



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE HÍDRICO DE ELEMENTOS
POTENCIALMENTE TÓXICOS EN ÁREAS MINERAS DE
REGIONES SEMIÁRIDAS. CASO DE ESTUDIO: MICROCUENCA
DEL ARROYO LA LUZ, MUNICIPIO DE CATORCE, SAN LUIS
POTOSÍ, MÉXICO.**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Maritza Ivette Durán Olmos

Asesor:

Dr. Israel Razo Soto

Co- asesor:

Dr. Isidro Montes Ávila

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2022





UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

28 de abril de 2022

**LIC. MARITZA IVETTE DURÁN OLMOS
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Israel Razo Soto e Isidro Montes Ávila**, Asesor y Coasesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 28 de abril del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Evaluación del transporte hídrico de elementos potencialmente tóxicos en áreas mineras de regiones semiáridas. Caso de estudio: microcuenca del arroyo La Luz, municipio de Catorce, San Luis Potosí, México”

Introducción.

1. Antecedentes de la contaminación por elementos potencialmente tóxicos en áreas mineras.
2. Descripción de la microcuenca del arroyo La Luz.
3. Metodología para evaluar el transporte hídrico de elementos potencialmente tóxicos en la microcuenca del arroyo La Luz.
4. Análisis y discusión de resultados de la evaluación del transporte hídrico de elementos potencialmente tóxicos en la microcuenca del arroyo La Luz.

Conclusiones.

Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR,

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo.
*etn.

“Rumbo al centenario de la autonomía universitaria”

Este trabajo se desarrolló en la Sierra de Catorce, San Luis Potosí México, los análisis se realizaron en el Área Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería en el Laboratorio de Geología, en el laboratorio de Difracción de rayos X en el instituto de Metalurgia y en el Laboratorio de Remediación Ambiental del Instituto de Metalurgia, pertenecientes a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

ESTUDIANTE BECADA POR MEDIO DEL:

Consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) No. de Beca 1073864.

LA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA RECIBE APOYO ATRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC).

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas e instituciones que me apoyaron y contribuyeron para la realización de este proyecto:

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por convertirse mi casa de estudios y formar parte de mi vida.

Al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, en particular a los profesores del Posgrado en Tecnología y Gestión del Agua, por su apoyo, consejos y aliento en el proceso de la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme la beca No. 1073864, para la realización de mi maestría.

Al Dr. Israel Razo Soto por asesorarme y guiarme en el camino de la realización de mi Tesis, y por su orientación para concluir mi maestría satisfactoriamente.

Al Dr. Isidro Montes Ávila por su apoyo, dedicación y tiempo en la recolección de muestras en campo, y sus consejos y observaciones a lo largo de este proceso.

Al Dr. Antonio Cardona Benavides por su orientación y aportaciones en las presentaciones de avance.

Al Dr. Cristóbal Aldama Aguilera por su orientación y aportaciones en las presentaciones de avance.

Al I.Q. Miguel Ángel Cortina Rangel, del Instituto de Geología, por brindarme su ayuda y conocimiento en la parte experimental.

A mis compañeros de la maestría, por compartir este tiempo y proceso conmigo, por compartir salones de clase, risas y trabajo, me llevo lo mejor de cada uno de ustedes y les deseo mucho éxito en lo que viene.

A mi novio, Jorge, por ser mi pilar y no dejarme caer en los momentos en que se ponía pesado, por siempre apoyarme y hacerme saber que yo puedo y que lo lograré, por siempre confiar en mi capacidad para hacer las cosas, por alentarme a ser una mejor persona y profesionalista, por compartir este proceso conmigo, por ser mi cómplice, mi inspiración, mi fuerza, mi amor y compartir cada momento juntos.

A mis papás, que sin ellos no estaría en el lugar en el que estoy, gracias por siempre apoyarme, alentarme y hacerme saber que, si se puede, por darme la educación que tengo y las bases y valores para ser una buena persona y profesionalista.

A todas las personas que conocí y me ayudaron y me alentaron en estos dos años, sobre todo a mi familia y amigos que siempre me apoyaron en todo momento.

Resumen

La minería ha desempeñado un papel importante en el desarrollo económico del país, sin embargo, también se considera una actividad que ocasiona graves daños ambientales. Uno de los impactos más importantes de la minería es la generación de grandes cantidades de residuos mineros, que pueden contener elevadas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como son As, Pb, Hg, Cu, Zn, Cd, entre otros. Cuando no existen las medidas de control y prevención adecuadas, estos residuos pueden dispersarse hacia el medio circundante generando riesgos de contaminación.

En la antigüedad, las compañías mineras carecían de programas de prevención de los impactos ambientales de sus actividades, por lo que en la actualidad es común encontrar sitios mineros contaminados por EPT, situación que se agrava en aquellos considerados como históricos, donde se pueden presentar severos riesgos ambientales y para la salud desapercibidos por no existir en la actualidad evidencias físicas de las actividades extractivas que ocurrieron en el pasado. Este se consideró el caso del Distrito Minero argentífero Real de Catorce (San Luis Potosí, México) donde se ha desarrollado la actividad minera. En la actualidad, en el sitio existen claras evidencias de la presencia de residuos mineros no controlados en el área con altos contenidos de EPT situados principalmente en las partes altas de la zona, considerando que los potenciales impactos por contaminación de éstas podrían persistir y representar graves riesgos para la salud y el ambiente, en este trabajo se estableció como objetivo evaluar el transporte hídrico de EPT, en suelos y sedimentos de la microcuenca del arroyo La Luz perteneciente al Distrito Minero argentífero Real de Catorce.

La metodología utilizada en la presente investigación consistió en: 1) describir el sistema ambiental y los antecedentes históricos del sitio con la ayuda de la revisión bibliográfica y visitas de reconocimiento; 2) delimitar el área de estudio y realizar un plan de muestreo; 3) realizar el muestreo ambiental y análisis químico de 24 muestras de suelo superficial y 39 de sedimentos; 5) evaluar la movilidad de EPT en muestras de suelo superficial y sedimentos; y 6) el análisis estadístico y generación de mapas mediante sistemas de información geográfica (SIG).

Los resultados obtenidos confirmaron la presencia de concentraciones que superaron los criterios o valores de referencia que establece la normativa nacional correspondiente. Los EPT de mayor preocupación son Pb y As, Sb y V. Las principales fuentes de contaminación identificadas fueron depósitos de residuos históricos no controlados, que se han dispersado al entorno principalmente por transporte hídrico a través de escorrentías intermitentes. Con respecto a las fuentes de contaminación, los resultados indican elevadas concentraciones de EPT en los sitios con mayor cercanía a estos residuos y otra potencial fuente está relacionada a la mineralización natural del área.

Las consecuencias de mayor preocupación por la contaminación de EPT se relacionan con la contaminación de extensas áreas de suelos rurales (áreas forestales y agrícolas) y urbanos y la capacidad de varios EPT para transferirse del suelo a la fase acuosa en contacto con agua de lluvia.

Abstract

Mining has played an important role in the economic development of the country, however, it is also considered an activity that causes serious environmental damage. One of the most important impacts of mining is the generation of large amounts of mining waste, which can contain high concentrations of potentially toxic elements (EPT), such as As, Pb, Hg, Cu, Zn, Cd, among others. Where appropriate control and prevention measures are not in place, such waste can be dispersed to the surrounding environment creating risks of contamination.

In ancient times mining companies lacked programs to prevent the environmental impacts of their activities, so it is now common to find mining sites contaminated by EPT, a situation that is aggravated in those considered historic, where severe environmental and health risks may occur unnoticed because there is currently no physical evidence of extractive activities that occurred in the past. This was considered the case of the Argentiferous Real Mining District of Catorce (San Luis Potosí, Mexico) where mining activity has developed. At present, there is clear evidence in the site of the presence of uncontrolled mining waste in the area with high EPT content located mainly in the upper parts of the area, whereas the potential pollution impacts of these could persist and pose serious risks to health and the environment, the aim of this work was to assess EPT water transport in soils and sediments of the micro-basin of the stream La Luz belonging to the Royal Argentiferous Mining District of Catorce.

The methodology used in the present research consisted of: 1) describing the environmental system and the historical background of the site with the help of a bibliographic review and a survey visit; 2) delimiting the study area and carrying out a sampling plan; 3) perform environmental sampling and chemical analysis of 24 surface soil and 39 sediment samples; 5) evaluate EFA mobility in surface soil and sediment samples; and 6) statistical analysis and mapping using geographic information systems (GIS).

The results obtained confirmed the presence of concentrations that exceeded the criteria or reference values established by the relevant national legislation. The EPT of greatest concern are Pb and As, Sb and V. The main sources of pollution identified were historical uncontrolled waste deposits, which have been dispersed to the environment mainly by water transport through intermittent runoff. Regarding the sources of contamination, the results indicate high concentrations of EPT in the sites closest to these residues and another potential source is related to the natural mineralization of the area.

The consequences of greatest concern for EPT contamination are related to the contamination of large areas of rural (forest and agricultural) and urban soils and the ability of several EPT to transfer from the soil to the aqueous phase in contact with rainwater.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	11
1. Antecedentes de la contaminación por elementos potencialmente tóxicos en áreas mineras....	12
1.2 Transporte hídrico	12
1.3 Sedimentos.....	12
1.3.1 Ciclo sedimentológico	13
1.4 Movilidad.....	14
1.5 Sitios mineros	16
1.6 Casos de la contaminación por elementos potencialmente tóxicos en sitios mineros	18
1.7 Región minera de Catorce.....	19
1.8 Justificación.....	21
1.9 Objetivo general:	21
1.9.1 Objetivos específicos:.....	21
1.10 Hipótesis:	21
2. Descripción de la microcuenca del arroyo la Luz	22
2.1 Ubicación del área de estudio.....	22
2.1. Residuos mineros de la microcuenca del arroyo La Luz.....	25
2.1.2 Caracterización hidrológica del área de estudio	29
2.1.3 Uso de suelo.....	32
2.1.4 Edafología.....	34
2.1.5 Geología.....	36
2.1.6 Clima.....	40
2.1.7 Variables meteorológicas.....	41
3. Metodología para evaluar el transporte hídrico de los elementos potencialmente tóxicos en la microcuenca del arroyo la Luz.	45
3.1 Delimitación del área de estudio	45
3.2 Diseño del muestreo	47
3.3 Toma de muestras.....	51
3.4 Análisis granulométrico.....	51
3.5 Determinación del pH y conductividad del suelo y sedimentos	52
3.6 Análisis químicos.....	53
3.6.1 Requerimientos analíticos.....	53
3.7 Determinación de las concentraciones totales de EPT por Fluorescencia de rayos X.	53

3.8 Digestión acida de muestras	54
3.9 Pruebas de movilidad	54
3.10 Análisis de muestras sólidas (sedimentos/suelos).....	54
3.11 Caracterización mineralógica.	55
4 Análisis y discusión de los resultados de la evaluación del transporte hídrico de elementos potencialmente tóxicos en la microcuenca del arroyo La Luz	56
4.1 Resultados del análisis granulométrico.....	56
4.2 Conductividad eléctrica y pH.....	58
4.3 Resultados de la concentración total.....	60
4.4 Resultados de la caracterización mineralógica	70
4.5 Resultados de las pruebas de movilidad	71
4.5.1 Concentraciones móviles	76
Conclusiones	82
Recomendaciones	84
Referencias.....	85
Anexos.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distritos mineros de Catorce	20
Tabla 2. Parámetros generales de la microcuenca arroyo La Luz	24
Tabla 3. Ubicación de residuos mineros en la microcuenca de estudio	26
Tabla 4. Caracterización de la microcuenca de la Sierra de Real de Catorce.....	31
Tabla 5. Precipitación media anual mediante el método aritmético (1979-2010).....	43
Tabla 6. pH y CE de la microcuenca del arroyo La Luz entre las diferentes fracciones.	58
Tabla 7. Porcentajes de muestras de sedimento y suelo que superaron los LMP y LD	61
Tabla 8. Estadística descriptiva de las concentraciones totales de EPT en la microcuenca arroyo La Luz.	62
Tabla 9. Comparación de concentraciones totales en área de residuos aguas arriba y abajo	68
Tabla 10. Porcentajes de recuperación SRM 2710a.....	70
Tabla 11. Principales fases minerales identificadas en las muestras por Difracción de Rayos X.....	70
Tabla 12. Tabla estadística descriptiva de la concentración soluble	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo conceptual de un sitio minero	17
Figura 2. Mapa base de la microcuenca del arroyo La Luz.....	23
Figura 3. Fotografías del cauce principal Arroyo La Luz	25
Figura 4. Corriente tributario del arroyo la Luz.....	25
Figura 5. Corriente tributaria y residuo.....	25
Figura 6. Mapa de ubicación de residuos en el área de estudio microcuenca del arroyo La Luz	27
Figura 7. Foto del terrero M5	28
Figura 8. Terrero M7 dentro de la localidad la Luz	28
Figura 9. Residuo La Candelaria M2.....	28
Figura 10. Terrero M4	28
Figura 11. Foto del estacionamiento Ogarrio.....	28
Figura 12. Jales (M9)	28
Figura 13. Mapa hidrológico microcuenca arroyo La Luz, San Luis Potosí.....	30
Figura 14. Perfil de elevación del cauce principal arroyo La Luz.....	31
Figura 15. Áreas de cultivo temporal en el área de estudio.	32
Figura 16. Mapa de uso de suelo y vegetación, de la microcuenca del arroyo la luz	33
Figura 17. Mapa de edafología microcuenca del arroyo La Luz	35
Figura 18. Mapa geológico tipo de roca de la zona de estudio	38
Figura 19. Mapa de clima de la microcuenca en estudio.....	41
Figura 20. Mapa de ubicación de las estaciones climatológicas de la zona de estudio.....	42
Figura 21. Climograma del periodo 1979-2010 estación Normal del Desierto.....	43
Figura 22. Climograma del periodo 1979-2010 estación Vanegas.....	44
Figura 23. Climograma del periodo 1979-2010 estación San José de Coronados	44
Figura 24. Mapa de delimitación del área de estudio.....	46
Figura 25 A. Mapa del diseño del muestreo en la microcuenca del arroyo La Luz.....	48
Figura 25B. Mapa del muestreo final de la microcuenca del arroyo La Luz.....	49
Figura 26. Mapa del muestreo y etiquetas de muestras de la microcuenca en estudio	50
Figura 27. Toma de muestra de sedimento cauce principal, Real de Catorce	51
Figura 28. Toma de muestra de suelo, zona de descarga, Real de Catorce.....	51
Figura 29. Granulometría de muestras	52
Figura 30. Fotografía del equipo XRF portátil DELTA Professional	53
Figura 31. Distribución de pesos en sedimentos y suelos.....	57
Figura 32. Distribución granulométrica cauce principal del arroyo La Luz e	58

Figura 33. Gráfica de conductividad eléctrica	59
Figura 34. Gráfica de pH en las diferentes áreas de la microcuenca arroyo La Luz.....	60
Figura 35. Mapa de distribución de concentraciones del As	64
Figura 36. Mapa de distribución de concentraciones de Sb.	65
Figura 37. Mapa de concentración de Pb de la microcuenca en estudio.	66
Figura 38. Mapa de concentración de V de la microcuenca del arroyo La Luz.	67
Figura 39. Gráfico de correlación ICP-MS y FRX de As	69
Figura 40. Gráfico de correlación ICP-MS y FRX de Sb	69
Figura 41. Gráfico de correlación ICP-MS y FRX de V	69
Figura 42. Gráfico de correlación ICP-MS y FRX de Pb.....	69
Figura 43. Mapa de concentración soluble de Pb.....	73
Figura 44. Mapa de concentración soluble de Sb	74
Figura 45. Mapa de concentración soluble de As	75
Figura 46. Mapa de concentración soluble de V.....	76
Figura 47. Gráfica de concentraciones móviles de EPT.....	77
Figura 48. Gráfica de porcentajes móviles de EPT.	78
Figura 49. Presencia de Fe en el arroyo La Luz	79
Figura 50. Conductividad eléctrica en el arroyo la Luz.....	80
Figura 51. pH arroyo La Luz	80

Lista de abreviaturas

EPT: elementos potencialmente tóxicos

DAM: Drenaje ácido de mina

LMP: límite máximo permisible

LD: límite de detección

CE: conductividad eléctrica

pH: potencial de hidrógeno

SRM: material estándar de referencia

FRX : fluorescencia de rayos X

DRX: difracción de rayos X

ICP-MS: Espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente

NOM: Norma oficial mexicana

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

CLICOM: Sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLImate COMputing project.

SIATL: Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas

Introducción

La industria minera históricamente ha sido de gran importancia en el desarrollo económico de nuestro país; México está localizado en una región volcánica rica en minerales; en el cual, la tradición minera se remonta a la época prehispánica; y se realiza básicamente en dos etapas: explotación y beneficio de metales (Sepúlveda, 2011). Sin embargo, la minería también es considerada como fuente significativa de contaminación; (Romero *et al.*, 2008) el principal problema asociado con los residuos mineros generados, se relaciona con su inadecuada disposición, exposición a la intemperie y a procesos erosivos, produciendo la dispersión de elementos potencialmente tóxicos (EPT) hacia el entorno (Volke- Sepúlveda *et al.*, 2005; Romero, 2011).

Los EPT tales como el Ag, As, Be, Cd, Hg, Co, Cr, Hg, Sb, V, entre otros, son elementos que se han clasificado como altamente tóxicos por diferentes organizaciones como la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (U.S EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), y se consideran como el principal contaminante emitido por la actividad minera (Siegel, 2002). Los impactos de los EPT liberados por la minería en la calidad del agua y la salud ambiental se originan principalmente por el drenaje ácido de minas (DAM) y las descargas fugitivas de aguas residuales no tratadas o derrames de soluciones durante los procesos de producción y transformación o por erosión y arrastre hídrico de las partículas del residuo (Bebbington Williams, 2008).

Para identificar posibles afectaciones a los recursos hídricos en sitios mineros, es necesario conocer las fuentes (residuos), los medios de dispersión (transporte hídrico) y destino (zonas de descarga) de los EPT, así como la movilidad química de éstos, es decir, la capacidad de estos de transferirse desde las fases sólidas hacia la fase acuosa (Russi Martínez, 2002).

En la microcuenca en estudio, se llevó a cabo la explotación, el beneficio y la inadecuada disposición de residuos; en donde se llegaron a encontrar hasta 12 depósitos de residuos abandonados, compuestos principalmente por material estéril (Díaz Barriga, 2020).

A pesar de que se han realizado investigaciones en el área (Díaz Barriga, 2020), que evidencian la presencia de residuos mineros históricos con altas concentraciones de EPT, no se habido realizado un estudio a partir del cual se contribuya a la evaluación del transporte hídrico de estos EPT en sedimentos y suelo de la microcuenca en estudio impactada por una gran variedad de residuos provenientes de las diferentes etapas de actividad minera que ha sufrido el distrito minero de Catorce, así como la movilidad de los elementos químicos en los recursos hídricos.

Para lograrlo, se realizó la evaluación de las concentraciones totales y solubles, de los sedimentos y suelo del arroyo la Luz de la microcuenca, para conocer el nivel y la extensión de la contaminación por los EPT asociada al transporte hídrico de residuos mineros de la zona, de acuerdo con las especificaciones de la normativa mexicana.

1. Antecedentes de la contaminación por elementos potencialmente tóxicos en áreas mineras.

EPT es un término general que incluye a todos aquellos elementos químicos (As, Ba, Be, Cd, Cr (VI), Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Sb, Tl y V) que debido a sus características y concentraciones pudieran ser tóxicos para la biota. Una fuente posible de estos pueden ser los residuos mineros que están definidos como materiales sólidos heterogéneos, provenientes de las etapas de procesamiento, extracción y explotación, considerados desechos por no tener valor económico, encontrados en o cerca de los sitios de la mina. Estos pueden estar relacionadas con operaciones y procesos mineros antiguos y/o recientes (Zúñiga, 1999).

Los EPT contenidos en los residuos de las operaciones mineras y metalúrgicas a menudo se dispersan por el viento y/o el agua (Navarro *et al.*, 2008) y se reconoce ampliamente que afectan a la calidad de las aguas abajo de las minas.

1.2 Transporte hídrico

El transporte físico del material sólido con contenidos de EPT por acción del movimiento del agua, provoca una clasificación en los sedimentos que dependerá del tamaño y densidad específica de las partículas, conforme disminuye el gradiente de altitud de la corriente, la energía hidráulica se reduce y ocurre gradualmente la sedimentación de las partículas, ocurriendo primero la sedimentación de las partículas gruesas y pesadas en los gradientes de altitud más grandes, y después las partículas finas y ligeras en los gradientes más pequeños (Siegel, 2002). Y cuando una corriente de agua abandona la zona montañosa ésta se encuentra con una brusca disminución de la pendiente, lo que la hace perder velocidad y por consiguiente capacidad de transporte. Al perder velocidad, los sedimentos originados por procesos erosivos son depositados en la parte topográficamente más baja del paisaje (valles, piedemontes, llanuras costeras), creando diversas formas deposicionales entre las que destacan las de origen fluvial: abanicos aluviales, deltas, terrazas y llanuras de inundación (Gómez, 1996; Iriondo, 2007). Los abanicos aluviales son elementos comunes en ambientes con condiciones climáticas diferentes. El aluvión se desplaza pendiente abajo por la llanura intermontana, perdiendo paulatinamente el resto de la carga (Iriondo, 2007). Su superficie forma un segmento de un cono que radia pendiente abajo desde el punto donde la corriente abandona el área-fuente (Gómez, 1996).

Un abanico o cono aluvial, es un depósito de sedimentos -gravas, arenas y sedimentos más finos- que se acumulan en la base de un frente montañoso o en el interior de un área montañosa, allí donde el relieve se amplía y disminuye la pendiente de una corriente de agua (Gómez, 1996).

1.3 Sedimentos

El Subcomité de Terminología Sedimentológica de la Unión Americana de Geofísicos (AGU) ha adoptado la siguiente definición para los sedimentos: "Fragmentos de material transportado por, suspendido en, o depositado por agua o aire, o acumulado en los lechos por otros agentes naturales;

cualquier acumulación detrítica. En la definición general de la AGU no está comprendido el hielo, la madera o el material de origen orgánico que flota en los ríos aluviales.

Trabajos recientes han demostrado la capacidad de los sedimentos para registrar fielmente el impacto ambiental en los sistemas fluviales a lo largo del tiempo (Bubb y Lester, 1994; Murray, 1996). La marcada tendencia de los metales pesados hacia la división en fase sólida y la capacidad de los sedimentos para integrar información a largo plazo hace que los sedimentos sean atractivos para evaluar el impacto de la minería, la industria y el desarrollo urbano en el medio fluvial (Mann y Lintern, 1983; Greesy *et al*, 1984).

1.3.1 Ciclo sedimentológico

El relieve de nuestro planeta ha sido y continúa siendo modelado por los procesos de erosión, transporte, deposición y consolidación de sedimentos. Tales procesos se han demostrado activos a través de tiempos geológicos. Los principales agentes dinámicos externos que actúan en los procesos mencionados son la gravedad, el agua, el viento y el hielo. La superficie terrestre se encuentra expuesta a la acción de diferentes agentes y condiciones climáticas, los cuales originan procesos físicos y químicos que desintegran y transforman las rocas originarias. En este caso, se dice que la roca ha sufrido un proceso de intemperización o meteorización. Todos los procesos de intemperización originan: i) la desintegración mecánica o física de las rocas (meteorización física) y ii) la descomposición química (meteorización química) (Basile *et al*, 2018).

Los productos resultantes de la desintegración mecánica y de la descomposición química de las rocas forman la gran variedad de los depósitos sedimentarios. Estos, en general, pueden ser residuales o transportados. Los residuales permanecen en el lugar en que se formaron, o yacen directamente sobre la roca parental de la cual se derivaron. Por el contrario, los transportados han sido depositados en zonas alejadas del lugar de generación original por algunos de los agentes de transporte: gravedad, agua, viento y hielo. De acuerdo con el agente de transporte, los depósitos sedimentarios pueden ser identificados respectivamente como, coluviales, aluviales, eólicos y glaciares (Basile *et al*, 2018).

Los depósitos de sedimentos aluviales son formados por los materiales detríticos transportados por el agua y depositados debido a una pérdida de competencia del flujo (disminución de velocidad). Sedimentos fluviales es el término general de los detritos que forman los depósitos dejados por un río, los cuales incluyen material fino (limo, arcilla) y material grueso (arena, grava, cantos rodados, etc.). Los sedimentos fluviales se encuentran en: i) el cauce principal del río; ii) la planicie aluvial, creada por divagación del cauce y depósitos durante inundaciones; iii) el fondo de lagos y embalses; iv) los conos de deyección (abanicos aluviales), v) el fondo de estuarios, donde pueden estar interestratificados con sedimentos transportados por el mar al estuario y vi) las formaciones deltaicas (Basile *et al*, 2018).

En cierto sentido, el ciclo sedimentológico prácticamente estipula que el sedimento generado inevitablemente es transportado aguas abajo hacia las zonas de depósito. El sedimento erosionado está destinado a ser transportado y depositado en otro lugar. Una partícula erosionada puede recorrer

una distancia relativamente corta, como el caso de la deposición de un deslizamiento en el pie de una ladera; puede recorrer una distancia mayor, como en el caso de un flujo de detritos que se deposita en un cono de deyección o puede ser transportada por el flujo mantiforme sobre el terreno, ingresar a la red hidrográfica y recorrer distancias considerablemente mayores suspendida en el seno de la corriente hídrica hasta depositarse en la planicie aluvial, en un embalse o alcanzar el cuerpo receptor (Basile *et al.*, 2018).

El transporte de sedimentos se ve altamente influenciado por la lluvia, aquellas de gran intensidad pueden superar la capacidad de infiltración provocando la destrucción de vegetación superficial, dando lugar a importantes fenómenos de erosión provocadas por el gran volumen de escorrentía superficial (FAO, 1997); el viento también juega un papel importante en el transporte de sedimentos ya que son transportados por saltación del suelo, favoreciendo su dispersión y enriqueciendo el medio con nuevos materiales, los cuales pueden verse modificados en función de las condiciones del medio (Romero-Guadarrama, 2011).

Ávila-Pérez (1999) menciona que los sedimentos son excelentes concentradores de algunos de los EPT considerados como los más tóxicos, debido a que la mayoría no son eliminados por procesos naturales, siendo capaces incorporarse a las cadenas alimenticias (Salomons *et al.*, 1987; Kabata-Pendias, 2011).

Los EPT pueden ser fácilmente transportados en los sedimentos a partir de la erosión hídrica, convirtiéndose en una potencial fuente de contaminación a los recursos hídricos, y al entorno inmediato de sitios no contaminados debido su migración y liberación a través de la modificación de las condiciones de pH, potencial redox del agua o del suelo, así como las características químicas y texturales del suelo (Salomons *et al.*, 1987; Kabata-Pendias, 2011).

1.4 Movilidad

La movilidad se refiere a la capacidad de un elemento para moverse dentro de los fluidos después de la disolución (Kathleen Smith y L.O Huyck, 1999). Dos de los factores que controlan directamente la movilidad y la solubilidad son conductividad eléctrica y pH. La química de la solución de un elemento se ve profundamente afectada por cambios en el estado de oxidación, mientras que las reacciones de disolución, incluyendo la hidrólisis, la complejación inorgánica, la complejación con aniones orgánicos más pequeños (como el oxalato) y la sorción/desorción, están controladas por el pH (Stumm y Morgan, 1981; Buffle, 1988).

En condiciones de pH alto, aniones y oxianiones (como los de Te, Se, Mo, U, As, P y B) son más móviles y la mayoría de los cationes (como los de Cu, Pb, Hg y Cd) son menos móviles, mientras que a pH bajo el inverso es generalmente cierto. Donde las sustancias húmicas o los subproductos biológicos están presentes, sin embargo, se forman complejos organo-metálicos estables, aumentando la movilidad de los oligoelementos (Stumm y Morgan, 1981; Buffle, 1988).

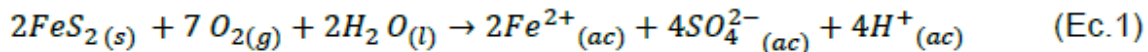
Entender las reacciones químicas involucradas en la interacción agua-mineral es necesario para establecer los factores que controlan la movilidad de los EPT. La caracterización mineralógica en

detalle proporciona información para definir qué controles son fundamentales entre la lixiviación de metales y el drenaje ácido (DAM) (Plumlee, 1999).

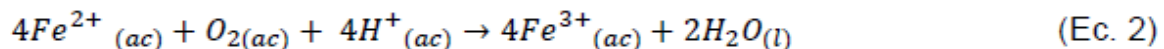
1.4.1 Drenaje ácido

El "drenaje ácido de la mina" (DAM) se refiere a un proceso particular por el cual efluentes ácidos se forma de la oxidación de minerales del sulfuro. Un número de otros términos también se utilizan para describir este proceso como "drenaje ácido" o "drenaje ácido de la roca" (ARD). Estos dos últimos términos resaltan el hecho de que hay, de forma natural, yacimientos de sulfuro y rocas sulfídicas que activamente capean, oxidan y causan manantiales y corrientes ácidos (Furniss et al. 1999; Posey et al. 2000; Munk *et al.* 2002). De hecho, las corrientes ácidas que drenan tales minerales y rocas pueden contener altos niveles de metales y metaloides que exceden los estándares de calidad del agua y resultan en efectos tóxicos para la vida acuática. El uso de estos términos intenta destacar el hecho de que el DAM se produce de forma natural y no relacionada con las actividades mineras. Sin embargo, estas situaciones naturales son raras en comparación con aquellas en las que la minería ha sido directamente responsable de la acidificación de las aguas (Lottermoser, 2007).

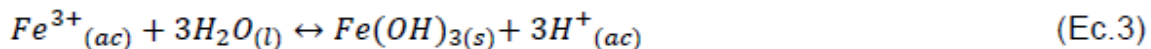
El drenaje ácido se forma por oxidación natural de minerales de sulfuro metálicos, principalmente de hierro, como la pirita (FeS_2) o pirrotita ($Fe(1-x)S$), esto da como resultado la liberación de elementos mayores, menores y traza contenidos en residuos minero-metalúrgicos. Asimismo, genera lixiviados que se caracterizan por pH ácido y altas concentraciones de sulfato, hierro y otros elementos (Ec 1).



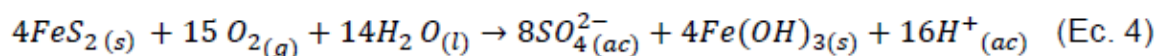
Los elementos presentes como impurezas en la estructura cristalina de la pirita son liberados durante su oxidación. En la presencia de un exceso de O_2 el Fe (II) es, posteriormente oxidado a Fe (III) y se genera un consumo de ácido por la reducción de oxígeno (Ec 2).



Los iones férricos son susceptibles de hidrolizarse produciendo un precipitado tipo hidróxido de hierro [$Fe(OH)_3$], como se observa en la Ec. 3:



Aunque la oxidación del Fe (II) (Ec. 2) es una reacción consumidora de ácido, el proceso posterior de hidrólisis (Ec.3) del Fe (III) generado produce tres moles de H^+ . La combinación de estas reacciones produce la siguiente reacción general:



Cabe señalar que las anteriores reacciones de oxidación de pirita son ecuaciones simplificadas y no describen completamente las complejas reacciones necesarias para llegar a los productos finales de la reacción (Garrels y Thompson, 1960; Nordstrom y Southam, 1997).

1.4.2 Atenuación natural del DAM

Las fases minerales más importantes para amortiguar el DAM aumentando el pH son la calcita, siderita, los hidróxidos de aluminio, los hidróxidos de hierro y los aluminosilicatos. La capacidad de neutralización en los jales de mineral de sulfuro es predominantemente de minerales carbonatados (calcita y dolomita) porque la mayoría de los minerales no carbonatados asociados con depósitos metalíferos son extremadamente lentos para reaccionar y afectar el pH (Jambor *et al.*, 2000). A medida que aumenta el pH, las especies de metales acuosos tienden a precipitarse como hidróxido, oxihidróxido o hidroxisulfato (Nordstrom, 1982). Además, a medida que aumenta el pH, los metales disueltos pueden adsorberse en las superficies de estos minerales recién formados y/u otras superficies presentes en el medio ambiente, como la materia orgánica debido a la disminución de la competencia con los protones, disminución del potencial superficial, y aumento de la hidrólisis de iones metálicos a pH circumneuro. En el contexto de las explotaciones mineras, la atenuación natural se refiere a la reducción observada de las concentraciones de contaminantes y/o de los caudales máxicos de contaminantes a medida que los contaminantes son transportados desde su origen (Nordstrom, 1982).

Los sistemas de tratamiento que se basan en gran medida en procesos químicos abióticos incluyen canales abiertos de piedra caliza, canales anóxicos de piedra caliza y sistemas sucesionales productores de alcalinidad. En los canales abiertos de piedra caliza, el agua ácida fluye sobre la piedra caliza triturada o algún otro agente alcalino neutralizando el pH y eliminando el aluminio soluble, el hierro y el manganeso a través de la precipitación mineral manteniendo el hierro en un estado reducido (como hierro ferroso) para evitar la oxidación del hierro y la consiguiente precipitación de óxidos férricos hidrosos en las superficies de piedra caliza. Tal precipitación superficial o blindaje por precipitados de hierro y aluminio reduce en gran medida la eficacia del material neutralizante (Mukhopadhyay *et al.*, 2007; Ziemkiewicz *et al.*, 1997).

1.5 Sitios mineros

Son los sitios en donde históricamente se han llevado a cabo actividades mineras y en algunos casos han sido abandonados y no se han realizado trabajos enfocados a la mitigación ambiental, la rehabilitación y el manejo de residuos (Silva Ontiveros & Sánchez Salazar, 2021). Los sitios mineros son diferentes entre sí, pero algunas de sus características pueden conceptualizarse mediante el modelo que se muestra en la figura 1 (Díaz Barriga, 2020) donde se representan las fuentes, medios de transporte y receptores.

