
V	81,6 ± 2,9
Zn	350,4 ± 4,8

Tabla 5. Concentraciones certificadas de los elementos presentes en el estándar Montana Soil clase NIST (No. 2711). Los elementos en rojo corresponden a los analizados en este estudio.

Los resultados obtenidos del control de calidad se presentan en la parte de anexos.

Capítulo 5. Resultados y Discusión

Muestreo

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos de las determinaciones realizadas durante el muestreo.

Muestra	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Conductividad (μS/cm)	Coordenadas
TX1	15,0	7,13	214	190	N: 18°33,944' ; O: 99° 36,019'
TX3	17,9	6,66	297	1663	N: 18°31,647' ; O: 99°35,371'
TX4	17,1	7,27	252	918	N: 18°31,499' ; O: 99°35,180'
TX5	16,4	7,79	260	446	N: 18°28,428' ; O: 99°34,761'
TX6	17,7	7,91	214	605	N: 18°27,956' ; O: 99°34,819'
TX7	16,7	7,78	265	612	N: 18°27,230' ; O: 99°35,235'

Tabla 6. Resultado de las determinaciones realizadas *in situ* en el primer muestreo (época de lluvias).

Muestra	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Conductividad (μS/cm)	Coordenadas
TX1	18,5	7,00	123	990	N: 18°33,944' ; O: 99° 36,019'
TX2	19,3	7,64	271	1848	N: 18°33,017' ; O: 99°35,727'
TX3	17,8	2,69	566	4200	N: 18°31,645' ; O: 99°35,370'
TX4	16,1	7,41	194	1900	N: 18°31,499' ; O: 99°35,180'
TX5	16,1	7,64	264	1560	N: 18°28,436' ; O: 99°34,740'
TX6	17,0	7,57	195	896	N: 18°28,428' ; O: 99°34,797'
TX7	27,6	7,99	246	1739	N: 18°26,938' ; O: 99°34,949'

Tabla 7. Resultados de las determinaciones realizadas *in situ* en el segundo muestreo (época de estiaje).

Al realizar la toma de muestras, se observó que en las muestras TX1, TX5, TX6 y TX7 el color del agua era gris, los valores de pH registrados tanto en época de lluvias como en estiaje oscilan entre 7,0 y 7,9, además se observó que la afluencia en el cauce del río era menor en época de estiaje que en época de lluvias. Los valores de conductividad registrados en época de lluvias son más bajos que los valores registrados en época de estiaje, lo que indica que en época de lluvias no había un alto contenido de iones disueltos que permitieran la conductividad en el agua. Los altos valores de conductividad registrados para los puntos TX1, TX5, TX6 y TX7 en época de estiaje reflejan la influencia que la época de estiaje ejerce sobre los afluentes del río, la cual permite la concentración de iones disueltos en el cauce del río.

Capítulo 5. Resultados y Discusión

Por otra parte en el punto de muestreo TX3, el color del agua era naranja, el valor de pH medido en el campo en época de lluvias y de estiaje fue de 6,6 y 2,69 respectivamente, mientras que el valor de conductividad registrado fue de 1663 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 4200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estas características nos indican que podría haber un alto contenido de metales en este punto. Para el punto TX4, el pH registrado en el campo en época de lluvias y estiaje fue de 7,27 y 7,41 respectivamente, mientras que los valores de conductividad fueron de 918 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que muestra que hay un contenido considerable de concentración de iones disueltos aunque la presencia de metales es menor que en el punto anterior. Finalmente en el punto de muestreo TX2 el valor de pH y de conductividad registrados fueron de 7,64 y 1848 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, además, este punto se caracteriza por recibir grandes cantidades de afluentes urbanos.

pH, conductividad y especies mayores en agua

Los resultados del análisis en el laboratorio se muestran a continuación.

Muestra	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Boro	SiO_2
TX1	8,02	180	nd ²	73,3	23,5	8,0	0,14	11,13	3,67	19,84	nd	37,70
TX3	7,17	1634	nd	48,4	924,5	16,0	0,97	30,87	2,90	244,05	nd	29,57
TX4	7,91	887	7,2	137,8	277,2	28,0	0,55	35,56	6,60	109,13	nd	31,37
TX5	8,34	438	18,7	161,3	55,2	4,5	0,18	9,95	1,82	73,91	nd	26,45
TX6	8,30	600	20,2	173,0	108,2	10,2	0,24	16,56	3,01	96,73	nd	24,65
TX7	8,24	607	11,5	193,6	108,6	9,0	0,26	16,11	2,79	97,72	nd	25,80

Tabla 8. Resultados de pH, conductividad y especies mayores obtenidos a partir de las muestras filtradas sin acidificar provenientes del primer muestreo (época de lluvias). Las concentraciones se expresan en mg/L.

Muestra	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Boro	SiO_2
TX1	8,16	842	16,7	332,9	41,6	61,9	0,23	81,65	16,72	47,76	nd	57,38
TX2	8,32	1720	72,5	598,0	111,4	151,3	0,27	165,12	33,64	94,18	1,49	48,04
TX3	2,85	3970	nd	nd	2497,3	14,8	0,33	75,87	5,93	483,46	1,10	38,30
TX4	8,18	1703	31,9	261,6	466,6	104,0	0,73	118,29	21,93	146,96	1,04	27,96
TX5	8,04	1801	16,2	231,2	660,7	84,7	0,73	119,71	16,89	206,41	1,24	27,17
TX6	8,26	810	23,0	282,0	172,9	11,0	0,28	28,55	3,01	143,62	nd	20,39
TX7	7,94	1758	7,3	254,7	571,4	87,9	0,70	108,51	17,42	199,06	1,19	27,39

Tabla 9. Resultados de pH, conductividad y especies mayores obtenidos a partir de las muestras filtradas sin acidificar provenientes del segundo muestreo (época de estiaje). Las concentraciones se expresan en mg/L.

² Concentración no detectable < 0,50 mg/L.

Como se observa en la tabla 8, los valores de pH se encuentran por arriba de 8, a excepción de las muestras TX3 y TX4 que tienen valores de 7,17 y 7,91 respectivamente, además de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000 y a la NOM-001-ECOL-1996, los valores de pH de las muestras se encuentran dentro de los límites permisibles, lo que indica que las muestras están dentro de un intervalo normal de valores de pH. Por otra parte en la tabla 9, los valores de pH se encuentran alrededor de 8, a excepción de la muestra TX3 (pH = 2,85), la cual se encuentra fuera de los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000 y a la NOM-001-ECOL-1996.

Por otra parte en la tabla 8 también se muestran los valores de conductividad de cada una de las muestras, ante lo cual podemos decir que las muestras que registran un valor más alto de conductividad son TX3 y TX4 que registran 1634 y 887 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente.

Sin embargo en la tabla 9 se observa que la muestra TX3 es la que presenta el valor más alto de conductividad (3970 $\mu\text{S}/\text{cm}$) para el muestreo en época de estiaje, lo cual nos indica una mayor presencia de iones disueltos en el agua.

Para los valores de alcalinidad de las muestras se reportaron principalmente dos especies HCO_3^- y CO_3^{2-} , de acuerdo a los valores obtenidos se observa que las muestras con valor de pH cercano o alrededor de 8 muestran una concentración más alta para bicarbonato y carbonato que para las muestras con pH menor, así para la muestras TX3, de ambos muestreos, la concentración de bicarbonato es muy pequeña en comparación con las demás muestras, se considera entonces que la baja alcalinidad de las muestras se debe al bajo contenido de ácido carbónico, bicarbonato y carbonato puesto que la predominancia de estas especies depende del pH de la disolución.

La determinación de sulfatos en el agua es importante debido a sus efectos catárticos en los humanos cuando está presente en cantidades excesivas y el valor límite máximo recomendado es de 400 mg/L, de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000. Como se puede ver en la tabla 8, la muestra TX3 (época de lluvias) y las muestras TX3, TX4, TX5 y TX7 presentadas en la tabla 9 (época de estiaje), muestran los valores más altos para esta determinación, lo que

indica que el agua en estos puntos no puede ser utilizada para los abastecimientos de agua públicos e industriales.

Para el Cl^- el valor límite permisible de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2000, es de 250 mg/L. Como se puede observar en las tablas 8 y 9, ninguna muestra rebasa este valor, además se puede ver que las muestras TX1, TX5 y TX7 del primer muestreo (tabla 8) y las muestras TX3 y TX6 del segundo muestreo (tabla 9), presentan los valores más bajos de concentración de cloruros.

La cuantificación de fluoruro (F^-) es importante ya que su deficiencia o exceso en el agua potable es perjudicial para la salud y considerando que el valor límite permisible es de 1,5 mg/L, ninguna de las muestras rebasa dicho valor.

El contenido de sodio y potasio como metales alcalinos es referido a la salinidad del agua, y el contenido que presentan en las muestras analizadas no presenta un peligro considerable para la salud.

La determinación del silicio se reporta como concentraciones de sílice como se puede observar en las tablas 8 y 9, los valores obtenidos indican la presencia de sílice en las aguas debida a la degradación de minerales silícicos, los valores obtenidos no difieren entre sí, lo que indica que probablemente existe la presencia del mismo tipo de minerales, además el tipo de mineral y el pH del agua son los factores que más afectan la solubilidad de la sílice, por lo que se puede considerar que no hay factores importantes que afecten la solubilidad del sílice en las muestras y por consiguiente su concentración en el agua.

Determinación de metales en agua

Para la determinación de los metales en las muestras de agua se analizaron por triplicado dos tipos de muestras, las muestras filtradas y acidificadas y las muestras acidificadas sin filtrar. Los resultados obtenidos para cada época se muestran en las siguientes tablas.

Muestra	As	± s ³	Cd	± s	Fe	± s	Pb	± s	Zn	± s
TX1	0,0005	0,00004	nd	--	nd	--	nd	--	0,05	0,02
TX3	0,0008	0,00004	0,51	0,03	nd	--	0,010	0,0005	60	33,71
TX4	0,0042	0,0003	0,09	0,016	nd	--	0,007	0,005	6,25	0,05
TX5	0,0047	0,0005	nd	--	nd	--	0,004	0,0004	0,17	0,04
TX6	0,0057	0,0004	nd	--	nd	--	0,005	0,0007	0,82	0,03
TX7	0,005	0,0003	nd	--	nd	--	0,008	0,003	0,88	0,05
NOM-127-SSA1-2000	0,025		0,005		0,3		0,01		5	
NOM-001-ECOL-1996	0,1		0,1		--		0,2		10	
WHO ⁴	0,01		0,003		--		0,01		--	

Tabla 10. Resultados del análisis de metales en las muestras filtradas y acidificadas, provenientes del primer muestreo (época de lluvias). Las concentraciones se expresan en mg/L. En la tabla se anexan los valores de límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996 y WHO.

