



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**Determinación de la dispersión geoquímica de Pb en
sedimentos de afluentes del área de incidencia del proyecto
minero Loma Larga**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Nombre del Autor:

ANGEL ROBERTO PERALTA VANEGAS

Nombre del Director:

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA - ECUADOR

2018

DEDICATORIA

Este trabajo de grado quiero dedicar a la amistad, al cariño y principalmente al AMOR que este último año he tenido la oportunidad de vivirlo y que simplemente puedo resumirlas en una persona. Ya que no todos los días se tiene la oportunidad de poder compartir tantos buenos momentos y sentir una conexión tan grande con una persona, por eso también agradezco a la vida poder haberte conocido Elisa. Todo este trabajo es sinónimo de fortaleza e inspiración que todos los días me aportas.

AGRADECIMIENTOS

Es un placer agradecer; en primer lugar, a mis padres por el trabajo incansable de sacar adelante a una familia pequeña pero con muchas ganas de aprender, por apoyarme cien por ciento en mis decisiones y por estar presente durante toda esta etapa importante de mi educación. En segundo lugar, al Ingeniero Fernando Valencia por ser mi maestro durante mi vida de estudiante y mi guía en el desarrollo de este trabajo, también agradezco al Doctor Juanito Calderón por acompañarme durante esta travesía, compartir su gran experiencia y ser un ejemplo de docente y de persona. En tercer lugar, a Julio Castro, Diego Quishpe, Karina Vintimilla, David Quezada, Kevin Fernández, Andrea Chaca y las demás personas que aportaron de manera desinteresada al desarrollo de este proyecto y agradecido por haber compartido momentos muy gratos con estas extraordinarias personas. En cuarto lugar, al Ingeniero Carlos Criollo de INV Metals y las personas que laboran en esta empresa por acompañar y ser miembros activos en el desarrollo este trabajo de grado. Finalmente, a la Universidad del Azuay y a todos mis amigos que aportaron para mi crecimiento académico y personal.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Marco Referencial.....	3
1.1.1. Ubicación de la zona de estudio.	3
1.1.2. Actividad antrópica.....	5
1.1.3. Clima y vegetación.	6
1.1.3.1. Clima.	6
1.1.3.2. Vegetación.....	7
1.1.3.3. Fauna.	8
1.2. Marco geológico regional.	9
1.2.1. Geología regional.....	9
1.2.2. Geomorfología.	10
1.2.3. Estratigrafía.....	11
1.2.4. Estructuras.	14
1.3. Marco geológico local.....	15

1.3.1.	Geología local.....	15
1.3.2.	Mineralización y tipo de depósito.....	18
1.3.2.1.	Mineralización.....	18
1.3.2.2.	Tipo de depósito.....	19
1.4.	Geoquímica.....	20
1.4.1.	Aplicaciones de la Geoquímica.....	21
1.4.1.1.	Geoquímica de prospección o prospección geoquímica.....	21
1.4.1.2.	Geoquímica Ambiental.....	22
1.4.2.	Procesos geoquímicos en geoquímica ambiental.....	23
1.4.2.1.	Procesos Primarios.....	23
1.4.2.2.	Procesos secundarios.....	23
1.5.	Geoestadística.....	24
1.5.1.	Etapas del análisis geoestadístico.....	24
1.5.2.	Gráficos estadísticos.....	25
1.5.2.1.	Histogramas.....	25
1.5.2.2.	Diagramas de caja y bigotes.....	26
1.5.3.	Valores resumen en geoestadística.....	26
1.5.3.1.	Medidas de posición.....	26
1.5.3.2.	Medidas de dispersión.....	27
1.5.4.	Distribución Normal, ajuste de normalidad y coeficientes de correlación.....	27
1.5.4.1.	Distribución normal.....	27
1.5.4.2.	Ajustes de normalidad.....	27
1.5.4.3.	Coefficientes de correlación.....	28
1.5.5.	Predicciones espaciales con el interpolador Kriging.....	28
1.5.5.1.	Tipos de Kriging.....	29
1.6.	Estado del Arte.....	30