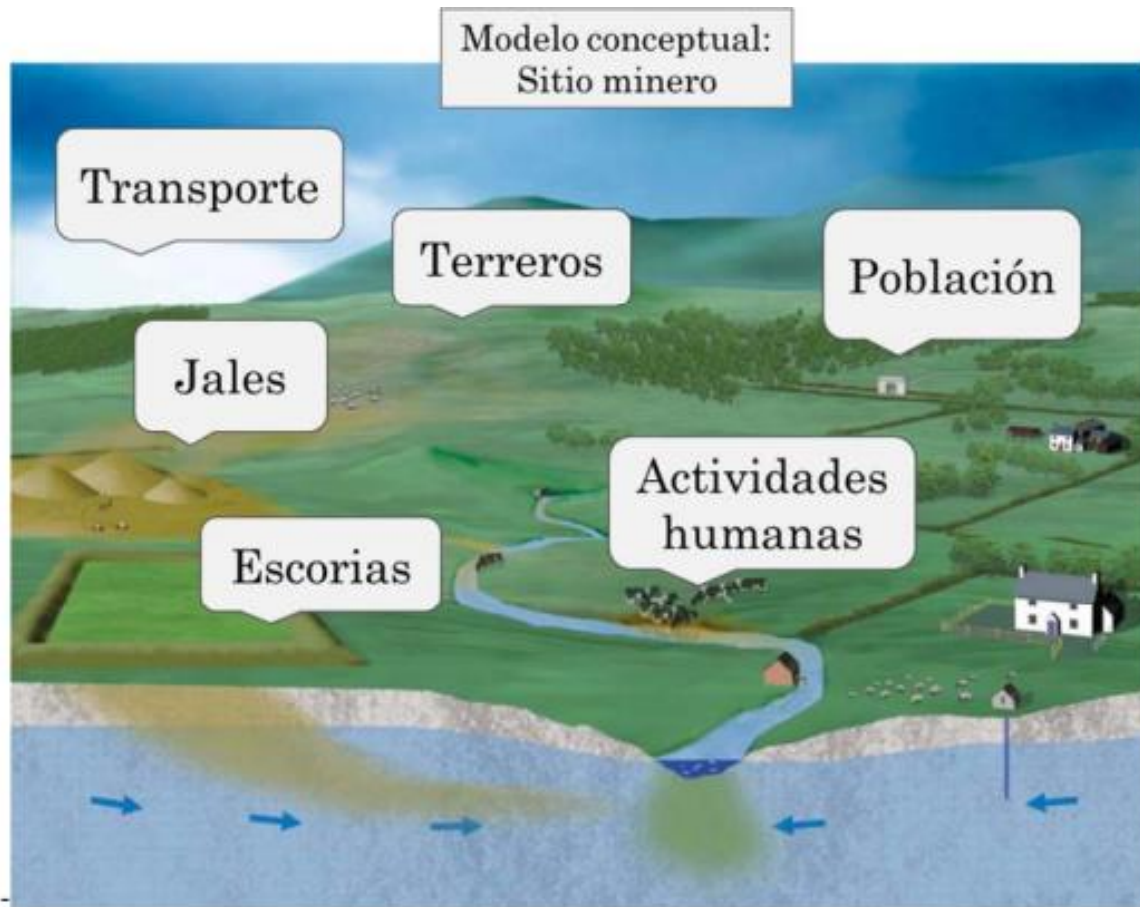


Figura 1. Modelo conceptual de un sitio minero adaptado por Díaz Barriga (2020).

De acuerdo con la normativa mexicana los residuos mineros se pueden clasificar en:

- Jales. – Residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.
- Terreros. – Residuos conformados por apilamiento de material mineral de baja ley.
- Escorias. – Residuos provenientes de las operaciones de fundición por la acción química y la fusión, a través de la combinación de fundentes (carbonatos y silicatos) con la ganga o porción sin valor del mineral.
- Tepetate. - Residuos conformados por apilamiento de material mineral, sin valor económico. Incluye al descapote.

1.5.1 Otros impactos ambientales de la actividad minera

A pesar de que la actividad minera ha sido de gran importancia para el desarrollo económico del país esta tiene diversos impactos el ambiente como lo son: emisiones sólidas durante la voladura y arranque de material, o durante los procesos de carga y transporte, o en relación con procesos metalúrgicos, gases emitidos en la combustión de la maquinaria, la emisión natural durante el proceso de extracción (CO₂ , CO, grisú —mezcla explosiva de metano y aire), ruido: generado por voladuras,

maquinaria pesada de arranque y transporte, desertización, deforestación, erosión, pérdida de suelo fértil, modificación del relieve, impacto visual, alteración de la dinámica de los procesos de ladera y contaminación por metales pesados (Cu, Pb, Cd, Hg, etc), metaloides (As) e hidrocarburos generada por efluentes líquidos y s, acidificación por acumulación y oxidación de sulfuros y drenaje ácido, incluyendo la adición de sales al suelo (sulfatos), desestabilización de laderas por sobrecargas y/o excavaciones y alteraciones en el nivel freático, subsidencia por huecos y subsidencia por depresión en el nivel freático, variaciones en el nivel freático, variaciones en el régimen de recarga y modificaciones en el flujo subterráneo por efectos barrera, drenajes inducidos, infiltración restringida/favorecida, contaminación por metales pesados y metaloides (As): en coloides en suspensión, en especies en disolución (Oyarzún *et al.*, 2006).

1.6 Casos de la contaminación por elementos potencialmente tóxicos en sitios mineros

La contaminación del suelo debida a actividades mineras anteriores es un importante problema ambiental en muchos países europeos. La mina Aljustrel (SW Portugal), situada en el sector occidental del Cinturón Pirita Ibérico (IBP) presenta un impacto visual y ambiental negativo como consecuencia de la actividad minera que se ha desarrollado desde la época romana. Sus efectos también frenan la calidad de vida de la población. La exposición de pirita y otros sulfuros al aire es responsable de la contaminación observada en suelos, aguas superficiales y sedimentos de corrientes. Este trabajo investigó la carga de contaminación de elementos tóxicos potenciales en muestras de suelo recolectadas alrededor de la zona minera de Aljustrel. (Candeias *et al.*, 2011). Los resultados mostraron una grave contaminación del suelo (principalmente As, Cd, Cu, Pb y Zn). Las concentraciones de As Cu Cd, Pb Zn están por encima de los valores regionales de referencia de la zona del sur de Portugal (SPZ). Las concentraciones medias de As, Cd, Cu, Pb y Zn superan los valores establecidos para los suelos mundiales, la Unión Europea, Portugal y Andalucía. Los resultados sugirieron que los patrones de distribución de las concentraciones de Co, Cr y Ni en el área de Aljustrel están influenciados principalmente por la naturaleza litológica y geoquímica de la roca madre. El fondo del suelo de este dominio geológico se caracterizó por un contenido de metales pesados relativamente alto, esencialmente derivado de las rocas madre (Candeias *et al.*, 2011).

Otro ejemplo del contenido potencialmente peligroso de los residuos de las minas es el caso de la mina abandonada de Mónica (Bustarviejo) en la Comunidad Autónoma de Madrid (España Central) donde estudiaron jales dispersos alrededor de la mina abandonada para determinar la concentración de varios elementos tóxicos potenciales y su impacto geoquímico en los suelos circundantes. Elementos como As, Cu, Zn, Cd, Pb, W, Ag, Fe se encontraron en concentraciones muy altas, contaminando el suelo en diversos grados (estos elementos eran a veces de 10 a 20 veces más altos en los residuos que en los suelos sin mezclar) (García Giménez Rosario & Jiménez-Ballesta Raimundo, 2017).

En México en el caso de Noria de Ángeles, Zacatecas se hizo un estudio en la zona minera y se encontraron concentraciones de Pb, Cd y As de los pasivos ambientales y las concentraciones de Pb, Cd, Hg y As en agua exceden los límites permisibles establecidos en las normas nacionales e internacionales (Cerón Rivera *et al.*, 2018); se han reportado pocos casos de contaminación de suelo

por metales pesados causada por operaciones de fundición, destacando los casos de contaminación de suelo por plomo en Torreón (Coahuila) y en Chihuahua (Chihuahua); y por Pb y As en San Luis Potosí (Cerón Rivera *et al*, 2018).

Algunos ejemplos de contaminación en sedimentos se han reportado a lo largo del mundo como el caso de a Sydney, Australia en el lago Burragorang donde el contenido de metales pesados de los sedimentos del lecho de las corrientes caracteriza el impacto ambiental en esta cuenca rural, las concentraciones más altas de Co y Cr en los sedimentos fluviales de esta cuenca están asociadas con las actividades de extracción de carbón (Birch *et al.*, 2001). En el caso de Sudáfrica se ha cubierto una superficie total de 295.000 km² (25% de la superficie de Sudáfrica) con una densidad de muestreo en sedimentos de la corriente de primer orden por kilómetro cuadrado en las proximidades de las regiones mineras y donde se obtuvieron reveló grandes anomalías de Cu, Ni, Co y Au (Lombard *et al*, 1999), otro ejemplo en una región semiárida se presenta en Región de Coquimbo, Chile zona que tiene un largo historial de actividades mineras donde se encontraron anomalías importantes en el caso del Cu, Au y As (Oyarzun *et al.*, 2007).

Algunos casos de contaminación en áreas mineras de regiones semiáridas en México se enlistan a continuación; en el área de Mineral de Pozos, en el centro-norte (extracción de Ag y Au) donde relaves fueron depositados a lo largo del arroyo principal de la zona, en condiciones semidesérticas, y ampliamente dispersos por el agua fluvial durante las estaciones lluviosas, se encontraron concentraciones de Cu, Zn, As, Cd y Pb están por encima de los promedios de la corteza terrestre (Carrillo-Chávez *et al*, 2006). Otro ejemplo es el caso de Zimapán en el río Tolimán donde se determinaron las concentraciones y distribución geoquímica de los sedimentos de As, Cd, Pb y Zn para evaluar las zonas afectadas por jales oxidados y no oxidados, y su movilidad medioambiental donde se encontraron altas concentraciones de Cd, Pb y Zn y donde se encontró que el factor clave para la atenuación de la movilidad del arsénico, cadmio, plomo y zinc es la calcita debido a su capacidad tampón de pH y la neutralización del drenaje ácido de la mina (Espinosa *et al.*, 2009). En el Distrito minero de Taxco, México, Espinosa y Armienta (2007) se encontraron concentraciones elevadas de Fe, Pb y Zn en sedimentos de arroyo afectados por relaves y efluentes de una mina; con la aplicación del Tessier *et al.* (1979) Otro ejemplo se presenta en el río San Pedro, México donde se albergan algunas de las mineralizaciones de cobre más importantes de México; y la determinación de las concentraciones totales mostraron altos niveles de metales pesados (Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn) (García-Lorenzo *et al*, 2011).

1.7 Región minera de Catorce

Real de Catorce fue fundado en 1773 cuando se descubrió la primera veta en el paraje Los Catorce; es así como en 1778 empezó la primera etapa de mayor producción de recursos minerales en esta área y continuó durante todo el siglo XVIII, fue en ese entonces uno de los principales productores de oro y plata del país y probablemente del mundo, con una producción de 2, 990 t de plata entre 1773 y 1827 especialmente por amalgamación, aunque también hubo procesos de fundición (Ávalos, 2009). Sin embargo, el crecimiento acelerado y la ambición de extraer más en el menor tiempo generaron una estructura social débil, cambiante, y altamente vulnerable ocasionando el declive de Catorce al

igual que lo sucedido en otros Reales que vino con el agotamiento de los yacimientos, que para la tecnología de la época fueron ya insuficientes, puesto que las minas tenían que ser exploradas a mayores profundidades (Armendáriz, 2016).

Este sitio cuenta con una larga trayectoria y explotación minera motivo por el cual existe una gran cantidad de residuos mineros con características muy diversas entre ellos, debido a las diferentes épocas de explotación, tipo de operaciones, procesos de beneficio, entre otros (Salazar G, 2000).

De acuerdo con el inventario físico de los recursos minerales del municipio Catorce San Luis Potosí, se divide en 4 distritos mineros de recursos metálicos en base a los antecedentes de la actividad minera y las condiciones hidrológicas superficiales (cuencas) (SGM, 2009) (tabla 1).

Tabla 1. Distritos mineros de Catorce (SGM, 2009).

Distrito	Formación geológica	Mineral de mena	Mineral de ganga	Alteraciones	Valores más importantes
Argentífero la Maroma	Huizachal y Zuloaga	Galena, esfarelita, pirita, proustita, bornita, malaquita, cervantita, estibiconita, estibinita, argentita y plata, siendo notable la presencia de vetas con barita.	Cuarzo y calcita	Silicificación, oxidación, argilización y piritización	Ag, Pb, Zn, Sb y Hg.
Argentífero Real de Catorce	Zuloaga, Caja, Cuesta del Cura, Tamaulipas, La Peña, Otates, Cupido y Taraises.	Se encuentran en vetas hidrotermales y mantos de reemplazamiento con mineralización de oro, plata, plomo, zinc, antimonio y mercurio.	Barita, Yeso, Onix.	Silicificación, hematización, limonitización, argilización y piritización	Ag, Pb, Zn, Sb y Hg.
Tierras Negras	Caliza, Zuloaga (Jurásico superior) La Caja (Jurásico superior).	Estibinita, velentinita, cervantita, estibiconita.	Calcita, Cinabrio.	Oxidación	Sb
Alamitos de los Díaz	Zuloaga, La Caja	Óxidos y sulfuros de antimonio	Calcita		Sb y Hg

En la zona de estudio perteneciente al distrito minero argentífero se encontraron los valores más importantes en los siguientes elementos: Plata, Arsénico, Vanadio, Cobre, Cadmio, Talio, Plomo, Zinc, Antimonio y Mercurio (Díaz Barriga, 2020).

1.8 Justificación

Las actividades mineras históricas que se han llevado a cabo en el distrito minero de Catorce han generado residuos, los cuales han contribuido a la contaminación con EPT de suelo y sedimentos de la microcuenca del arroyo La Luz; estos elementos representan riesgo potencial a los recursos hídricos y ya que en sitios de clima árido o semiárido, el suelo de la zona de descarga de las escorrentías será el receptor principal de los contaminantes (Salazar G, 2000), las áreas con uso de suelo de agricultura se encuentran en su mayoría en la parte baja de la microcuenca por lo que lo hace una zona de interés para el estudio del transporte hídrico de EPT.

En los últimos años se han realizado diversos estudios puntuales sobre la identificación de los residuos mineros abandonados más significativos en el distrito, sin embargo, a la fecha no se ha realizado un estudio que determine las concentraciones totales y móviles de estos elementos contenidos en sedimentos de los cauces y suelo del área de descarga, así como la valoración del transporte hídrico.

El presente estudio pretende ser una herramienta útil para la determinación de las concentraciones totales y móviles de EPT y en la evaluación del transporte hídrico de estos en sedimentos y suelo del cauce principal en la microcuenca del arroyo La Luz y el abanico aluvial.

1.9 Objetivo general:

Determinar el nivel y la extensión de la contaminación por los elementos potencialmente tóxicos asociada al transporte hídrico de residuos mineros de la zona árida de la microcuenca del arroyo La Luz y evaluar la movilidad de los contaminantes desde las fases sólidas a la fase acuosa.

1.9.1 Objetivos específicos:

- Determinar mediante fluorescencia de rayos X (FRX) las concentraciones totales de EPT en sedimentos del cauce principal, de sus afluentes y en suelo superficial del área de descarga
- Determinar mediante extracciones con agua meteórica sintética y análisis por ICP-MS las concentraciones móviles de EPT en las muestras seleccionadas.
- Caracterizar mediante difracción de rayos X las fases mineralógicas de la zona de estudio.
- Describir las características hidrológicas del área de estudio.
- Determinar el transporte hídrico de EPT mediante mapas de dispersión de las concentraciones total y móvil.

1.10 Hipótesis:

El transporte hídrico de EPT desde las partes altas de la cuenca donde se encuentran residuos mineros abandonados causa la contaminación de suelos en la parte baja de la cuenca en niveles y formas químicas que podrían producir altas concentraciones solubles de los EPT.

2. Descripción de la microcuenca del arroyo la Luz

2.1 Ubicación del área de estudio.

El municipio de Catorce se encuentra en la parte norte del estado de San Luis Potosí, en la zona Altiplano. La cabecera municipal, Real de Catorce, se localiza cerca del trópico de Cáncer, a una altitud de 2,680 metros sobre el nivel del mar. Los límites del municipio son: al norte con el municipio de Vanegas; al noreste con el municipio de Cedral, al este con el municipio de Villa de la Paz; al sureste el municipio de Villa de Guadalupe; al sur con el municipio de Charcas; al suroeste con el municipio de Santo Domingo; con el oeste del estado de Zacatecas (INAFED, 2005). Real de Catorce se localiza en uno de los picos de la cadena montañosa caliza, llamada Sierra de Catorce, que es paralela a la Sierra Madre Oriental.

Para establecer el área de estudio, se consideró tanto los antecedentes de la actividad minera (distritos mineros), las condiciones hidrológicas superficiales (cuencas) y el inventario de residuos mineros del área en donde se identificaron 12 depósitos de residuos mineros no controlados y se identificó la erosión hídrica como un importante medio de dispersión (Díaz Barriga, 2020).

De acuerdo con el inventario físico de los recursos minerales del municipio Catorce S.L.P (SGM, 2009), encontrados en la tabla 1 en el distrito minero Argentífero Real de Catorce se registran valores importantes de Ag, Pb, Zn, Sb y Hg y ya que la mayor parte de la población del municipio se concentra dentro de este distrito, en las localidades de La Luz, Potrero y, además es el distrito minero con las minas que mayor producción generaron de oro y plata (Padre Flores, La Purísima, Bonanza, La Candelaria, Santa Ana, San Joaquín, San Agustín, Milagros, entre otras) (SGM, 2009) se definió este distrito minero como el área de estudio, a continuación en la figura 2 se muestra el mapa de ubicación del área de estudio e imágenes de la microcuenca del Arroyo la Luz, las vías de comunicación del área de estudio es la carreta federal 62 y diversos caminos que comunican las comunidades presentes en la microcuenca en estudio.

Para la caracterización del sitio se utilizaron sistemas de información geográfica (SIG) en este caso el ARCGIS, así como cartas temáticas descargadas de internet (clave INEGI F14-A24) por ejemplo edafológica (eda251mgw INEGI, 2018), geológica (F1401 INEGI, 2017), de uso de suelo y vegetación (usv250s6gw CONABIO, 2019), clima (702825267568 INEGI, 2018), entre otras. Las escalas de trabajo utilizadas (1:50,000 o 1: 250,000) fueron las correspondientes a las cartas publicadas y disponibles por instituciones gubernamentales como el Servicio Geológico Mexicano (SGM), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), así como, imágenes satelitales de Google Earth.

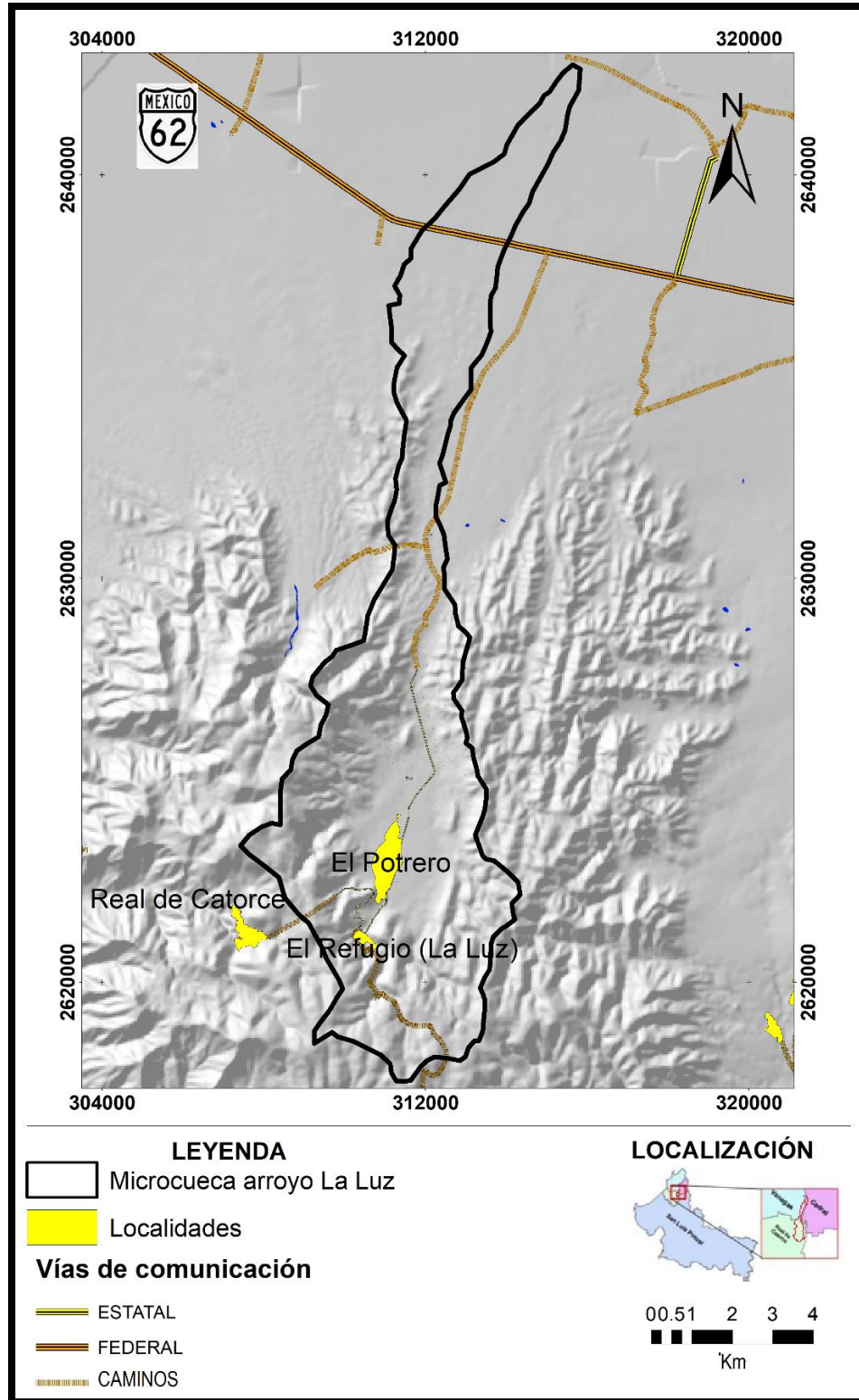


Figura 2. Mapa base de la microcuenca del arroyo La Luz (Elaboración propia a partir de información de INEGI,2019)

La microcuenca en estudio está ubicada en la subcuenca Matehuala y en el suroeste colinda con la subcuenca Catorce (RH37Ba-RH37Bc) y se encuentra a la región hidrogeológica Cedral-Matehuala, dentro del área de estudio destacan las poblaciones El Potrero con una población de 262 habitantes y el Refugio La Luz con 162 habitantes (INEGI, 2020). Los parámetros generales de la microcuenca arroyo La Luz en estudio se muestran en la tabla 2, el área de la microcuenca es de 68.3km y pertenece a la clase de rectangular oblonga u oval oblonga con un relieve pronunciado y algunas imágenes del sitio se muestran a continuación.

Tabla 2. Parámetros generales de la microcuenca arroyo La Luz (INEGI, 2019)

Parámetros generales		
Perímetro	62.04	km
Área	68.34	km ²
Parámetros de la forma		
Coefficiente de compacidad	7.5	Clase III oval oblonga o rectangular oblonga (Campos, 1992)
Relación de elongación	0.39	Relieve pronunciado (Summerfield, 1992)
Factor de forma	0.017	Muy poco achatada (Campos, 1992)

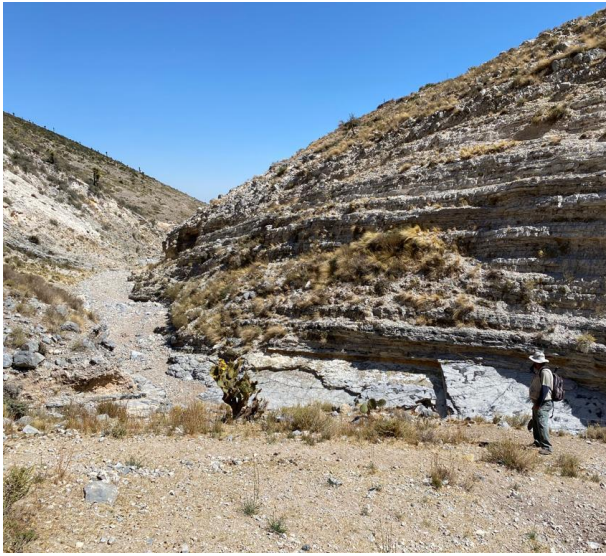


Figura 3. Fotografías del cauce principal Arroyo La Luz



Figura 4. Corriente tributario del arroyo la Luz

Figura 5. Corriente tributaria y residuo

En la figura 3 se muestra el cauce principal el arroyo La Luz del área de estudio, la figura 4 corresponde a una de las corrientes secundarias del cauce principal y en la figura 5 se puede apreciar uno los residuos presentes y su ubicación respecto a la corriente de agua.

2.1.1 Residuos mineros de la microcuenca del arroyo La Luz

En base al inventario de residuos mineros de Díaz Barriga (2020) se identificaron 12 depósitos dentro del área de estudio y a continuación se presenta la tabla de coordenadas y mapa de ubicación, posteriormente se describen las características de estos.

Tabla 3. Ubicación de residuos mineros en la microcuenca de estudio (Díaz Barriga.2020).

Tipo	ID	Área (m ₂)	Coordenadas UTM	
			X	Y
Terrero	M10	872	311522	2619876
Terrero	M11	701	311764	2619660
Terrero	M12	446	311859	2619955
Terrero	M1	1146	309753	2621860
Jales	M9	117148	311337	2621940
Residuo	M2	11920	310228	2622630
Terrero	M3	478	310150	2622780
Terrero	M4	6648	311516	2623230
Terrero	M5	2860	310605	2620580
Terrero	M6	4695	310513	2620820
Terrero	M7	8782	310364	2621220
Terrero	M8	3413	310507	2621320

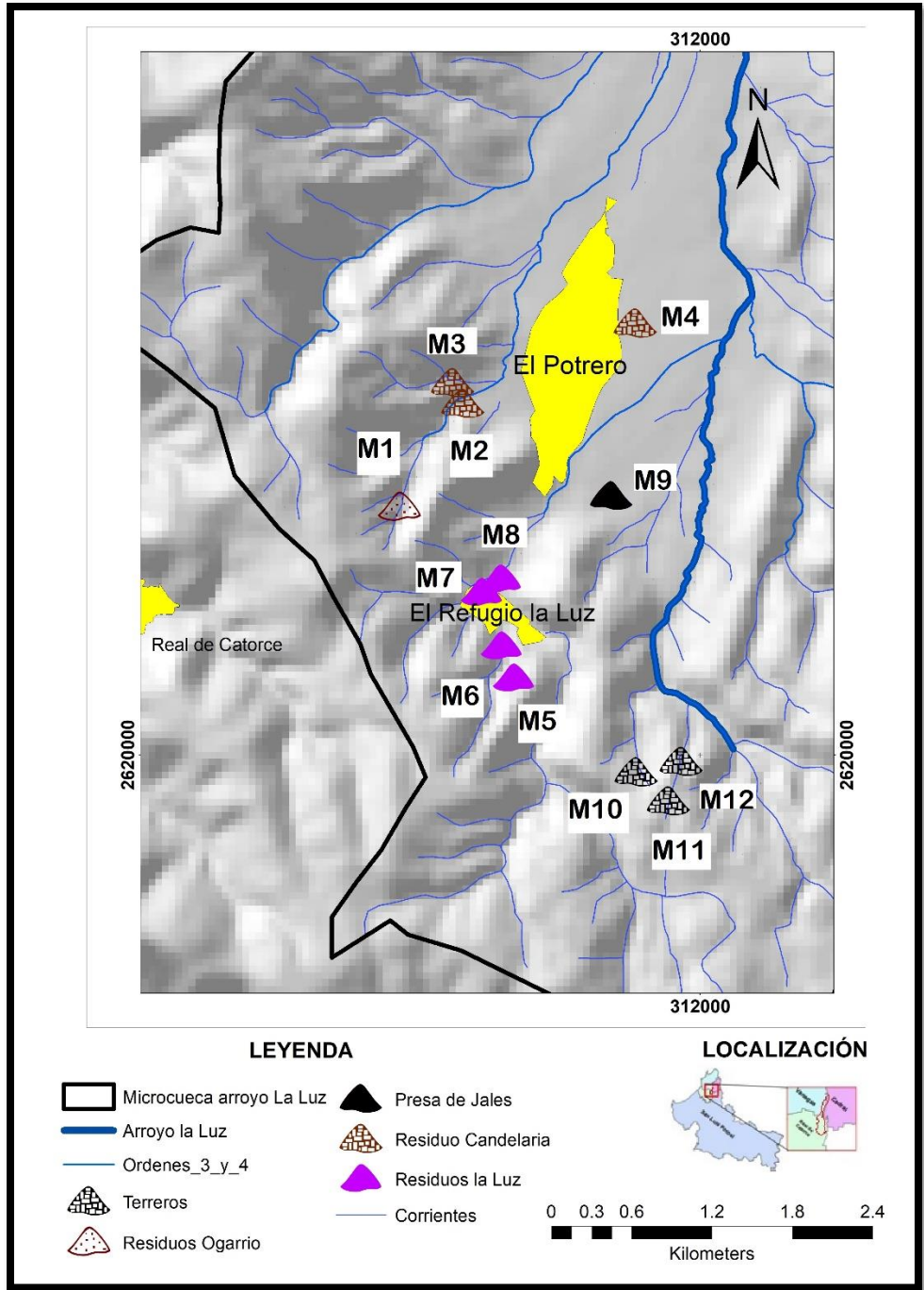


Figura 6. Mapa de ubicación de residuos en el área de estudio microcuenca del arroyo La Luz (Díaz Barriga, 2020)

Dentro de los residuos mineros encontrados en la microcuenca se encuentran aquellos pertenecientes a la localidad La Luz, una de las principales localidades del sitio de estudio donde se encuentran 4 distintos terreros (M5, M6, M7 y M8) siendo la localidad en el área de estudio con mayor número de depósitos de residuos mineros; otra de las localidades en el área es el Potrero en la que los residuos

(M2,M3,M4) están ubicados en las inmediaciones de la mina La Candelaria, ubicada aguas arriba de la localidad justo por un costado de los residuos se encuentra un arroyo, el cual fluye por un costado de la comunidad de El Refugio y descarga en una zona agrícola donde también hay bordos de retención de agua. En esta zona se practica la ganadería, por lo que el agua de estos bordos seguramente se utiliza para el abastecimiento del ganado (Díaz Barriga, 2020).



Figura 7. Foto del terrero M5 (La Luz)



Figura 8. Terrero M7 dentro de la localidad la Luz



Figura 9. Residuo La Candelaria M2



Figura 10. Terrero M4



Figura 11. Foto del estacionamiento Ogarrio



Figura 12. Jales (M9)

El terrero M1 se encuentra a 200 m aguas arriba del estacionamiento del túnel Ogarrío perteneciendo a un sitio minero pequeño con solo un depósito de residuo y se encuentra a 200 m aguas arriba del estacionamiento del túnel Ogarrío. El terrero ocupa parte del lecho del arroyo intermitente que desemboca en el mismo estacionamiento), por lo cual el transporte hídrico toma especial relevancia en este residuo minero (figura 11) y finalmente la presa de jales presentada en la figura 12 (M9) que presenta una granulometría fina la cual una parte se encuentran compactados y otra es susceptible de dispersarse por viento o por escurrimientos superficiales (Díaz Barriga, 2020).

2.1.2 Caracterización hidrológica del área de estudio

La Sierra de Catorce se ubica dentro de la Región Hidrológica 37, El Salado (RH-37), la cual, por su extensión, corresponde a una de las vertientes interiores más importantes del país, se ubica en la altiplanicie septentrional, en toda la porción noroccidental del estado de San Luis Potosí. Está constituida por una serie de cuencas cerradas que se caracterizan por la carencia de grandes corrientes superficiales (Gobierno del Estado S.L.P, 2008)

Todas las corrientes superficiales de la Sierra de Catorce son intermitentes, por lo que las únicas infraestructuras hidráulicas son pequeños bordos, pozos de extracción de agua subterránea y sistemas de captación de agua de manantiales, esta última es la principal fuente de suministro de agua para las diferentes actividades humanas de las localidades de la Sierra de Catorce, en la figura 13 mostrada a continuación se puede apreciar la red hidrológica de la zona y en la tabla 4 se encuentran los parámetros generales de la microcuenca del arroyo la Luz.

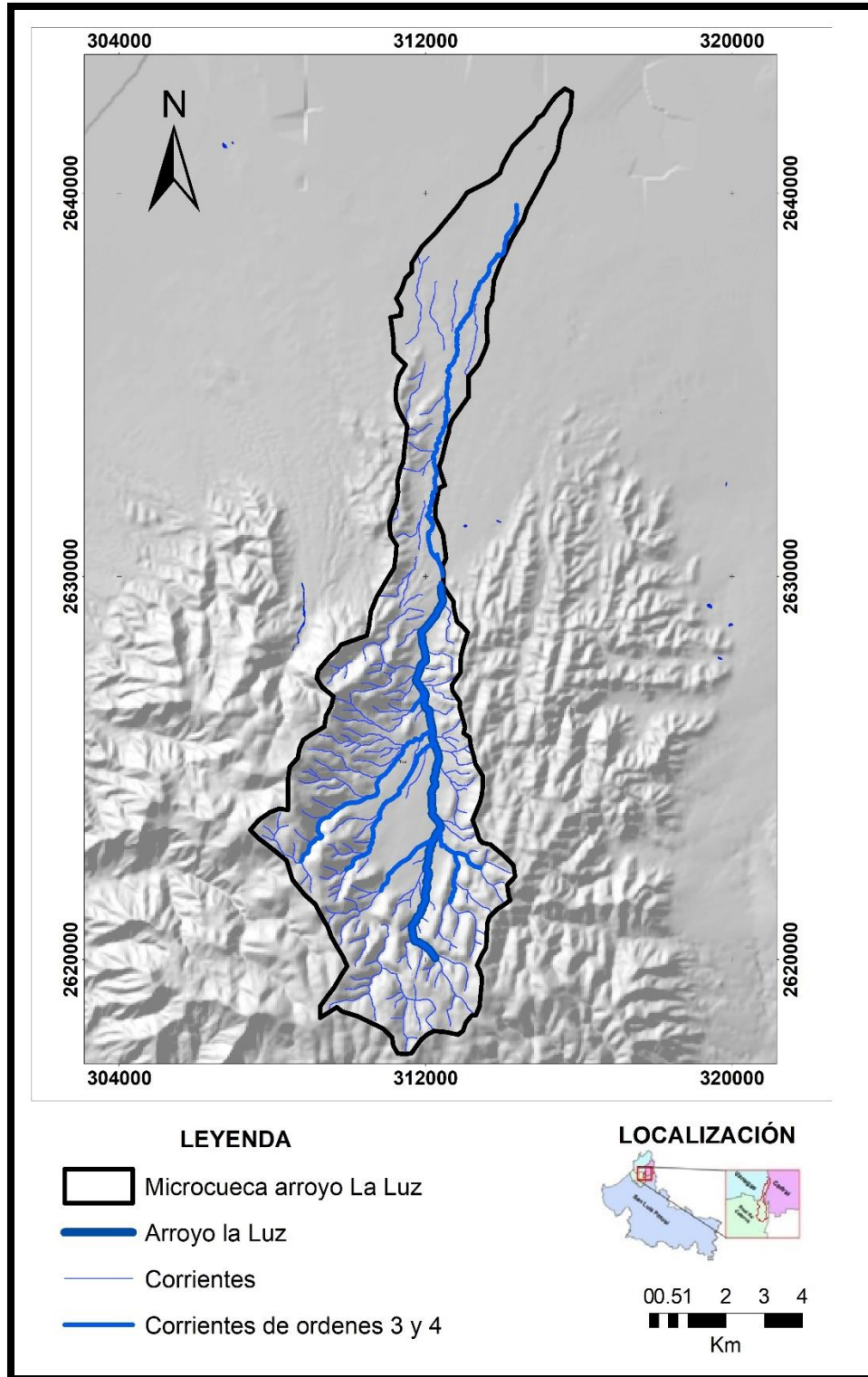


Figura 13. Mapa hidrológico microcuenca arroyo La Luz, San Luis Potosí (Elaboración propia a partir de información de INEGI, 2019).