Muestra	As	± s	Cd	± s	Fe	± s	Pb	± s	Zn	± s
TX1	0,006	0,0005	nd	--	0,36	0,05	0,0097	0,0005	0,09	0,04
TX3	0,122	0,004	0,63	0,04	47,40	0,84	0,0658	0,0005	80	5,15
TX4	0,023	0,006	0,2	0,04	9,75	0,03	0,0307	0,0005	20	2,57
TX5	0,008	0,006	nd	--	0,65	0,06	0,0187	0,0003	0,39	0,05
TX6	0,015	0,003	nd	--	2,27	0,04	0,032	0,0016	4,25	0,01
TX7	0,013	0,0008	nd	--	4,24	0,05	0,0345	0,0004	3,5	0,03
NOM-127-SSA1-2000	0,025		0,005		0,3		0,01		5	
NOM-001-ECOL-1996	0,1		0,1		--		0,2		10	
WHO	0,01		0,003		--		0,01		--	

Tabla 11. Resultados del análisis de metales en las muestras acidificadas sin filtrar, provenientes del primer muestreo (época de lluvias). Las concentraciones se expresan en mg/L. En la tabla se anexan los valores de límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996 y WHO.

³ Desviación estándar.

⁴ Organización Mundial de la Salud (WHO).

Capítulo 5. Resultados y Discusión

Muestra	As	± s	Cd	± s	Fe	± s	Pb	± s	Zn	± s
TX1	0,0144	0,0014	nd	--	0,2	0,1	0,013	0,001	0,13	0,03
TX2	0,0039	0,0001	nd	--	nd	--	0,022	0,0009	nd	--
TX3	0,0001	0,00009	1,733	0,048	49,5	4,0	0,218	0,0210	245,83	6,08
TX4	0,0025	0,0009	nd	--	nd	--	0,024	0,0025	2,83	1,12
TX5	0,0051	0,0032	0,053	0,009	nd	--	0,026	0,0009	3,47	0,35
TX6	0,0232	0,0012	nd	--	nd	--	0,015	0,0009	nd	--
TX7	0,0056	0,0006	nd	--	nd	--	0,026	0,0019	1,57	0,56
NOM-127-SSA1-2000	0,025		0,005		0,3		0,01		5	
NOM-001-ECOL-1996	0,1		0,1		--		0,2		10	
WHO	0,01		0,003		--		0,01		--	

Tabla 12. Resultados del análisis de metales en las muestras filtradas y acidificadas, provenientes del segundo muestreo (época de estiaje). Las concentraciones se expresan en mg/L. En la tabla se anexan los valores de límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996 y WHO.

Muestra	As	± s	Cd	± s	Fe	± s	Pb	± s	Zn	± s
TX1	0,0233	0,0038	nd	--	0,66	0,019	0,015	0,0009	0,14	0,01
TX2	0,0243	0,0006	nd	--	0,84	0,11	0,215	0,005	229,16	6,08
TX3	0,0160	0,0237	0,357	0,009	104,08	10,93	0,036	0,004	43,00	2,92
TX4	0,0195	0,0060	0,340	0,029	1,45	0,44	0,028	0,0009	8,25	0,01
TX5	0,0106	0,0002	0,087	0,009	0,77	0,03	0,015	0,0009	nd	--
TX6	0,0265	0,0023	nd	--	nd	--	0,028	0,001	5,67	0,24
TX7	0,0112	0,0005	0,053	0,009	0,71	0,03	0,030	0,001	0,50	0,14
NOM-127-SSA1-2000	0,025		0,005		0,3		0,01		5	
NOM-001-ECOL-1996	0,1		0,1		--		0,2		10	
WHO	0,01		0,003		--		0,01		--	

Tabla 13. Resultados del análisis de metales en las muestras acidificadas sin filtrar, provenientes del segundo muestreo (época de estiaje). Las concentraciones se expresan en mg/L. En la tabla se anexan los valores de límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996 y WHO.

En las tablas 10 y 12, se registran los valores obtenidos para las muestras filtradas y acidificadas provenientes del primer y segundo muestreo respectivamente. Estas muestras filtradas y acidificadas, representan los metales disueltos; es decir, los metales que lograron atravesar una membrana de 0,45 μm , mientras que las muestras acidificadas sin filtrar (tablas 11 y 13), representan el contenido de metales totales. El análisis para cada metal contenido en las muestras analizadas se presenta a continuación.

Arsénico (As)

El contenido de metales disueltos registrados en la época de lluvias (tabla 10) revela valores de arsénico que se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles, sin embargo en época de estiaje (tabla 12) el contenido de arsénico disuelto registrado para las muestras TX1= $0,0144 \pm 0,0014$ mg/L y TX6= $0,0232 \pm 0,0012$ mg/L, se encuentra por arriba de los límites máximos permisibles de acuerdo a la WHO.

Por otra parte las muestras TX1= $0,006 \pm 0,0005$ mg/L y TX5= $0,008 \pm 0,006$ mg/L que representan el contenido de metales totales mostradas en la tabla 11, contienen valores de As por debajo de los límites permisibles, sin embargo, los valores de As en las muestras TX4= $0,023 \pm 0,006$ mg/L, TX6 = $0,015 \pm 0,003$ mg/L y TX7= $0,013 \pm 0,0008$ mg/L, se encuentran por arriba del límite permisible de acuerdo a la WHO. Además la muestra TX3 = $0,122 \pm 0,004$ mg/L tiene el valor de As más alto, rebasando los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996 y WHO. Cabe destacar que la muestra TX3 es la que se encuentra en un área aledaña a los jales Guerrero, que posiblemente estén influenciando el contenido de metales sobre el cauce del río Taxco.

En la tabla 13 (muestreo en época de estiaje) se muestran el contenido de metales totales, donde se puede ver que las muestras TX3 = $0,0160 \pm 0,0237$ mg/L, TX4 = $0,0195 \pm 0,0060$ mg/L, TX5 = $0,0106 \pm 0,0002$ mg/L y TX7 = $0,0112 \pm 0,0005$ mg/L, rebasan el valor límite permisible de acuerdo a la WHO. Además las muestras TX1 = $0,0233 \pm 0,0038$ mg/L, TX2 = $0,0243 \pm 0,0006$ mg/L y TX6 = $0,0265 \pm 0,0023$ mg/L, presentan valores 2 veces más que el límite permisible de acuerdo a la WHO. El aumento en concentración de As en el punto TX3 se debe a la influencia que tienen los jales sobre el cauce del río, además el punto TX6 se encuentra influenciado por las actividades mineras aledañas al área de estudio.

De acuerdo con las tablas 11 y 13, se puede ver la influencia que la época de lluvias tiene sobre la concentración de metales en el cauce del río,

sobresaltando el punto TX3, que se encuentra aledaño a los jales y que posiblemente esté afectado por el arrastre de éstos hacia el cauce del río.

Cadmio (Cd)

Para el contenido de metales disueltos registrados en la tabla 10, se lograron detectar únicamente dos valores TX3 = $0,51 \pm 0,03$ mg/L y TX4 = $0,09 \pm 0,016$ mg/L, los cuales rebasan los límites permisibles, además en época de estiaje (tabla 12) sólo se logró detectar y cuantificar cadmio en las muestras TX5 = $0,053 \pm 0,009$ mg/L y TX3 = $1,73 \pm 0,048$ mg/L, cuyos valores se encuentran por arriba de los límites permisibles.

En las tablas 11 y 13 se determinaron las concentraciones totales de Cd, sólo se lograron detectar valores para las muestras TX3 = $0,63 \pm 0,04$ mg/L y TX4 = $0,20 \pm 0,04$ mg/L, que además rebasan los límites permisibles. Por otra parte en la tabla 13 se lograron detectar valores de Cd para las muestras TX3 = $0,357 \pm 0,009$ mg/L, TX4 = $0,340 \pm 0,029$ mg/L, TX5 = $0,087 \pm 0,009$ mg/L y TX7 = $0,053 \pm 0,009$ mg/L, rebasando de igual manera los valores de límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996 y WHO.

Como se puede ver en las tablas 11 y 13, el valor obtenido en el punto TX3 en época de lluvias es mayor que el valor obtenido en época de estiaje. Además de acuerdo con el cauce del río Taxco, el punto TX4 presenta concentraciones altas de Cd, provenientes del punto TX3. El aumento en concentración de Cd en este punto pone de manifiesto el origen antropogénico del Cd, el cual posiblemente es provocado por el aporte de cadmio en solución y en forma de partículas desde los jales aledaños a este punto de muestreo.

Hierro (Fe)

Como se observa en la tabla 10, no se lograron detectar valores para el Fe disuelto en época de lluvias, sin embargo en época de estiaje (tabla 12) se lograron detectar valores para las muestras TX1 = $0,2 \pm 0,1$ mg/L y TX3 = $49,5$

$\pm 4,0$ mg/L, siendo esta última la que rebasa 165 veces el valor límite permisible de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000.

Para el contenido de metales totales de las muestras registradas en las tablas 11 y 13 se obtuvo lo siguiente.

Los puntos de muestreo TX1 con valores de $0,36 \pm 0,05$ mg/L y $0,66 \pm 0,019$ mg/L para época de lluvias y estiaje respectivamente, y el punto TX2 = $0,84 \pm 0,11$ mg/L, aunque tienen los valores de concentración de Fe más pequeños, rebasan el límite permisible de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000.

El punto de muestreo TX3 con valores de $47,4 \pm 0,84$ mg/L y $104,08 \pm 10,93$ mg/L para época de lluvias y estiaje respectivamente, representa el punto con la mayor concentración de Fe. Como se puede ver en la tabla 13, es en época de estiaje en la que hay una mayor concentración de Fe, y aunque este punto se encuentra influenciado por los jales aledaños, se observa que la concentración de Fe tiene orígenes tanto antropogénicos como naturales.

El punto de muestreo TX4 cuyos valores de concentración registrados en época de lluvias y estiaje son $9,75 \pm 0,03$ mg/L y $1,45 \pm 0,44$ mg/L respectivamente, se encuentra influenciado por el contenido de Fe presente en el punto anterior.

El punto TX5 presenta concentraciones de $0,65 \pm 0,06$ mg/L y $0,77 \pm 0,03$ mg/L en época de lluvias y estiaje respectivamente. Por otra parte el punto TX6, únicamente registra un valor de $2,27 \pm 0,04$ mg/L para la época de lluvias, lo anterior pone de manifiesto el origen antropogénico del Fe puesto que esta muestra se encuentra en un área influenciada por actividades mineras. Finalmente el punto TX7 muestra valores de $4,24 \pm 0,05$ mg/L y $0,71 \pm 0,03$ mg/L en épocas de lluvias y estiaje respectivamente, los cuales permiten observar la influencia que ejerce el contenido de Fe presente en el punto TX6 sobre la concentración de Fe en el punto TX7.