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS	33
2.1. Tipo de estudio.....	33
2.2. Muestreo de sedimentos.....	33
2.3. Preparación de la muestra.	34
2.4. Ensayos de laboratorio.	35
CAPÍTULO 3: VALIDACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS	36
3.1. Pruebas de normalidad de los datos.	37
3.2. Diagrama de caja y bigote de Pb.....	37
3.3. Pruebas de correlación lineal de Pearson con el Cu.....	39
3.4. Correlación con las coordenadas.....	39
3.4.1. Correlación con las coordenadas del río Irquis.....	39
3.4.2. Correlación con las coordenadas del río Bermejós.....	41
3.5. Elaboración del modelo de dispersión.	42
3.5.1. Resultados en la microcuenca del río Irquis.	45
3.5.2. Resultados en la microcuenca del río Bermejós.	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXOS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del proyecto minero Loma Larga.	3
Figura 1.2. Ubicación de las concesiones mineras Cerro Casco, Río Falso y Cristal..	4
Figura 1.3. Zona de estudio y zona de influencia del proyecto Loma Larga.	5
Figura 1.4. Clima en el páramo de la zona minera Loma Larga.	7
Figura 1.5. Vegetación predominante de paramos en la zona minera Loma Larga.	8
Figura 1.6. Caelifera de páramo en las concesiones mineras de Loma Larga.	9
Figura 1.7. Mapa geológico del Ecuador	10
Figura 1.8. Mapa geomorfológico e Hidrográfico de la zona minera Loma Larga. ..	11
Figura 1.9. Mapa geológico de la zona de Loma Larga.	12
Figura 1.10. Sistema de fallas en la Zona minera Loma Larga.....	15
Figura 1.11. Geología local del proyecto minero Loma Larga.	17
Figura 1.12. Corte geológico de la zona del proyecto Loma Larga.	17
Figura 1.13. Forma del cuerpo mineral visto desde el noreste.....	18
Figura 1.14. Forma del cuerpo mineral visto desde el oeste.	19
Figura 1.15. Tipo de depósito del proyecto minero Loma Larga.....	20
Figura 1.16. Paisaje Geoquímico.	22
Figura 1.17. Ejemplo de histograma estándar.	25
Figura 1.18. Ejemplo de diagrama de caja y bigotes.	26
Figura 1.19. Ecuación para la prueba de normalidad de Jarque-Bera.....	28
Figura 2.1. Tamizado de sedimentos fluviales.....	33
Figura 2.2. Secado, triturado y tamizado de la muestra.	34
Figura 2.3. Pesado, digestión con ácido nítrico, filtrado y aforado de la muestra.	35
Figura 3.1. Flujograma para elegir el método de interpolación.	36
Figura 3.2. Diagrama de caja para valores de Pb.	38
Figura 3.3. Diagrama de dispersión de Pb.	38
Figura 3.4. Dispersión de Pb en la cuenca del río Irquis.....	40
Figura 3.5. Mineralización identificada proyectada desde la microcuenca del río Irquis.	40
Figura 3.6. Dispersión de Pb en la cuenca del río Bermejós.....	41
Figura 3.7. Zona mineralizada proyectada desde la microcuenca que alimenta al río Bermejós.	42
Figura 3.8. Mapa de la distribución geoquímica normal de Pb.	43

Figura 3.9. Mapa de la distribución geoquímica de Pb.....	44
Figura 3.10. Modelo de dispersión geoquímica de Pb en la cabecera hidrográfica de la microcuenca del río Irquis.....	46
Figura 3.11. Modelo de dispersión geoquímica de Pb en la cabecera hidrográfica de la microcuenca del río Bermejós.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de proyecciones kriging y sus propiedades.....	29
Tabla 1.2. Tipos de kriging y las superficies que la generan.	30
Tabla 3.1. Coeficiente de correlación Pb-Cu.	39
Tabla 3.2. Coeficiente de correlación Pb-coordenadas en X.....	39
Tabla 3.3. Coeficiente de correlación de Pb-coordenada en Y.....	41