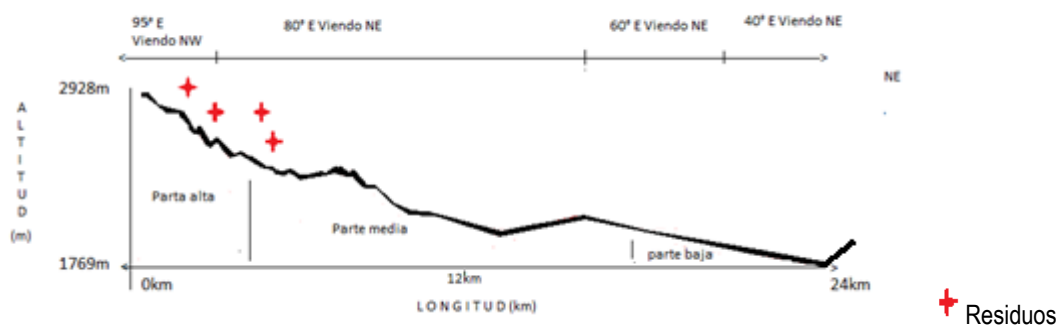


Figura 14. Perfil de elevación del cauce principal arroyo La Luz.

En la figura 14 se aprecia el perfil de elevación del cauce principal teniendo una altura máxima de 2928 m y en el área de descarga donde es la parte más baja se tiene una altura de 1769 m, también se aprecia que los residuos se encuentran en la parte alta y media del cauce.

Tabla 4. Caracterización de la microcuenca de la Sierra de Real de Catorce (SIATL 2020, INEGI. 2019)

Parámetros del relieve		
Altitud máxima	2928	m
Altitud media	2390	m
Altitud mínima	1769	m
Pendiente media	4.62	%
Parámetros de red hidrográfica		
Longitud del cauce principal (arroyo La Luz)	23.45	km
Tiempo de concentración	2.74	horas
Tipos de corrientes	Intermitentes	
Orden de corriente	5	
Número de escurrimientos	169	
Patrón de drenaje	Dendrítico	
Densidad de drenaje	0.034	m/m ² Densidad baja(INE, 2004)

En la tabla 4 se muestran los parámetros generales de relieve y de la red hidrográfica, hay un total de 169 escurrimientos son corrientes intermitentes y el tiempo de concentración de 2.74 horas, el orden de la corriente principal 5 y se tiene una diferencia de 1159 m entre la altura máxima del cauce principal y la parte más baja.

2.1.3 Uso de suelo.

La mayor parte del territorio del área de estudio corresponde a matorral desértico rosetófilo (MDR), seguido de pastizal inducido para actividades ganaderas (INEGI, 2017). Las áreas con uso de suelo de agricultura (figura 15) se encuentran en su mayoría en la parte baja de la microcuenca en estudio por la disponibilidad hídrica y el nivel del terreno, sin embargo, debido en las cercanías de la localidad de El Potrero existe una depresión del terreno lo suficientemente plana para realizar actividades de agricultura dentro de la Sierra de Catorce, esta agricultura es de régimen temporal. Por último, también hay presencia de chaparral y de vegetación secundaria en proporciones menores. En la figura 16 presentada a continuación presenta un mapa de la distribución de los usos de suelo dentro del área de estudio.



Figura 15. Áreas de cultivo temporal en el área de estudio.

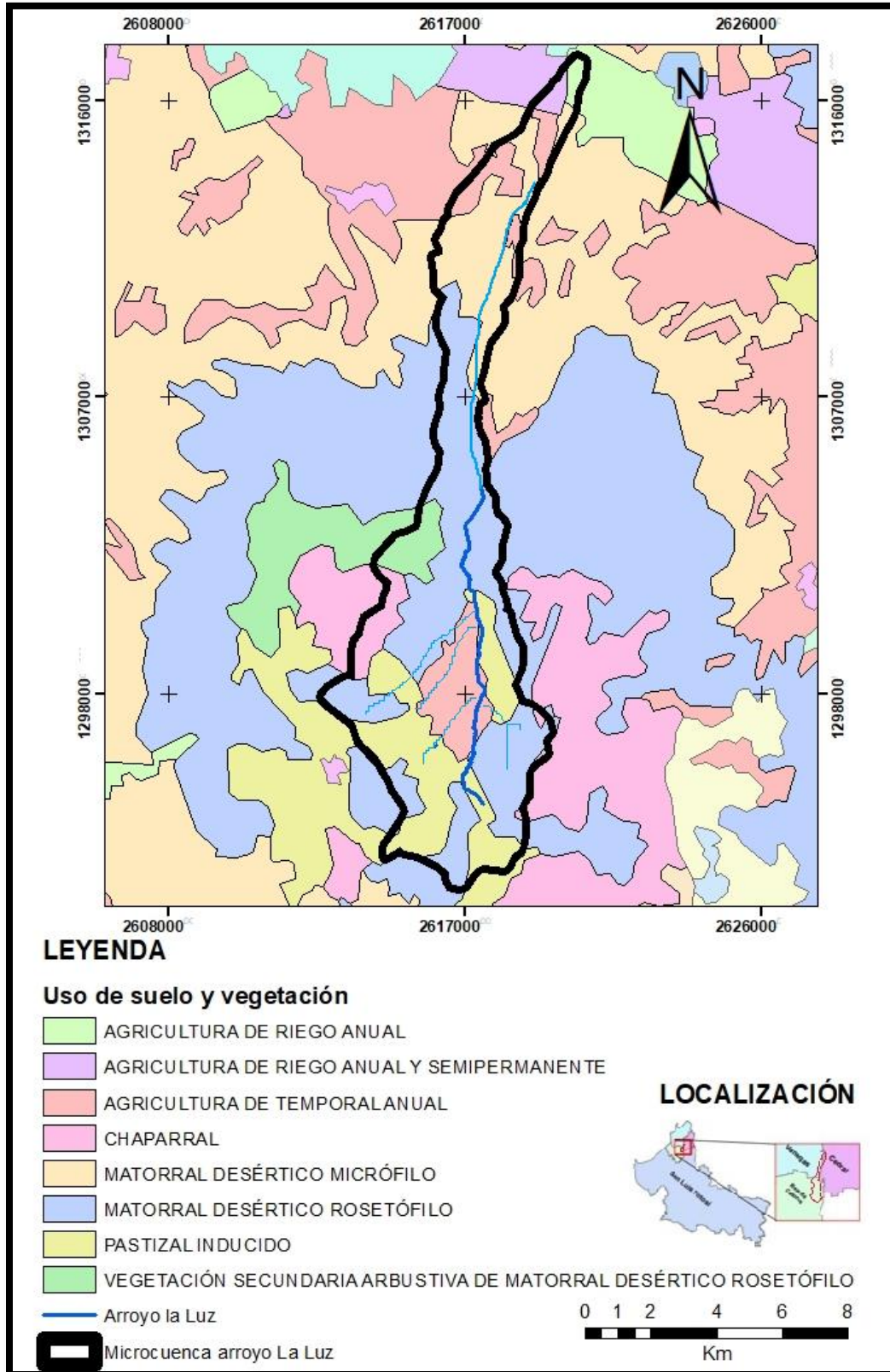


Figura 16. Mapa de uso de suelo y vegetación, de la microcuenca del arroyo la luz, (INEGI 2019).

2.1.4 Edafología.

El tipo de suelo (figura 17) con mayor presencia dentro del área de estudio es el litosol, el cual es un suelo muy somero sobre roca continua y suelo extremadamente gravilloso y/o pedregoso. El litosol es un suelo azonal y particularmente común en regiones montañosas (FAO, 2008).

En la parte baja de la microcuenca en estudio el tipo de suelo que predomina es el Xerosol Gypico, el cual pertenece a los gipsisoles. Los gipsisoles son suelos con una acumulación secundaria sustancial de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Estos suelos se encuentran en la parte más seca de la zona de clima árido. El material parental es principalmente depósitos aluviales, coluviales y eólicos no consolidados de material meteorizable rico en bases (FAO, 2008). También está la presencia de los xerosoles cálcicos, que son suelos que se desarrollan en ambientes próximos a áridos, carácter que se consigue por el poco espesor de la capa de raíces, el bajo contenido en materia orgánica y la textura relativamente gruesa, factores que afectan a la capacidad de almacenaje de agua útil por el suelo, moderadamente pedregosos o pedregosos, fuertemente calcáreos, básicos, con el complejo saturado y el calcio como catión dominante (FAO, 2008).

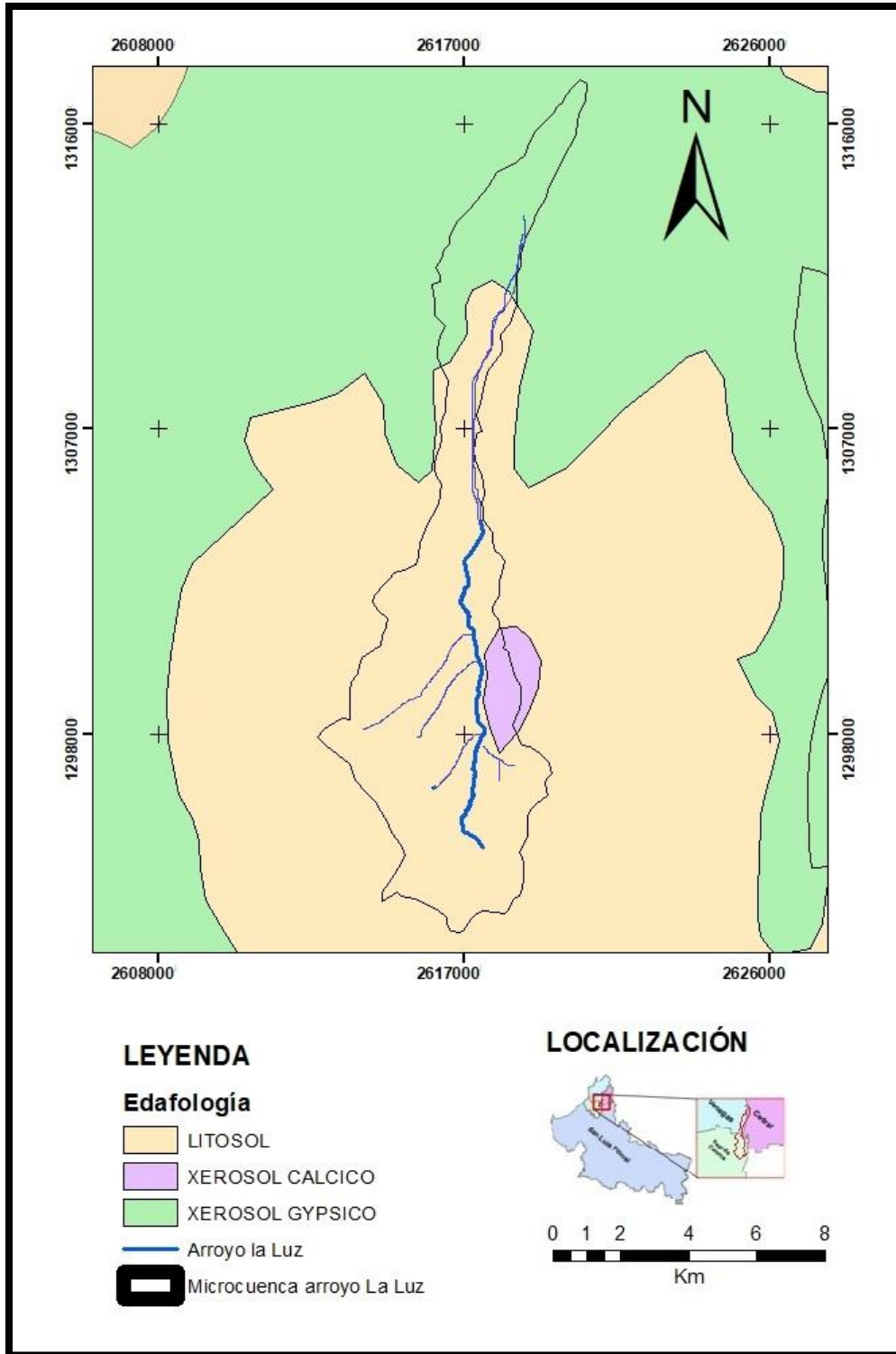


Figura 17. Mapa de edafología microcuenca del arroyo La Luz (Elaboración propia a partir de información de INEGI 2019).

2.1.5 Geología.

El área de estudio, fisiográficamente se ubica en la zona limítrofe de las provincias; al oeste con la Mesa Central y al este con la Sierra Madre Oriental, específicamente dentro de la subprovincia de las sierras bajas (Raisz, E, 1964; Lugo Hubp, 1990).

En el área afloran rocas: metamórficas de bajo grado y de contacto, ígneas extrusivas e intrusivas y sedimentarias, estas abarcan un rango de edades desde el Paleozoico superior hasta el reciente, presenta una amplia distribución de las secuencias calcáreas marinas del Jurásico superior y Cretácico (Zarate del Valle, 1982; Bacon, 1978; Barboza-Gudiño, 1989).

En el distrito de Catorce la mineralización de Ag, Pb y Zn en vetas parece estar relacionada al hidrotermalismo, asociado a la intrusión de los cuerpos cuarzo-monzoníticos y al oriente de Potrero Catorce, la mineralización de Sb está relacionada a fallas NW-SE que contiene vetas de calcita y sólo en algunos casos sílice y oxidación, ocurriendo zonas preferenciales de mineralización en la intersección de estas fallas con mantos de remplazamiento de calcita hidrotermal que ocurren principalmente en la Formación Zuloaga (SGM,2003).

A continuación se describen las unidades geológicas que afloran en la microcuenca del arroyo La Luz, las formaciones presentes en el área de estudio son las siguientes: i) Formación Cupido, ii) Formación Tmps Superior, iii) Formación Taraises, iv) Formación La Caja y por último v) Formación Zuloaga.

Formación Cupido (KhbCz)

La Formación Cupido ha sido reconocida a lo largo de toda la Sierra Madre Oriental, en los estados de San Luis Potosí, Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, Zacatecas y Durango). La unidad está formada por calizas de color gris oscuro, formando capas con concreciones de pirita, y concreciones de pedernal gris claro (en algunas ocasiones negra en la parte superior de la unidad. Esporádicamente las calizas están intercaladas con capas de limolitas de color violáceo. Dentro de la caliza se ha reportado la presencia de pedernal, así como concreciones de pirita (Enciso de la Vega, 1968; Tristán-González y Torres-Hernández, 1994) y de marcasitas oxidadas (Barragán y Díaz-Otero, 2004; Córdoba, 1963)

Formación Taraises (KbevMg-Lu)

En un inicio Imlay (1936) divide la formación Taraises en dos miembros litológicos; el miembro inferior lo describe como calizas grises resistentes a la erosión; sin embargo, el miembro superior se constituye de estratos delgados de caliza y calizas arcillosas, en superficie fresca presenta un color de gris claro a gris oscuro, gris amarillento o crema; muy fosilífera. De manera general, la unidad consiste en una caliza arcillosa, con textura de mudstone a wackestone (Díaz de León, *et al* 1953) con delgadas bandas y lentes de pedernal intercaladas con estratos de lutitas y limolitas, líneas estiolíticas paralelas a la estratificación (Santamaría-Orozco *et al*, 1990) horizontes terrígenos de color gris (Barboza-Gudiño *et al*, 1998) así como concreciones de pirita (Santamaría-Orozco *et al*, 1990)

Formación La Caja (Jkltm-Mg)

Esta unidad es predominante terrígena y su base se presenta como una secuencia de limolita de color gris oscuro, pardo oscuro y pardo grisáceo, entre las que se intercalan estratos delgados de caliza,

algunas bandas y nódulos de pedernal negro y horizontes de arenisca aislados, donde las capas de caliza tienen un espesor de 10-20 cm (Verma y Westermann, 1974). Siendo la roca huésped de algunas de las mejores venas mineralizadas en el distrito de la Sierra de Catorce (Lewis, 2008)

Formación Zuloaga (JokCz)

Imlay (1938) describe que esta unidad está constituida principalmente de caliza de estratificación gruesa, presentándose capas de 3-5 e incluso 10 pies, generalmente de coloración gris oscura, aunque en partes inferior y media se pueden observar capas de color gris medio ligero; en algunas secciones en la parte superior pueden presentar nódulos de pedernal negro y localmente algunas capas presentan bivalvos, gasterópodos o corales pobremente conservados. Este depósito es el más importante desde el punto de vista de los yacimientos minerales, ya que está constituido por estratos de caliza recristalizados ("mantos" de calcita), que se presentan mineralizados con Sb (Zarate del Valle, 1982).

Formación Tmp Superior (KapaCz-Mg)

Belt (1935) la describe como calizas compactas de grano fino, con una estratificación bien marcada, Menciona que la parte más alta mide de 200 a 300 pies el color predominante es gris y contiene un gran número de lentes y nódulos de pedernal de forma irregular, mientras que el color del pedernal varía desde negro a blanco, y la diferencia con respecto a la parte inferior lo indica en las variaciones de color de las calizas de blancas a crema, en cuanto al pedernal está prácticamente ausente y el que se logra encontrar es de tonalidades claras.

A continuación, en la figura 18 se presenta el mapa geológico de la microcuenca en estudio.

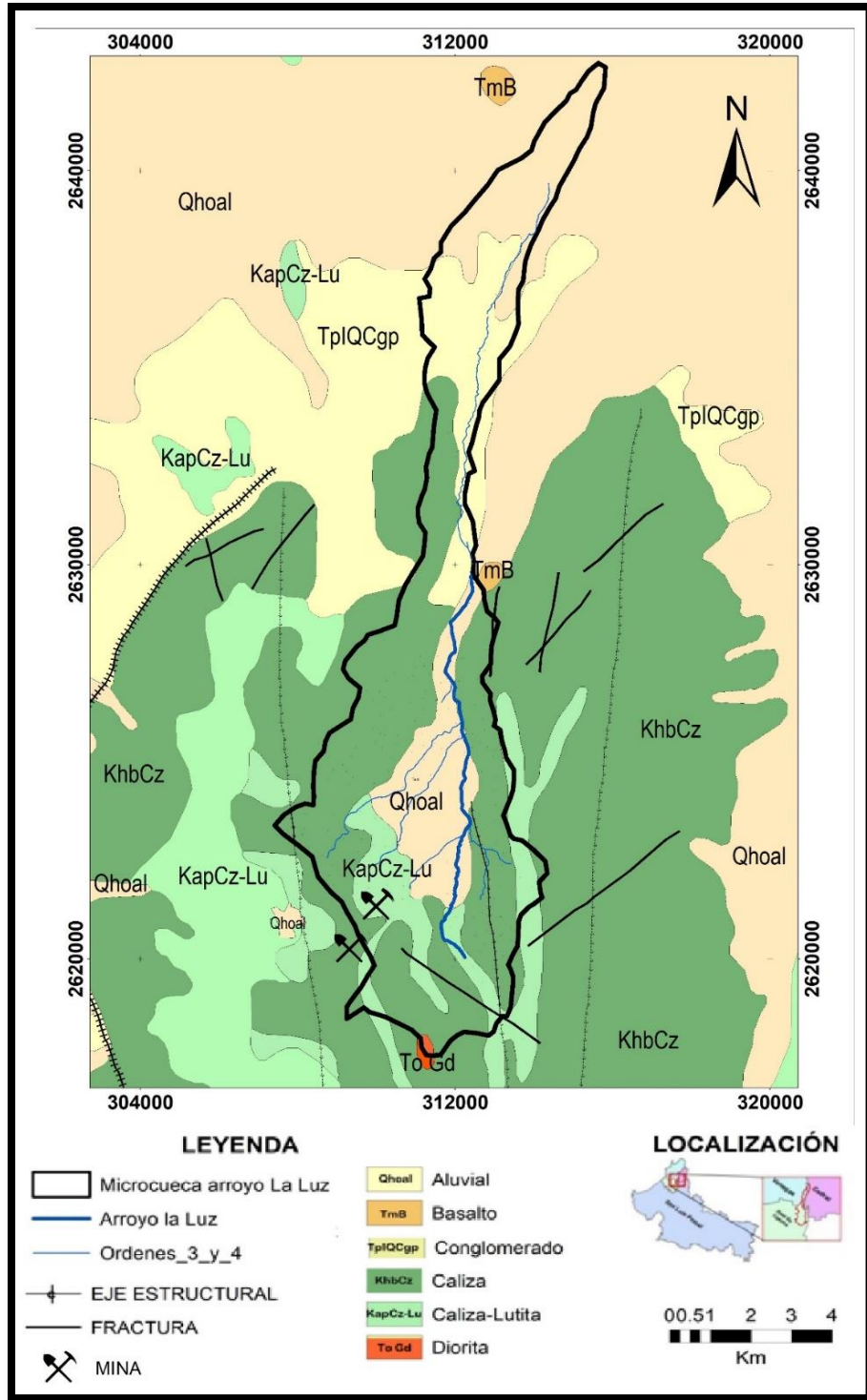


Figura 18. Mapa geológico tipo de roca de la zona de estudio (Elaboración propia a partir de información de INEGI 2013 y SGM 2009).

Catorce constituye una estructura levantada de tipo pilar tectónico asimétrico. En su margen occidental muestra una bien marcada zona de falla normal de orientación norte–sur, además de fallamiento normal de orientación oeste–noroeste hacia sus extremos norte y sur, y una más difusa margen oriental con desarrollo de fallas normales menores, de orientación norte–sur. La estructura interna del bloque está caracterizada por plegamientos mayores de orientación general norte–noreste y ligera vergencia hacia el este. La porción noroccidental de la sierra es la parte más levantada, en donde han quedado expuestas las unidades más antiguas reconocidas en la región y en donde se observan horizontes de deslizamiento y despegue que ponen en contacto unidades superiores de la secuencia sobre unidades inferiores con la total ausencia, por efectos tectónicos, de las correspondientes unidades intermedias (Barboza-Gudiño *et al*; 2003). En base al mapa geológico (figura 18) los tipos de roca presentes son calizas, basaltos, dioritas, conglomerados y aluviales y a continuación se describen cada una de ellas:

Aluvión (Qhoal)

Suelo formado por el depósito de materiales sueltos (gravas y arenas) provenientes de rocas preexistentes, que han sido transportados por corrientes superficiales de agua. Este nombre incluye a los depósitos que ocurren en las llanuras de inundación y los valles de los ríos; son unidades no consolidadas que están presentes a lo largo de los centros de corrientes principales dentro del área estudio y consisten en grava, arena, limo y arcilla pobremente clasificados (Rogers, 2020).

Diorita (To Gd)

Es una roca intrusiva de grano grueso que tiene aspecto similar al granito gris. es una roca ígnea intrusiva compuesta principalmente por los minerales de silicato feldespato de plagioclasa (normalmente andesina), biotita, hornblenda y/o piroxeno. La composición química de la diorita es intermedia, entre la del gabro máfico y la del granito félsico. La diorita suele ser de color gris a gris oscuro, pero también puede ser negra o gris azulada, y con frecuencia tiene un tono verdoso. Se distingue del gabro por la composición de las especies de plagioclasa; la plagioclasa de la diorita es más rica en sodio y más pobre en calcio. La diorita puede contener pequeñas cantidades de cuarzo, microclina y olivino. (Rogers, 2020).

Basalto (TmB)

Es una roca volcánica de grano fino y de color verde oscuro a negro, compuesta fundamentalmente por piroxeno y plagioclasa rica en calcio con cantidades menores de olivino y anfíbol (Rogers, 2020).

Caliza (KhbCz)

Roca química o bioquímica, es la roca más importante de las rocas carbonatadas; constituida de carbonato de calcio (>80% CaCO₃), pudiendo estar acompañada de: aragonito, sílice, dolomita, siderita y con frecuencia la presencia de fósiles, por lo que son de gran importancia estratigráfica. Por su contenido orgánico, arreglo mineral y textura existen gran cantidad de clasificaciones en calizas. Sin embargo, en ninguna se considera la presencia de material clástico. En los casos donde es considerable o relevante la presencia de clásticos se clasifica la caliza y el tamaño de la partícula

determina el nombre secundario: caliza arcillosa, caliza arenosa y caliza conglomerática (INEGI, 2017).

Conglomerado (TplCQgp)

Roca de grano grueso mayores a los 2 mm a más de 250 mm (gravilla 2-4 mm, matatena 4-6 mm, guijarro 64 - 256 mm y peñasco > 256 mm); de formas esféricas a poco esféricas y de grado de redondez anguloso a bien redondeados. Por la presencia de arcillas (matriz y/o cementante) se diferencian los siguientes tipos de conglomerados: ortoconglomerados (matriz 15%) (INEGI, 2017).

Lutita (KapCz-Lu)

Roca constituida por material terrígeno muy fino (arcillas) 1/256 mm. Debido al tamaño de sus componentes no es posible una clasificación más precisa. Por la presencia de minerales accesorios se tienen: lutitas calcáreas, lutitas rojas o férricas, lutitas carbonosas y lutitas sílice (INEGI, 2017).

2.1.6 Clima

Como se logra apreciar en la figura 19 y de acuerdo con la carta climática de México 1:250000 del INEGI, la parte baja de la microcuenca tiene un clima BS0K el cuál de acuerdo con la clasificación Köpen con modificaciones por E. García, es un clima seco templado con verano cálido con una temperatura media entre 12° y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18° C, temperatura del mes más caliente mayor a 18°C con régimen de lluvias de invierno con un porcentaje de lluvias invernal, respecto al total anual mayor de 36 (INEGI, s.f.).

Existe una franja de clima BS1K El cual es un clima Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18° C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C; lluvias de verano mayores al 18% anual (INEGI, s.f.).

También se aprecia una zona con clima C(E)w que de acuerdo con las características la temperatura media del mes más cálido supera los 22 °C. Este clima es una variación del *chino* o *pampeano* y se da en regiones más alejadas del mar que no reciben tantas precipitaciones por lo que la estación menos lluviosa aquí es bastante seca. En la parte alta de la microcuenca se encuentra el clima C(w0) que corresponde a templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, s.f.).

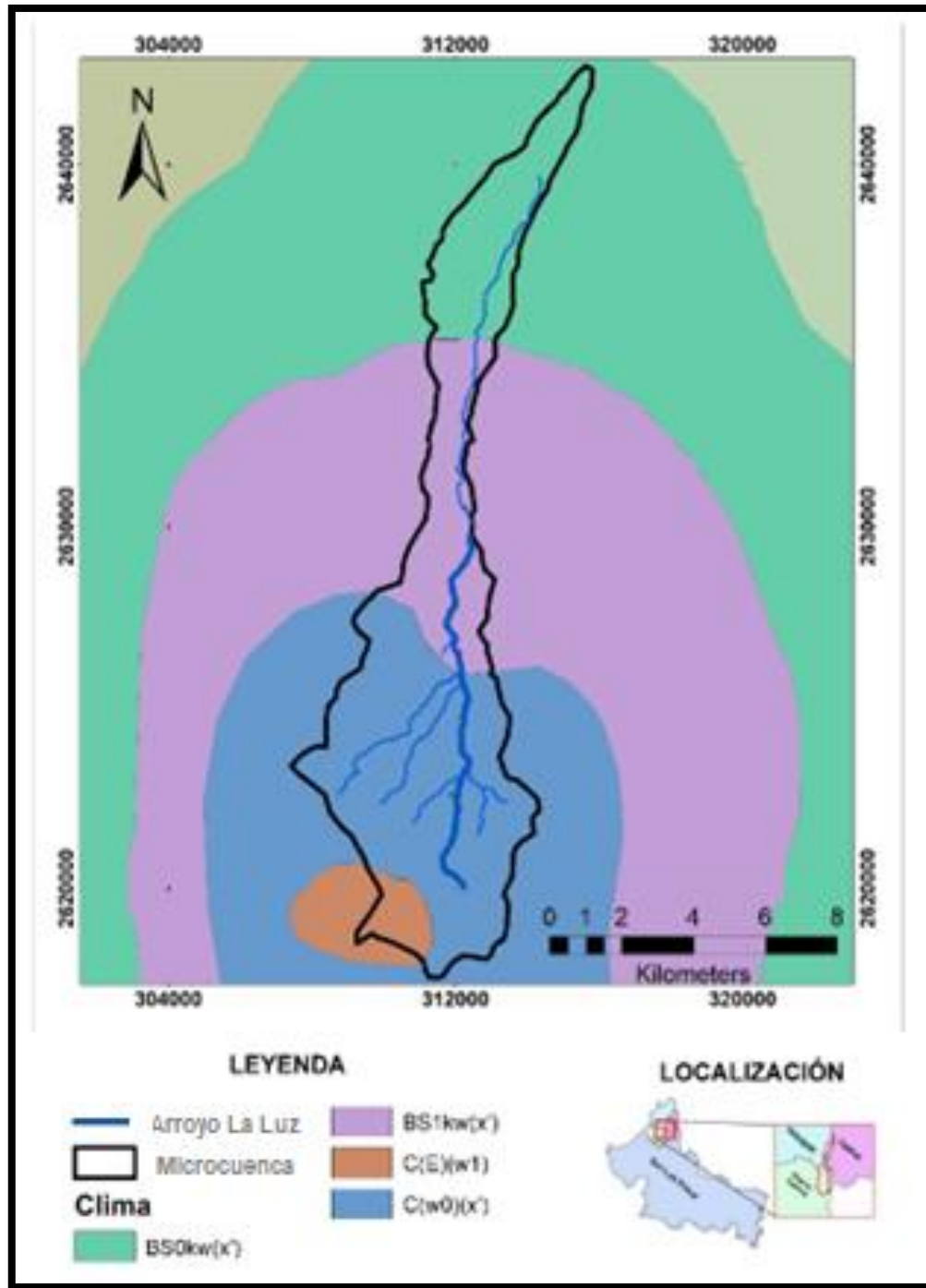


Figura 19. Mapa de clima de la microcuenca en estudio, (Elaboración propia a partir de información de INEGI 2019).

2.1.7 Variables meteorológicas

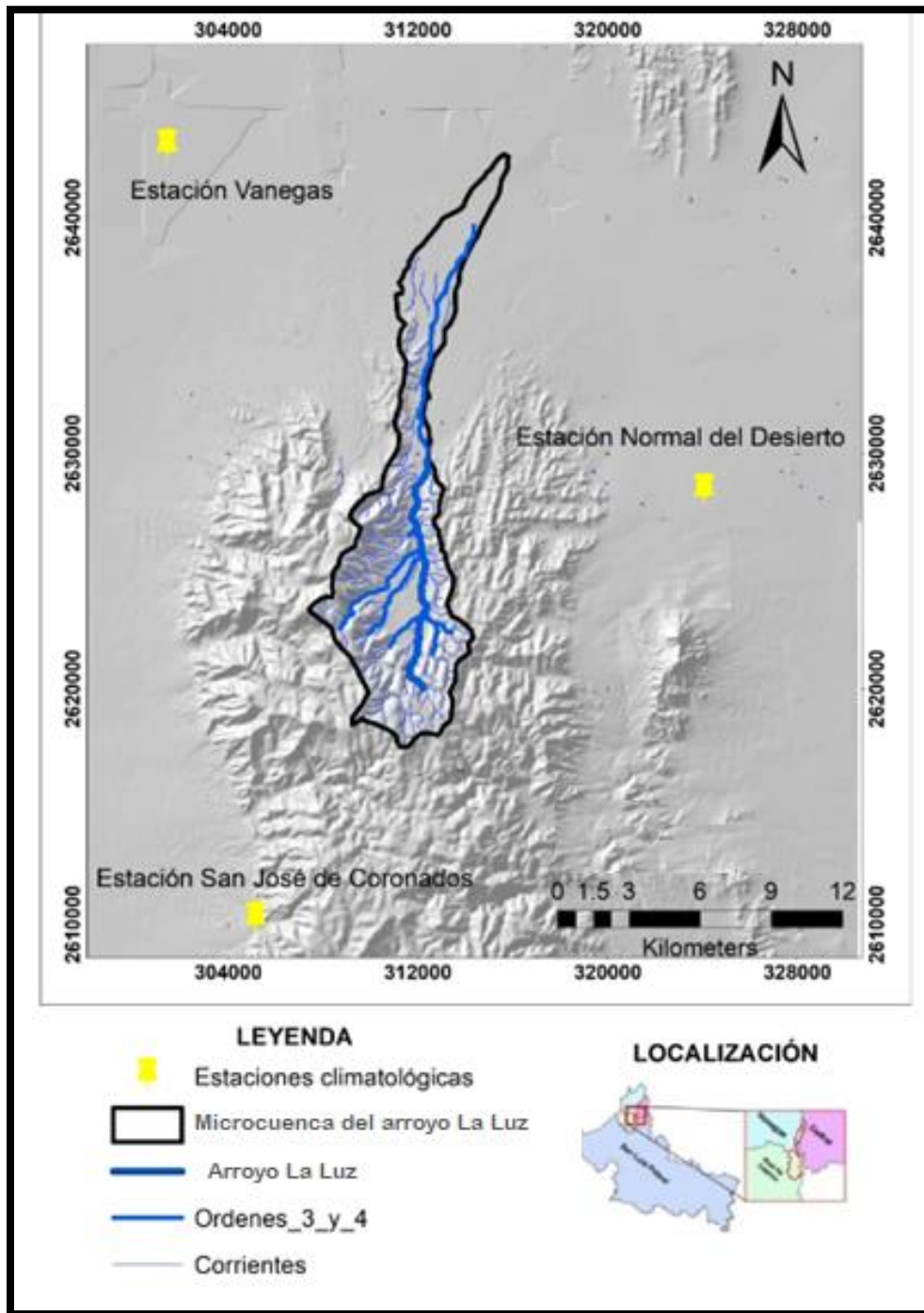


Figura 20. Mapa de ubicación de las estaciones climatológicas de la zona de estudio, (Elaboración propia a partir de información de INEGI 2019).

En base a la figura 20 se puede apreciar que se tomaron los datos de tres estaciones climatológicas más cercanas a el área de estudio, las estaciones corresponden a las estaciones de Normal del desierto, Vanegas y San José de Coronados.

Tabla 5. Precipitación media anual mediante el método aritmético durante el periodo 1979-2010 (CLICOM, 2010)

Estación	Nombre	Precipitación (mm)	Método aritmético (mm)
24007	Normal del Desierto	319.89	
24094	Vanegas	257.73	327.5
24165	San José de Coronados	404.9	

De acuerdo con los resultados obtenidos mostrados en la tabla 5 se obtuvo un total de 327.5 mm de precipitación media anual. Y a continuación se presenta los climogramas por estación de área de estudio.