Los valores de concentración de Fe registrados para las muestras antes mencionadas están por arriba de los valores límites permisibles aunque las muestras TX3 y TX4 son las que registran los valores más altos.

Plomo (Pb)

Para el caso de los metales disueltos (tablas 10 y 12), es la muestra TX3 tomada en época de lluvias, la que tiene un valor ligeramente mayor al límite permisible de acuerdo a la WHO con un valor de $0,010 \pm 0,0005$ mg/L. Sin embargo en época de estiaje, todas las muestras rebasan los valores límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-2000 y WHO, siendo la muestra TX3 la que presenta el valor más alto de concentración de Pb ($0,218 \pm 0,021$ mg/L), rebasando los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996 y WHO.

Las concentraciones totales de Pb obtenidas en época de lluvias (tabla 11), registran valores por encima del límite permisible de acuerdo a la NOM-127-2000 y WHO, en algunos de los puntos de muestreo, siendo la muestra TX3 ($0,0658 \pm 0,0005$ mg/L), la que registra el valor más alto. Por otra parte, las concentraciones totales de Pb obtenidas en época de estiaje (tabla 13), muestran valores por arriba de los límites permisibles, donde las muestras TX1 y TX5 tienen las concentraciones más bajas (TX1 = $0,015 \pm 0,0009$ mg/L y TX5 = $0,015 \pm 0,0009$ mg/L) y la muestra TX2 presenta el valor más alto con una concentración de Pb de $0,215 \pm 0,005$ mg/L, rebasando así los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996 y WHO.

Zinc (Zn)

El contenido de metales disueltos en época de lluvias (tabla 10), muestra que los valores de concentración de Zn en las muestras TX3 ($60,00 \pm 33,71$ mg/L) y TX4 ($6,25 \pm 0,05$ mg/L) rebasan los valores límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000 y a la NOM-001-ECOL-1996.

Las muestras tomadas en época de estiaje (tabla 12), con el menor contenido de metales disueltos son TX1, TX4, TX5 y TX7 con concentraciones de $0,13 \pm 0,03$ mg/L, $2,83 \pm 1,12$ mg/L, $3,47 \pm 0,35$ mg/L y $1,57 \pm 0,56$ mg/L, respectivamente, siendo la muestra TX3 la única que rebasa en varios ordenes

de magnitud los valores límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, NOM-001-ECOL-1996.

Las muestras tomadas en época de lluvias (tabla 11), revelan que las muestras TX1 y TX5 presentan las concentraciones de Zn más bajas con valores de $0,09 \pm 0,04$ mg/L y $0,39 \pm 0,05$ mg/L, respectivamente. Sin embargo las muestras TX3 y TX4, registran valores más altos rebasando respectivamente 8 y 2 veces el límite permisible de acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996 además que 16 y 4 veces más los valores límites permisibles de la NOM-127-SSA1-2000. Por otra parte las muestras TX4 y TX6 tomadas en época de estiaje (tabla 13), se encuentran ligeramente por arriba de los límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000, sin embargo las muestras TX2 y TX3, muestran respectivamente valores 22 y 4 veces más que el límite permisible de acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996 además que 45 y 8 veces más que los valores límites permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-2000.

Si se consideran las características físicas al realizar el muestreo, se observó que en el punto TX3 el agua mostraba coloración café-rojiza, característica del óxido de Fe (III), además las determinaciones de conductividad eran altas y el valor de pH menor que en los demás puntos de muestreo. Se toma en cuenta principalmente este punto de muestreo puesto que de acuerdo a la trayectoria del río éste se encontraba antes de los puntos TX4 (localizado después del punto TX3 e influenciado por la descarga de afluentes urbanos), TX5 (localizado antes de la unión con el río Cacalotenango) y TX7 (localizado después de la unión del río Cacalotenango con el río Taxco), además que se encontraba cerca de jales mineros, los cuales contribuyen directamente a la contaminación de aguas superficiales por metales.

Determinación de metales en sedimentos

Los contenidos totales de los metales analizados (As, Cd, Fe, Pb y Zn) en los sedimentos, se presentan en las siguientes tablas, donde han sido agregados los valores de fondo (VF) para sedimentos de agua dulce establecidos por la NOAA (1999).

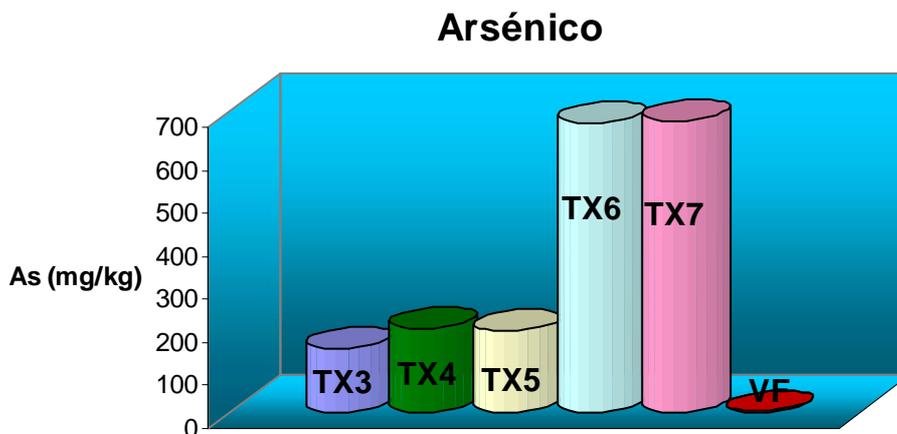
Muestra	As		Cd		Fe (%)	Pb		Zn (mg/kg)		
	(mg/kg)	± s	(mg/kg)	± s		(mg/kg)	± s	(mg/kg)	± s	
TX3	148,04	39,81	56,67	4,22	11,19	0,99	2703,08	239,57	7168,59	1073,63
TX4	194,05	12,42	19,56	0,17	5,10	0,05	739,53	4,04	3521,44	148,27
TX5	188,57	28,46	9,80	1,59	4,42	0,37	946,26	20,93	1503,61	96,65
TX6	675,19	23,05	24,68	0,29	6,26	0,09	1002,31	28,58	3060,66	130,45
TX7	679,85	62,47	27,08	1,29	6,60	0,38	1017,02	6,21	3004,31	218,47
VF	1,1		0,1 – 0,3		0,99 - 1,8		4 - 17		7--38	

Tabla 14. Resultados del análisis de metales en sedimentos, provenientes del primer muestreo (época de lluvias). En esta tabla se presentan los contenidos totales de los metales analizados (As, Cd, Fe, Pb y Zn) donde han sido agregados los valores de fondo (VF) para sedimentos de agua dulce establecidos por la NOAA (1999) para su comparación.

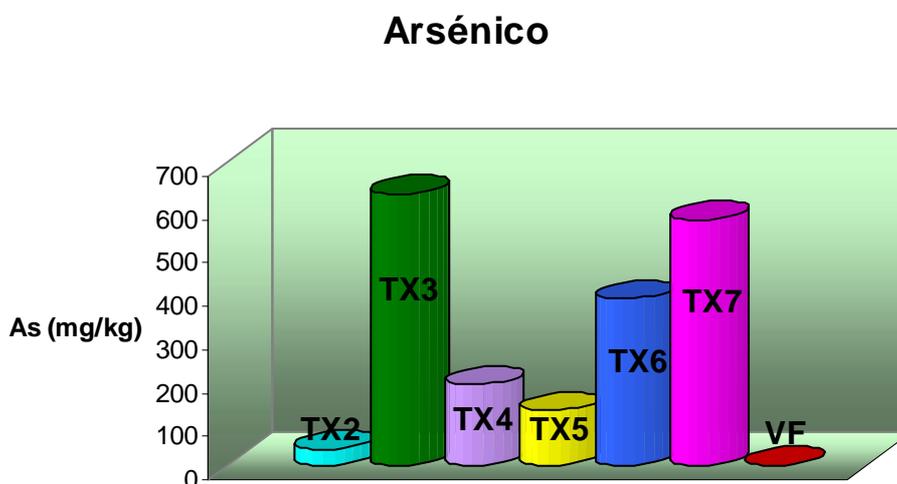
Muestra	As		Cd		Fe (%)	Pb		Zn		
	(mg/kg)	± s	(mg/kg)	± s		(mg/kg)	± s	(mg/kg)	± s	
TX2	36,10	7,04	5,58	0,92	4,46	0,21	200,40	8,91	492,81	3,55
TX3	625,47	87,49	17,94	2,04	26,89	17,63	166,46	29,76	2365,85	116,06
TX4	186,47	41,92	345,16	36,61	5,72	1,00	401,11	72,71	41299,63	6366,26
TX5	126,62	24,79	40,32	1,67	3,85	0,19	501,56	17,32	2311,39	162,14
TX6	383,94	77,56	825,95	89,85	5,57	0,45	737,44	50,14	65964,28	5092,20
TX7	565,35	99,25	251,54	4,21	5,15	0,08	422,49	54,92	17440,75	1258,11
VF	1,1		0,1-0,3		0,99-1,8		4--17		7--38	

Tabla 15. Resultados del análisis de metales en sedimentos, provenientes del segundo muestreo (época de estiaje). En esta tabla se presentan los contenidos totales de los metales analizados (As, Cd, Fe, Pb y Zn) donde han sido agregados los valores de fondo (VF) para sedimentos de agua dulce establecidos por la NOAA (1999) para su comparación.

Arsénico (As)



Gráfica 1. Concentración total de Arsénico en sedimentos del río Taxco. Época de lluvias.



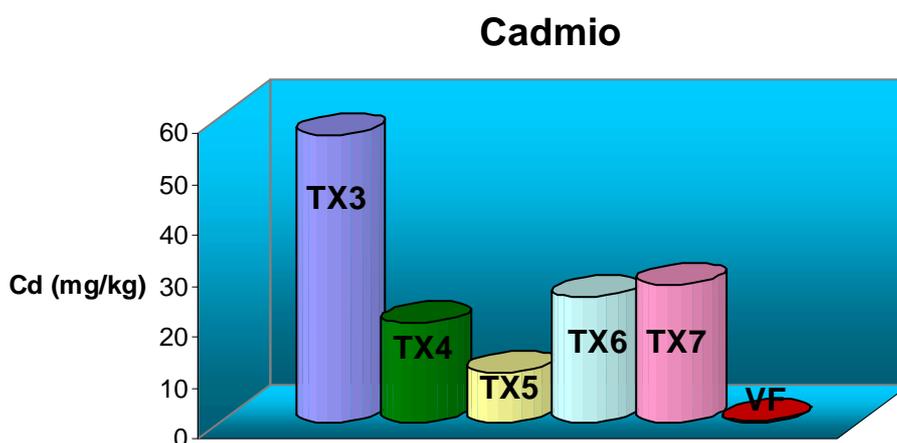
Gráfica 2. Concentración total de Arsénico en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje.