ÍNDICE DE ANEXOS

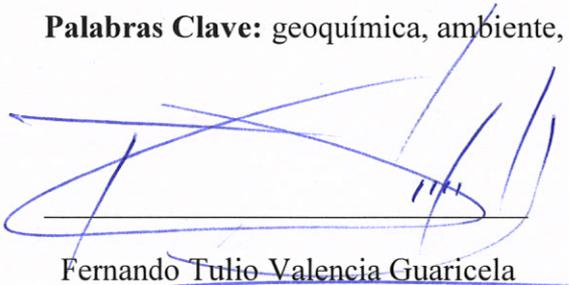
Anexo 1: Resultados de concentraciones de Pb y Cu en ppm.	53
Anexo 2: Descripción de la metodología utilizada para el muestreo de sedimentos.	55
Anexo 3: Descripción de la metodología utilizada de la preparación de la muestra.	58
Anexo 4: Descripción de la metodología utilizada para el análisis del laboratorio. ...	60
Anexo 5: Estadísticas descriptivas de los datos de las concentraciones de Pb.	62
Anexo 6: Histogramas y pruebas de normalidad de Pb.	64
Anexo 7: Propiedades de datos del interpolador Kriging Universal.	67

**DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN GEOQUÍMICA DE Pb EN
SEDIMENTOS DE AFLUENTES DEL ÁREA DE INCIDENCIA DEL
PROYECTO MINERO LOMA LARGA**

RESUMEN

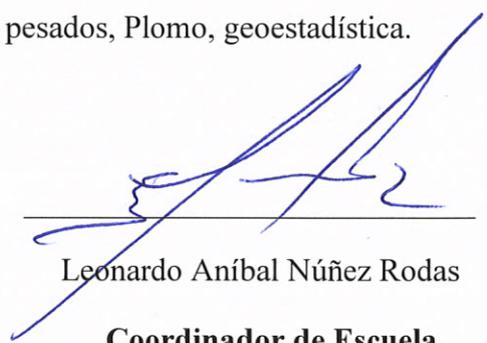
La geoquímica del medio ambiente ha sido una herramienta muy importante, poco utilizada para solucionar problemas referentes al ambiente y que permita localizar emisiones de contaminación; ya sea de origen natural u antrópico. En la zona de influencia del proyecto minero Loma Larga existe poca información de la distribución geoquímica natural de plomo y el objetivo de la investigación es determinar el modelo de dispersión de este metal siguiendo una metodología de muestreo y aplicación de un interpolador geoestadístico. Obteniendo como resultado un modelo bastante coherente y lógico con una media de plomo de 22 ppm que representa la línea base geoquímica de concentraciones de Pb en el área de estudio previo la explotación minera.

Palabras Clave: geoquímica, ambiente, metales pesados, Plomo, geoestadística.



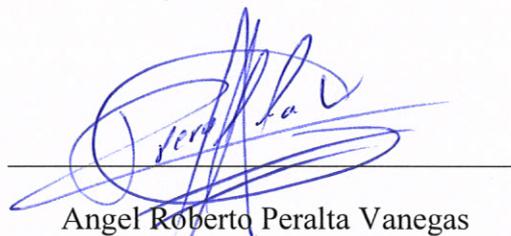
Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Angel Roberto Peralta Vanegas

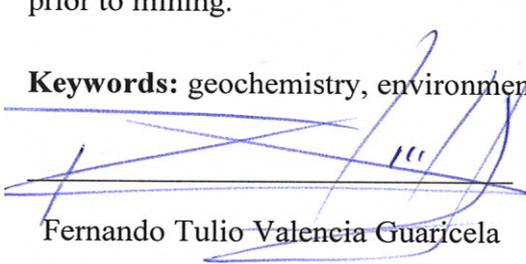
Autor

**DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN GEOQUÍMICA DE Pb EN
SEDIMENTOS DE AFLUENTES DEL ÁREA DE INCIDENCIA DEL
PROYECTO MINERO LOMA LARGA**

ABSTRACT

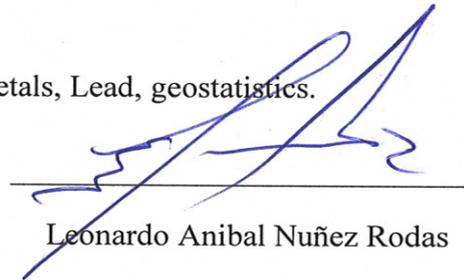
The geochemistry of the environment has been a very important tool, but has scarcely been used to solve problems related to the environment and to locate pollution emissions of natural or anthropic origin. There is little information on the natural geochemical distribution of lead in the area of influence of the "Loma Larga" mining project. The objective of this investigation was to determine the dispersion model of this metal following a methodology of sampling and application of a geostatistical interpolator. The result was a quite coherent and logical model with a mean lead of 22 ppm that represented the geochemical baseline of lead concentrations in the study area prior to mining.