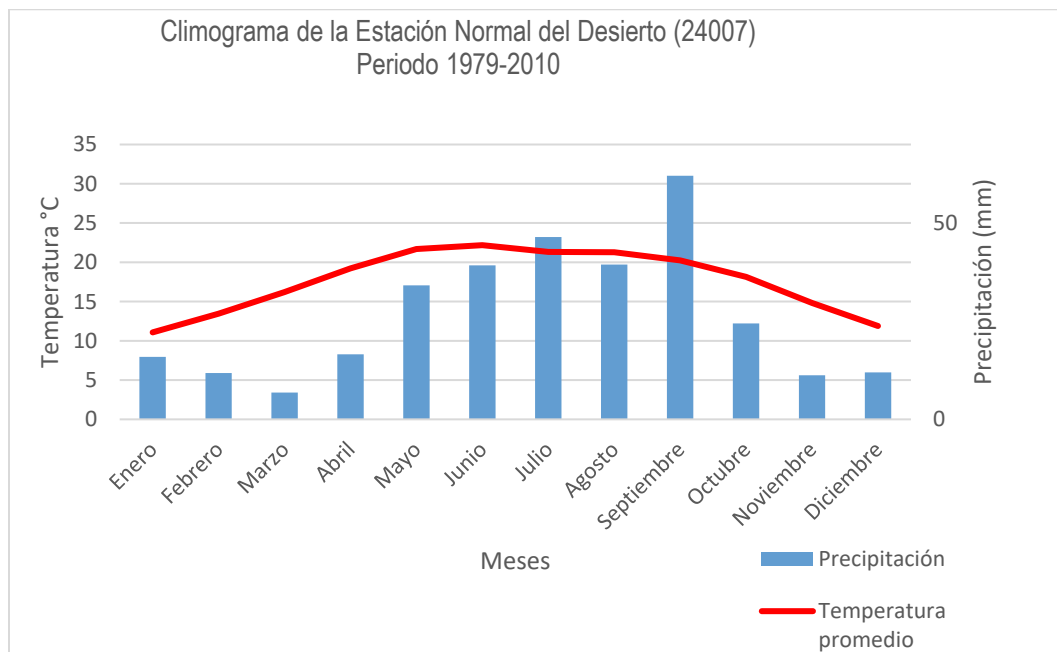


Figura 21. Climograma del periodo 1979-2010 estación Normal del Desierto (CLICOM, 2010).

Se puede apreciar en la figura 21 que el mes que presenta mayor precipitación corresponde al mes de septiembre y los meses que presentan mayores temperaturas son de abril a septiembre.

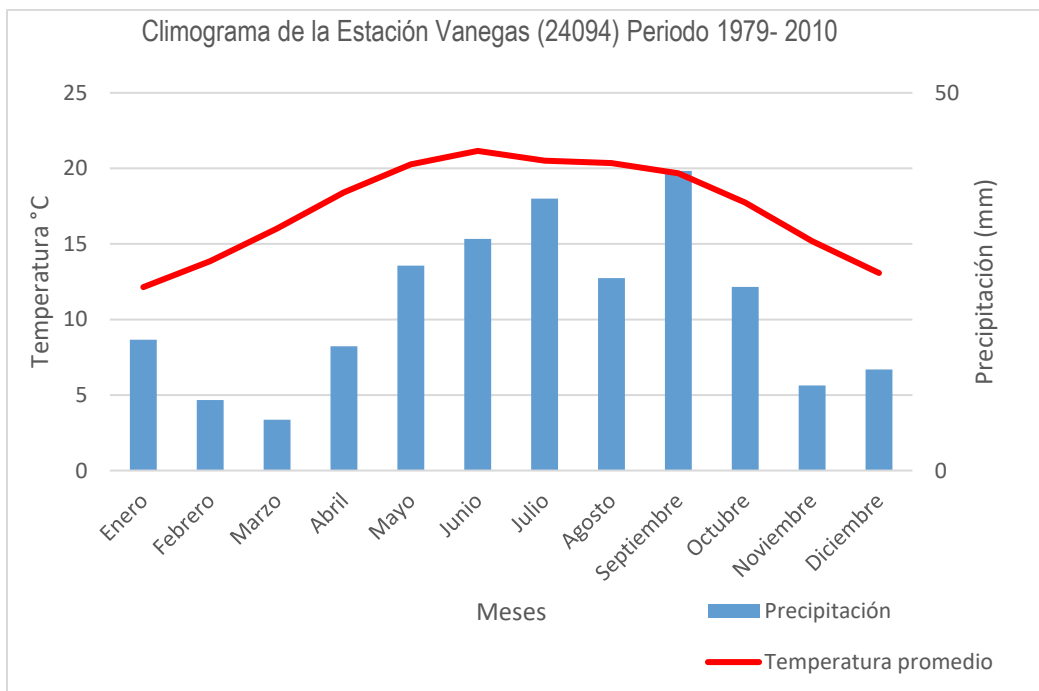


Figura 22. Climograma del periodo 1979-2010 estación Vanegas (CLICOM, 2010).

En relación con la figura 22 el mes que presenta mayor precipitación corresponde a septiembre y el mes que presenta mayor temperatura corresponde al mes de junio.

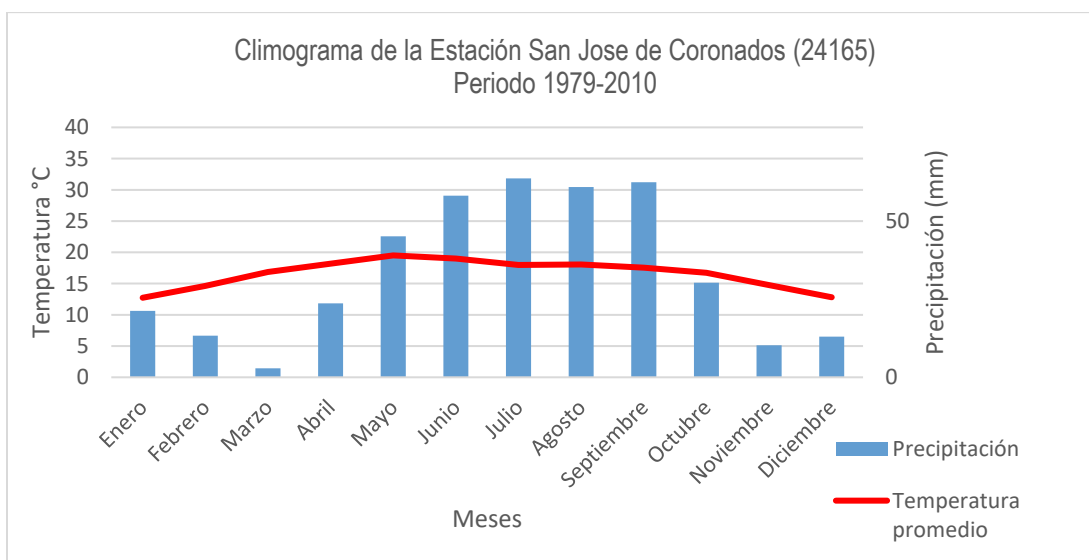


Figura 23. Climograma del periodo 1979-2010 estación San José de Coronados (CLICOM,2010).

De acuerdo con la figura 23 se puede apreciar que los meses de mayor precipitación son de junio a septiembre y la temperatura más alta se presenta en el mes de mayo, el mes que presenta menor precipitación es en el mes de marzo.

3. Metodología para evaluar el transporte hídrico de los elementos potencialmente tóxicos en la microcuenca del arroyo la Luz.

3.1 Delimitación del área de estudio

La definición del área de estudio y sus características descriptivas tuvo como base la presencia de residuos minero- metalúrgicos abandonados relacionados con la actividad minera de la zona, en específico de la microcuenca del arroyo la Luz perteneciente al municipio de Catorce, San Luis Potosí.

Una parte esencial en esta etapa fue la identificación de las actividades relacionadas con la minería antigua, lo cual se estableció mediante la información bibliográfica consultada y estudios previos de la caracterización de los residuos mineros de la zona en estudio.

Mediante las herramientas antes descritas en el capítulo 2 se elaboraron mapas georreferenciados donde se representaron elementos como: trazo del parteaguas de la microcuenca de estudio, hidrología superficial, localidades, residuos mineros, el cauce de la corriente principal y sus afluentes.

Lo anterior, se completó con vistas al sitio en estudio, verificando en campo la información preliminar de las cartas temáticas con los rasgos físicos de la microcuenca (corriente principal y secundarias, parteaguas, relieve, etc).

Para establecer el área de estudio se consideró: i) Los residuos mineros y su distribución espacial, ii) Las comunidades del área, iii) Los límites del parteaguas en la microcuenca y iv) La descarga del cauce principal y la cercanía a fuentes de abastecimiento de la población aledaña (figura 24).

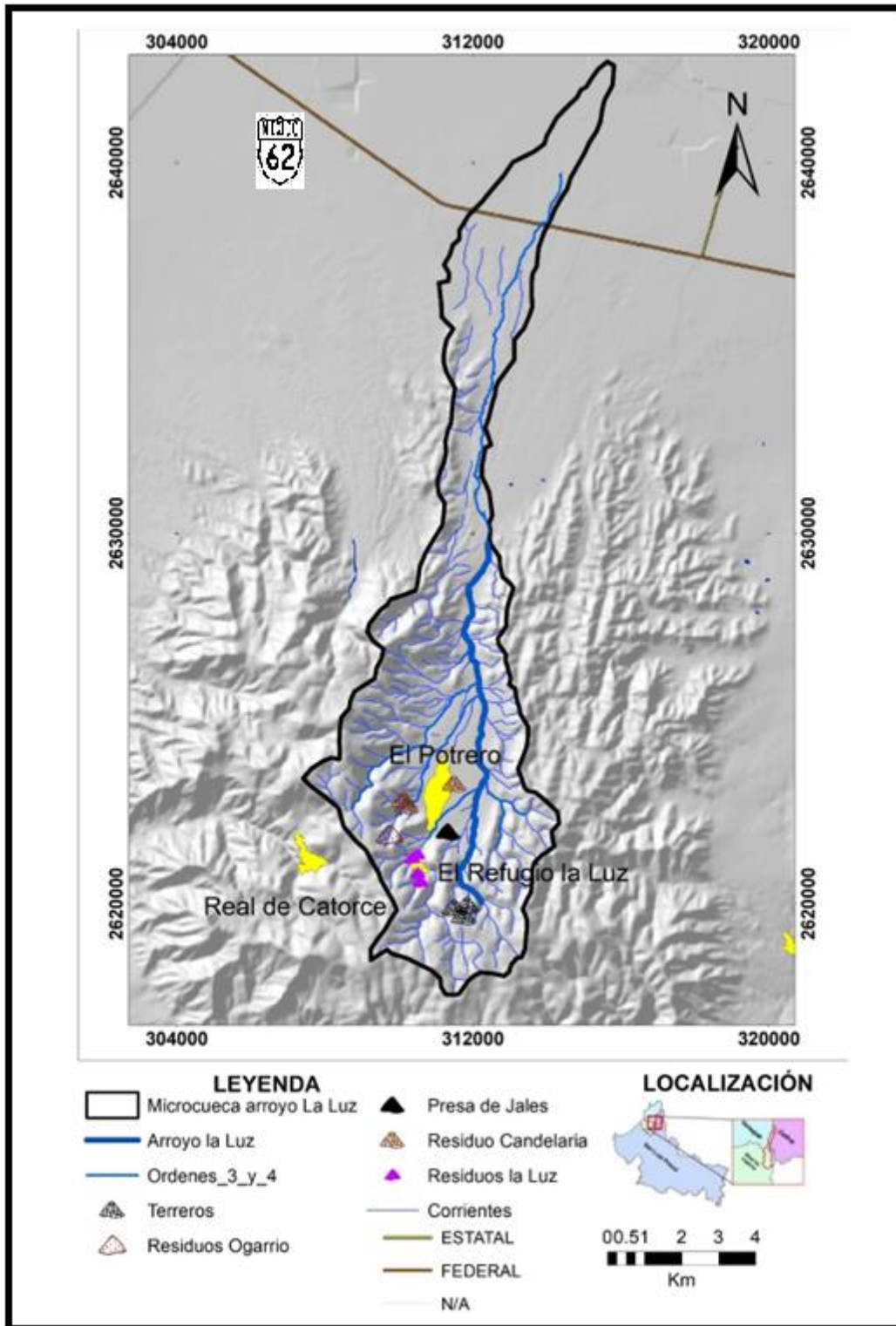


Figura 24. Mapa de delimitación del área de estudio, (INEGI, 2018).

3.2 Diseño del muestreo

Para la selección de sitios de muestreo de **sedimentos y suelos del área en estudio** y con el objetivo particular de lograr una mejor representatividad del área de estudio, se consideró tomar en cuenta 3 áreas: el cauce principal, la zona de descarga y en los afluentes que drenan los sitios con presencia de residuos mineros no controlados; en el caso de los sedimentos del cauce principal, se diseñó un muestreo sistemático aleatorio con puntos potenciales de muestreo equidistantes a cada 1000 m, obteniendo un total de 22 potenciales sitios de muestreo de sedimentos del cauce principal (Figura 25A y 25B). En el caso de los sedimentos de los afluentes con influencia de residuos mineros, se diseñó un muestreo dirigido en el que se ubicaron puntos de muestreo aguas arriba y aguas abajo de los depósitos de residuos mineros obteniendo un total de 10 potenciales puntos de muestreo de sedimentos de efluentes (Figura 26). Para el muestreo de suelo en la zona de descarga, se diseñó un muestreo sistemático aleatorio en el que se definieron cinco líneas perpendiculares a la trayectoria de la descarga cada 150 m. Sobre cada línea se definieron cinco puntos de muestreo, excepto en la primera línea en la que se ubicaron tres puntos de muestreo, con una separación de 100 m obtenido un total de 25 potenciales punto de muestreo de suelo de la zona de descarga (Figura 26).

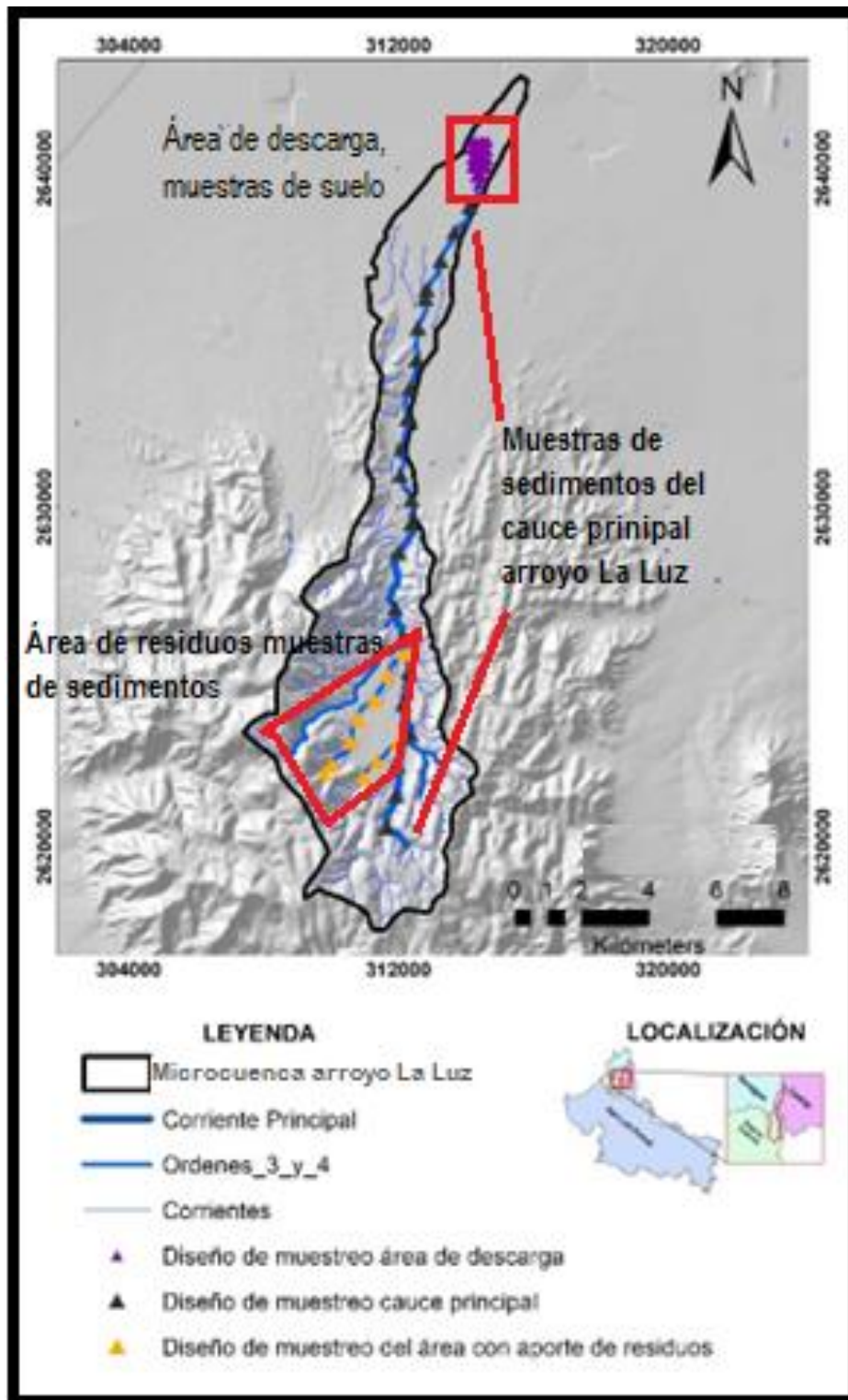


Figura 25 A. Mapa del diseño del muestreo en la microcuenca del arroyo La Luz.

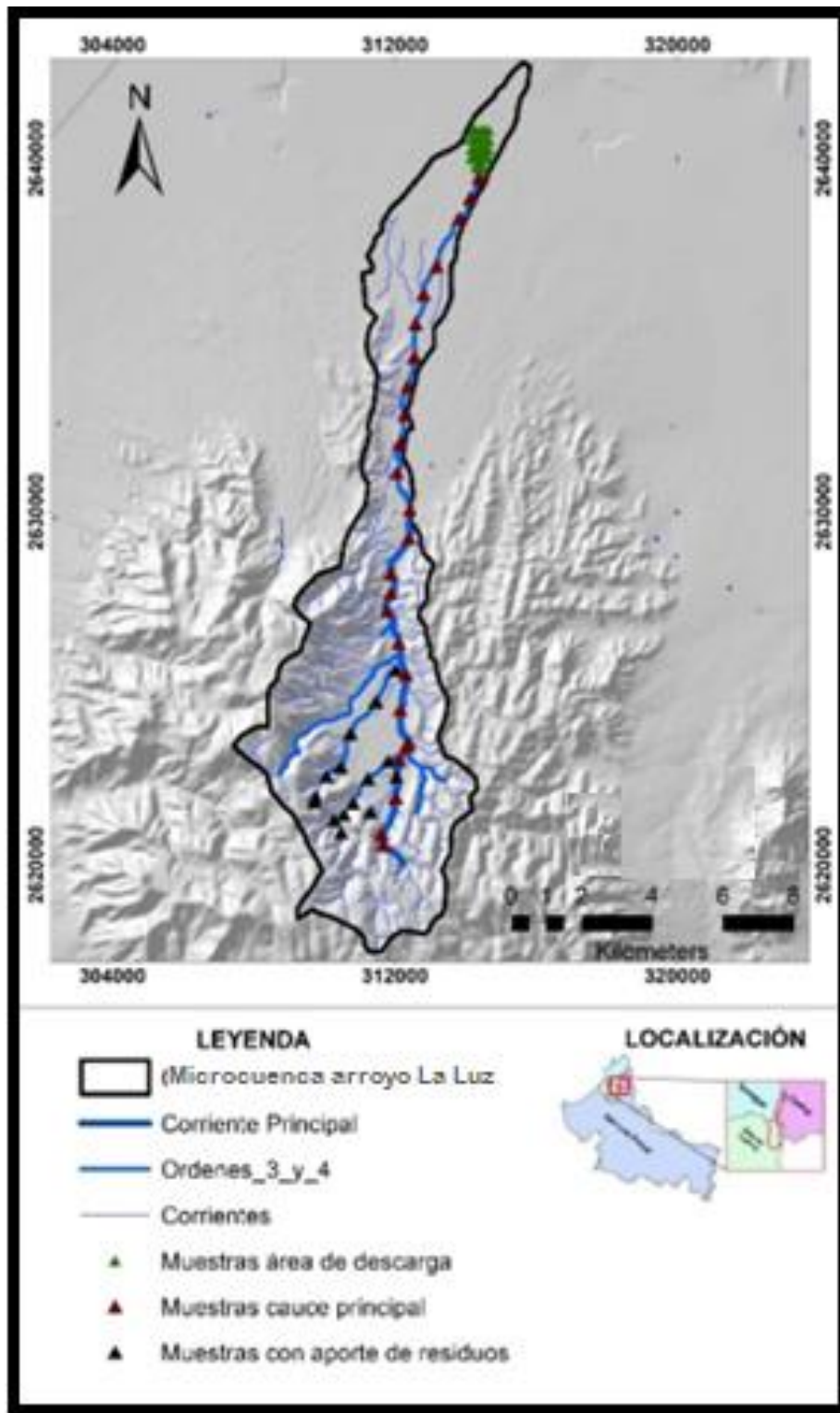


Figura 25B. Mapa del muestreo final de la microcuenca del arroyo La Luz.

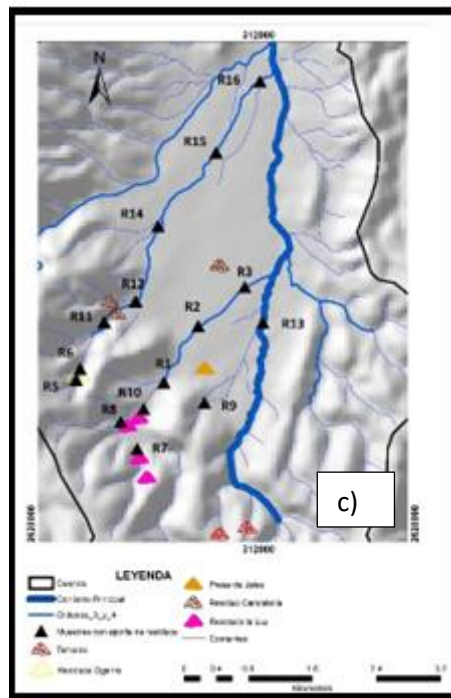
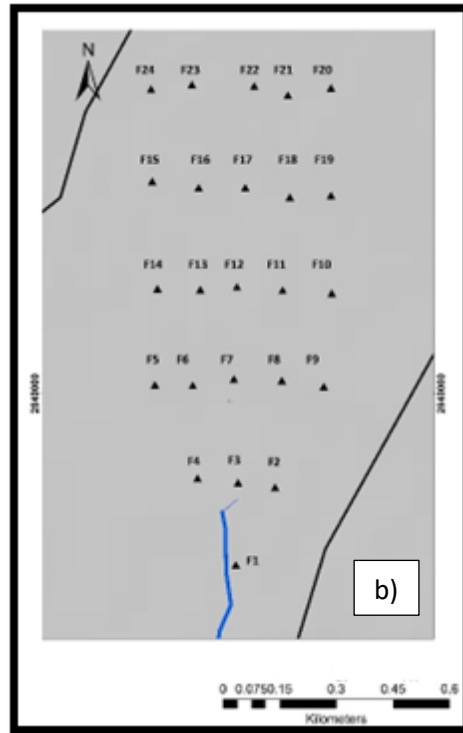
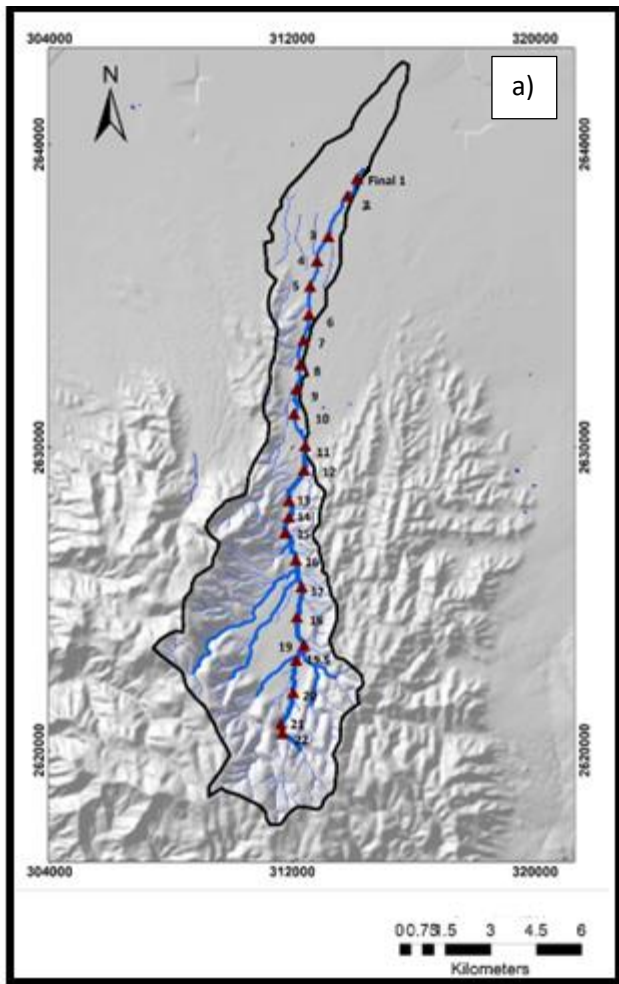


Figura 26. Mapa del muestreo y etiquetas de muestras de la microcuenca en estudio a) muestras de sedimentos del cauce principal arroyo La Luz, b) muestras de suelos área de descarga, c) muestras de sedimentos área de residuos.

Una vez ejecutado el muestreo, el número de muestras reales de sedimento de cauce principal obtenidas fue de 24, mientras que de los efluentes de la zona de residuos mineros se obtuvieron 15 muestras de sedimento, 5 muestras aguas arriba y 10 muestras aguas abajo, con respecto a los depósitos de residuos no controlados. En el caso del suelo de la zona de descarga se obtuvieron 24 muestras. En la figura 23 se muestran la distribución espacial de los puntos de muestreo reales de sedimento y suelo; el diseño del muestreo se cumplió en un 100% obteniendo un total de 63 muestras de sedimentos y suelos cada una con un peso aproximado a los 2 kg.

3.3 Toma de muestras

Las muestras de sedimentos correspondieron al material depositado sobre el lecho del cauce de 0-5 cm de profundidad, en cada punto el sedimento se recolectó con ayuda de un cucharón de acero inoxidable, se trazó un transecto o línea imaginaria perpendicular al flujo del cauce, sin muestrear las partes cercanas a las paredes del cauce para evitar interferencias (figura 27).

El muestreo de suelo en la zona de descarga (figura 28) se realizó de manera superficial no excediendo de 3cm de profundidad marcando cuadros de 50 cm lado por lado, ambos muestreos se basaron en la NOM-147-SEMARNAT7SSA1-2004 y en literatura consultada de Hernández Ruiz (2017).

Cada muestra fue tamizada en el lugar con un tamiz <2mm y fueron embolsadas y etiquetadas, se tomaron las coordenadas exactas del punto tomado y se fotografió la zona marcando la referencia del punto con un pintarrón. El inventario de muestras con sus coordenadas se encuentra en el anexo de este documento.



Figura 27. Toma de muestra de sedimento cauce principal, Real de Catorce



Figura 28. Toma de muestra de suelo, zona de descarga, Real de Catorce

3.4 Análisis granulométrico

Las muestras tanto de suelos como de sedimentos obtenidas fueron separadas en diferentes fracciones para posterior a esto medir los parámetros fisicoquímicos de interés, se tomó 1 kg de cada

muestra para posteriormente sacar el porcentaje en peso de cada una y determinar que fracción es mas abundante, el tamaño correspondiente de cada una se presenta a continuación: fracción A <2 mm >0.240 mm, fracción B <0.240 mm >0.122 mm, fracción C <0.122 mm >0.073 mm y fracción D <0.073 mm

Para la separación de las muestras se utilizaron 4 tamices con las medidas anteriormente descritas y cada muestra fue sometida a una agitación durante 15-20 minutos en el ro-tap de marca humblot,. A continuación, se muestran imágenes del proceso.



Figura 29. Granulometría de muestras

3.5 Determinación del pH y conductividad del suelo y sedimentos

El grado de acidez o alcalinidad de los suelos y sedimentos en todas las fracciones obtenidas fue determinado a través de la medición del pH de cada muestra, y la cantidad de sales solubles presentes con agua se determinó mediante la lectura de la conductividad eléctrica de acuerdo con el método ASTM D 4972-95. La medición se realizó en el sobrenadante del suelo formado al suspender 10 g de muestra en 10 mL de agua desionizada, con ayuda de un equipo portátil CONDUCTRONIC modelo PC18, que mide pH, CE y temperatura.

3.6 Análisis químicos

El análisis químico de las concentraciones tanto totales como móviles son una etapa relevante dentro de la secuencia del trabajo práctico en esta investigación. Es esencial cumplir con requisitos específicos para la cuantificación de elementos, para así dar paso a una correcta interpretación de resultados como lo son métodos analíticos suficientemente sensibles (detección de un amplio rango de elementos) precisión analítica, exactitud geoquímica (dentro de estándares establecidos) y datos y registros documentados y rastreables dentro del proceso. (Salminen *et al.*, 2005; Chiprés *et al.*, 2008).

3.6.1 Requerimientos analíticos

Para la determinación analítica de las muestras seleccionadas tanto de sedimentos y suelos fue realizada en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP (LGQIG), que cuenta con equipos de Espectrometría de masas de acoplamiento inductivo (ICP-MS), marca Thermo Scientific modelo X Series 2 siendo de los métodos más recomendados y usados para para proyectos de caracterización geoquímica (Darnley *et al.*, 1995; Salminen *et al.*, 2005; Chiprés *et al.*, 2008),

proporcionando un escaneo multielemental donde se identificaron algunos EPT como lo son: As, Cd, Pb, Cr, Ni, Sb y otros elementos de interés.

3.7 Determinación de las concentraciones totales de EPT por Fluorescencia de rayos X.

Para la determinación de las concentraciones totales de los EPT se utilizó la fluorescencia de rayos x que es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra; el analizador utilizado fue el XRF portátil DELTA Professional con tubos de rayos X con ánodos de plata (Ag), rodio (Rh), oro (Au) o tántalo (Ta) [según aplicación] con sistema electrónico inteligente, acelerómetro; barómetro para la corrección de la presión atmosférica en mediciones de elementos ligeros.



Figura 30. Fotografía del equipo XRF portátil DELTA Professional, determinación de concentraciones totales

El modo de calibración del equipo permite identificar entre otros los siguientes elementos Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Ta, W, Pt, Au, Hg, Pb, Bi, Th y U ; de todos estos elementos y para enfoques de este estudio se centró en los EPT y se realizaron tablas estadísticas descriptivas de los datos obtenidas divididas por las áreas de muestreo, para los límites máximos permisibles se basó en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y para el caso específico del Sb se basó en los límites máximos permisibles establecidos por la EPA en los Regional Screening Levels (RSLs) - Generic Tables (EPA, 2021).

Como control de calidad en este proceso cada muestra fue leída 3 veces para posteriormente promediar los valores obtenidos y descartar cualquier error de lectura que se pudiera presentar y se utilizó el material de referencia certificado (SRM, por sus siglas en inglés) al SRM-2710a Montana Soil.

3.8 Digestión ácida de muestras

Para hacer una validación de los datos obtenidos de la FRX, ya que esta técnica no es reconocida en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, el 10% de las muestras fueron sometidas a un proceso de digestión en medio ácido para conocer la concentración total de elementos (As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Mn, Ca, Sb etc), utilizando un horno de microondas marca CEM modelo MARS 6. Para llevar a cabo este proceso, se necesitó de 0.5 gr de muestra bien homogeneizada, a la cual se le agregaron 9 mL de HNO₃ concentrado. La digestión se llevó a cabo durante 35 min en un sistema cerrado. Posteriormente se aforó a un volumen conocido. Una vez concluido el proceso de digestión, las muestras digeridas se mantuvieron en refrigeración a 4 °C hasta su análisis en condiciones similares a las establecidas en el método EPA 3051 (USEPA, 1996; CEM, 2015).

Como control de calidad, todo el material utilizado para la preparación de muestras y la determinación de metales fue previamente lavado con Extran al 10% y enjuagado con agua corriente, a continuación se le dio un segundo tratamiento al ser sumergido por al menos 3 h, en una solución de HNO₃ al 10%, pasado el tiempo el material es extraído del ácido y enjuagado repetidas veces con agua desionizada, para después ser escurrido y secado en su totalidad. Adicionalmente como control de calidad, por cada lote de 20 muestras se digirió y analizó un blanco y el material de referencia certificado SRM-2710a Montana Soil. Así mismo, por cada 10 muestras, se digirió y analizó un duplicado elegido al azar. Una vez digeridas las muestras se analizaron mediante el espectrómetro de masas de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

3.9 Pruebas de movilidad

Para llevar a cabo la determinación de la movilidad en las 40 muestras seleccionadas de suelos y sedimentos de la fracción más fina, se aplicó la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 Anexo B mediante el método de extracción de solubles con agua en equilibrio con CO₂. Se utilizaron 2 gr de la muestra y 40 ml de agua meteórica con un pH <5.5.

Las muestras ya preparadas de acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se sometieron a una agitación continua por 18 ± 0.25 horas a temperatura ambiente, posterior a este paso se dejó reposar durante 5 minutos y se centrifugaron las muestras, se separó el extracto y las muestras fueron almacenadas para posteriormente hacer su medición mediante la técnica ICP-MS.

Como control de calidad en este procedimiento se realizaron duplicados por cada 10 muestras y un blanco por cada 10 muestras.

3.10 Análisis de muestras sólidas (sedimentos/suelos)

Las muestras digeridas y aquellas resultantes de las pruebas de movilidad se analizaron mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS que se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas).

La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 8000 K. En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadrupolar a través de una interfase de vacío creciente, allí son separados según su relación carga/masa. Cada una de las masas sintonizadas llegan al detector donde se evalúa su abundancia en la muestra.

3.11 Caracterización mineralógica.

Con la finalidad de conocer los componentes mineralógicos mayores de las muestras de sedimentos y suelos se llevó a cabo un análisis mediante la técnica de DRX en un Difractómetro de polvos marca Bruker, modelo D8 ADVANCE con tubo de cobre ($\lambda=1.54060\text{\AA}$) y filtro de níquel. Los parámetros de difracción fueron: un rango de $2\theta=4-90^\circ$, $\text{step size}=0.02$, $\text{time/step}=0.3$ seg, $\text{duración}=21$ min y el haz se generó a 40 kV y 35 mA.

La identificación de fases minerales cristalinas mayores se realizó contrastando el difractograma que se obtuvo de cada muestra contra la base de datos de patrones de difracción estándares de fases minerales puras que dispone el programa del mismo equipo.

4 Análisis y discusión de los resultados de la evaluación del transporte hídrico de elementos potencialmente tóxicos en la microcuenca del arroyo La Luz

4.1 Resultados del análisis granulométrico

Se obtuvo el porcentaje en peso de cada muestra para conocer que tamaño de partícula es más abundante en cada zona y posteriormente determinar las concentraciones totales de EPT en cada fracción; como resultado de la distribución granulométrica se obtuvo que la fracción C es la menos abundante en todas las zonas y la fracción más abundante es la A (2 a 0.240 mm) que es la fracción más gruesa, en el caso específico de los sedimentos en el arroyo principal y corrientes tributarias que se muestra en la figura 31; en el caso de los suelos la fracción más abundante es la fracción D (<0.073 mm) que corresponde a la partícula más fina. En el caso de las muestras de sedimentos la fracción más abundante es la más gruesa ya que en la parte alta de la cuenca donde se recolectaron las muestras el tipo de suelo pertenece al litosol que se caracteriza por ser extremadamente gravilloso y/o pedregoso (FAO, 2008) y en el caso de las muestras de suelos que se tomaron en la parte baja de la microcuenca donde descarga el cauce principal la fracción más abundante es la más fina esto debido a que el suelo pertenece a xerosol gypsico donde el material parental es principalmente depósitos aluviales, coluviales y eólicos no consolidados de material meteorizable rico en bases (FAO, 2008). Los resultados de este análisis denotan las diferencias en la distribución granulométrica entre la parte alta de la microcuenca y las corrientes tributarias con la parte baja del cauce principal.