Las concentraciones de As obtenidas en época de lluvias (tabla 14), muestran valores que rebasan de 134,5 a 618 veces el VF establecido por la NOAA (1999). El menor contenido de As se presenta en las muestras tomadas en el punto TX3 = 148,04 ± 39,81 mg/kg, además, es posible que el contenido de As presente en las muestras TX4 = 186,47 ± 41,92 mg/kg y TX5 = 126,62 ± 24,79 mg/kg estén influenciadas por el punto TX3, el cual se encuentra en la cercanía de los jales mineros. Por otra parte, la concentración de As se incrementa en las muestras TX6 = 675,19 ± 23,05 mg/kg y TX7 = 679,85 ± 62,47 mg/kg. El

aumento en la concentración de As en el punto TX6 se debe principalmente a la influencia que ejerce la actividad minera aledaña a este punto de muestreo, a su vez, el punto TX7 presenta altas concentraciones de As, las cuales son transportadas desde los puntos de muestreo anteriores (gráfica 1).

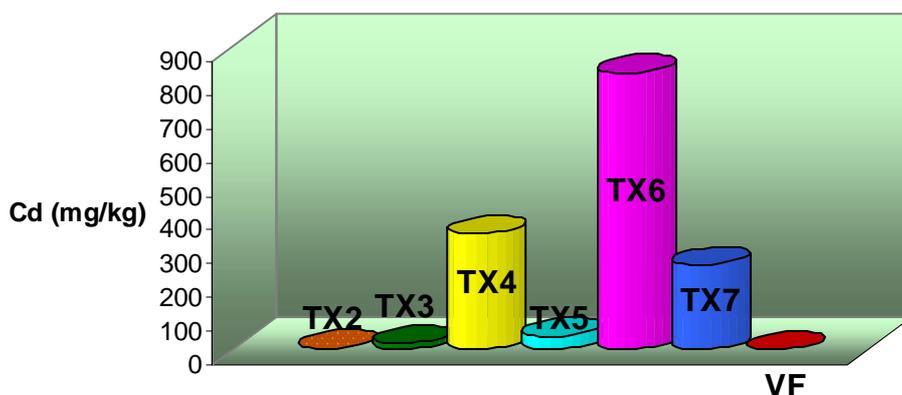
En época de estiaje (tabla 15), se puede observar que los valores rebasan de 32,8 a 568,6 veces el valor de fondo establecido por la NOAA (1999). La menor concentración de As se ubica en el punto TX2 = $36,10 \pm 7,04$ mg/kg, sin embargo en el punto TX3 las concentraciones de As aumentan a $625,47 \pm 87,49$ mg/kg, rebasando 568,6 veces el valor de fondo y vuelven a disminuir en los puntos TX4 = $186,47 \pm 41,92$ mg/kg y TX5 = $126,62 \pm 24,79$ mg/kg, para aumentar nuevamente a $383,94 \pm 77,56$ mg/kg y $565,35 \pm 99,25$ mg/kg en los puntos TX6 y TX7 respectivamente, este último punto presenta grandes concentraciones de As debido a la unión del río Cacalotenango con el río Taxco. En el gráfico 2, se puede observar que los puntos de muestreo TX3 y TX6, aportan la mayor concentración de Arsénico al río Taxco, donde el agua del río en el punto TX3 presenta mayor acidez, lo cual permite la disolución de carbonatos e hidróxidos, así como el incremento en la desorción de los cationes metálicos debido a la competencia con los iones hidrógeno.

Cadmio (Cd)



Gráfica 3. Concentración total de Cadmio en sedimentos del río Taxco. Época de lluvias.

Cadmio

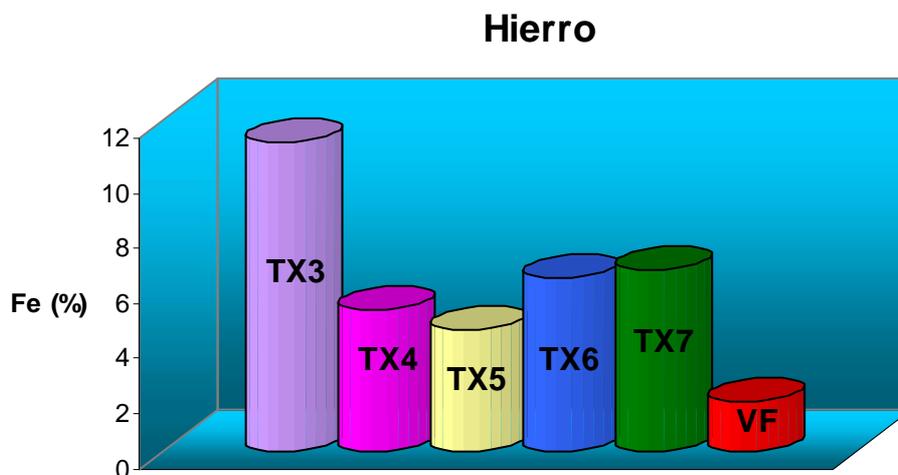


Gráfica 4. Concentración total de Cadmio en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje.

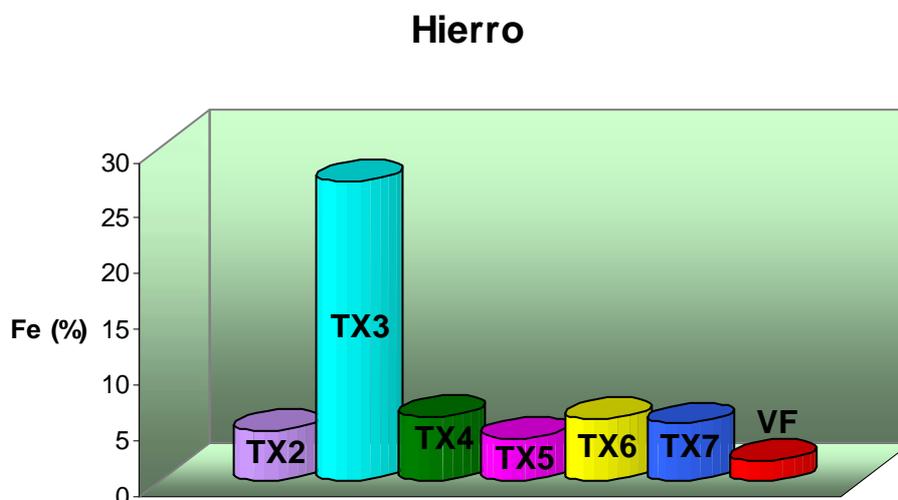
Las concentraciones de Cd en el río Taxco en época de lluvias, se encuentran por arriba de los valores de fondo (gráfico 3), los resultados revelan que el punto TX3 = $56,67 \pm 4,22$ mg/kg, es el que contiene la mayor concentración de cadmio, sin embargo su valor se encuentra por debajo del valor de fondo de acuerdo con la NOAA (1999). La disminución en concentración de Cd río abajo, indica que existe la mínima transportación de partículas contenidas de este metal.

En la gráfica 4 (época de estiaje), se puede observar que son los puntos TX4 y TX6 los que contienen las mayores concentraciones de cadmio con valores de $345,16 \pm 36,61$ mg/kg y $825,95 \pm 89,85$ mg/kg, los cuales rebasan respectivamente 1150,5 y 2753,1 veces el valor de fondo de acuerdo a la NOAA (1999). El contenido de Cd en el punto TX4, probablemente se deba a las aportaciones que las descargas de afluentes urbanos ejercen sobre el río, así como el transporte de partículas contenidas en el punto de muestreo anterior, por otra parte el punto TX6 se encuentra influenciado por las actividades mineras aledañas a este punto de muestreo, aportando así altas concentraciones de Cd río abajo. De acuerdo con los resultados obtenidos (tabla 15), todas las muestras presentan altas concentraciones de Cd, además cabe destacar que en el punto TX3 los sedimentos eran de color naranja, indicando contaminación por metales, tal y como lo revelan los resultados obtenidos (tabla 15).

Hierro (Fe)



Gráfica 5. Concentración total de Hierro en sedimentos del río Taxco. Época de lluvias.



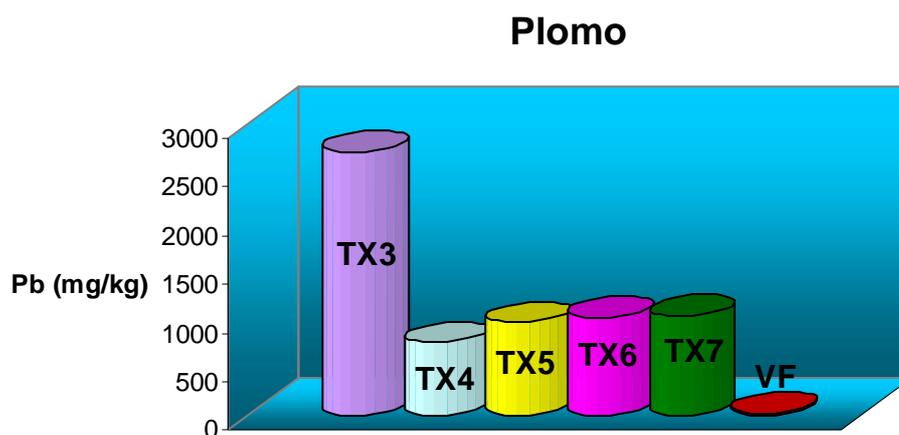
Gráfica 6. Concentración total de Hierro en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 14, podemos observar que la muestra que presenta la mayor concentración de Fe es la muestra TX3 = $11,19 \pm 0,99$ %, rebasando 621,6 veces el valor de fondo establecido de acuerdo a la NOAA (1999). En la gráfica 5 se puede observar que los contenidos de Fe en las muestras TX4, TX5, TX6 y TX7 son igualmente elevados, mostrando concentraciones de $5,10 \pm 0,05$ %, $4,42 \pm 0,37$ %, $6,26 \pm$

0,09 %, $6,60 \pm 0,38$ %, en el orden mencionado, rebasando 283, 245, 347 y 366 veces respectivamente el valor de fondo establecido por la NOAA (1999).