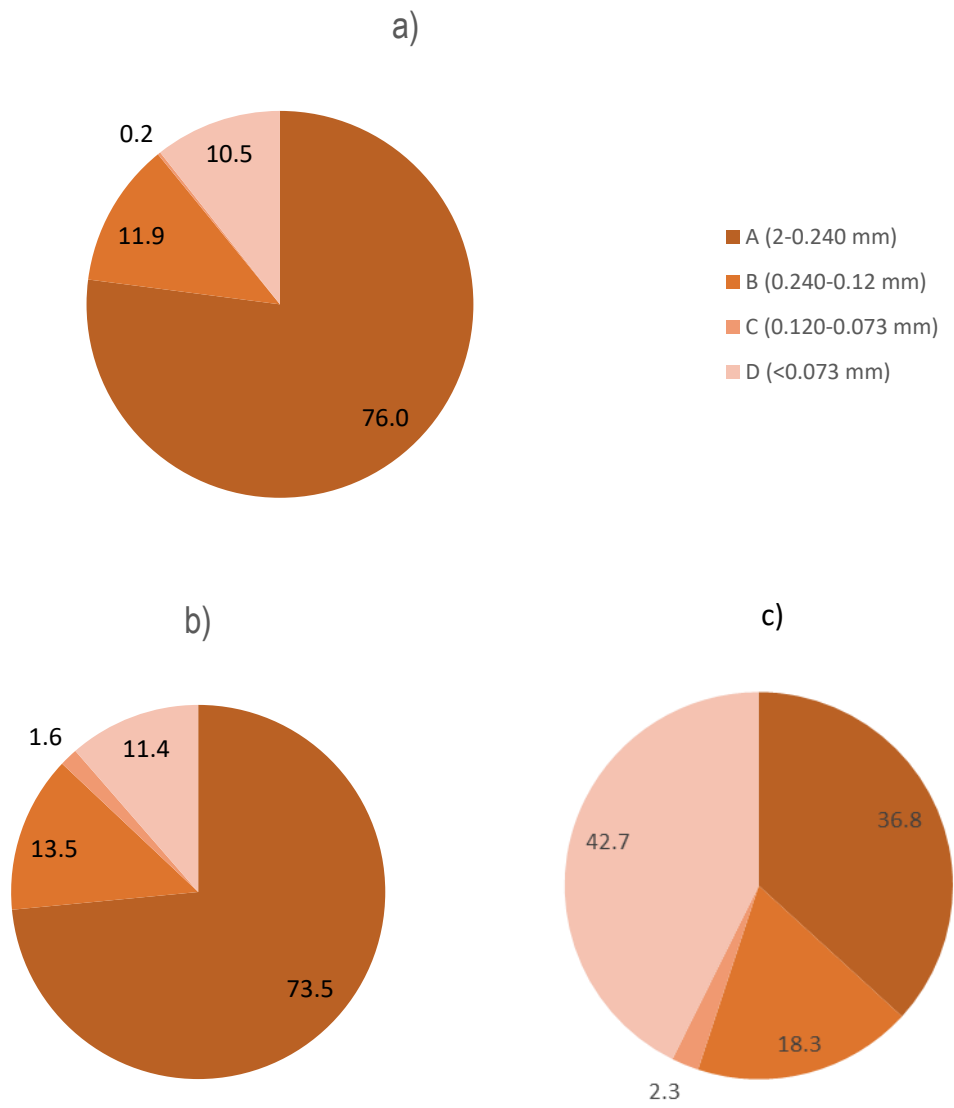


Figura 31. Distribución de pesos en sedimentos y suelos a) sedimentos arroyo La Luz, b) sedimentos área de residuos, c) suelos área de descarga

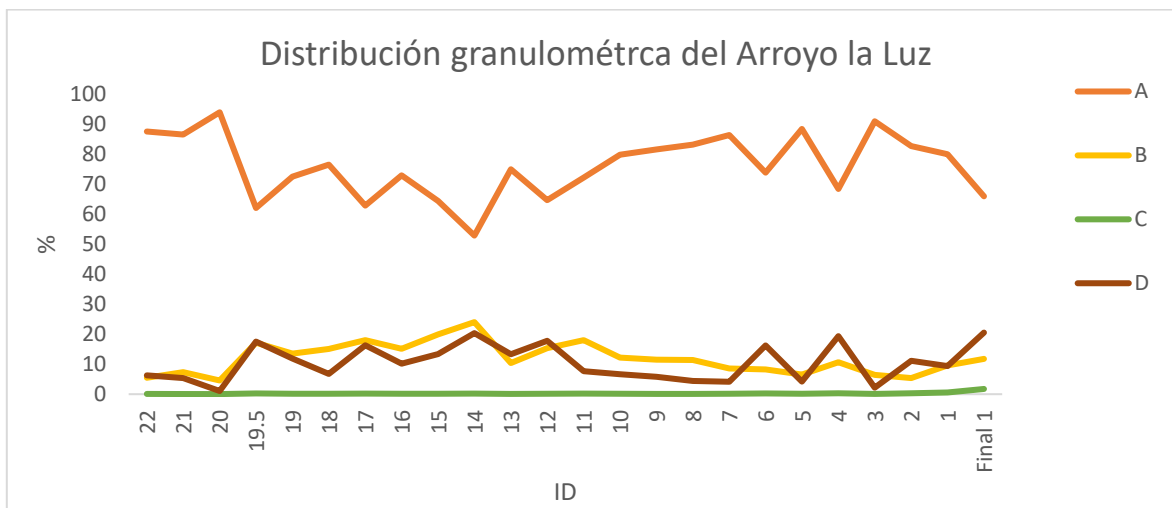


Figura 32. Distribución granulométrica cauce principal del arroyo La Luz entre las diferentes fracciones

En base con la figura 32 se puede apreciar que a lo largo de todo el cauce principal la fracción más abundante es la fracción más gruesa permaneciendo arriba del 60% de la totalidad de la muestra, también se puede observar que a partir de la muestra 3 hay una disminución en esta fracción y un aumento en la fracción más fina esto es debido a su cercanía con el área de descarga donde predomina esta fracción.

4.2 Conductividad eléctrica y pH

En las fracciones A, B y D de las muestras de sedimento y suelo se determinaron los parámetros fisicoquímicos de pH y CE.; de la fracción C estos parámetros no fueron tomados ya que por la cantidad de muestra obtenida no se obtuvo lo suficiente para emplear el método anteriormente descrito en la metodología. A continuación, se presenta la tabla estadística descriptiva (tabla 6) de los resultados obtenidos separados por fracciones y posteriormente graficas donde se muestran las diferencias entre las 3 áreas muestreadas.

Tabla 6. pH y CE de la microcuenca del arroyo La Luz entre las diferentes fracciones.

Fracción	A		B		D	
	CE (μS/cm)	pH	CE(μS/cm)	pH	CE(μS/cm)	pH
Media	343.7	7.7	381.5	7.7	523.0	7.5
Min	103.0	7.3	122.0	7.3	153.0	7.0
Max	1559.0	8.3	1702.0	8.1	1598.0	7.9
Desv estándar	247.5	7.2	247.8	7.1	327.5	7.2
Mediana	298.0	7.7	311.0	7.7	401.0	7.6

La tabla 5 muestra que no existe una diferencia significativa en cuanto a los valores de pH obtenidos en las diferentes fracciones; la media del pH está entre 7.7 y 7.5 lo que es un pH neutro-básico que se encuentra en toda la microcuenca y se explica principalmente por el elevado contenido de calizas presentes en el área de estudio, en cuanto a la conductividad eléctrica tenemos una media entre 343 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 523 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el valor promedio de conductividad señala que los sedimentos y el suelo superficial del área de estudio es no salino ($<2 \text{ dS}/\text{m}$) según lo establecido por Richards (1954). Y un incremento en los valores de conductividad eléctrica ($>2 \text{ dS}/\text{m}$) es debido al incremento de sales solubles ya que la conductividad eléctrica es controlada por una combinación de sales solubles, contenido de arcillas, contenido de agua en el suelo, y temperatura del suelo (McNeill, 1980).

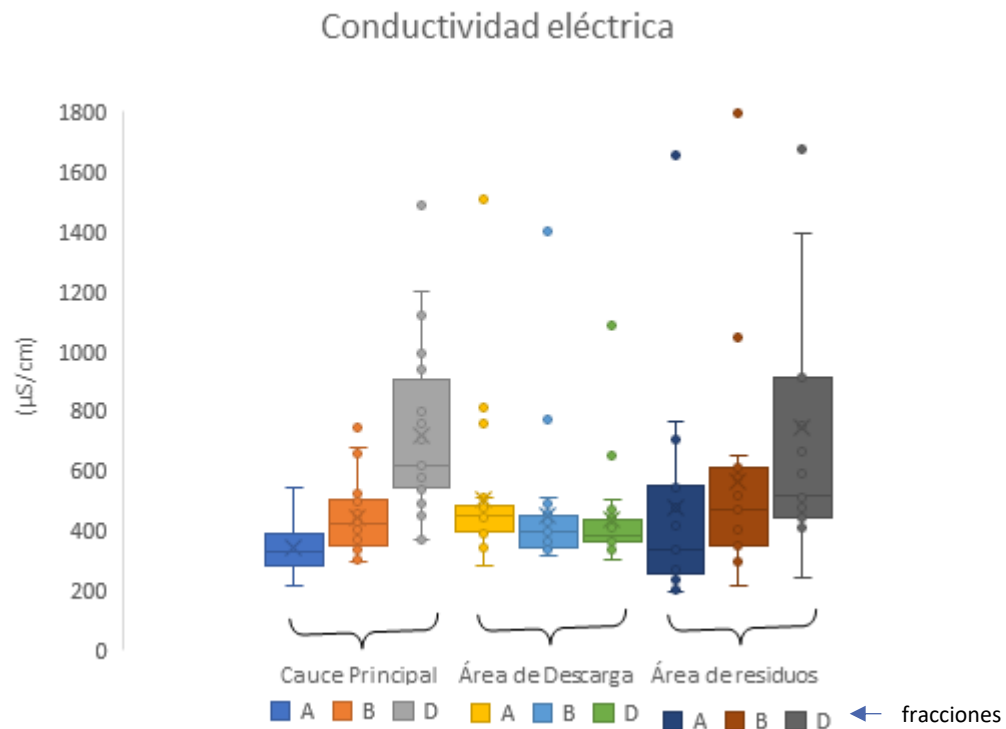


Figura 33. Gráfica de conductividad eléctrica entre las diferentes áreas muestreadas en la microcuenca arroyo La Luz

En relación con la figura 33 podemos darnos cuenta de que el valor más alto en cuanto a la conductividad eléctrica es en el área de los residuos y esto puede ser producto de causas naturales como es la disolución de minerales formadores de suelo y el consecuente incremento de iones solubles (Sposito, 2008), sin embargo, los resultados globales del sitio indican que los suelos son no salinos en condiciones naturales, tal como se observó en la mayor parte del área de estudio, en base con los resultados de los análisis de varianza (ANOVA) y método de Tukey se obtuvo que no existen diferencias significativas entre las 3 áreas muestreadas, en cuanto a las diferentes fracciones se obtuvieron diferencias significativas en la todas las fracciones del cauce principal arroyo La Luz.

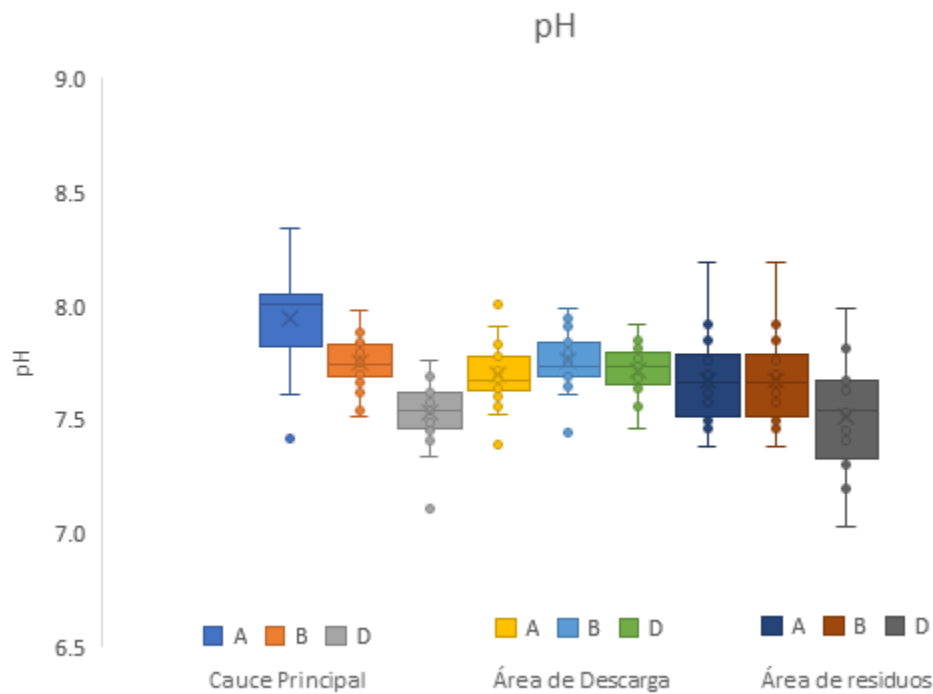


Figura 34. Gráfica de pH en las diferentes áreas de la microcuenca arroyo La Luz

De acuerdo con los resultados de la gráfica del pH nos podemos percatar que el pH más alto se encuentra en el área del cauce principal y el valor más bajo en el área de residuos, sin embargo, las diferencias en los valores no son significativas permaneciendo en un pH básico, de acuerdo con los resultados ANOVA y método Tukey se obtuvieron diferencias significativas en las fracciones B y D en el cauce principal arroyo La Luz y entre la fracción A y D del área de residuos.

4.3 Resultados de la concentración total

Se determinó la concentración de 38 elementos por FRX, enfocándonos en los EPT que regula la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (esta técnica no analiza Ba, Be, Tl y Se) incluyendo al Sb que de acuerdo a la literatura es un elemento de interés para el área de estudio (Díaz Barriga, 2020). Las concentraciones totales obtenidas fueron comparadas con las Concentraciones de Referencia Totales (CRT) establecida por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelo de uso residencial y/o agrícola, en el caso del Sb se tomó el límite máximo permisible establecido por la EPA en los Regional Screening Levels (RSLs); en el caso de las muestras de sedimentos también se tomaron estas concentraciones de referencia ya que no hay una norma mexicana que los establezca.

De acuerdo con los resultados obtenidos se obtuvo una base de datos de todas las muestras en las 4 fracciones y se realizaron tablas estadísticas descriptivas para identificar los EPT presentes que superaban el límite máximo permisible (LMP) para así evaluar cuales serían de interés para este estudio y se presentan a continuación.

Tabla 7. Porcentajes de muestras de sedimento y suelo que superaron los LMP y LD

	Ag	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Sb	V
% de muestras que superan el LD	11	94	4	29	3	99	100	88	97
% de muestras que superan el LMP	0	86	0	0	0	0	18	88	97
LD (mg/kg)	<10	<5	<10	<10	<5	<10	<5	<20	<10
LMP (NOM147) (mg/kg)	390	22	37	280	23	1600	400	31	78

LD: Limite de detección por FRX

De acuerdo con lo observado en la tabla 7 los EPT que rebasan los límites máximos permisibles son el As, Pb, Sb y V, donde tenemos mayor porcentaje de las muestras que rebasan este límite es en el V con un total del 97% de las muestras, le sigue el Sb y Arsénico y finalmente el Pb con un total de 18%, de todos los EPT medidos por FRX también resalto que algunos de ellos no rebasan el LMP de como es el caso de la Ag, Cd, Cr, Hg y Ni; En base con los resultados obtenidos se definieron los elementos de más importancia del área de estudio que fueron As, Pb, Sb y V por sus elevadas concentraciones que rebasaron los LMP establecidos y se realizaron tablas estadísticas descriptivas de estos elementos como mapas de las concentraciones totales.

Tabla 8. Estadística descriptiva de las concentraciones totales de EPT en la microcuenca arroyo La Luz.

EPT	Área	Cauce Principal (Arroyo La Luz)				Área con aporte de residuos				Área de descarga			
		Fracción	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C
As (LMP 22mg/kg)	Media	45.5	54.9	53.7	54.2	41.7	30.4	29.6	33.0	33.5	31.3	31.7	32.0
	Mínimo	13.7	26.0	31.7	35.0	24.7	ND	ND	ND	18.8	20.7	20.3	20.3
	Máximo	195.7	187.3	173.3	156.3	66.7	65.0	98.3	83.3	45.7	42.7	47.3	38.3
	Desviación Estandar	48.7	44.1	39.8	34.5	14.3	20.7	27.1	25.3	8.0	6.6	6.8	4.7
	Mediana	24.3	37.5	39.0	41.5	37.3	33.7	30.7	35.3	35.3	30.7	31.3	33.0
Pb (LMP 400mg/kg)	Media	32.6	130.9	209.1	332.9	405.69	1148.4	1836.6	1829.1	217.9	182.6	168.8	201.1
	Mínimo	15.3	28.3	34.3	36.0	21	39.3	41.0	39.0	50.3	48.0	52.7	52.3
	Máximo	57.7	448.0	616.0	1013.0	1324.3	5499.0	11805.3	8645.3	354.3	359.3	377.3	337.7
	Desviación Estandar	12.4	93.6	148.0	237.1	391.67	1549.9	3123.0	2622.8	87.5	86.6	91.1	67.9
	Mediana	31.0	100.2	167.3	277.0	388.67	755.3	866.0	738.7	245.0	181.0	148.8	199.5
Sb (LMP 31mg/kg)	Media	55.3	237.2	310.1	311.2	132.0	271.8	315.9	298.4	124.3	100.8	82.7	121.8
	Mínimo	19.0	19.0	71.7	68.0	19.0	9.0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Máximo	319.0	1695.0	1032.3	599.3	330.3	634.0	671.0	988.3	212.0	176.7	170.3	209.0
	Desviación Estandar	71.6	352.7	257.5	137.2	81.6	167.7	173.1	226.1	68.0	42.8	37.8	44.7
	Mediana	19.0	110.7	213.0	267.2	109.5	225.3	309.3	273.3	129.7	103.0	81.3	128.0
V (LMP 78mg/kg)	Media	220.3	255.1	251.6	274.7	333.9	332.5	374.2	349.5	213.00	209.56	217.31	243.47
	Mínimo	9.0	191.7	185.0	204.0	180.0	195.0	214.3	227.0	ND	ND	ND	206.00
	Máximo	321.0	357.3	441.3	343.0	1148.0	1117.0	1162.7	830.0	315.67	289.33	284.00	328.00
	Desviación Estandar	72.7	42.4	59.6	33.0	250.1	223.9	228.2	151.6	86.01	66.65	68.53	26.70
	Mediana	236.2	262.2	242.3	269.2	251.5	267.5	331.0	315.3	234.5	216.75	231.00	240.25

Las celdas resaltadas en la tabla 8 indican los valores más altos encontrados que superan el LMP en las concentraciones totales obtenidas en las diferentes áreas y fracciones, en base a los resultados nos podemos dar cuenta que en el caso de As en todas las fracciones y áreas de muestreo se supera el LMP establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 alcanzando valores hasta de 195.7 mg/kg y el más bajo de 38.3mg/kg siendo su LMP de 22 mg/kg, en el caso del Pb las muestras que superan el LMP en todas las fracciones es en el área con aporte de residuos y en el cauce principal llegando a tener concentraciones hasta de 11805.3 mg/kg , en el Sb en todas las fracciones y áreas nos excede el límite de la norma encontrando valores hasta de 1695 mg/kg y pasa lo mismo con el V donde encontramos concentraciones en el área con aporte de residuos hasta de 1162.7 mg/kg.

En el caso específico del As las concentraciones en sedimentos y suelos el 86% de las muestras rebasan el LMP lo que indica que existe un alto grado de contaminación por As en el área de estudio estos resultados son explicados por la naturaleza del yacimiento mineral de Au y Ag de la Sierra de Catorce y de acuerdo con el historial de actividad minera en el área se han generado grandes cantidades de residuos con concentraciones de metales pesados, susceptibles a procesos de erosión y meteorización. En cuanto a las diferencias entre las concentraciones y las diferentes fracciones no se ve una tendencia o preferencia a aumentar en una de ellas, pero en el caso de las concentraciones encontradas en las diferentes áreas es notoria una disminución de estas en los suelos pertenecientes al área de descarga.

En base a los resultados obtenidos del Pb solo el 18% de las muestras superaron el LMP sin embargo en el área con aporte de residuos llegamos a encontrar concentraciones hasta de 400 veces más altas de acuerdo a las concentraciones de referencias establecidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, en cuanto a las diferencias de las concentraciones entre las fracciones en el caso de los sedimentos son más altas en las fracciones más finas C y D; en cuanto a las diferencias entre las diferentes áreas de muestreo sobresalen las concentraciones altas encontradas en el área de los residuos y en el caso de los suelos del área de descarga no hubo ninguna muestra que rebasara el LMP.

De los resultados del Sb el 88% de las muestras superaron el LMP establecido por los RSL de la EPA (31 mg/kg), la presencia de este elemento se debe a la formación Zuloaga presente en la microcuenca en estudio ya que presenta estratos de caliza recristalizados, que se presentan mineralizados con Sb (Zarate del Valle, 1982). En lo que respecta a las diferencias de las concentraciones entre las fracciones no se denota una tendencia a acumularse en una de ellas, y en lo que respecta a las diferentes áreas de muestreo en las 3 áreas encontramos concentraciones altas, pero son mayores en los sedimentos pertenecientes al cauce principal y el área de residuos.

Del V tenemos que el 97% de las muestras obtenidas superaron el LMP, tampoco se observa una tendencia a aumentar en alguna de las fracciones, y en cuanto a las áreas de muestreo las 3 áreas presentan altas concentraciones sobresaltando los altos valores encontrados en los sedimentos del área de los residuos. Adicionalmente, los altos niveles de estos EPT se deben a la composición mineral propia de las rocas superficiales en la zona minera, conforme a Petersen et al. (2001), existe la presencia de minerales ricos en Pb, As, V y Sb y las actividades humanas como la minería pueden aumentar considerablemente los niveles presentes de EPT.

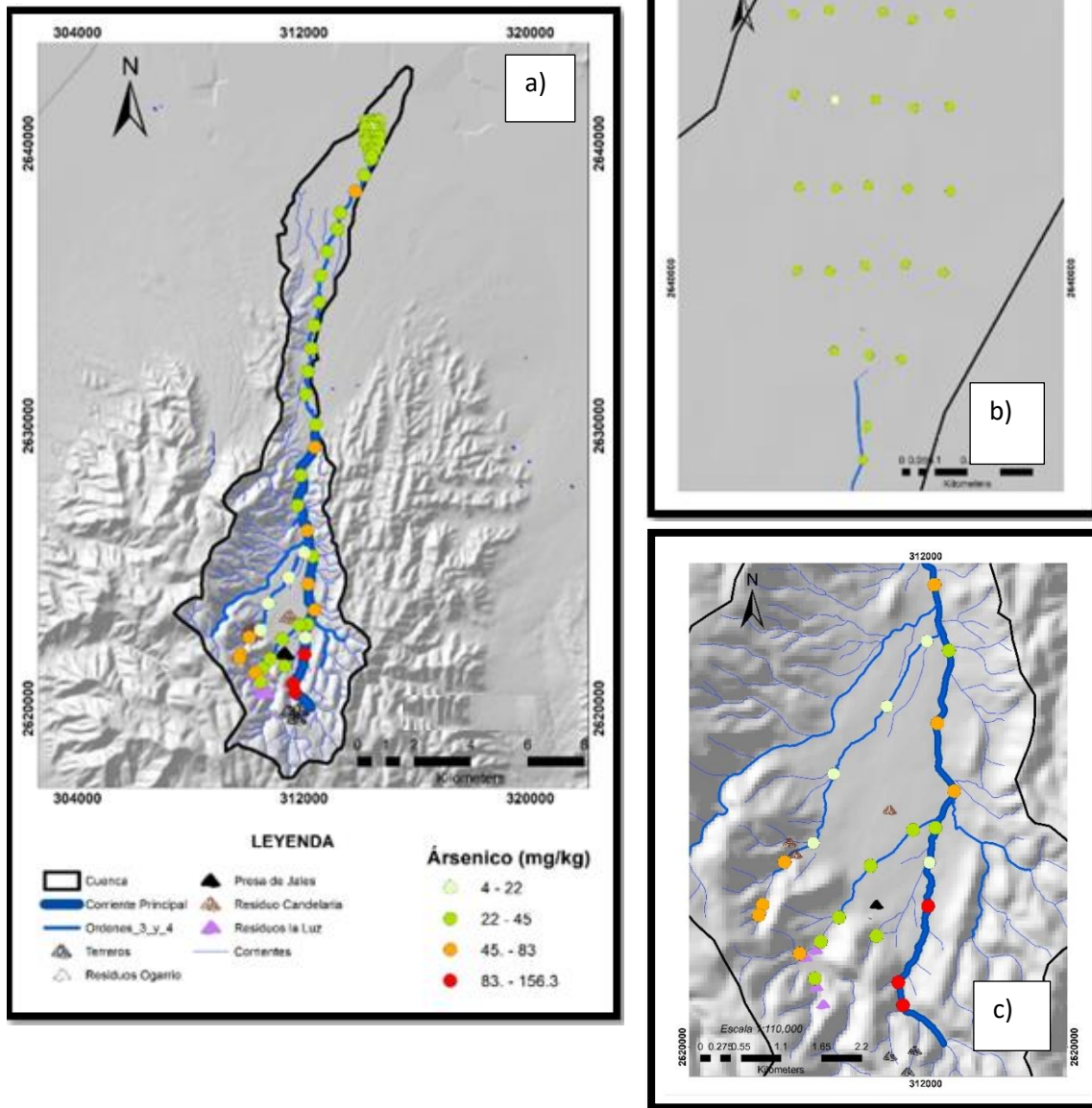


Figura 35. a) Mapa de distribución de concentraciones del As, b) suelos área de descarga, c) sedimentos área de residuos.

De acuerdo con la figura 35 las muestras que presentan los valores más altos de As pertenecen a la zona alta de la microcuenca pertenecientes a los puntos rojos en el arroyo La Luz donde se registran valores hasta de 156.3 mg/kg también se logra apreciar que las concentraciones van disminuyendo conforme se acerca a el área de descarga que se muestra en el recuadro superior derecho, sin embargo todas las muestras superan el LMP que es 22 mg/kg de acuerdo a la NOM-147SEMARNAT/SSA1-2004 evidenciando la contaminación por este elemento en suelos y sedimentos.

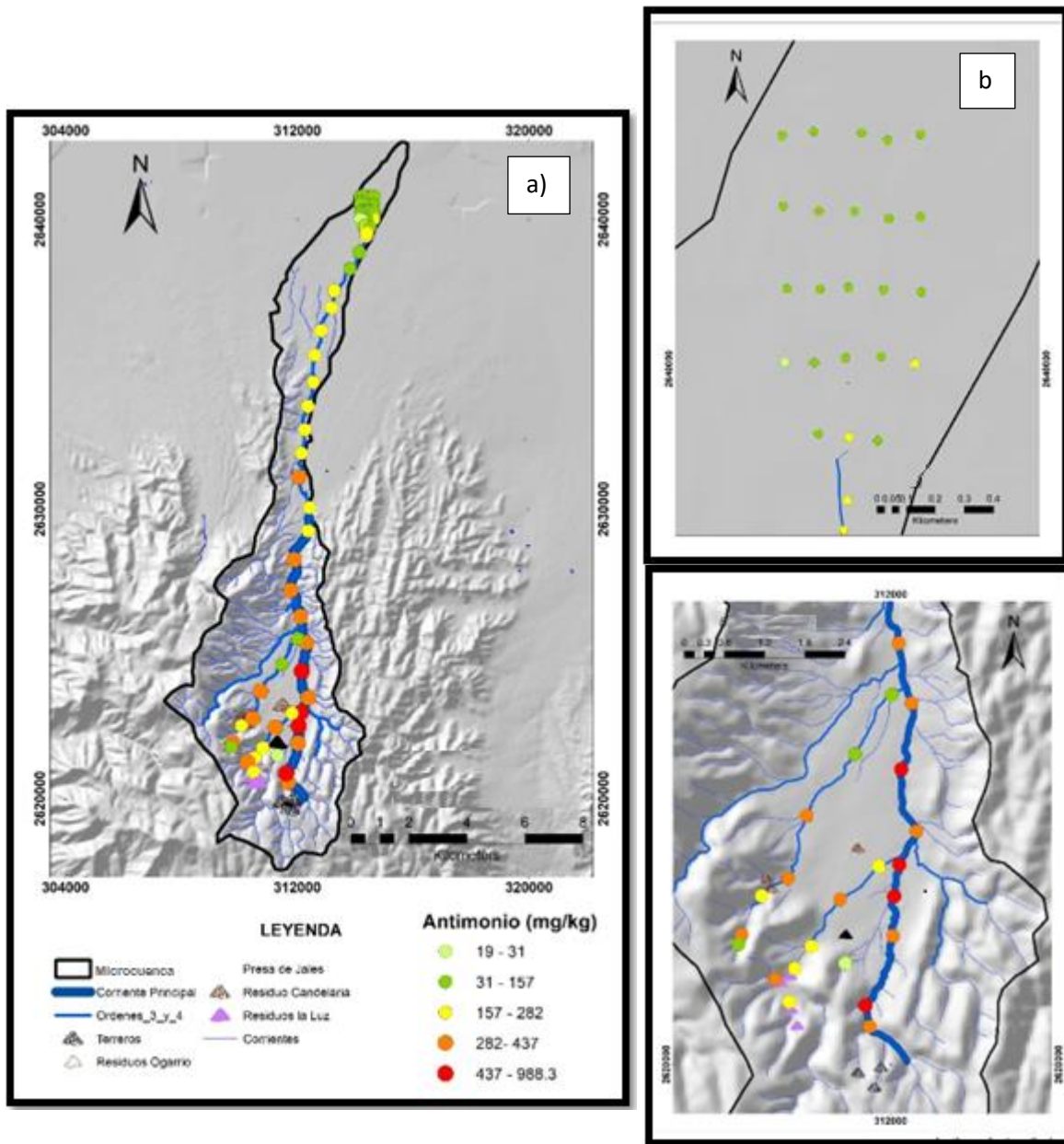


Figura 36. a) Mapa de distribución de concentraciones de Sb b) suelos área de descarga, c) sedimentos área de residuos.

El área donde se presentan los valores más altos de antimonio se registra en la parte alta de la microcuenca de acuerdo con la figura 36 estos valores pertenecen tanto a la parte alta del cauce principal como al área de los residuos y se aprecia la disminución de las concentraciones conforme se avanza al área de descarga del arroyo La Luz.

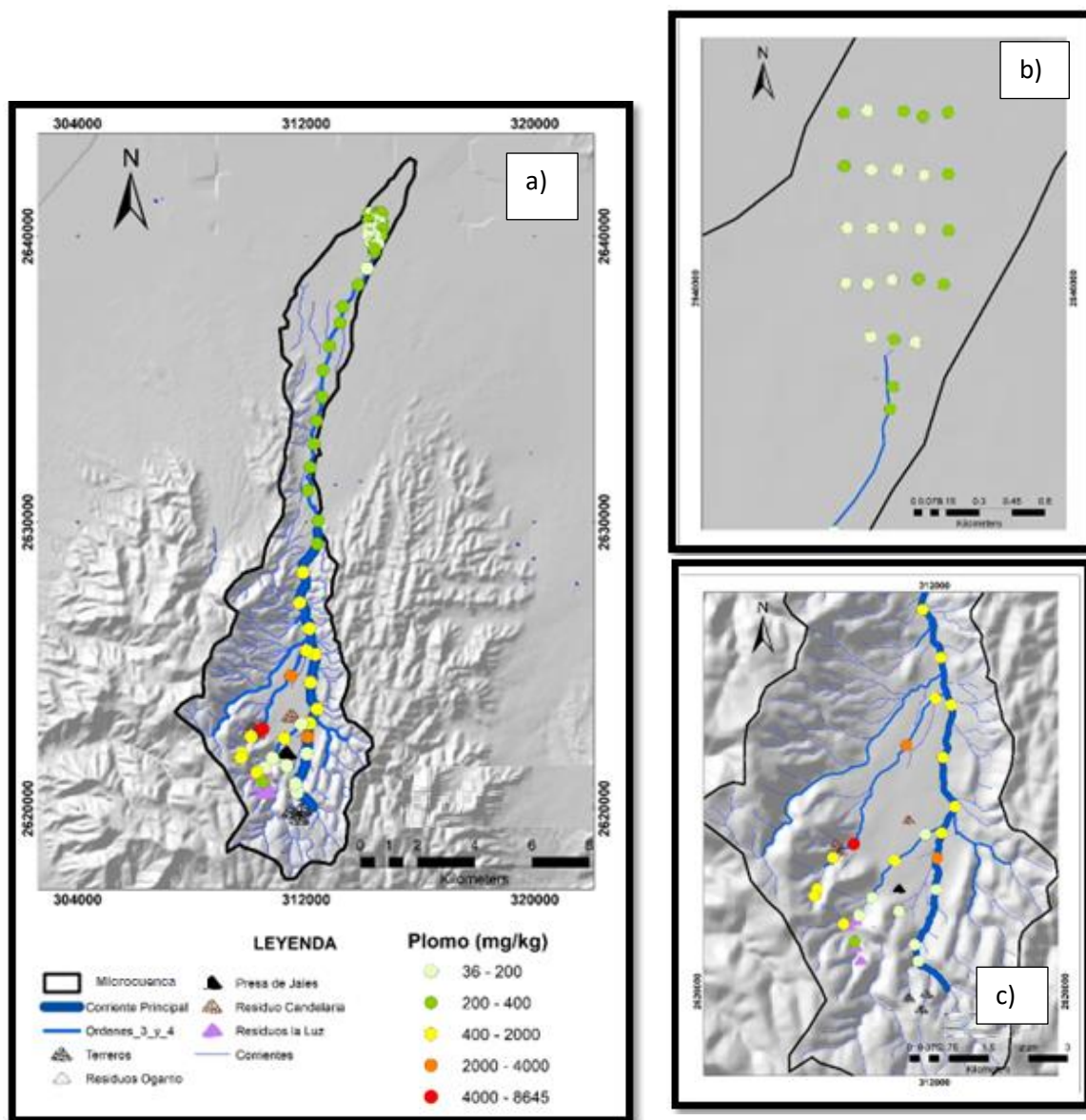


Figura 37. a) Mapa de concentración de Pb de la microcuenca en estudio b) suelos área de descarga, c) sedimentos área de residuos.

Como se observa en la figura 37 las concentraciones más altas de Pb las encontramos en el área de los residuos y en la parte media del cauce principal, se logra apreciar que la concentración más alta registrada pertenece al área de los residuos donde se encuentran los residuos de la candelaria y en la presa de jales que sugiere que estos son una fuente directa de Pb añadiendo las fases minerales encontradas en esta área posteriormente descritas en los resultados de DRX, las concentraciones en la parte media del cauce principal se pueden atribuir a los sedimentos transportados por las corrientes tributarias con cercanía a los residuos, específicamente a los residuos de la candelaria y la presa de jales, en este caso vemos que en la parte alta del cauce principal y en el área de descarga no se registran valores que superen el LMP (400 mg/kg).

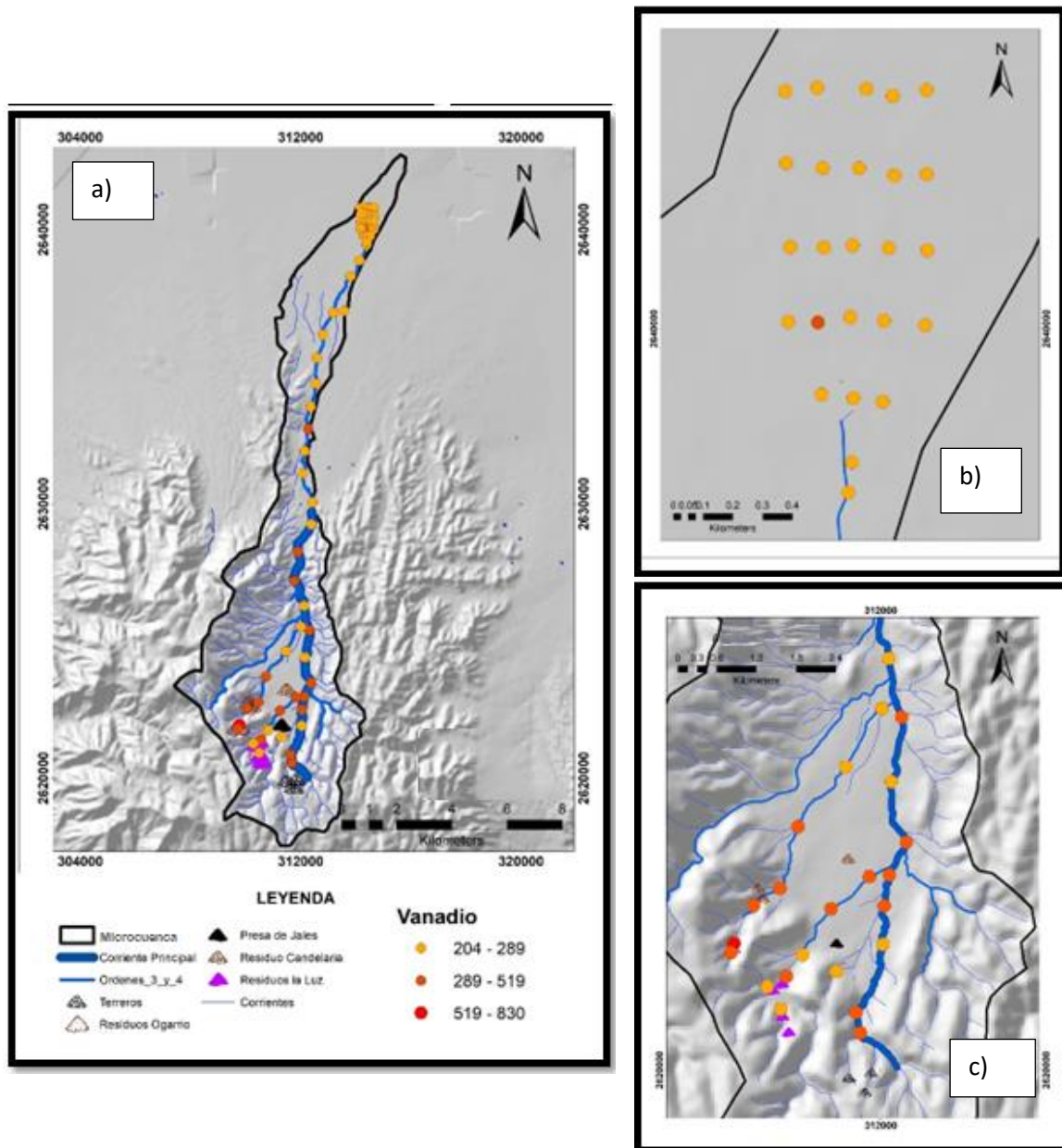


Figura 38. a) Mapa de concentración de V de la microcuenca del arroyo La Luz, b) suelos área de descarga, c) sedimentos área de residuos.

Como se observa en la figura 38 las concentraciones más altas de V las encontramos en la cercanía a los residuos pertenecientes a los residuos, sin embargo, en todas las muestras de sedimentos y suelos tenemos concentraciones que exceden el LMP de acuerdo a la NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 denotando la contaminación en la zona de este elemento; es un elemento que ocurre

naturalmente y está extensamente distribuido en la corteza terrestre en una concentración de aproximadamente 100 mg/kg encontrándose en cerca de 65 minerales diferentes (EPA,2018)

Para hacer una comparación de la influencia de los residuos en la microcuenca se tomaron muestras aguas arriba y aguas abajo de algunos de estos y ver el incremento o disminución de las concentraciones de los EPT tanto en la fracción gruesa como en la fracción fina y estos resultados de muestras a continuación en la tabla 9.

Tabla 9. Comparación de concentraciones totales en área de residuos aguas arriba y aguas abajo

Residuo	ID	Fracción fina				Fracción Gruesa			
		EPT (mg/kg)				EPT (mg/kg)			
		As	Sb	Pb	V	As	Sb	Pb	V
Terrero Ogarrío (M1)	Aguas arriba R5	47	118.3	429.3	365.3	57.6	109.21	388.6	258.3
	Aguas abajo R6	88.33	361	974	830	66.33	303.3	455.17	644.3
		1.87	3.05	2.26	2.27	1.15	2.77	1.17	2.49
Terrero la Luz (M7)	Aguas arriba R7	30.3	189.3	225	239.6	37.3	136.75	133.3	219
	Aguas abajo R8	64	353.3	738.6	289	50.3	138.6	209.3	301.6
		2.11	1.86	3.28	1.2	1.34	1.01	1.57	1.37
Presa de Jales (M9)	Aguas arriba R9	37.6	14	39	227.6	30.6	15.3	27.67	180
	Aguas abajo R13	9.67	988.3	2519.3	296	27.6	248.33	584.6	201
		3.88	70.59	64.59	1.3	1.1	16.23	21.12	1.11
Residuo Candelaria (M2)	Aguas arriba R11	64.3	273.3	1880	376.6	62.67	103.6	616.6	303
	Aguas abajo R12	13.75	428	7153	339.6	44.75	222.3	1324.3	206
		4.67	1.56	38.04	1.1	1.4	2.14	2.14	1.47

Disminución Incremento

Las concentraciones de los elementos en la mayoría de los casos aumentan después de la presencia de un residuo como es el caso del Sb y Pb y en el caso del As y V se ven algunas disminuciones en las concentraciones en el caso de la muestra R11 y R12, en cuanto a las diferencias entre las fracciones se ve un aumento mayor en las concentraciones en la partícula más fina de Sb y Pb en la presa de jales y el residuo candelaria denotando su aporte de estos EPT en las corrientes de agua que van a descargar al cauce principal.

4.3.1 Validación de datos de FRX mediante ICP-MS

Ya que la técnica de FRX no está reconocida como una técnica de análisis para el cumplimiento de la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 se hizo una validación de estos datos mediante la digestión ácida y medición por ICP-MS ya que esta técnica si está reconocida en la normativa anteriormente mencionada, para comparar los resultados de FRX contra ICP-MS se realizó un análisis de correlación entre las concentraciones de cada EPT analizado por ambas técnicas. Los resultados de las

correlaciones se muestran en las Figuras 39, 40, 41 Y 42 en las que se muestran los gráficos de correlación de As, Sb, V y Pb, respectivamente.

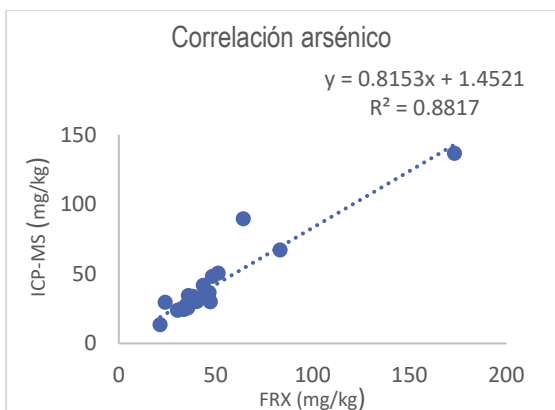


Figura 39. Gráfico de correlación ICP-MS y FRX de As

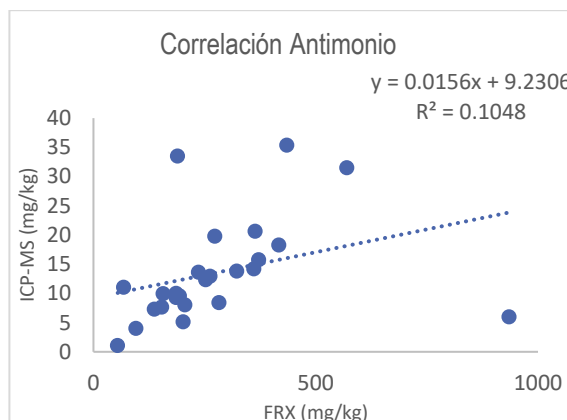


Figura 40. Gráfico de correlación ICP-MS y FRX de Sb

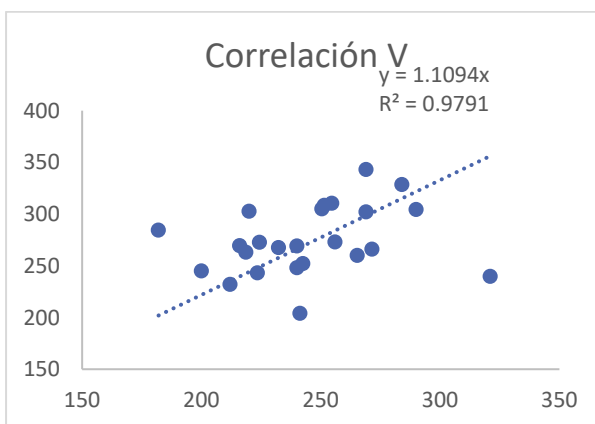


Figura 41. Gráfico de correlación ICP-MS y FRX de V

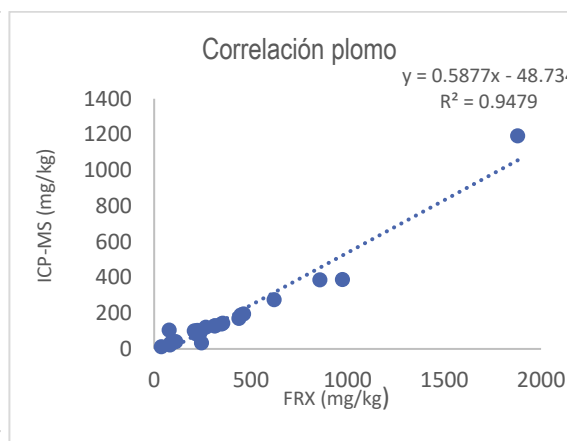


Figura 42. Gráfico de correlación ICP-MS y FRX de Pb

De acuerdo con la comparación entre los resultados de FRX y ICP-MS existe buena correlación en Pb y V arriba del 94%, también del As existe buena relación de las técnicas, sin embargo, el caso del Sb la discrepancia de los datos es muy grande (figura 40).

Para validar los datos mediante FRX también se calculó el porcentaje de recuperación de algunos elementos de interés en este trabajo del SRM Montana Soil 2710^a que se analizó mediante FRX y ICP-MS, a continuación, se muestran los resultados:

Tabla 10. Porcentajes de recuperación SRM 2710a

Porcentaje de recuperación SRM 2010 ^a	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Hg	Pb
FRX	109	90	88	ND	ND	0.03	102
ICP-MS	27	33	11	61	3	148	43

En base a los resultados de la tabla se puede apreciar que hay mayor recuperación mediante la técnica de FRX que la de ICP-MS en la mayoría de los elementos presentados.

4.4 Resultados de la caracterización mineralógica

A continuación, se presenta la tabla de las principales fases minerales de la zona de estudio, los difractogramas de las 14 muestras seleccionadas de la fracción más fina realizados en el programa Origin se encuentran en el anexo de este documento.

Tabla 11. Principales fases minerales identificadas en las muestras de suelo y sedimentos por Difracción de Rayos X

Id	Descripción	pH	CE	Principales fases minerales presentes		
				CaCO ₃	SiO ₂	Feldespatos/ Silicatos
2	Sedimento	7.62	901µs/cm	+++	++	+
4	Sedimento	7.36	494µs/cm	+++	++	+
7	Sedimento	7.36	624µs/cm	+++	++	+
11	Sedimento	7.43	625µs/cm	+++	++	+
14	Sedimento	7.54	521µs/cm	++	+++	+
19.5	Sedimento	7.69	274µs/cm	+++	++	+
21	Sedimento	7.51	663µs/cm	++	+++	+
R2	Sedimento	7.38	496µs/cm	++	+++	+
R8	Sedimento	7.47	817µs/cm	+++	++	+
R12	Sedimento	7.26	1598µs/cm	++	+++	+
R13	Sedimento	7.92	153µs/cm	+++	++	+
R14	Sedimento	7.6	315µs/cm	+++	++	+
F5	Suelo	7.76	399µs/cm	+++	++	+
F9	Suelo	7.57	356µs/cm	+++	++	+
F24	Suelo	7.71	326µs/cm	+++	++	+

+++ muy abundante, ++ medianamente abundante, + ligeramente abundante. Representan el nivel de intensidad del pico observado en el difractograma para cada fase mineral presente en el suelo.

Se puede observar que las muestras analizadas poseen las mismas fases minerales principales, teniendo como fase mineral más abundante en su mayoría la calcita (CaCO₃); seguido del cuarzo

(SiO₂), los cuales son componentes característicos de las rocas que afloran en la región de Real de Catorce; y en menor abundancia se encuentra una gran variedad de feldespatos alcalinos y aluminosilicatos, como la anortoclasa [(Na,K)AlSi₃O₈], ortoclasa (KAlSi₃O₈), moscovita [KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂], anortita [Ca(Al₂Si₂O₈)], albita (NaAlSi₃O₈), entre otros.

Las diferencias encontradas en las fases minerales en las muestras 14, 21, R2 y R12 ubicadas en la parte alta de la microcuenca se pueden atribuir a que los sedimentos transportados de la parte alta de la cuenca donde tenemos la presencia de Diorita que es una roca ígnea intrusiva compuesta principalmente por los minerales de silicato feldespato de plagioclasa (Rogers, 2020).; teniendo una influencia en la composición mineralógica de los suelos, enriqueciendo los suelos aledaños a la parte alta del cauce.

De acuerdo con los resultados el mineral más abundante es la calcita por las rocas existentes en el área y su presencia en el medio ambiente trae ventajas como la neutralización de la acidez del suelo, la disminución de la solubilidad de metales pesados potencialmente tóxicos y el incremento del magnesio y calcio disponibles para las plantas (Hahn y Marschner 1998), así como incrementa la capacidad de intercambio catiónico en los suelos (Pérez, 1986). Sin embargo, un aumento considerable de la calcita puede incrementar el grado de descomposición de la materia orgánica con la consecuente pérdida del carbono orgánico (Sánchez et al, 2007).

En base a los resultados de los difractogramas también obtuvimos la presencia de los siguientes elementos Cristobalita, Ortoclasa, Caolín, Enstatita de Fe y Dióxido de Fe; en las muestras pertenecientes al área de residuos se encontró la presencia de Cerusita que es un carbonato de Pb (PbCO₃), y constituye una de las menas más importantes de este elemento, la tabla correspondiente a estos resultados se encuentra en el anexo de este documento.

4.5 Resultados de las pruebas de movilidad

En base a los resultados obtenidos de las pruebas de movilidad se realizó una tabla estadística descriptiva para identificar los EPT presentes y aquellos que rebasaban el LMP de la NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece las concentraciones de referencia de contaminantes solubles, en el caso del Sb al no estar normado en esta se tomó el valor de referencia de Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano; la tabla se muestra a continuación donde solo el Sb nos rebasa el LMP, en el caso de los otros EPT presentes sus concentraciones solubles son muy alejadas del valor de referencia por lo cual son muy poco solubles.

Tabla 12. Tabla estadística descriptiva de la concentración soluble

Áreas	Estadísticos	EPT (mg/L)						
		Ag	As	Cd	Hg	Pb	Sb	V
Cauce Principal Parte alta	Media	LD	0.02	LD	0.00006	0.046	0.011	0.001
	Mediana	LD	0.02	LD	0.00005	0.054	0.014	0.002
	Mínimo	LD	0.01	LD	0.00003	0.000	0.008	0.000
	Máximo	LD	0.02	LD	0.00015	0.074	0.014	0.002
Cauce Principal Parte media	Media	LD	0.01	LD	0.00004	0.025	0.009	0.003
	Mediana	LD	0.01	LD	0.00002	0.023	0.009	0.003
	Mínimo	LD	0.01	LD	0.00002	0.011	0.008	0.002
	Máximo	LD	0.01	LD	0.00010	0.051	0.012	0.004
Cauce Principal Parte baja	Media	LD	0.01	LD	0.00006	0.026	0.008	0.007
	Mediana	LD	0.01	LD	0.00005	0.022	0.008	0.007
	Mínimo	LD	0.01	LD	0.00001	0.008	0.007	0.006
	Máximo	LD	0.02	LD	0.00011	0.053	0.009	0.008
Área de descarga	Media	LD	0.01	0.00001	0.00013	0.015	0.004	0.008
	Mediana	LD	0.01	0.00001	0.00011	0.012	0.005	0.009
	Mínimo	LD	0.00	0.00001	0.00002	0.005	0.000	0.002
	Máximo	LD	0.02	0.00001	0.00041	0.051	0.008	0.011
Área con cercanía a residuos	Media	LD	0.01	0.00287	0.00020	0.106	0.019	0.003
	Mediana	LD	0.01	0.00241	0.00011	0.08	0.022	0.002
	Mínimo	LD	0.01	0.00040	0.00001	0.001	0.001	0.001
	Máximo	LD	0.02	0.00694	0.00070	0.27	0.031	0.007
LMP NOM 147 (mg/L)		0.5	0.5	0.01	0.02	0.5	--	0.16

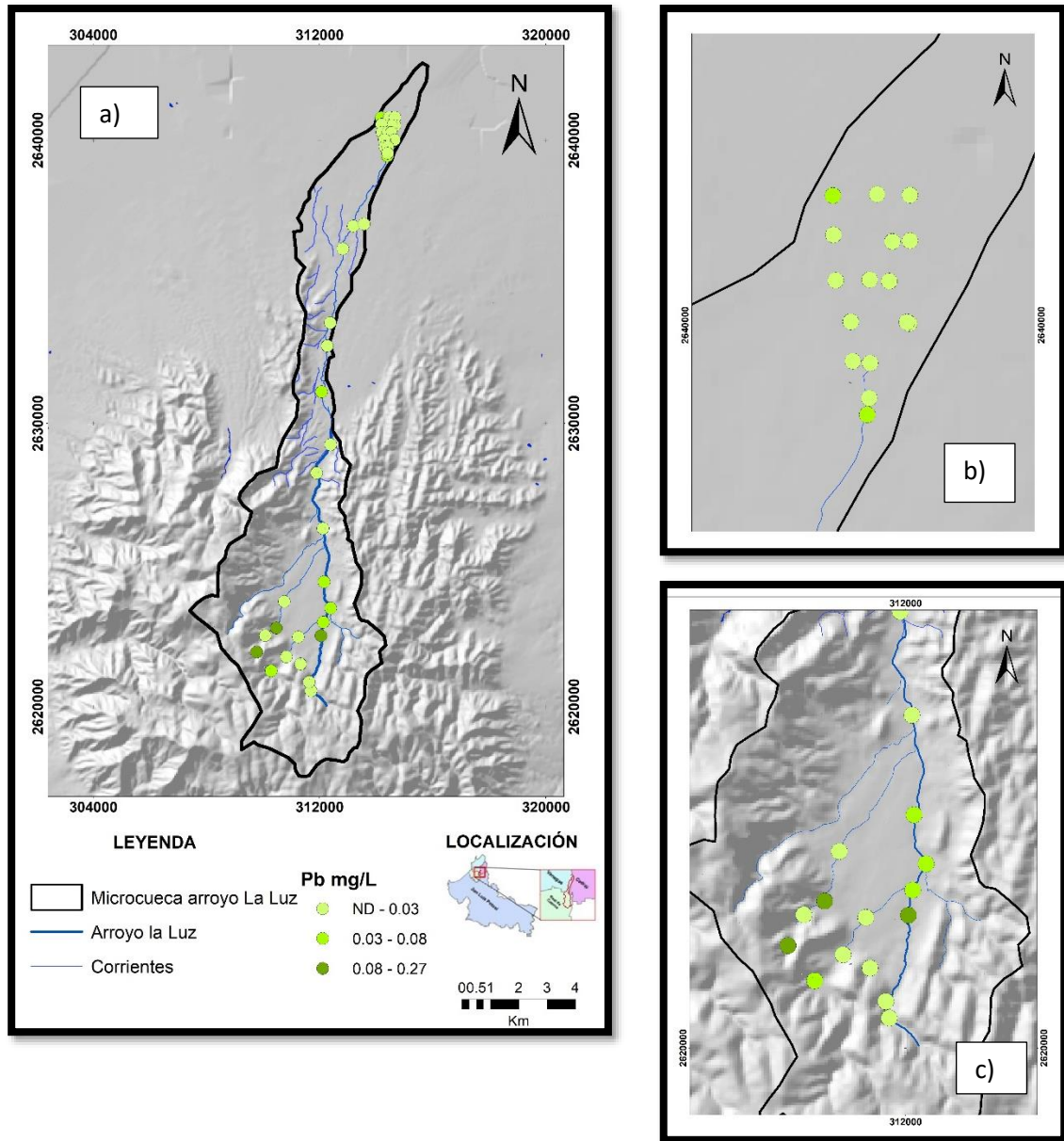


Figura 43. a) Mapa de concentración soluble de Pb, b) suelos área de descarga, c) sedimentos área de residuos.

En la figura 43 se muestran las concentraciones solubles del Pb donde de acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se establece un total de 0.5 mg/L, y de acuerdo a la media obtenida en la tabla 12 esta de 0.015 a 0.106 denotando su poca solubilidad en el área de estudio y en base con el mapa de dispersión la solubilidad más alta 0.027 mg/L se encuentra en el área de los residuos de la candelaria donde también se reportan las concentraciones totales más altas .

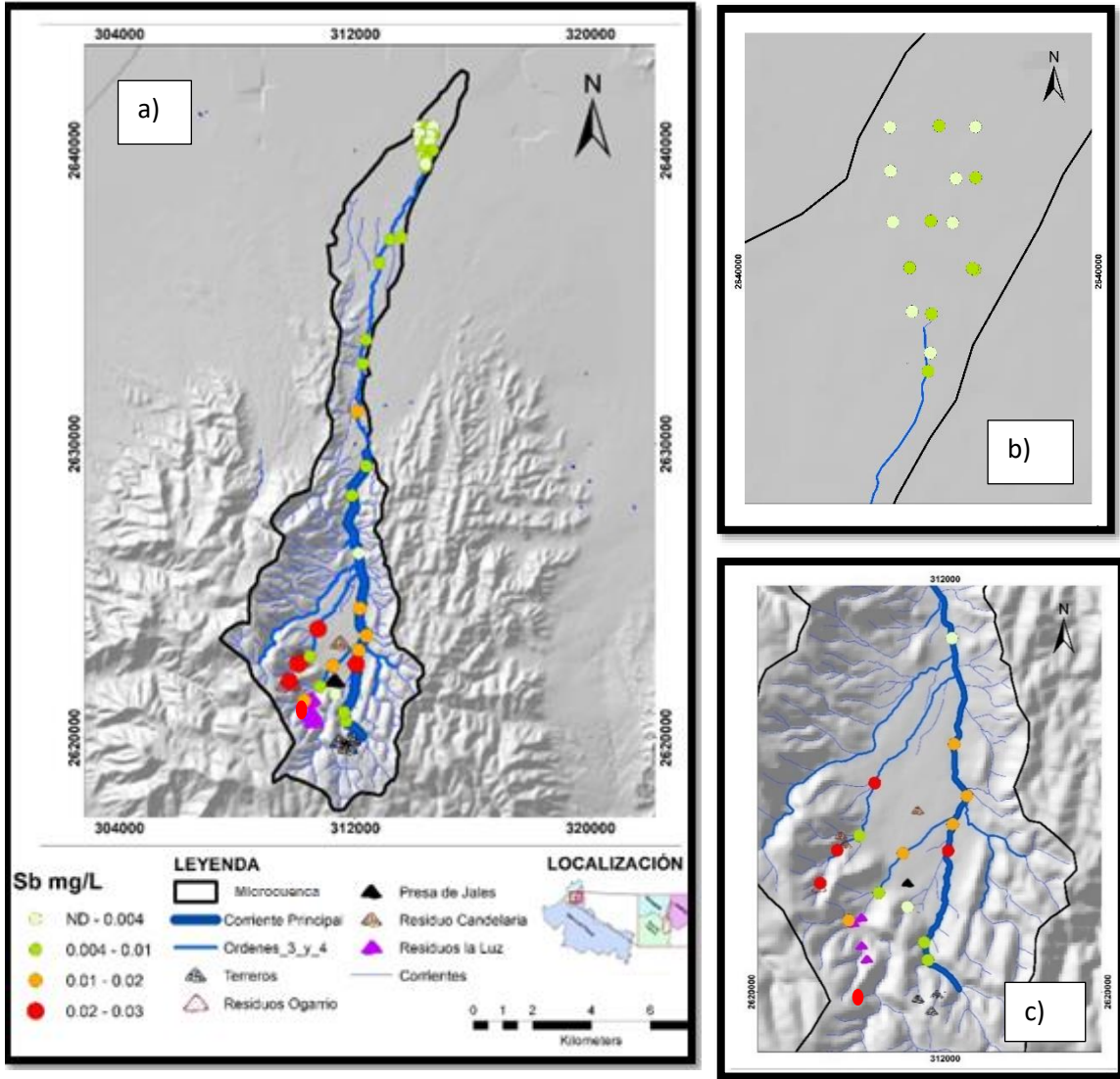


Figura 44. a) Mapa de concentración soluble de Sb b) suelos área de descarga, c) sedimentos área de residuos.

En la figura 44 se muestran las concentraciones solubles del Sb donde de acuerdo con la EPA (2018) en los Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable establece un total de 0.006 mg/L y donde encontramos las concentraciones solubles más altas corresponden a las concentraciones totales más altas registradas con valores que oscilan entre 189.3 mg/kg hasta 988.3 mg/kg estos resultados indican que un mayor contenido total de metales aumenta la posibilidad de que la fracción soluble sea alta.

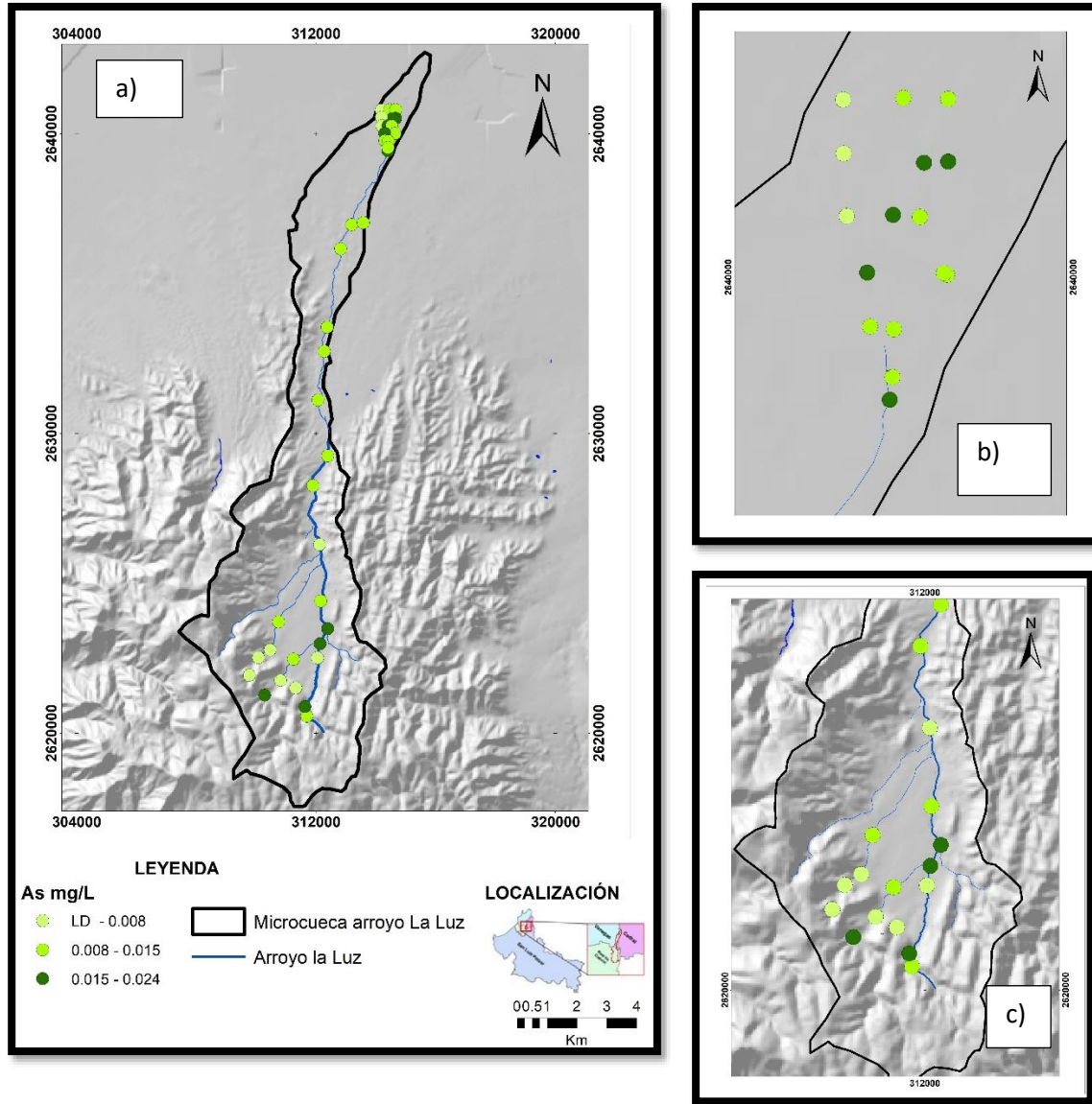


Figura 45. a) Mapa de concentración soluble de As, b) suelos área de descarga, c) sedimentos área de residuos.

En la figura 45 podemos observar las concentraciones solubles del As, donde encontramos los valores solubles más altos, aunque sin superar el LMP en la parte alta del cauce principal el arroyo La Luz y en el área de descarga, siendo menos soluble en la parte media del cauce principal.

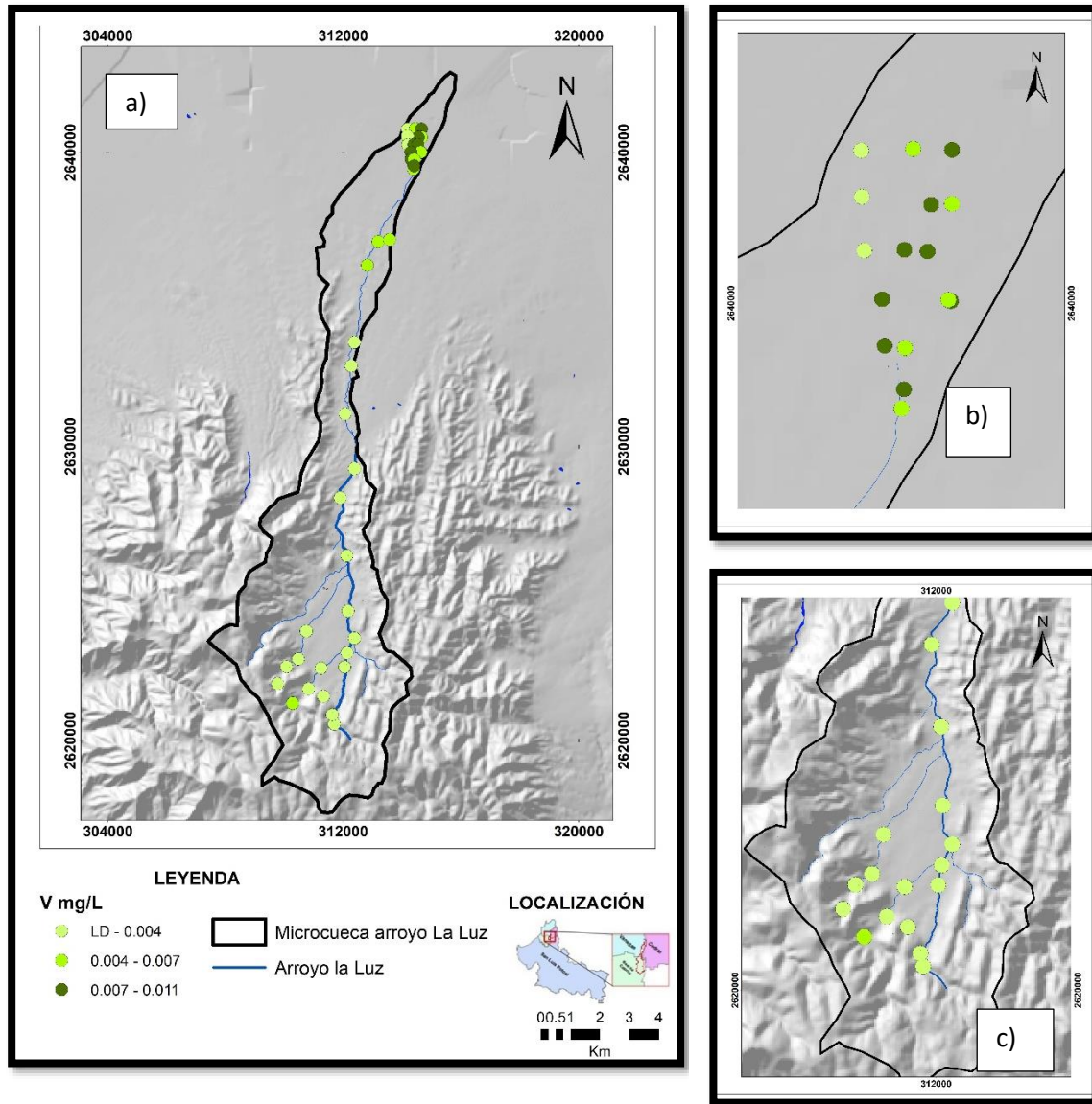


Figura 46. a) Mapa de concentración soluble de V b) suelos área de descarga, c) sedimentos área de residuos.

En la figura 46 se muestran las concentraciones solubles del V donde encontramos las solubilidades mas altas aun sin repasar LMP en base con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece 0.16 mg/L en el área de descarga del cauce principal encontrando concentraciones solubles de 0.011 mg/L valor que está aún muy debajo de la norma.