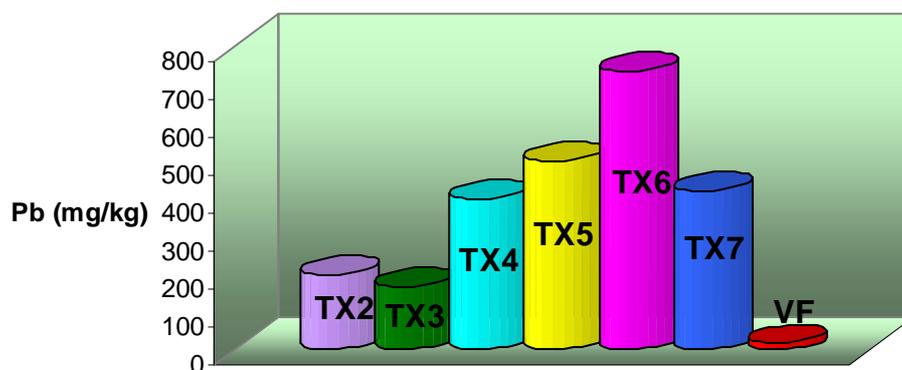
Las muestras obtenidas en época de estiaje (tabla 15), revelan que la muestra TX3 = $26,89 \pm 17,63$ %, contiene la mayor concentración de Fe rebasando 1493 veces el valor de fondo establecido por la NOAA (1999). En la gráfica 6, se puede observar que las muestras TX2, TX4, TX5, TX6 y TX7 presentan concentraciones de Fe similares con valores de $4,46 \pm 0,21$ %, $5,72 \pm 1,00$ %, $3,85 \pm 0,19$ %, $5,57 \pm 0,45$ %, $5,15 \pm 0,08$ %, en el orden mencionado, rebasando 247, 317, 213, 309 y 286 veces el valor de fondo establecido por la NOAA (1999). Los resultados obtenidos tanto en época de lluvias como en época de estiaje, ponen de manifiesto el origen natural del Fe al presentarse valores semejantes entre las muestras.

Plomo (Pb)



Gráfica 7. Concentración total de Plomo en sedimentos del río Taxco. Época de lluvias.

Plomo



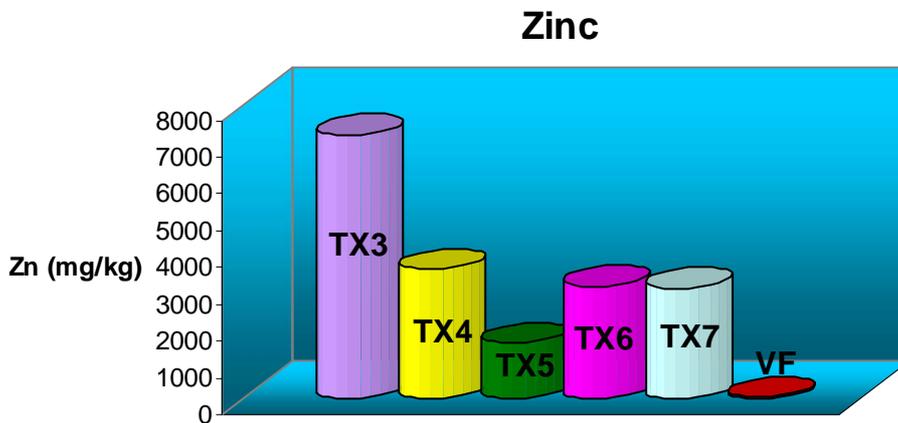
Gráfica 8. Concentración total de Plomo en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje.

Los resultados obtenidos en época de lluvias (tabla 14), muestran que las concentraciones de Plomo en el río Taxco son elevadas, donde la muestra TX3 presenta la mayor concentración de plomo ($2703,08 \pm 239,57$ mg/kg), rebasando 159 veces el valor de fondo establecido por la NOAA (1999). La gráfica 7, muestra que los puntos de muestreo TX4, TX5, TX6 y TX7, con valores de $739,53 \pm 4,04$ mg/kg, $946,26 \pm 20,93$ mg/kg, $1002,31 \pm 28,58$ mg/kg, $1017,02 \pm 6,21$ mg/kg, en el orden mencionado, contienen concentraciones de Pb similares, rebasando 43, 55, 59 y 60 veces respectivamente el valor de fondo establecido por la NOAA (1999). Con respecto a la muestra TX6, se observa que en época de lluvias no existen altas contribuciones de Pb hechas por el río Cacalotenango hacia el río Taxco, puesto que ambos ríos presentan concentraciones similares (gráfica 7).

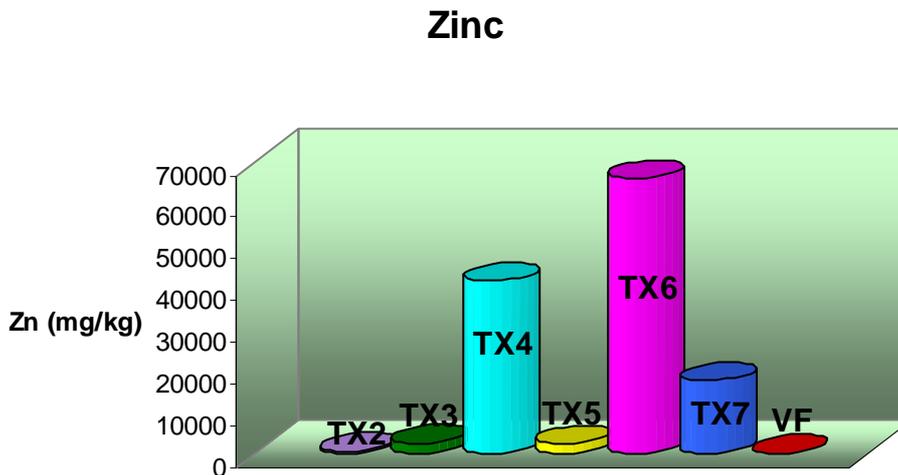
En la gráfica 8 (época de estiaje), se puede observar que la muestra TX6 tiene el mayor contenido de plomo ($737,44 \pm 50,14$ mg/kg) rebasando 43,3 veces el valor de fondo establecido por la NOAA (1999), el alto contenido de Pb en esta muestra se debe a las actividades mineras aledañas a este punto de muestreo. Es posible que el medio ácido presente en el punto TX3, permita la movilidad de los metales contenidos en éste punto, aumentando así la concentración de Pb río abajo, en donde el punto TX4 muestra una concentración de $401,11 \pm 72,71$ mg/kg, rebasando 23,5 veces el valor de fondo. En la gráfica 8 se puede

observar que la concentración de Pb antes de la unión con el río Cacalotenango (TX5 = 501,56 ± 17,32 mg/kg) es menor que la concentración de plomo contenida en el punto TX6, perteneciente al río Cacalotenango (737,44 ± 50,14 mg/kg). Una vez que el río Cacalotenango se une al río Taxco, las concentraciones de Pb disminuyen (TX7 = 422,49 ± 54,92 mg/kg), indicando que no existen aportaciones importantes de Pb contenido en el río Cacalotenango hacia el río Taxco, además de una posible resuspensión de los sedimentos.

Zinc (Zn)



Gráfica 9. Concentración total de Zinc en sedimentos del río Taxco. Época de lluvias.



Gráfica 10. Concentración total de Zinc en sedimentos del río Taxco. Época de estiaje.

Capítulo 5. Resultados y Discusión

Las muestras obtenidas en época de lluvias (tabla 14), rebasan en varios ordenes de magnitud el valor de fondo establecido por la NOAA (1999). En la gráfica 9, se puede observar que la muestra TX3, contiene, la mayor concentración de Zn ($7168,59 \pm 1073,63$ mg/kg), rebasando 188,6 veces el valor de fondo, esto debido a la cercanía de los jales. El contenido de Zn presente en el punto TX4 ($3521,44 \pm 148,27$ mg/kg), rebasa 92,6 veces el valor de fondo, además este punto de muestreo esta influenciado por descargas de afluentes urbanos y por el contenido de Zn presente en el punto de muestreo anterior. La concentración de Zn en la muestra TX5 ($1503,61 \pm 96,65$ mg/kg), es menor que en la muestra TX6 ($3060,66 \pm 130,45$ mg/kg). Las concentraciones de Zn después de la unión de ambos ríos (TX7= $3004,31 \pm 218,47$ mg/kg), son muy similares al punto TX6, lo cual pone de manifiesto que existe un importante aporte de Zn del río Cacalotenango hacia el río Taxco.

En la tabla 15, se muestran los resultados obtenidos en época de estiaje y en la gráfica 10 se puede observar que la muestra TX6, presenta la mayor concentración de Zn ($65964,28 \pm 5092,20$ mg/kg), rebasando 1736 veces el valor de fondo (VF) establecido por la NOAA (1999), sucesivamente la muestra TX4 ($41299,63 \pm 6366,26$ mg/kg), rebasa 1086,8 veces el valor de fondo, este punto de muestreo se encuentra influenciado tanto por descargas de afluentes urbanos como por las aportaciones de Zn provenientes del punto anterior. La menor concentración de Zn \pm desviación estándar se encuentra en la muestra TX2 ($492,81 \pm 3,55$ mg/kg), la cual rebasa 13 veces el VF, para después aumentar a un valor de $2365,85 \pm 116,06$ mg/kg en la muestra con la influencia de jales mineros (TX3), rebasando 62,2 veces el VF, además la muestra TX5 ($2311,39 \pm 162,14$ mg/kg) rebasa 60,8 veces el VF. La concentración de Zn después de la unión del río Cacalotenango con el río Taxco, es menor que el punto TX6 pero mayor que la concentración antes del punto de unión, indicando que la mayor aportación de Zn es a través del río Cacalotenango (grafica 10).

Capítulo 5. Resultados y Discusión

Los resultados descritos manifiestan que las menores concentraciones de As, Cd, Fe, Pb y Zn totales se encuentran en las muestras TX2, TX4 y TX5. Por otra parte, la muestra TX3 presenta las mayores concentraciones de los metales mencionados, lo cual evidencia la influencia que los jales mineros ejercen sobre las concentraciones de metales en sedimentos.

Las muestras obtenidas en el río Taxco antes y después de su unión con el río Cacalotenango, indican que el mayor aporte de As, Cd, Pb y Zn, es a través del río Cacalotenango. Las concentraciones totales de metales en las muestras analizadas rebasan en varios órdenes de magnitud los valores de fondo establecidos por la NOAA (1999), incluyendo las muestras ubicadas en áreas alejadas de las actividades mineras y de los depósitos de jales.

El análisis realizado en época de lluvias y de estiaje permitió analizar el comportamiento de la movilidad de los metales a lo largo del cauce del río.