4.5.1 Concentraciones móviles

De acuerdo con los resultados de las concentraciones totales tanto en suelos como en sedimentos y las concentraciones solubles se pudo establecer la concentración móvil de cada una de las muestras

analizadas de algunos de los EPT que nos arrojaron datos como es el caso del As, Hg, Pb, V, Sb y Pb , estos resultados se presentan a continuación:

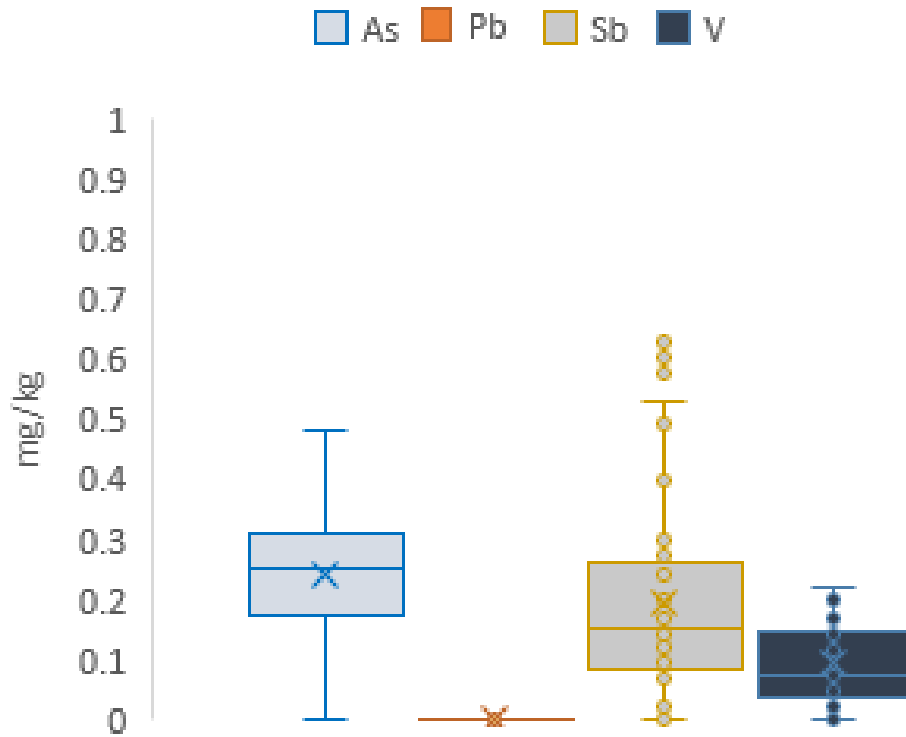


Figura 47. Gráfica de concentraciones móviles de EPT.

De acuerdo con los resultados de las concentraciones móviles los valores son muy pequeños obteniendo que las concentraciones móviles más altas son del As y Sb, siendo el Pb quien tiene la concentración móvil más baja, también se calculó el porcentaje de movilidad de cada uno de los elementos presentados dando como resultado el porcentaje móvil más alto se presenta en el As y de los demás EPT mostrados no rebasa el 0.4% de movilidad como se muestra en la figura 48.

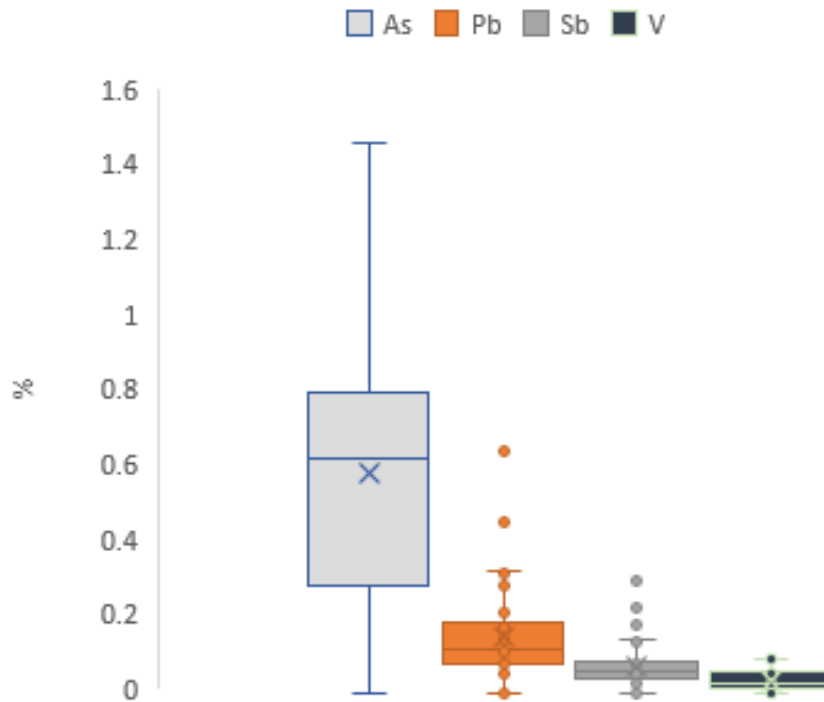


Figura 48. Gráfica de porcentajes móviles de EPT.

De acuerdo con los resultados de las concentraciones y el porcentaje móviles indican que la capacidad que poseen estos ETP en el área de estudio para movilizarse al medio acuoso es muy baja, comportamiento que se ve influenciado por la condición natural del sitio y que también puede deberse a las características de la fuente. No obstante, los resultados obtenidos muestran que existe una pequeña fracción de Sb en el área de los residuos que tiene la capacidad de transferirse y permanecer en la fase acuosa, y que en algunos casos superar el LMP. Esta fracción soluble indica que en algunos puntos de la microcuenca estos sedimentos son una fuente potencial de contaminación al transferirse a la fase acuosa. Cabe resaltar que esta concentración soluble no es definitiva, se puede ver modificada por las condiciones variables del sitio a través del tiempo, y un aumento en la fracción soluble implicaría una preocupación ambiental y de salud debido a que los contaminantes se encuentran disueltos en la solución del suelo, quedando disponibles para ser absorbidos por las plantas o transferirse a los cuerpos de agua (Kabata-Pendias, 2011).

Las concentraciones móviles más altas coinciden con las muestras que poseen las concentraciones totales más altas de Sb para este conjunto de muestras, y dichas muestras poseen un pH de suelos y sedimentos alcalinos con valores entre 7.0 y 8.3, esto exhibe que a pesar de poseer los porcentajes móviles más altos, existe la posibilidad de una inmovilización de los elementos tóxicos en el suelo superficial por la presencia de fases minerales alcalinas, reflejada por medio de valores de pH superiores a 8.0. La movilización del Pb es usualmente baja, pero algunos parámetros del suelo como el incremento en la acidificación y la formación de complejos Pb y materia orgánica, pueden

incrementar su movilidad (Kabata-Pendias, 2011), por lo que en las condiciones actuales del sitio este elemento permanece inmóvil, no obstante, una disminución del pH del suelo hasta llegar a acidificarlo implicaría un aumento en la concentración móvil.

La variable clave que regula la movilidad de la mayoría de los metales pesados es el pH. Sin embargo, para ciertos elementos, como el As, el pH no es un factor importante en el control de su movilidad debido a que las formas químicas solubles del As predominan en un rango de pH muy amplio (Smedley & Kinniburgh, 2002). Es por ello por lo que la movilidad del As es determinada por procesos de precipitación, disolución, adsorción y desorción. Estos procesos son controlados por parámetros geoquímicos como el pH, Eh, composición iónica y mineral (Bissen & Frimmel, 2003; Masscheleyn et al., 1991). En el caso del As que se encuentra en el suelo del área de estudio el posible proceso que influye en su inmovilidad en el suelo es la adsorción a minerales y otros componentes del suelo como la materia orgánica, los óxidos de Fe y Mn, a carbonatos, entre otros. A continuación, se muestran las gráficas de relación de Fe, pH y conductividad del cauce principal el arroyo La Luz que son un factor clave para la movilidad de este y otros EPT.

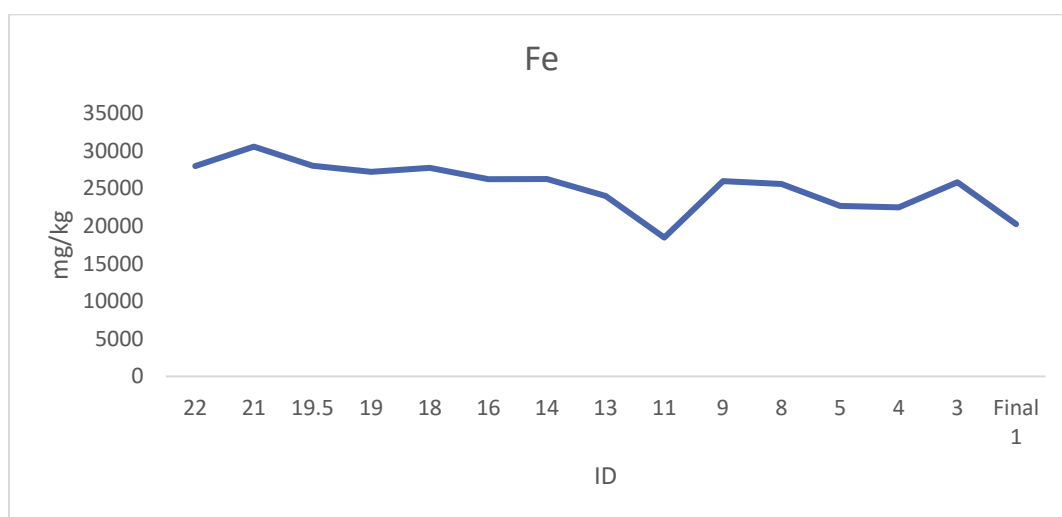


Figura 49. Presencia de Fe en el arroyo La Luz

En cuanto a la presencia de Fe en el arroyo La Luz se logran apreciar concentraciones muy similares a lo largo de todo el cauce por lo que no se puede observar una influencia directa en cuanto a cambio de concentraciones de este y se recomendaría un estudio para verificar la presencia de este en óxidos de Fe.

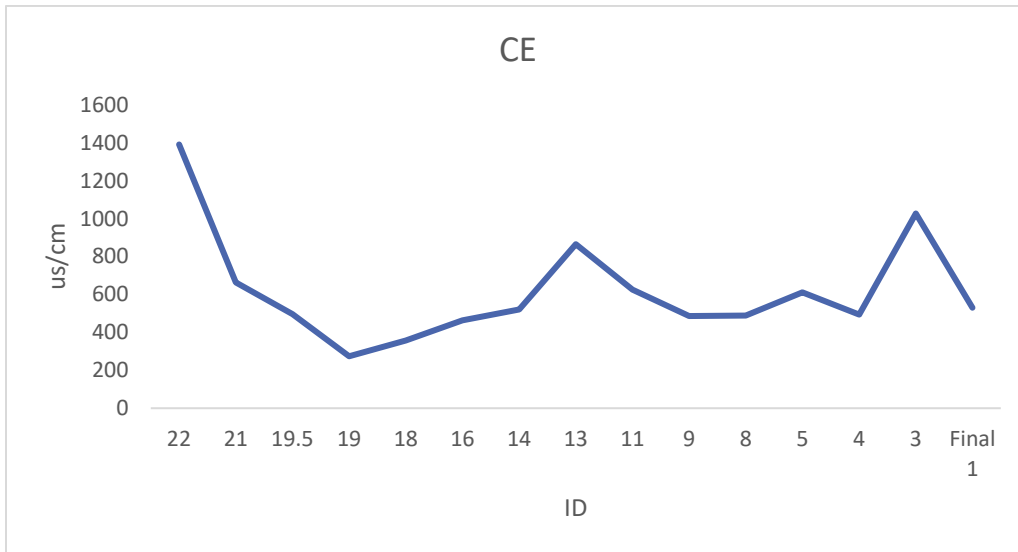


Figura 50. Conductividad eléctrica en el arroyo la Luz

En base con las CE registradas a lo largo del cauce principal podemos apreciar que las CE más altas están en la parte alta del cauce principal y algunas otras en medio del cauce y un poco antes del área de descarga, y que pueden influir en el aumento de las movilidades de estos EPT.

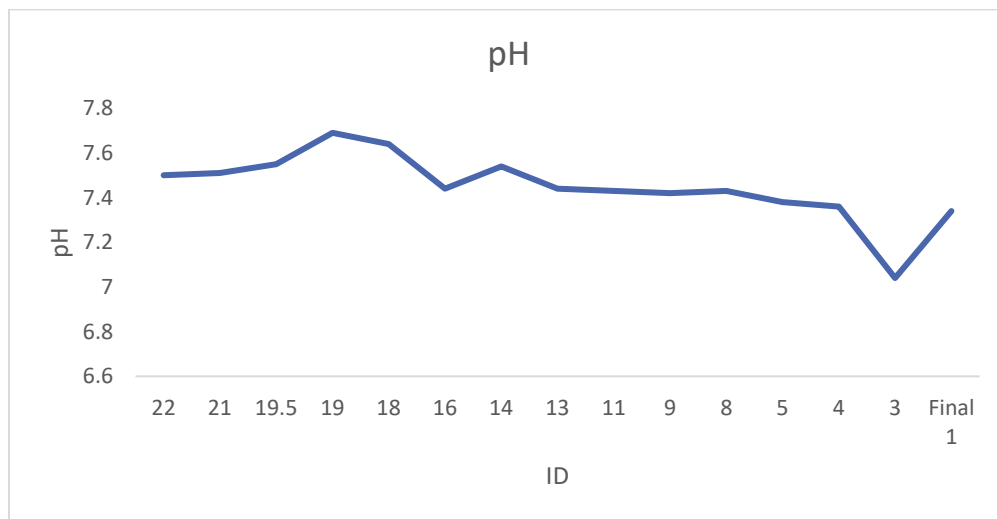


Figura 51. pH arroyo La Luz

Respecto a el pH a lo largo del cauce principal tenemos valores alcalinos superiores a 7, reportándose los mas bajos antes del área de descarga factor que de ser más bajos podría contribuir a la movilización de estos EPT.

En el caso del Sb tiene una afinidad más alta para la fase de partículas que para la fase acuosa y la transformación de formas móviles de Sb está controlada predominantemente por procesos de precipitación y adsorción naturales. Se ha reconocido que los oxihidróxidos de hierro, manganeso y minerales de aluminio son agentes secuestradores de origen natural de Sb en el medio ambiente. El antimonio también se inmoviliza en el entorno natural mediante la precipitación con álcalis y metales

pesados que resultan en fases minerales extremadamente estables, como antimonatos de calcio (Herath *et al.*, 2017).

Aunque la toxicidad del V varía entre diferentes especies, está controlada principalmente por el potencial redox del suelo (EH). Sin embargo, el conocimiento de la geoquímica redox del V se retrasa en comparación con lo que se sabe acerca de otros elementos potencialmente tóxicos (EPT). En particular, no se han revisado hasta la fecha la especiación y movilización de V inducida por el efecto redox en suelos y sedimentos y los riesgos conexos para el medio ambiente; se conoce que el V (+5) es la forma más móvil y tóxica de su especie mientras que es el estado de valencia termodinámicamente estable en ambientes tóxicos, mientras que el vanadio (+3) podría ser predominante bajo condiciones euxinicas (anóxicas y sulfídicas). El vanadio puede reaccionar de manera variable en respuesta al cambio de EH del suelo: en condiciones anóxicas, la movilización de vanadio puede disminuir porque el vanadio (+5) puede reducirse a vanadio relativamente menos soluble (+4) a través de reacciones inorgánicas como con H₂S y materia. Por otro lado, las concentraciones disueltas de vanadio pueden aumentar a bajo EH en muchos suelos para revelar un patrón similar al de Fe, que puede ser debido a la disolución reductiva de óxidos de Fe y la liberación del vanadio asociado. Esas diferencias en la dinámica de liberación de vanadio pueden ocurrir como resultado del impacto directo del EH en la especiación de vanadio en la solución del suelo y los sedimentos del suelo, y/ o debido a los cambios dependientes de EH en el pH del suelo, la química de (Fe)(hydr)óxidos, y la complejación con el carbono orgánico del suelo. La dinámica de liberación de vanadio en los suelos también puede verse afectada positivamente por el pH del suelo y la liberación de compuestos orgánicos aromáticos (Shaheen *et al.*, 2019).

Estudios similares realizados en distritos mineros de zonas semiáridas reportan altas concentraciones de algunos EPT, como el caso del Cerro San Pedro, San Luis Potosí se reportan concentraciones de Pb y As 15 y 32 veces arriba del LMP (González Romero, 2017) establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 donde también estos elementos presentan bajas movilidades por la presencia de calizas en el área, en la microcuenca San Pedro donde se encuentra Tinajillas también se encuentra la contaminación por Pb y Sb encontrando concentraciones de 18 y 42 veces superando el LMP y donde ocurre la atenuación natural por la caliza y feldespatos del área (Hernández Ruiz, 2017), otro sitio minero con características similares es el distrito minero Fresnillo, Zacatecas donde se reportaron altas concentraciones de Pb y As, donde el As reportó altas movilidades suponiendo un riesgo a la calidad de los cuerpos de agua (Mayorga Ávila, 2012), otro ejemplo es Concepción del Oro, Zacatecas donde se reportaron altas concentraciones de As y Pb superando 34.8 y 3 veces el LMP establecido (Ramírez Hernández, 2010); estos ejemplos evidencian la importancia de estudios de caracterización y evaluación de las fuentes de contaminación en sitios mineros, donde residuos mineros no controlados pueden ser transportados por las corrientes de agua o eólicas y afectar los cuerpos de agua y suelos aledaños a estas fuentes.

Conclusiones

A partir de un estudio sistemático que involucró diferentes técnicas de análisis y caracterización, se evaluó el transporte hídrico de EPT en la microcuenca del arroyo La Luz tanto en suelos como en sedimentos y dentro de los resultados obtenidos de la caracterización del área de estudio se obtuvo que la conductividad eléctrica de la zona varían de 343 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 523 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en la fracción donde se encontró el valor más alto de conductividad es en la B (0.240-0.120 mm) perteneciendo a suelos no salinos y registrándose valores más alto de conductividad en la parte alta del arroyo La Luz, de acuerdo con la caracterización mineralógica las fases minerales predominantes son la calcita y cuarzo por lo que en la zona se tienen pH básicos en toda la microcuenca en estudio.

En cuanto a los resultados de las concentraciones totales los elementos de interés en el área de estudio por rebasar el LMP de acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 son el As (87%), Pb(18%), Sb (88%) y el Vanadio (97%), en el caso del As se obtuvieron valores hasta de 195.7 mg/kg y de Sb de 1695 mg/kg estos valores encontrados en la parte alta del cauce principal y en el caso de Pb tenemos concentraciones hasta de 11805.3 mg/kg y del V 1162.7 mg/kg en el área con aporte de residuos, en el caso del V las concentraciones más altas se encuentran en la parte alta de la cuenca y del Pb estas concentraciones se encuentran cerca de los residuos de la Candelaria y Ogarrío, en general las concentraciones más altas encontradas a lo largo de la microcuenca en estudio se encuentra en la parte alta de esta donde se encuentran todos los residuos mineros, en el caso del Sb y V en todas las muestras se rebaso el LMP denotando la contaminación por estos elementos en toda el área en estudio.

De acuerdo con las comparaciones de las concentraciones totales aguas arriba y aguas abajo en el área de los residuos se tiene un incremento de estas en el 86% de los casos de mostrando la influencia de estos en el área, y denotando un mayor aporte en Pb y Sb en la fracción más fina en la presa de Jales y de Pb en el residuo la Candelaria estos resultados evidencian los residuos como fuentes de directas de estos EPT en las corrientes de agua, también es importante mencionar que no se demostró una influencia de los residuos en las concentraciones de As y Sb .

En base con la validación de los resultados obtenidos mediante FRX y ICP-MS se tiene buena correlación en As, Pb y V sin embargo en el caso del Sb la correlación no fue aceptable, pero en los resultados de los porcentajes de recuperación del SMR se tiene una mejor recuperación en la técnica de FRX.

De los resultados de movilidad obtuvimos que de las concentraciones solubles obtenidas solo el caso Sb rebasó el LMP, donde de acuerdo con las concentraciones totales fueron las más altas presentadas, estos resultados indican que una mayor concentración total aumenta la posibilidad de que la fracción soluble sea alta. En cuanto a las concentraciones solubles el Pb son más solubles en puntos específicos de la microcuenca especialmente en el área de los residuos y parte alta del cauce principal, el cuanto al As y el V son más solubles en el área de descarga, aunque son concentraciones solubles que no rebasan el LMP permisible.

En cuanto a la concentración móvil de los EPT mencionados no se obtuvieron valores que rebasaran el LMP y los porcentajes móviles son muy bajos en todos los casos estudiados, en el As tiene el porcentaje móvil más alto debido a que las fases móviles de este elemento predominan en un pH más amplio, el Pb 0.5% es móvil y en el caso de Sb y V es menor al 0.5%. Estos resultados indican que la capacidad que poseen estos elementos en el área de estudio para movilizarse al medio acuoso es muy baja, comportamiento que se ve influenciado por la condición natural del sitio y que también puede deberse a las características de la fuente.

Los residuos mineros abandonados en la zona de estudio son una fuente de contaminación por EPT y son transportados por las corrientes de agua por toda la microcuenca en estudio incrementando los niveles de concentración y su movilidad a la fase acuosa se ve delimitada por la alcalinidad del sitio por ende la preocupación por contaminación por estos elementos es baja, una disminución en el pH del sitio supondría el incremento de la movilidad y otro factor importante que causaría una mayor movilidad sería el incremento en las conductividades eléctricas.

De acuerdo con la hipótesis planteada los residuos mineros si contribuyen en la contaminación de suelos y sedimentos teniendo evidencia clara del aporte de Pb y Sb de la presa de jales y los residuos la Candelaria, en cuanto a las concentraciones solubles no son altas por la naturaleza del sitio.

Recomendaciones

Se requieren estudios complementarios con la finalidad de obtener un conocimiento más amplio del área impactada, a partir de los cuales se logren seleccionar estrategias o tecnologías que estén mejor orientadas a la eliminación de fuentes.

En virtud del conocimiento de la mineralización en el área, se recomienda un estudio para determinar las concentraciones de fondo, y con ello, conocer si las concentraciones detectadas en sedimentos que no presentaron influencia aparente de potenciales fuentes, provienen de estas o su origen se debe a la lixiviación de los minerales presentes de las rocas presentes en el área.

Se sugiere utilizar otra técnica para la validación de los resultados obtenidos de Sb. Se recomienda realizar una extracción secuencial selectiva para determinar la especiación de los metales traza en suelo y sedimentos presentes, para la identificación de óxidos de Fe al ser un factor determinante en la movilidad de algunos EPT.

Se sugiere realizar acciones para controlar las fuentes de contaminación principalmente la presa de jales y los residuos de la Candelaria donde se evidencia su contribución por Pb y Sb.

En climas áridos la influencia eólica es un factor importante en el transporte de sedimentos y EPT, por lo que se recomienda realizar estudios de patrones de viento, para crear un mapa de riesgo a varios kilómetros a la redonda.

Se recomienda tomar muestras de los pozos de abastecimiento de agua encontrados en el área de descarga de la microcuenca o muestras de agua tomadas en la temporada de lluvia.

Referencias

- Alderton, David H.M and Serafimovski, Todor and Burns, Liz and Tasev, Goran (2014) Distribution and mobility of arsenic and antimony at mine sites in FYR Macedonia. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9 (1). pp. 43-56. ISSN Printed: 1842-4090; Online: 1844-489X
- Armendariz, K. K. y Armendariz, K. K. (2017). : The Systematic Destruction and Rewriting of World History at the Hands of ISIS [Electronic Thesis, The University of Arizona]. <http://hdl.handle.net/10150/624119>
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (1995).ASTM designation D 4972-95a. West Conshohocken, PA.: ASTM.
- Atkins, M. B., y Lewis, R. J., 1976. Chemical distribution and gaseous evolution of arsenic-74 added to soils as DMSA-74 Arsenic. *Soil Science Society of America Journal* 40, 655–658 pp.
- ATSDR (Agency for toxic Substances and Disease Registry). (2007). Toxicological Profile for Lead. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta. pp. 582.
- ATSDR (Agency for toxic Substances and Disease Registry). (2007). Toxicological Profile for Arsenic. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta. pp. 559.
- Avalos. (2009). Espectroscopia. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 6(3), 491–495. https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2009.v6.i3.14
- Basile, P Peruzzo, F y Riccardi, G. (2019). Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos. 1ª Ed.. <https://doi.org/10.35305/curiham.v23i0.29>
- Basile, P., Riccardi, G. y Rodríguez, J. (2016). Modelación matemática hidro-morfodinámica a escala de cuenca en ríos con lechos de sedimentos no-uniformes. *Cuadernos del CURIHAM*, 22, 1–25. <https://doi.org/10.35305/curiham.v22i0.24>
- Birch, G., Siaka, M. y Owens, C. (2001). *Water, Air, and Soil Pollution*, 126(1/2), 13–35. <https://doi.org/10.1023/a:1005258123720>
- Bustamante Natalia, Danoucaras Natasha, McIntyre Neil, Díaz-Martínez Juan Carlos, Restrepo-Baena Oscar Jaime (2016) Revisión sobre mejora de la gestión del agua en la minería informal de oro. Disponible en: http://www.scielo.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302016000200016&lang=es
- Candeias,., da Silva, E.F., Salgueiro, A., Pereira, H., Reis, A., Patinha, C., Matos, J. and Ávila, P. (2011), Assessment of soil contamination by potentially toxic elements in the aljustrel mining area in order to implement soil reclamation strategies. *Land Degrad. Dev.*, 22: 565-585. <https://doi.org/10.1002/ldr.1035>
- Carmona-García, Uriel; Cardona-Trujillo, Harold; Restrepo-Tarquino, Inés (2017). Gestión ambiental, sostenibilidad y competitividad minera. Contextualización de la situación y retos de un enfoque a través del análisis del ciclo de vida *Dyna*, vol. 84, núm. 201, junio, 2017, pp. 50-58. Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49650911006>
- Carrillo-Chávez, A., González-Partida, E., Morton-Bermea, O., Hernandez, E., Levresse, G., Soto, P., Tritlla, J. y Camprubi, A. (2006). Heavy Metal Distribution in Rocks, Sediments, Mine Tailings, Leaching Experiments, and Groundwater from the Mineral de Pozos Historical Mining Site, North-Central Mexico. *International Geology Review*, 48(5), 466–478. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.48.5.466>

Cerón-Rivera, Carolina, Martínez-Montoya, Juan F., Olmos-Oropeza, Genaro, Palacio-Núñez, Jorge, & Espinosa-Reyes, Guillermo. (2018). Potentially toxic minerals in environmental liabilities in Noria de Ángeles, Zacatecas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 24(3), 329-337. Epub 19 de febrero de 2021. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.12.067>

Díaz Barriga Yañez Diego. (2020). Identificación y evaluación de pasivos ambientales mineros en real de catorce, San Luis Potosí, México. Pag 8-34.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2007b. Norma Oficial Mexicana NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Publicada el 2 de marzo de 2007. 69 pp.

Dótor Almazán Azucena, Armienta Hernández María Aurora, Cabrera y Oscar Talavera Mendoza Flor Árcega (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972014000300008&lang=es

EPA. (1986). Regional Screening Levels. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Health and Environmental Assessment, Environmental Criteria and Assessment Office. EPA600883028F.

EPA. (1978). Public notification handbook for public drinking water suppliers. Environmental Protection Agency, Office of Drinking Water., Office of Health and Environmental Assessment, Environmental Criteria and Assessment Office. EPA600883028F.

EPA. (1986).. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Health and Environmental Assessment, Environmental Criteria and Assessment Office. EPA600883028F.

Espinosa, E., Armienta, M. A., Cruz, O., Aguayo, A. y Cenicerros, N. (2009). Geochemical distribution of arsenic, cadmium, lead and zinc in river sediments affected by tailings in Zimapán, a historical polymetallic mining zone of México. *Environmental Geology*, 58(7). <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1649-6>

ESRI (Environmental Systems Research Institute). (2003). ArcGIS9. Using ArGIS geostatistical Analyst. United States of America. 300 pp.

ESRI (Environmental Systems Research Institute). (2002). ArcGis 3D Analyst. Three-Dimensional Visualization, Topographic Analysis and Surface Creation. United States of America. 12 pp.

Fernando Miranda José, Rodrigues Figueiredo Janine, Adilson Curi, Alameda Hernandez Pedro (2017) La gestión participativa de los recursos hídricos en el sector minero. *Revista de Medio Ambiente y Minería* versión impresa ISSN 2519-5352 http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522017000200002&lang=es

García, E. (2004). Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Quinta edición. Instituto de Geografía-UNAM. México. 91 pp.

García-Giménez, R., Jiménez-Ballesta, R. (2017). Mine tailings influencing soil contamination by potentially toxic elements. *Environ Earth Sci* **76**, 51 <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6376-9>

- García-Lorenzo, M. L., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., Molina-Ruiz, J. y Tudela, M. L. (2011). Spatial distribution and sources of trace elements in sediments affected by old mining activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(11), 7041–7052. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2478-8>
- Garrels R. M., Thompson M. E., (1960). Oxidation of pyrite by iron sulfate solutions. *Am. J. Sci*, 258, 57-67.
- Garrels R. M., Thompson M. E., (1962). A chemical model for sea water at 25 degrees C and one atmosphere total pressure. *American Journal of Science*, 260(1), 57-66.
- Gómez, A. 1996. Abanicos Aluviales: Aportación teórica a sus aspectos más significativos. Cuaternario y Geomorfología. León, Guanajuato. México. 10 (3-4), 77-124 pp.
- González Romero Brenda Mariela. (2017). Evaluación de la distribución y movilidad de plomo y arsénico en suelo del abanico aluvial de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí. Pag 14-16.
- González-Flores, E., Tornero, M. A., Ángeles-Cruz, Y. y Bonilla, N. (2009). Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 25, 15-22 pp.
- Herath, I., Vithanage, M. y Bundschuh, J. (2017). Antimony as a global dilemma: Geochemistry, mobility, fate and transport. *Environmental Pollution*, 223, 545–559. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.057>
- Hernández Ruíz Susana Guadalupe. (2017). Estudio del transporte hídrico de plomo y arsénico en microcuencas del distrito minero Cerro de San Pedro, San Luis Potosí, México, Pag 17-18.
- INAFED. (2005). Enciclopedia de los municipios. Retrieved from <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM24sanluispotosi/municipios/24006a.html>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (1972). Carta uso de suelo San Luis Potosí F14-A24, escala 1:50,000: México. D.F., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (2002). Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí. Primera edición. México. 136 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (2013). Carta edafológica San Luis Potosí F14-A44, escala 1:50,000: México. D.F., Secretaría de la Presidencia, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (2013). Carta geológica San Luis Potosí F14-A24, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de la Presidencia, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (1979). Carta uso de suelo San Luis Potosí F14-A24, escala 1:50,000: México. D.F., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (2002). Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí. Primera edición. México. 136 pp.
- Iriondo, M. H. (2007). Cap 8. Procesos Aluviales. En: *Introducción a la Geología*. Editorial Brujas. 3era Edición. Córdoba, Argentina. 91-110 pp.
- Iriondo, A. (2007). ZIRCON GEOCHRONOLOGY AND HF ISOTOPES OF PALEO AND MESOPROTEROZOIC GRANITIC DRILL CORE SAMPLES FROM CHIHUAHUA: NEW CONTRIBUTION TO UNDERSTAND THE DISTRIBUTION OF BASEMENT PROVINCES ALONG THE SSW MARGIN OF LAURENTIA. En *GSA Annual Meeting in Phoenix, Arizona, USA - 2019*. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/abs/2019am-341014>

Jambor, J.L., Blowes, D.W., and Ptacek, C.J. (2000) Mineralogy of mine wastes and strategies for remediation. In D.J. Vaughan, and R.A. Wogelius, Eds. Environmental Mineralogy. Eötvös University Press, Budapest.

José E. Santos-Jallath, Jhonnatan Coria-Camarillo, José de Jesús Huezco-Casillas, Geovanni Rodríguez-Cruz (2013) Influencia de jales mineros sobre el río y evaluación del proceso de atenuación natural por dispersión disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222013000300015&lang=es

Kabala, C., y Singh, R. (2001). Fractionation and Mobility of Copper, Lead, and Zinc in Soil Profiles in the Vicinity of a Copper Smelter. Institute of Soil Science. 485-492 pp.

Kabala, C., y Singh, R. (2001). Fractionation and Mobility of Copper, Lead, and Zinc in Soil Profiles in the Vicinity of a Copper Smelter. Institute of Soil Science. 485-492 pp.

Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Edition. CRC Press. United States of America. 505 pp.

Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Edition. CRC Press. United States of America. 505 pp.

Kralik, M. (1999). A rapid procedure for environmental sampling and evaluation of polluted sediments. Applied Geochemistry, 14(6), 807–816. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(98\)00096-1](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(98)00096-1)

Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. y Aranda-Gómez, J.J., (1982). Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico no. 85, 208 pp.

Leonardo Guiza Suarez, (2011). Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia. (Opinión Jurídica, edición especial, pp. 123-140 - ISSN 1692-2530 Julio-Diciembre de 2011 / 166 p. Medellín, Colombia) Disponible en: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/opinion/article/view/738/680>

Lombard, M., de Bruin, D. y Elsenbroek, J. H. (1999). High-density regional geochemical mapping of soils and stream sediments in South Africa. Journal of Geochemical Exploration, 66(1-2), 145–149. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(99\)00032-1](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(99)00032-1)

Lottermoser, B. G. (2010). Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Mariussen, E., Johnsen, I. V. y Strømseng, A. E. (2017). Distribution and mobility of lead (Pb), copper (Cu), zinc (Zn), and antimony (Sb) from ammunition residues on shooting ranges for small arms located on mires. Environmental Science and Pollution Research, 24(11), 10182–10196. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8647-8>

Mayorga Ávila Rubi Estrella. (2010). Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados en el distrito minero Fresnillo (Zacatecas, México) pag 25-21.

Montejano, A. R. (1993). El Real de Minas de la Purísima Concepción de los Catorce. San Luis Potosí.

Mukhopadhyay, B., Bastias, L., and Mukhopadhyay, A. (2007) Limestone drain design parameters for acid rock drainage mitigation. Mine Water and the Environment, 26, 29-45.

Navarro. (2009). Mössbauer and infrared spectroscopy as a diagnostic tool for the characterization of ferric tannates. En ISIAMÉ 2008 (pp. 563–569). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01370-6_74

NIOSH. (1998). Method 7702: lead by field portable XRF. Retrieved from <http://www.caslab.com/Test-Method-7702>

Nordstrom, D. K., Alpers, C. N., Ptacek, C. J., and Blowes, D. W. (2000). Negative pH and extremely acidic mine waters from Iron Mountain, California. *Environmental Science and Technology*, 34(2), 254-258.

Nordstrom, D. K., Blowes, D. W., and Ptacek, C. J., (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16.

Nordstrom, D.K., and Alpers, C.N. (1999) Geochemistry of acid mine waters. In G.S. Plumlee, and M.J. Logsdon, Eds. *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*, 6A, p. 133-160. Society of Economic Geologists, Littleton. Nordstrom, D.K., and Southam, G. (1997) Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. In J.F. Banfield, and K.H. Nealson, Eds. *Geomicrobiology: Interactions between microbes and minerals*. M/

Oparin, V. N., Potapov, V. P., Giniyatullina, O. L., & Shchastlivtsev, E. L. (2013). Studies into the Oyarzun, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H. y Higuera, P. (2007). Mineral deposits and Cu–Zn–As dispersion–contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. *Environmental Geology*, 53(2), 283–294. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0643-8>

Palacio-Tobón Carlos Alberto , Vieira-Agudelo Sara Cristina , Saldarriaga-Molina Julio Cesar , (2019) Modelación de metales pesados en corrientes Disponible en : http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302019000300019&lang=es

Paulo Vitor Siffert, Patrícia Generoso, Liliane de Oliveira Guimarães, Paula Pessoa de Castro Gentil (2019) Organizational irresponsibilities or absence of territorial governance? reflections on environmental management in the minas-rio project. *Ambiente & Sociedades* Print version ISSN 1414-753X On-line version ISSN 1809-4422, Ambient. soc. vol.22 São Paulo 2019 Epub Aug 26, 2019. Available: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2019000100309&lang=es

Pérez O, Margarita M.; Betancur V, Angie (2016) Impactos ocasionados por el desarrollo de la actividad minera al entorno natural y situación actual de Colombia *Sociedad y Ambiente*, núm. 10, marzo-junio, 2016, pp. 95-112 El Colegio de la Frontera Sur Campeche, México Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455746534005>

Pérez, J. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos-Aplicaciones en Geología*. Buenos Aires, Argentina.

Petersen, M.A., Libera, M.D., Jannas, R.R. y Maynard, S.R. (2001). *Geology of the San Pedro Porphyry-Related Gold-Silver Deposits*, San Luis Potosí, México. *Society of Economic Geologist*. 8: 217-241 pp.

Piña Leyte-Vidal Juan J., Est Lázaro Adrián González-Fernández, Lic Onibag Gutiérrez-Artiles, MSc Lázaro Márquez-Llauger , Lic Tania Alfonso Del Cristo (2019) Caracterización de tres bioindicadores de contaminación por metales pesados. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302019000300019&lang=es

Plumlee Williams (1999). *Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*. Pacific Section Society of Economic.

Ramírez Hernández Virginia. (2010). Caracterización ambiental y análisis de riesgos para la salud en un sitio minero-metalúrgico. caso de estudio: Concepción del Oro, Zacatecas, México.

Rodríguez, L. (2012). Minería. Retrieved from: <https://www.importancia.org/?s=Miner%C3%ADa>

- Rogers, M. (2020). *Exploremos Las Rocas Igneas (Exploring Igneous Rocks)*. Rosen Publishing Group.
- Romero. (2011). The Coal Industry: Past or Future of Energy Production in Spain? *European State Aid Law Quarterly*, 10(3), 565–574. <https://doi.org/10.21552/estal/2011/3/247>
- Russi, D., & Martínez, J. (2002). Los pasivos ambientales. Íconos. *Revista de Ciencias Sociales*, 123-
- Salazar, G. (2000). Cap. I El Sistema: Real de Minas, Centro Agropecuario, Energético y de Servicios. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. En: *Las haciendas en el siglo XVII en la región minera de San Luis Potosí*. San Luis Potosí, S.L.P., México. 37-71 pp.
- Salazar, G. G. (2000). *Las haciendas en el siglo XVII en la región minera de San Luis Potosí*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Salomons, W. (1995). Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration*, 5-23.
- Sánchez, W., Mohsin, M., y Imery, J. (2007). Efecto comparativo de la calcita y conchas de moluscos marinos sobre algunas propiedades químicas de dos ultisoles del estado de Monagas. *Saber*, Universidad de Oriente, Venezuela. Vol. 19 N°1:14-20.
- SEMARNAT.(2004). NOM-147-SEMARNAT-2004. Retrieved from https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-
- Sepulveda, F. (2011). Chapter 7 An Overview of BMIs. En *International Review of Neurobiology* (pp. 93–106). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/s0074-7742\(09\)86007-8](https://doi.org/10.1016/s0074-7742(09)86007-8)
- SGM. (2009). *Inventario físico de los recursos minerales del municipio Catorce, S.L.P. Catorce: Servicio Geológico Mexicano, Gobierno del Estado de San Luis Potosí, Secretaría de Desarrollo Económico.*
- Shaheen, S. M., Alessi, D. S., Tack, F. M. G., Ok, Y. S., Kim, K.-H., Gustafsson, J. P., Sparks, D. L. y Rinklebe, J. (2019). Redox chemistry of vanadium in soils and sediments: Interactions with colloidal materials, mobilization, speciation, and relevant environmental implications- A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 265, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.01.002>
- Siegel, R. F. (2002). *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*. Springer. Germany. 218 pp.
- Siegel, R. F. (2002). *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*. Springer. Germany. 218 pp.
- Silva Ontiveros, Leticia Odeth, & Sánchez Salazar, María Teresa. (2021). Cierre de minas y abandono de sitios mineros en México: ¿un proceso “normal”? Referencias al norte de México. *Investigaciones geográficas*, (106), e60426. Epub 06 de junio de 2022. <https://doi.org/10.14350/rig.60426>
- Silva Ontiveros, L. O. y Sánchez Salazar, M. T. (2021). Cierre de minas y abandono de sitios mineros en México: ¿un proceso “normal”? Referencias al norte de México. *Investigaciones Geográficas*, (106). <https://doi.org/10.14350/rig.60426>
- Simón, M., Ortiz, I., García, I., Fernández, E., Fernández, J., Dorronsoro, C. y Aguilar, J. (1999). Pollution of soil by the toxic spill of a pyrite mine. *Aznalcóllar, España. Sci Total Environ*. 242: 105- 115 pp.
- Smedley, P.L. y Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*. 17:517-568 pp.

- Smedley, P.L. y Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*. 17:517-568 pp.
- Smith, E., Naidu, R. y Alston, A.M. (1998). Arsenic in the soil environment: A review. *Adv. Agron.* 64:149–195.
- Smith, E., Naidu, R. y Alston, A.M. (1998). Arsenic in the soil environment: A review. *Adv. Agron.* 64:149–195.
- Smith, K. S. y Huyck, L. O. (1999). Chapter 2. An Overview of the Abundance, relative Mobility, Bioavailability, and Human Toxicity of Metals. *Rev Econ. Geol.* 6A:29-70 pp.
- Smith, K. S. y Huyck, L. O. (1999). Chapter 2. An Overview of the Abundance, relative Mobility, Bioavailability, and Human Toxicity of Metals. *Rev Econ. Geol.* 6A:29-70 pp.
- Smith, K. S., & Huyck, H. L. O. (1999). An Overview of the Abundance, Relative Mobility, Bioavailability, and Human Toxicity of Metals. *Reviews in Economic Geology*, 6, 29–70.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2016). Normales Meteorológicas 1981-2010. Estación 00024155 Escuela de Agronomía. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=slp>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2016). Normales Meteorológicas 1981-2010. Estación 00024081 San Jose Coronado. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=slp>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2016). Normales Meteorológicas 1981-2010. Estación 0002081 Vanegas. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=slp>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2016). Normales Meteorológicas 1981-2010. Estación 00025081 Normal del Desierto. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=slp>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2016). Carta geológica mexicana F14A24, Escala 1;50000. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion->
- Tristán-González, M. (2008). Evolución Tectono-volcánica durante el Paleógeno en la Porción sur- Oriental de la Mesa Central. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 207pp.
- Tristán-González, M., Labarthe-Hernández, G., Torres-Hernández, J.R. y Aguirre-Díaz, G., (2008). Post-laramidic and pre-Basin and Range deformation and its implication in the Oligocenic volcanism in the eastern part of Mesa Central, Mexico: Tectonophysics (en arbitraje).
- Tristán-González, M., Torres-Hernández, J.R. y Labarthe-Hernández, G. (2002). Carta Geológica Minera y Geoquímica, Carta San Luis Potosí. Esc.1:50,000. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Consejo de Recursos Minerales e Instituto de Geología de la U.A.S.L.P.
- Universidad de Burgos. (2020),, fundamento ICP-MS, disponible en: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp>
ms#:~:text=Se%20basa%20en%20el%20acoplamiento.iones%20(espectr%C3%B3metro%20de%20masas).&text=Cada%20una%20de%20las%20masas,su%20abundancia%20en%20la%20muestra.
- Volke-Sepulveda, T. (2015). Tolerance, arsenic uptake, and oxidative. *International Journal of Phytoremediation*, 18(7), 671–678. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1118432>
- Zarate del Valle, P. F. (1982). Geología y análisis metalogenético de la Sierra de Catorce, S.L.P. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 43(1), 1–21. <https://doi.org/10.18268/bsgm1982v43n1a1>

Ziemkiewicz, P.F., Skousen, J.G., Brandt, D.L., Sterner, P.L., and Lovett, R.J. (1997) Acid mine drainage treatment with armored limestone in open limestone channels. *Journal of Environmental Quality*, 26, 1017-1024.

Zuñiga, L. L. (1999). Modelagem e simulação do processo de destilação molecular e determinação experimental aplicado a resíduos pesados de petróleo [PublishedVersion, [s.n.]]. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/267114>

Anexos

Inventario de muestras cauce principal y área de descarga

Cauce Principal				Área de Descarga			
ID	X	Y	Tipo	ID	X	Y	Tipo
22	311692	2620570	Sedimento	F24	314183	2640803	Suelo
21	311627	2620883	Sedimento	F23	314291	2640815	Suelo
20	312035	2621922	Sedimento	F22	314456	2640811	Suelo
19.5	312133	2622987	Sedimento	F21	314545	2640787	Suelo
19	312388	2623487	Sedimento	F20	314659	2640806	Suelo
18	312160	2624413	Sedimento	F19	314659	2640523	Suelo
17	312316	2625402	Sedimento	F18	314550	2640518	Suelo
16	312120	2626298	Sedimento	F17	314432	2640543	Suelo
15	311777	2627198	Sedimento	F16	314309	2640543	Suelo
14	311897	2628260	Sedimento	F15	314186	2640560	Suelo
13	312387	2629258	Sedimento	F14	314200	2640277	Suelo
12	312433	2630061	Sedimento	F13	314313	2640275	Suelo
11	312066	2631122	Sedimento	F12	314410	2640282	Suelo
10	312145	2631938	Sedimento	F11	314531	2640273	Suelo
9	312272	2632745	Sedimento	F10	314661	2640265	Suelo
8	312374	2633555	Sedimento	F9	314654	2640012	Suelo
7	312559	2634394	Sedimento	F8	314640	2640019	Suelo
6	312597	2635330	Sedimento	F7	314402	2640039	Suelo
5	312822	2636170	Sedimento	F6	314293	2640022	Suelo
4	313189	2636972	Sedimento	F5	314193	2640024	Suelo
3	313576	2637042	Sedimento	F4	314306	2639778	Suelo
2	313826	2638309	Sedimento	F3	314413	2639766	Suelo
F01	314140	2638885	Sedimento	F2	314511	2639754	Suelo
Final 1	314395	2639447	Sedimento	F1	314407	2639549	Suelo

Área de Residuos			
ID	X	Y	Tipo
R16	312019	2625529	Sedimento
R15	311471	2624640	Sedimento
R14	310747	2623721	Sedimento
R13	312053	2622514	Sedimento
R12	310471	2622781	Sedimento
R11	310076	2622522	Sedimento
R10	310569	2621435	Sedimento
R9	311327	2621512	Sedimento
R8	310283	2621275	Sedimento
R7	310489	2620935	Sedimento
R6	309777	2621939	Sedimento
R5	309727	2621798	Sedimento
R3	311829	2622959	Sedimento
R2	311248	2622470	Sedimento
R1	310820	2621765	Sedimento

Parámetros fisicoquímicos y peso de las muestras

Cauce Principal						
ID		W	%	CE	pH	T °C
22	A	1744.04	87.6	437	7.94	25.8
	B	108.51	5.4	654	7.66	25.8
	C	14.62	0.1			
	D	124.78	6.3	1391	7.5	25.7
21	A	863.46	86.5	231	7.97	26.1
	B	73.1	7.3	335	7.68	26
	C	7.76	0.1			
	D	53.62	5.4	663	7.51	26.1
20	A	1876.71	94.0	246	7.74	26.1
	B	91.26	4.6	307	7.79	26
	C	8.34	0.1			
	D	21.06	1.1	496	7.55	25.7
19.5	A	617.55	62.0	192	8.03	26.2
	B	170.73	17.2	356	7.73	26.1
	C	32.58	0.2			
	D	174.44	17.5	274	7.69	26.2
19	A	724.27	72.5	199	7.95	26.2
	B	135.22	13.5	246	7.83	26.2
	C	20.39	0.1			
	D	118.58	11.9	357	7.64	26.1
18	A	761.01	76.5	256	7.85	26
	B	149.78	15.1	404	7.71	26.1
	C	16.43	0.1			
	D	67.22	6.8	705	7.54	26
17	A	625.77	62.9	193	8.03	26.2
	B	179.31	18.0	282	7.7	26.1
	C	28.03	0.2			
	D	162.34	16.3	399	7.54	26.1
16	A	727.87	72.9	222	7.98	25.9
	B	150.74	15.1	275	7.7	25.9
	C	18.02	0.1			
	D	101.4	10.2	463	7.44	25.9
15	A	642.52	64.4	159	8	26.2
	B	198.99	19.9	213	7.83	26.3
	C	22.97	0.2			
	D	133.13	13.3	279	7.27	26.4
14	A	527.09	52.9	217	7.97	25.1
	B	239.47	24.0	362	7.64	25.1

	C	27.54	0.2			
	D	203.08	20.4	521	7.54	25.1
13	A	758.54	75.0	227	7.96	25.2
	B	104.85	10.4	419	7.62	25.1
	C	13.93	0.1			
	D	134.69	13.3	865	7.44	25.4
12	A	647.53	64.7	301	7.94	25.6
	B	153.7	15.4	432	7.59	25.5
	C	21.68	0.2			
	D	178.17	17.8	848	7.48	25.3
11	A	721.56	72.2	249	7.82	25.4
	B	179.9	18.0	271	7.71	25.4
	C	21.57	0.2			
	D	76.75	7.7	625	7.43	25.3
10	A	797.15	79.8	259	7.74	25.7
	B	121.75	12.2	202	7.77	25.6
	C	13.48	0.1			
	D	66.27	6.6	445	7.57	25.6
9	A	815.17	81.6	156	7.96	25.7
	B	115.08	11.5	245	7.81	25.9
	C	11.27	0.1			
	D	57.77	5.8	486	7.42	25.8
8	A	831.29	83.2	353	7.54	28.1
	B	114.12	11.4	256	7.62	28.1
	C	9.92	0.1			
	D	43.99	4.4	489	7.43	28.1
7	A	890.12	86.4	155	7.79	27.5
	B	88.36	8.6	247	7.63	27.4
	C	9.51	0.1			
	D	42.71	4.1	624	7.36	27.4
6	A	740.46	73.8	121	7.94	27.3
	B	82.47	8.2	293	7.55	27.1
	C	16.87	0.2			
	D	163.06	16.3	370	7.47	26.9
5	A	891.15	88.4	162	7.99	26.9
	B	66.16	6.6	335	7.62	26.8
	C	8.37	0.1			
	D	42.14	4.2	611	7.38	26.8
4	A	687.32	68.4	313	7.35	26.7
	B	106.77	10.6	327	7.47	26.5
	C	16.31	0.3			

	D	194.56	19.4	494	7.36	26.4
3	A	914.21	91.0	290	7.71	26.4
	B	64.87	6.5	411	7.44	26.3
	C	3.8	0.1			
	D	21.97	2.2	1027	7.04	25.9
2	A	823.69	82.7	448	7.92	24.7
	B	53.3	5.4	563	7.63	24.8
	C	8.45	0.3			
	D	110.57	11.1	901	7.62	24.7
F01	A	803.6	80.0	236	8.27	24.8
	B	96.43	9.6	586	7.91	24.8
	C	11.02	0.5			
	D	94.03	9.4	1109	7.58	24.7
Final 1	A	665.1	65.9	365	7.67	24.8
	B	118.87	11.8	385	7.63	24.8
	C	17.58	1.7			
	D	207.06	20.5	530	7.34	24.6

ÁREA DE DESCARGA						
ID		W	%	CE	pH	T °C
F24	A	646.49	64.8	370	7.63	25.1
	B	180.09	18.0	335	7.65	25.1
	C	21.3	2.1			
	D	150.23	15.1	326	7.71	24.7
F23	A	509.81	52.3	297	7.73	24.5
	B	247.53	25.4	246	7.71	24.7
	C	25.01	2.6			
	D	192.4	19.7	268	7.7	24.6
F22	A	475.54	47.5	319	7.56	24.5
	B	92.15	9.2	322	7.54	24.6
	C	14.84	1.5			
	D	418.38	41.8	273	7.61	24.5
F21	A	469.98	47.0	721	7.67	24.7
	B	182.49	18.2	679	7.62	24.6
	C	19.63	2.0			
	D	328.1	32.8	558	7.49	24.9
F20	A	196.04	19.7	253	7.71	24.8
	B	148.1	14.9	241	7.75	24.9
	C	18.13	1.8			
	D	634.83	63.7	243	7.78	24.7
F19	A	392.38	52.9	395	7.61	24.9

	B	99	13.3	375	7.58	25.2
	C	12.76	1.7			
	D	238.01	32.1	336	7.59	24.9
F18	A	139.52	18.8	298	7.56	24.8
	B	100.14	13.5	243	7.64	24.7
	C	16.43	2.2			
	D	487.66	65.6	243	7.72	24.6
F17	A	256.71	34.6	358	7.59	24.5
	B	93.35	12.6	306	7.62	24.8
	C	8.7	1.2			
	D	383.27	51.7	288	7.52	24.9
F16	A	319.69	43.1	388	7.45	25.1
	B	162.91	22.0	256	7.58	25.1
	C	20.24	2.7			
	D	238.38	32.2	340	7.51	24.9
F15	A	380.86	51.6	370	7.56	25
	B	191.6	26.0	363	7.37	25.2
	C	23.58	3.2			
	D	142.28	19.3	348	7.39	25.1
F14	A	351.71	48.3	415	7.58	25.2
	B	235.38	32.3	414	7.62	25.1
	C	16.63	2.3			
	D	124.79	17.1	410	7.73	24.8
F13	A	455.52	60.7	354	7.84	25.5
	B	176.22	23.5	331	7.88	25.8
	C	14.36	1.9			
	D	104.5	13.9	323	7.74	25.3
F12	A	341.32	45.7	1417	7.49	25.6
	B	119.72	16.0	1309	7.58	25.2
	C	14.04	1.9			
	D	271.86	36.4	992	7.58	25.1
F11	A	128.26	17.2	386	7.71	25.7
	B	190.22	25.6	272	7.84	25.6
	C	17.42	2.3			
	D	407.99	54.8	261	7.85	25.4
F10	A	233	31.5	348	7.79	25.8
	B	227.6	30.8	267	7.86	25.3
	C	16.63	2.3			
	D	261.48	35.4	276	7.78	25.4
F9	A	198.15	26.5	356	7.57	25.6
	B	79.91	10.7	242	7.73	25.4

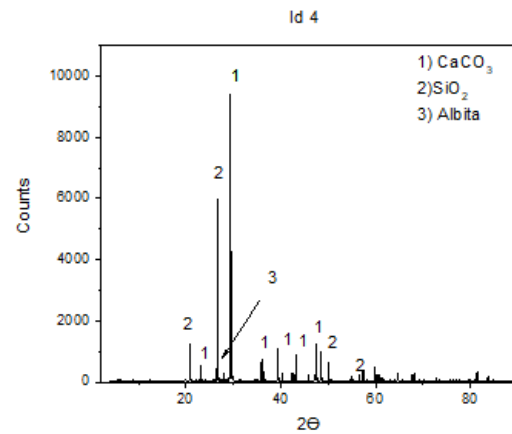
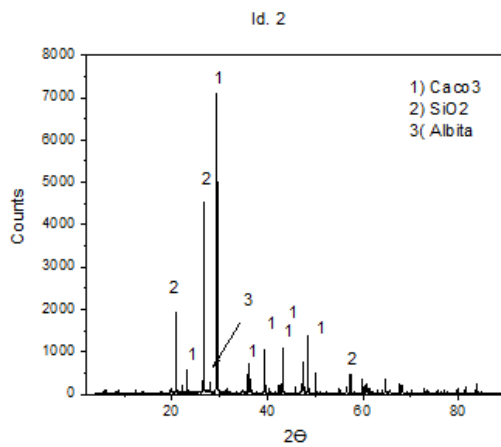
	C	14.72	2.0			
	D	454.75	60.8	288	7.64	25.4
F8	A	252.11	33.6	358	7.65	25.3
	B	59.02	7.9	307	7.74	25.2
	C	7.29	1.0			
	D	431.58	57.5	285	7.69	25.3
F7	A	124.22	16.6	357	7.53	25.3
	B	48.66	6.5	311	7.64	24.8
	C	9.59	1.3			
	D	565.58	75.6	278	7.66	25.2
F6	A	340.67	45.7	419	7.58	25.3
	B	101.44	13.6	336	7.68	25.3
	C	14.14	1.9			
	D	289.52	38.8	377	7.57	25.3
F5	A	350.5	47.0	270	7.76	24.9
	B	155.77	20.9	261	7.78	24.8
	C	18.57	2.5			
	D	220.27	29.6	399	7.76	24.8
F4	A	73.65	9.8	270	7.54	24.6
	B	138.92	18.5	253	7.77	24.6
	C	34.06	4.5			
	D	505.96	67.2	213	7.67	24.6
F3	A	119.83	16.1	662	7.32	24.6
	B	146.45	19.7	394	7.65	24.5
	C	29.62	4.0			
	D	447.86	60.2	317	7.6	24.5
F2	A	99.97	13.3	310	7.66	24.5
	B	102.64	13.6	241	7.77	24.5
	C	19.91	2.6			
	D	530.14	70.4	249	7.68	24.8
F1	A	289.56	38.8	190	7.94	24.9
	B	194.45	26.0	223	7.92	25.3
	C	23.23	3.1			
	D	239.47	32.1	288	7.62	24.9

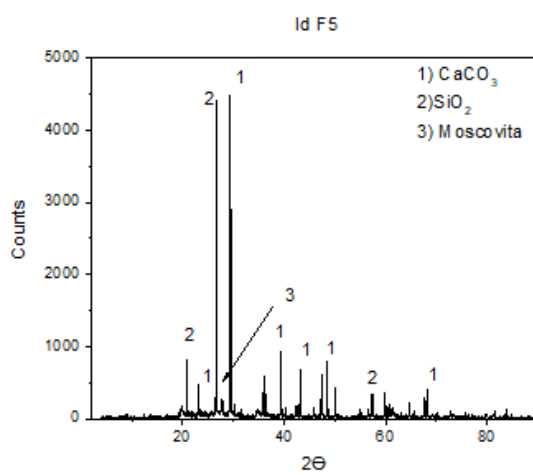
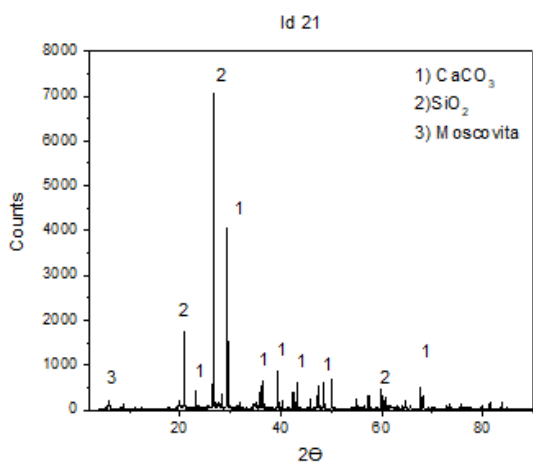
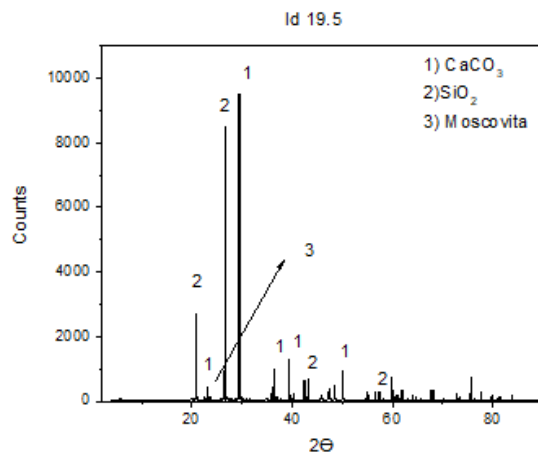
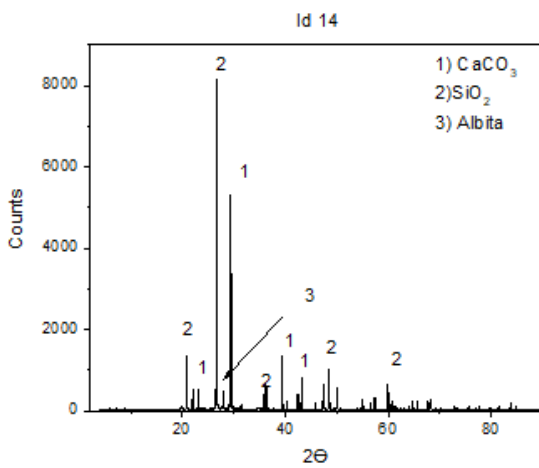
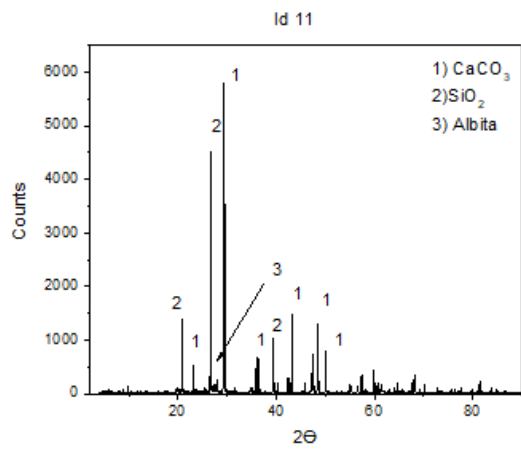
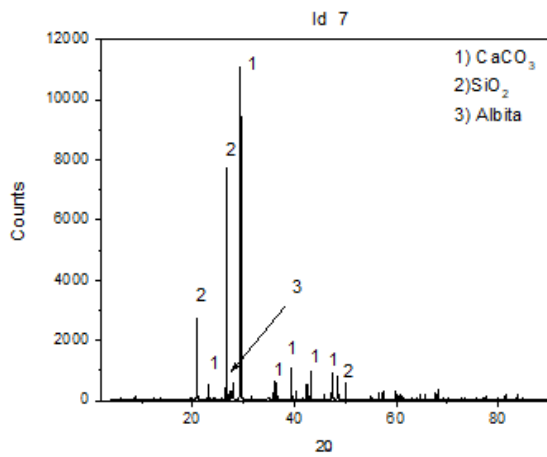
Área de residuos						
ID		W	%	CE	pH	T °C
R16	A	510.82	51.3	449	7.55	25.7
	B	200.71	20.1	427	7.44	25.7
	C	27.94	2.8			
	D	256.69	25.8	571	7.46	25.7

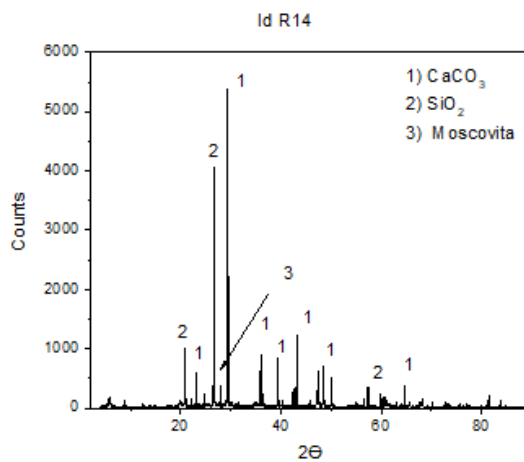
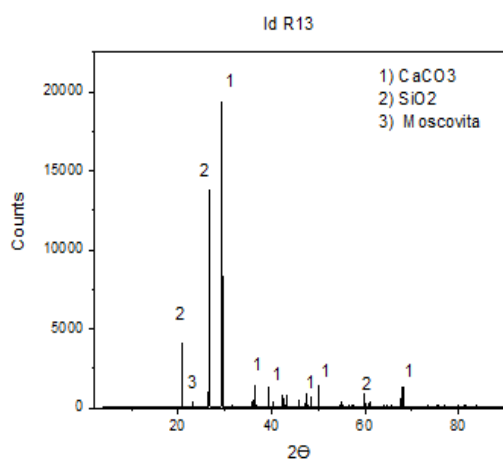
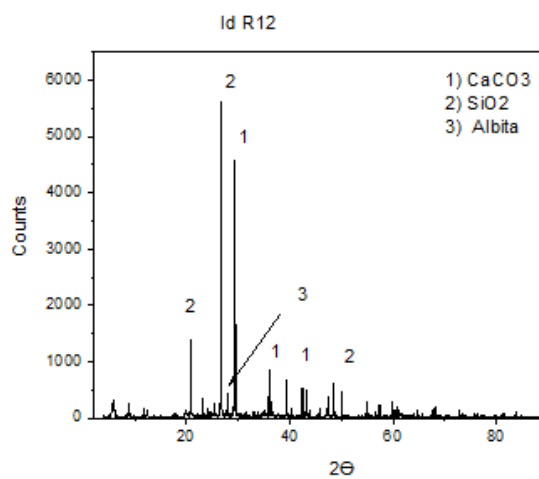
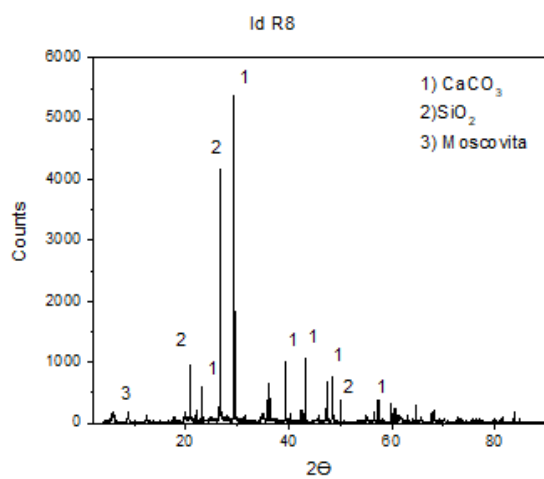
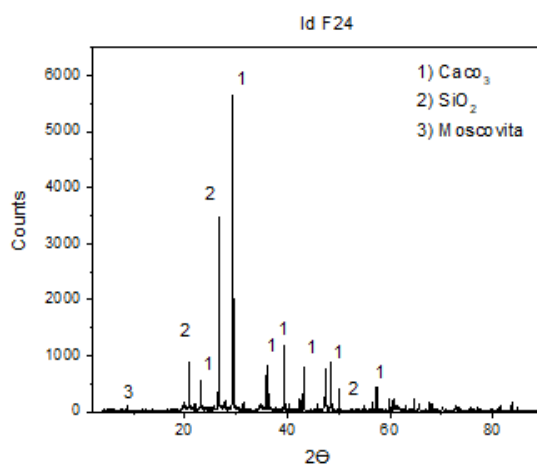
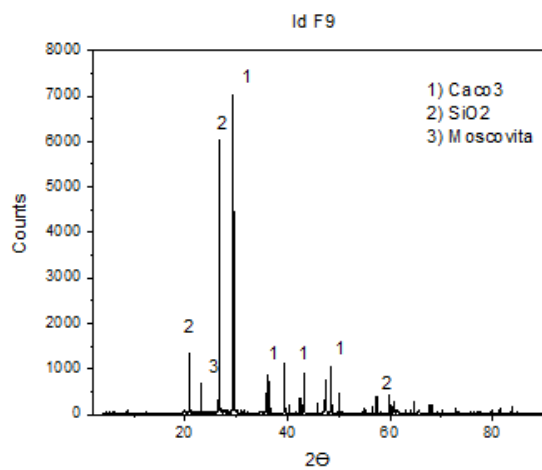
R15	A	810.96	81.3	192	7.95	25.8
	B	106.92	10.7	309	7.64	25.8
	C	11.5	1.2			
	D	68.3	6.8	416	7.56	25.8
R14	A	743.48	74.5	199	7.91	25.8
	B	141.77	14.2	258	7.72	25.7
	C	15.48	1.6			
	D	96.97	9.7	315	7.6	25.7
R13	A	277.19	27.9	161	7.96	25.5
	B	378.83	38.1	122	8.12	25.7
	C	37.72	3.8			
	D	300.71	30.2	153	7.92	25.6
R12	A	750.78	75.2	1559	7.5	25.5
	B	111.83	11.2	1702	7.43	25.7
	C	15.07	1.5			
	D	121.36	12.1	1598	7.26	25.7
R11	A	809.46	81.2	457	7.68	25.8
	B	110.46	11.1	559	7.78	25.8
	C	12.15	1.2			
	D	65.3	6.5	1299	7.13	25.9
R10	A	908.84	89.8	103	8.07	24.2
	B	76.23	7.5	202	7.85	24.2
	C	6.8	0.7			
	D	20.14	2.0	330	7.74	24.2
R9	A	774.66	77.4	325	7.44	24.2
	B	109.71	11.0	393	7.51	24.2
	C	14.7	1.5			
	D	102.39	10.2	401	7.47	24.2
R8	A	861.83	85.7	243	7.91	24.4
	B	60.93	6.1	517	7.55	24.4
	C	8.03	0.8			
	D	74.43	7.4	817	7.47	24.4
R7	A	699.43	69.7	674	7.29	24.3
	B	151.18	15.1	483	7.69	24.4
	C	19.33	1.9			
	D	133.1	13.3	659	7.6	24.3
R6	A	791.77	79.6	609	7.38	24
	B	91.46	9.2	953	7.31	24.1
	C	10.51	1.1			
	D	100.85	10.1	1583	7.23	24.3
R5	A	679.96	68.2	382	7.35	24.2

	B	145.36	14.6	379	7.39	24.2
	C	20.3	2.0			
	D	150.69	15.1	383	7.34	24.1
R3	A	730.09	73.3	143	7.97	24.2
	B	133.8	13.4	262	7.63	24.3
	C	15.97	1.6			
	D	116.63	11.7	424	7.58	24.5
R2	A	800.14	80.4	179	7.87	24.5
	B	115.8	11.6	309	7.59	24.3
	C	11.08	1.1			
	D	68.15	6.8	496	7.38	24.2
R1	A	864.98	86.9	107	7.99	24.3
	B	92.08	9.2	228	7.44	24.4
	C	7.93	0.8			
	D	30.59	3.1	351	6.96	24.6

Difractogramas







Estudio de Sedimentos de arroyo cauce principal y tributarios en la Microcuenca la Luz

Muestra	Asociado principalmente a:	2	4	7	11	14	19.5	21	F5	F9	F24	R2	R8	R12	R13	R14	Presencia	Familia de minerales
Rocas sedimentarias		Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	Calcita	15	Carbonato
		Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	15	
Rocas ígneas		Albita-Ca	Albita	Albita	Albita-Ca	Albita			Albita-Ca		Albita-Ca			Albita	Albita	Albita	10	
		Microclina	Microclina	Microclina													3	
		Diopsido-Fe	Diopsido-Fe					Diopsido-Fe									3	
		Cristobalita				Cristobalita							Cristobalita				3	
		Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	Muscovita	15	Silicatos
Minerales					Cincofuro												1	
								Enstatita-Fe									1	
			Orthoclasa	Orthoclasa	Orthoclasa			Orthoclasa	Orthoclasa			Orthoclasa					6	
Rocas ígneas y/o intemperismo		Caolín										Caolín	Caolín	Caolín		Caolín	5	
		Monmorillonita						Monmorillonita					Monmorillonita	Monmorillonita		Monmorillonita	5	
Evaporitas o DAM														Yeso			1	Sulfatos
Mineralización o ¿DAM?																Censita	1	Carbonato