Capítulo 6. Conclusiones

Los resultados de los contenidos de metales en agua manifiestan las siguientes conclusiones:

Con respecto a los metales disueltos en el agua del río se concluye lo siguiente:

- En época de lluvias las concentraciones más bajas de As, Cd, Fe, Pb y Zn se obtuvieron de las muestras TX1, TX5, TX6 y TX7 (aguas residuales, río Taxco antes de la unión con el río Cacalotenango, río Cacalotenango y río Taxco después del aporte del Cacalotenango).
- La muestra TX3, correspondiente a la época de lluvias y tomada cerca de los depósitos de jales, presentó altas concentraciones de Cd, Pb y Zn, rebasando los límites máximos permisibles en agua para consumo humano.
- La muestra TX4, tomada en época de lluvias, registró valores por arriba de los límites permisibles para Cd y Zn, debido a las aportaciones al cauce del río provenientes el punto de muestreo TX3 cercano a los residuos mineros.
- En época de estiaje, la concentración más alta de As se obtuvo de la muestra TX1 (aguas residuales de la ciudad de Taxco), rebasando ligeramente el límite máximo permisible de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (WHO).
- En época de estiaje las concentraciones más bajas de As, Cd, Fe y Zn se obtuvieron en las muestras TX2 (aguas residuales), TX4 (aguas cercanas a los jales mineros), TX6 (río Cacalotenango cerca de la confluencia con el río Taxco) y TX7 (río Taxco después del aporte del río Cacalotenango).

Capítulo 6. Conclusiones

- La muestra TX3, tomada en época de estiaje, registró valores por arriba de los límites máximos permisibles para Fe y Zn.
- En época de estiaje las muestras TX3 y TX4 (a un lado de los jales y aguas debajo de los mismos) mostraron las más altas concentraciones de Cd, registrando valores por arriba de los límites máximos permisibles.
- En época de estiaje todas las muestras registraron valores de Pb por arriba de los límites máximos permisibles, siendo la muestra TX3, la cual se tomó cerca de los depósitos de jales, la que presentó el valor más alto.

Con respecto a los metales totales se concluye lo siguiente:

- En época de lluvias los menores contenidos de arsénico, cadmio, hierro plomo y zinc total se presentaron en las muestras TX1 (aguas residuales) y TX5 (río Taxco antes de la unión con el río Cacalotenango).
- En época de lluvias, las concentraciones de As más altas se obtuvieron de las muestras TX3 (a un lado de los jales), TX6 (río Cacalotenango cerca de la confluencia con el río Taxco) y TX7 (después de la unión del río Cacalotenango con el río Taxco) registrando valores de As por arriba de los límites permisibles.
- Las concentraciones más altas de Cd y Zn se obtuvieron de las muestras TX3 y TX4, cercanas a los jales mineros, registrando valores por arriba de los límites máximos permisibles.
- Todas las muestras tomadas en época de lluvias presentan altas concentraciones de Fe y Pb, siendo la muestra TX3, la cual se tomó cerca de los depósitos de jales, la que registró los valores más altos.

Capítulo 6. Conclusiones

- La concentración más alta de As se obtuvo en la muestra TX6 (río Cacalotenango cerca de la confluencia con el río Taxco) tomada en época de estiaje.
- Las concentraciones más altas de Cd se obtuvieron en las muestras TX3, TX4, TX5 y TX7, tomadas en época de lluvias registrando valores por arriba de los límites máximos permisibles.
- De las muestras tomadas en época de estiaje, a excepción de la muestra TX6, todas presentan altas concentraciones de Fe rebasando los límites máximos permisibles.
- Todas las muestras tomadas en época de estiaje, presentan altas concentraciones de Pb rebasando los límites máximos permisibles.
- Las concentraciones más altas de Zn se obtuvieron en las muestras TX2, TX3, TX4 y TX6 tomadas en época de estiaje, donde la muestra TX2, tomada cerca de afluentes urbanos, registró el valor más alto.
- Se considera que la muestra TX4 presenta alto contenido de metales debido a las aportaciones al cauce del río causadas por la presencia de los depósitos de jales desde el punto de muestreo TX3, así como a las descargas de los afluentes urbanos.
- La muestra TX6 localizada en una zona influenciada por las actividades mineras presenta alto contenido de metales dejando al descubierto el origen antropogénico de estos proveniente de aguas arriba desde los jales El Fraile.
- Las muestras TX4 y TX7 presentan mayor contenido de arsénico, hierro, plomo y zinc totales en el primer muestreo coincidiendo con el periodo de lluvias y, por tanto, con mayor disolución y arrastre de material particulado y de desecho que puede contribuir a la concentración de metales en el agua del río.

- Las actividades mineras de la zona, tienen una fuerte influencia sobre los contenidos de metales en las aguas del río Taxco, puesto que las mayores concentraciones de éstos se encuentran en las muestras cercanas a los depósitos de jales.
- En cuanto a las variaciones en las épocas de muestreo, se puede observar que el contenido de metales en las muestras de agua que se encuentran en una zona impactada por el aporte de jales mineros (TX3) y en las muestras influenciadas por las actividades mineras (TX6) presentan variaciones que coinciden con las épocas de muestreo. En el segundo muestreo, que corresponde con la época de estiaje, los contenidos de As, Cd, Pb y Zn del punto TX3 y los contenidos de Fe y Pb del punto TX6 disminuyen con respecto al primer muestreo (época de lluvias) esto evidencia la influencia que tiene la descarga de lluvias en la disolución y arrastre de metales provenientes de los depósitos de jales y de las actividades mineras cercanas al área de estudio contribuyendo así a la concentración de metales en el agua del río.
- Dadas las altas concentraciones que se encontraron en las muestras analizadas en los dos muestreos, se puede decir que el sistema acuoso estudiado está afectado por el aporte de metales en solución y en forma de partículas provenientes de los depósitos de jales aledaños, por las actividades mineras y por los efluentes de aguas residuales.

Con respecto a los resultados de los contenidos de metales totales en sedimentos se concluye lo siguiente:

- Todas las muestras tomadas en época de lluvias, registraron para As, valores por arriba de los valores de fondo permitidos por la NOAA, siendo la muestra TX7, la cual se tomó después de la unión del río Cacalotenango con el río Taxco, la que registró el valor más alto.

Capítulo 6. Conclusiones

- Las muestras tomadas en época de lluvias, registraron para Cd, Fe, Pb y Zn, valores por arriba de los valores de fondo establecidos por la NOAA, siendo la muestra TX3, la cual se tomó cerca de los depósitos de jales, la que registra los valores más altos.
- En época de estiaje, todas las muestras presentaron altas concentraciones de As, rebasando el valor de fondo establecido por la NOAA, y donde la muestra TX3 fue la que registró el valor más alto.
- Todas las muestras tomadas en época de estiaje, registraron para Cd, valores por arriba de los valores de fondo establecidos por la NOAA, donde la muestra TX6, proveniente del río Cacalotenango, registró el valor más alto.
- Las muestras tomadas en época de estiaje registraron para Fe, Pb y Zn, valores por arriba de los valores de fondo establecidos por la NOAA, donde los valores más altos los registraron las muestras TX3 para Fe y para Pb y Zn la muestra TX6.
- La muestra TX3 y TX6 presentan las mayores concentraciones de los metales mencionados, lo cual evidencia la influencia que los depósitos de jales y las actividades mineras ejercen sobre las concentraciones de metales en sedimentos.
- Las muestras obtenidas en el río Taxco antes y después de su unión con el río Cacalotenango, indican que el mayor aporte de As, Cd, Pb y Zn, es a través del río Cacalotenango.
- Las concentraciones totales de metales en las muestras analizadas rebasan en varios órdenes de magnitud los valores de fondo establecidos por la NOAA (1999), incluyendo las muestras ubicadas en áreas alejadas de las actividades mineras y de los depósitos de jales, dejando al descubierto el arrastre de los mismos, así como la mineralización natural del área de estudio.

- El hierro, es el metal de mayor concentración con respecto al resto de los metales, rebasando en varios órdenes de magnitud el valor de fondo establecido por la NOAA (1999) lo cual refleja la mineralización de la zona.
- No se recomienda usar el agua proveniente del sistema acuoso estudiado para uso ni para consumo humano.
- En cuanto a las variaciones en las épocas de muestreo, se puede observar que el contenido de metales en las muestras de sedimentos que se encuentran en una zona impactada por el aporte de jales mineros (TX3) y en las muestras influenciadas por las actividades mineras (TX6) presentan variaciones que coinciden con las épocas de muestreo. En el segundo muestreo, que corresponde con la época de estiaje, los contenidos de Cd, Pb y Zn del punto TX3 y los contenidos de As, Fe y Pb del punto TX6 disminuyen con respecto al primer muestreo (época de lluvias) esto evidencia la influencia que tiene la descarga de lluvias en la disolución y arrastre de metales provenientes de los depósitos de jales y de las actividades mineras cercanas al área de estudio contribuyendo así a la concentración de metales en el agua del río.
- En general se encontraron altas concentraciones totales de metales tanto en las muestras de sedimentos como en las muestras de agua, el contenido de metales esta mayormente influenciado por las actividades mineras aledañas al área de estudio así como a la presencia de los depósitos de jales dejando al descubierto el origen antropogénico de éstos.

ANEXOS

Anexo 1

Resultados de las muestras estándares certificadas

Las siguientes tablas (tablas 16, 17, 18, 19 y 20) muestran los porcentajes de recuperación del conjunto de los métodos de digestión y análisis correspondientes a los estándares Montana Highly Elevated Trace Element Concentration (clase NIST No. 2710), Montana Moderated Elevated Trace Element Concentration (clase NIST No. 2711) y Búfalo River Sediment (clase NIST No. 8704). Los cuales fueron tratados por cuadruplicado y de manera similar a la descrita en el apartado de digestión total.

Muestra	As (mg/Kg)	± DE	Concentración Certificada (mg/Kg)	Recuperación (%)
Montana (2710)	716,7	18,62	626 ± 38	114,4
Montana (2711)	102,1	7,93	105 ± 8	97,2
Buffalo River	18,5	0,75	17	109,1

Tabla 16. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar. En la tabla se han agregado las concentraciones de arsénico certificadas para cada uno de los suelos.

Muestra	Cd (mg/kg)	± SD	Concentración Certificada (mg/kg)	Eficiencia (%)
Montana (2710)	22,7	0,76	21,8 ± 0,2	104,3
Montana (2711)	39,5	1,44	41,7 ± 0,25	94,7
Buffalo River	3,2	2,00	2,94 ± 0,29	111,2

Tabla 17. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar. En la tabla se han agregado las concentraciones de cadmio certificadas para cada uno de los suelos.

Muestra	Fe (%)	± SD	Concentración Certificada (%)	Eficiencia (%)
Montana (2710)	3,3	0,29	3,38 ± 0,10	97,9
Montana (2711)	2,9	0,42	2,89 ± 0,06	101,0
Buffalo River	4,1	0,07	3,97 ± 0,10	105,0

Tabla 18. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar. En la tabla se han agregado las concentraciones de hierro certificadas para cada uno de los suelos.

Muestra	Pb (mg/kg)	± SD	Concentración Certificada (mg/kg)	Eficiencia (%)
Montana (2710)	5422,8	23,83	5532 ± 80	98,0
Montana (2711)	1064,9	57,84	1162 ± 31	91,6
Buffalo River	148,1	0,47	150 ± 17	98,7

Tabla 19. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar. En la tabla se han agregado las concentraciones de plomo certificadas para cada uno de los suelos.

Muestra	Zn (mg/Kg)	± SD	Concentración Certificada (mg/Kg)	Eficiencia (%)
Montana (2710)	6592,91	273,93	6952 ± 91	94,8
Montana (2711)	326,65	33,73	350,4 ± 4,8	93,2
Buffalo River	404,96	4,86	408 ± 15	99,2

Tabla 20. Resultados de la digestión de sedimentos en suelos estándar. En la tabla se han agregado las concentraciones de zinc certificadas para cada uno de los suelos.

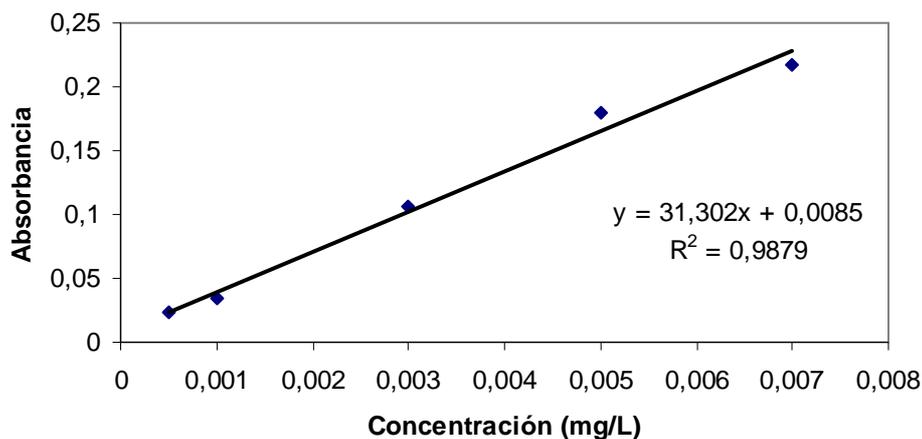
Como se puede observar en dichas tablas, las recuperaciones de arsénico oscilan entre 114,4 % para Montana clase NIST 2710, 97,2 % para Montana clase NIST 2711 y 109,1 % para Buffalo River. Las recuperaciones de cadmio oscilan entre 104,3 % para Montana clase NIST 2710, 94,7 % para Montana clase NIST 2711 y 111,2 % para Buffalo River. Para el hierro, las recuperaciones oscilan entre 97,9 % para Montana clase NIST 2710, 101,0 % para Montana clase NIST 2711 y 105,0 % para Buffalo River. En el caso del plomo las recuperaciones son de 98,0 % para Montana clase NIST 2710, 91,6 % para Montana clase NIST 2711 y de 98,7 % para Buffalo River. Finalmente para zinc, las recuperaciones son de 94,8 % para Montana clase NIST 2710, 93,2 % para Montana clase NIST 2711 y de 99,2 % para Buffalo River. Dichos valores fueron comparados con el valor certificado para cada uno de los suelos. El suelo estándar Buffalo River, mostró las mejores recuperaciones del análisis de As, Cd, Fe, Pb y Zn.

Los resultados obtenidos indican que el método de digestión seguido del análisis por EAA comúnmente empleado en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica permite obtener recuperaciones entre 91,6 % y 111,2 %, las cuales se consideran en la literatura como aceptables para este tipo de muestras (Cantwell et al, 2008; Yigiterhan, 2008; Zheng, 2008), además de ser un método seguro y rápido comparado con otros métodos de digestión (Siaka et al, 1998).

Anexo II

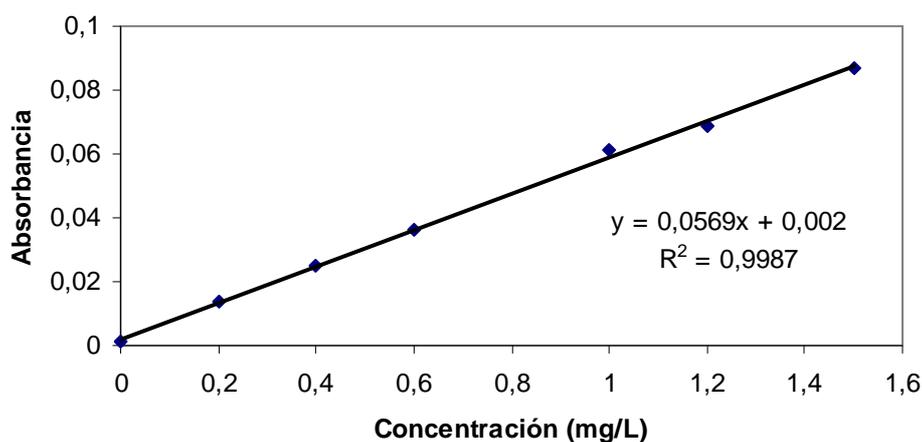
A continuación se presentan las curvas de calibración empleadas para calcular la concentración de As, Cd, Fe, Pb y Zn en las muestras a partir de las mediciones de absorbancia.

Curva de calibración (As)



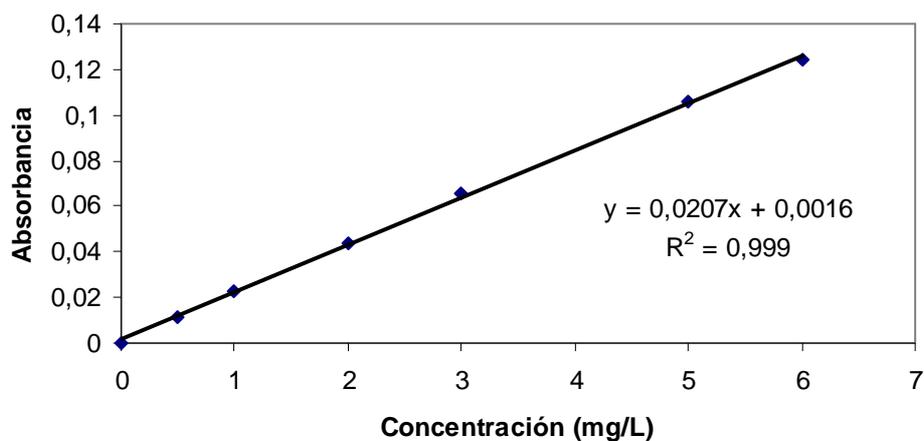
Gráfica 11. Curva de calibración para la determinación de As obtenida por espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros (agua y sedimentos).

Curva de calibración (Cd)



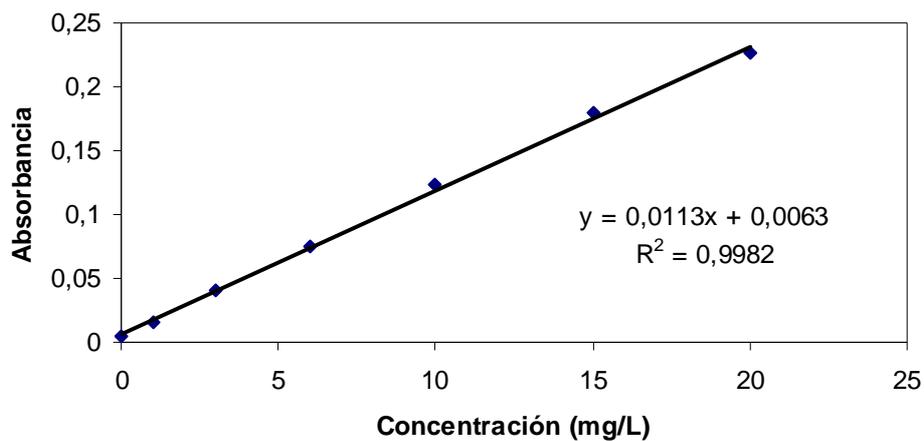
Gráfica 12. Curva de calibración para la determinación de Cd obtenida por espectrofotometría de absorción atómica por flama (agua y sedimentos).

Curva de calibración (Fe)



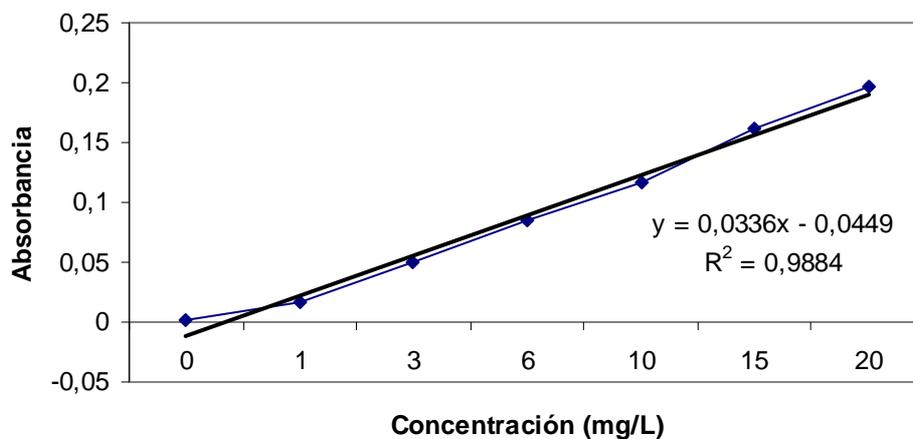
Gráfica 13. Curva de calibración para la determinación de Fe obtenida por espectrofotometría de absorción atómica por flama (agua y sedimentos).

Curva de calibración (Pb)



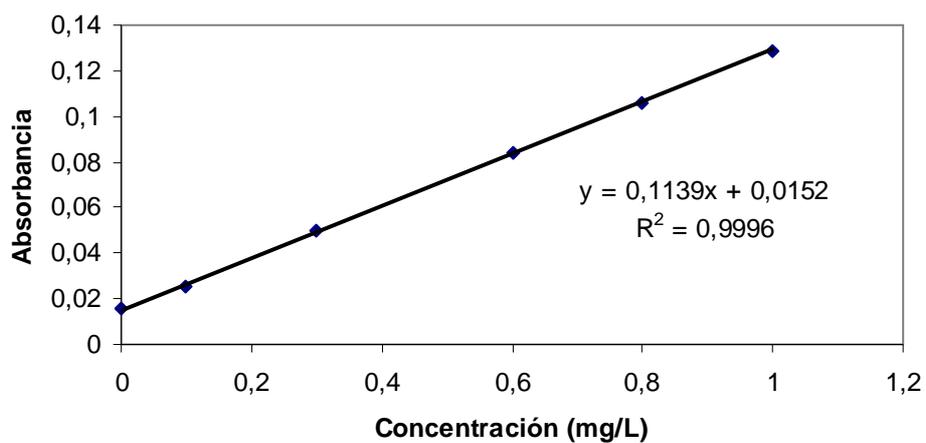
Gráfica 14. Curva de calibración para la determinación de Pb obtenida por espectrofotometría de absorción atómica por flama (sedimentos).

Curva de Calibración (Pb)



Gráfica 15. Curva de calibración para la determinación de Pb obtenida por espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito (agua)

Curva de calibración (Zn)



Gráfica 16. Curva de calibración para la determinación de Zn obtenida por espectrofotometría de absorción atómica por flama (agua y sedimentos).

Bibliografía

- ⊕ **APHA/AWWA/WEF, 1992**, American Public Health Association. Washington, D.C. USA.
- ⊕ **APHA/AWWA/WPCF, 2005**. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- ⊕ **Armienta M.A., Romero F.M., González-Hernández G., 2007**, "*Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México*", Applied Geochemistry, Vol. 22, 109-127.
- ⊕ **Armienta M.A., Talavera O., Morton O., Barrera M., 2003**, "*Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, México*", Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 71, 387-393.
- ⊕ **Armienta M.A., Talavera O., Villaseñor G., Espinosa E., Pérez-Martínez I., Cruz O., Ceniceros N. & Aguayo A., 2004**, Environmental behaviour of metals from tailings in shallow rivers: Taxco, central México, Applied Earth Science. (Trans. Inst. Min. Metall. B), Vol. 113, B76-B82.
- ⊕ **Armienta M.A., V. Zamora, S. Juárez, 1987**, *Manual para el análisis químico de aguas naturales en el campo y laboratorio*, Comunicaciones técnicas, Serie Docencia y Divulgación, No. 4, Instituto de Geofísica, UNAM, Laboratorio de Química Analítica.
- ⊕ **Barbara T. Watton., Bodek H., Lyman w. J., Reehl W. F., Rosenblatt D. H. 1988**. "*Environmental Inorganic Chemistry: properties, processes and estimation methods*". Pergamon Press., USA.
- ⊕ **Bauer Henry H., Gary D. Christian, James E. O'Reilly, 2000**. "*Instrumental Analysis*". Ed. Allyn and Bacon, Inc. 154-174.
- ⊕ **Bradl H.B. 2005**. *Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation*. Interface Science & Technology. Elsevier Academic Press. Vol. 6. 1- 143.
- ⊕ **Callender E., 2004**, "*Heavy metals in the Environment-Historical trends*", In: Holland, H. D. and Turekian K. K. (eds) Treatise of Geochemistry. Environmental Geochemistry, Vol. 9, 67-105.

- ⊕ **Callender E., Rice K. C., 2000**, "*The Urban Environmental Gradient: Anthropogenic Influences on the Spatial and Temporal Distributions of Lead and Zinc in Sediments*", In: Environmental Science & Technology, No. 2, Vol. 34, 232-238.
- ⊕ **Cantwell M. G., Burgess R. M., King J. M., 2008**, "*Resuspension of contaminated field and formulated reference sediments Part 1: Evaluation of metal release under controlled laboratory conditions*", In: Chemosphere, doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.08.007 (In Press).
- ⊕ **Campa U.M.F. y Ramírez J., 1979**. "*Evolución Geológica y Metalogénesis del Noroccidente de Guerrero*". Serie Técnico-Científica No. 1. UAGro.
- ⊕ **Ceniceros N., Armienta M.A., Talavera O., Villaseñor G., Espinosa E., Pérez-Martínez I., Cruz O. & Aguayo A., 2003**. Comportamiento ambiental de metales procedentes de jales cercanos a ríos en Taxco Gro., México. GEOS. Vol. 23(2). 129.
- ⊕ **Clair N. Sawyer, Perry L. McCarty, Gene F. Parkin 2001**. "*Química para ingeniería ambiental*". Cuarta edición. Editorial Mc Graw Hill.
- ⊕ **Clemens R., De Caritat P., 1998**. *Chemical elements in the environment: facsheets for the geochemist and environmental scientist*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 41-381.
- ⊕ **Coll-Hurtado, Sánchez-Salazar M.T., Morales J., 2002**. *La minería en México, Geografía, Historia, Economía y Medio Ambiente*. UNAM. Instituto de Geografía. 25-47.
- ⊕ **CONAGUA. 2007**. *Hidrología del Estado de Guerrero*. www.conagua.org.mx
- ⊕ **Conell D. W., 2005**. *Basic concepts of environmental Chemistry*. CRC press. Secund edition. 79-245.
- ⊕ **Cotton F.A., Wilkinson G., Murillo C. A., Botchman M., 1999**. "*Advance in Inorganic Chemistry*", 6th Edition. John Wiley & Sons.
- ⊕ **Csuros María, Csuros Csaba., 1990**. *Environmental sampling and analysis for metals*". Lewis Publishers.

- ⊕ **De Cerna y Fries C. 1981.** "*Hoja de Taxco 14Q-h(7) con resumen de la geología de la Hoja Taxco, estados de Guerrero, México y Morelos*". UNAM. Instituto de Geología. Carta Geológica de México. Serie 1. Mapa con Texto.
- ⊕ **Espinosa Serrano E., 2003,** "*Especiación y movilidad de metales pesados en sedimentos del río Taxco*", Tesis de Maestría, ICMYL, UNAM, 110.
- ⊕ **Fergusson J. E., 1990.** "*The heavy elements: Chemistry, environmental impact and health effects*". Pergamon Press. New York. 143-313.
- ⊕ **Förstner U., Wittman G. T. W., 1979.** *Metal pollution in the aquatic environment.* Springer Verlag Berlin Heidelberg. 1-250.
- ⊕ **Furness R. W., Rainbow P. S., 1990.** *Heavy metals in the marine environment.* CRC Press. Boca Raton, Florida. 27-47.
- ⊕ **Gismera J. M., Lacala J., Da Silvaa P., García R., Sevilla M. T., Procopio J. R. 2004.** "*Study of metal fractionation in river sediments. A comparison between kinetic and sequential extraction procedures*". Environmental Pollution. Vol.127. 175–182.
- ⊕ **Giuliano V., Pagnanelli F., Bornoroni L., Toro L., Abbrúzzese C. 2007.** "*Toxic elements at a disused mine district: Particle size distribution*". J. of Hazardous Materials. Vol.148. 409–418.
- ⊕ **INEGI.** www.inegi.gob.mx. 2007
- ⊕ **INEGI. 1999.** *Carta climática del estado de Guerrero.*
- ⊕ **INEGI. 2000.** *Gobierno del Estado de Guerrero. Anuario Estadístico del Estado de Guerrero.* Aguascalientes, Ags.
- ⊕ **Kemmer Frank N., John McCallion., 1982.** "*Manual del agua, su tratamiento, naturaleza y aplicaciones*". Ed. Mc Graw Hill. 1.1-4.23, 6.1-7.33, 29.1-29.11
- ⊕ **Loring D. and Rantala R., 1992.** "*Manual for the Geochemical Analyses of Marine Sediments and Suspended Particulate Matter*". Earth Science Reviews. Vol. 32. 235-283.
- ⊕ **Lucas H.H., González Pérez C., 2002.** "*Introducción al análisis instrumental*". Editorial Ariel. 45-49, 54-74.
- ⊕ **Manahan, E. Stanley, 2005,** *Environmental Chemistry*, 8th edition, CRC press, USA, 47-80, 169-181, 681-693.

- ⊕ **Meyers R. A., 2000.** *"Encyclopedia of Analytical Chemistry, Applications, Theory and Instrumentation"*. Jhon Wiley & Sons. Vol. 4. 3249-3279 pp.
- ⊕ **Moreno-Sánchez R., Cervantes C., 1999.** *"Contaminación ambiental por metales pesados"*. Editorial A.G.T. México. 1- 28.
- ⊕ **NOAA. 1999.** *"Screening Quick Reference Tables for Inorganics in Solids"*, 2.
- ⊕ **Pérez-Bendito D. and Rubio S., 1999,** *Environmental Analytical Chemistry*, First edition, Elsevier, Amsterdam, Vol. 32, 471-484.
- ⊕ **Pohanish R. P., 2001.** *"Sitting's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens"*. Fourth Edition. Noyes Publicatins. Vol. 2.
- ⊕ **Rufo Lourdes, Rodríguez N., Amils R., De la Fuente V., Jiménez-Ballesta R., 2007.** *"Surface geochemistry of soils associated to the Tinto River (Huelva, Spain)"*.In: Science of the Total Environment. Vol. 378. 223-227.
- ⊕ **Salomons W., Förstner U., Mader P., 1995.** *Heavy metals: problems and solutions*. Environmental Science. Springer Verlag.
- ⊕ **SECOFI, 1999.** *"Monografía Geológico-Minera del Estado de Guerrero"*. Consejo de Recursos Minerales. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Coordinación General de Minería.
- ⊕ **Siaka M., Owens C.M., Birch G. F., 1998.** *"Evaluation of some digestion methods for the determination of heavy metals in sediment samples by Flame-AAS"*. Analytical Letters. Vol. 31 (4), 703-718.
- ⊕ **Skoog A. Douglas. 1994.** *"Análisis instrumental"*. Cuarta edición. Editorial Mc Graw Hill. Barcelona, España. 228-268.
- ⊕ **U.S.E.P.A., 1995.** *"Profile of the Metal Mining Industry"*. EPA Office of Compliance Sector Notebook Project. EPA/310-R-95-008.
- ⊕ **Willard Hobart H. 1991.** *"Métodos instrumentales de análisis"*. Grupo editorial Iberoamericana. EUA. 229-248.
- ⊕ **World Health Organization. 2007.** http://www.who.int/water_sanitation-health/resourcesquality/wqachapter6.pdf (consultada el 15 de noviembre a las 16: 12 h).
- ⊕ **World Health Organization. 2007.** <http://ww.who.int/water-sanitation-health/resources/wqmonitor/en/index.html> (consultada el 15 de noviembre a las 18:05 h).

Bibliografía

- ⊕ **Yigiterhan O., Murray J. W., 2008**, “*Trace metal composition of particulate matter of the Danube river and Turkish rivers draining into the Black Sea*”, *Marine Chemistry*, Vol. 11, 63-76.
- ⊕ **Zheng N., Wang Q., Liang Z., Aheng D., 2008**, “*Characterization of heavy metal concentrations in the sediments of three freshwaters rivers in Huludau City, Northeast China*”, *Environmental pollution*, Vol. 154, 135-142.