Keywords: geochemistry, environment, heavy metals, Lead, geostatistics.



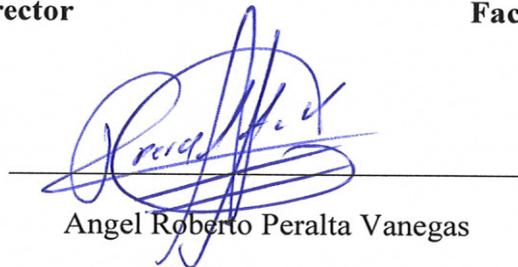
Fernando Tulio Valencia Guaricela

Thesis Director



Leonardo Anibal Nuñez Rodas

Faculty Coordinator



Angel Roberto Peralta Vanegas

Author



UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas



Translated by
Ing. Paul Arpi

Angel Roberto Peralta Vanegas

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela. MSc.

Julio, 2018

**DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN GEOQUÍMICA DE Pb EN
SEDIMENTOS DE AFLUENTES DEL ÁREA DE INCIDENCIA DEL
PROYECTO MINERO LOMA LARGA**

INTRODUCCIÓN

El territorio ecuatoriano posee grandes cantidades de recursos minerales; principalmente al sur del país y como lo es la provincia del Azuay. En la jurisdicción del cantón Cuenca se ha encontrado yacimientos minerales de gran interés nacional y con ello, la presencia de empresas mineras internacionales encargadas de extraer estos recursos. Loma Larga es uno de los grandes proyectos mineros del Ecuador, ubicado en zonas de páramos, bosques nativos y humedales; por este motivo, es necesario realizar estudios preventivos para proteger y evitar impactos ambientales y daños a la salud de la población.

El tema ambiental esta última década ha ido ganando terreno por la intensa campaña y promoción del gobierno ecuatoriano por el desarrollo de la minería, ya que esta actividad es y será siempre un factor importante para la economía del país. Para afrontar estos problemas existe la geoquímica aplicada al medio ambiente o geoquímica ambiental que ha sido una herramienta importante para el desarrollo de este modelo de dispersión del plomo.

Por el contrario, existe poca información de una caracterización geoquímica a detalle de plomo (Pb) en la zona de influencia del proyecto minero Loma Larga y la cantidad de expertos locales que puedan apoyar es bastante reducida; por lo tanto, la elaboración de este estudio permitirá determinar cómo está dispuesto el Pb dentro de zona minera

y por este motivo se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es la concentración de plomo en sedimentos de los ríos del área de influencia del proyecto minero Loma Larga?

La idea es establecer una línea base ambiental de la presencia de Pb en sedimentos fluviales del área de influencia del proyecto minero Loma Larga, el cual resulta de gran interés para toda la población del cantón Cuenca porque ayudará a determinar el grado de alteración que podrían realizar las actividades mineras al medio ambiente; principalmente a las fuentes hídricas, por encontrarse en zonas sensibles de páramos, bosques nativos y humedales.

Las gráficas generadas permitió conocer, determinar, caracterizar y localizar umbrales de dispersión geoquímica de Pb en sedimentos de río aplicando metodologías de estudios similares y mediante la recolección de 60 muestras de sedimentos fluviales del área de influencia, análisis químicos en los laboratorios de la Universidad del Azuay de las muestras con el método de espectrofotometría de absorción atómica y finalmente mediante un interpolador geoestadístico kriging se logró elaborar el modelo de dispersión geoquímico de Pb.

Como resultado de este estudio se estableció concentraciones de Pb que están entre 15 y 22 ppm y que son valores bastante aceptables y lógicos considerando que la zona de estudio existe la presencia de sulfuros y óxidos provenientes de una mineralización

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Marco Referencial.

1.1.1. Ubicación de la zona de estudio.

El Proyecto Loma Larga, se encuentra ubicado al sur del Ecuador en la Cordillera Occidental de la cadena montañosa de los Andes, en la provincia del Azuay, a 480 km al sur de la capital Quito y al suroeste de la ciudad de Cuenca a una altitud de 3500 a 3900 m.s.n.m.

El área de influencia se encuentra dentro de tres cantones y seis parroquias: Cuenca (Baños y Victoria del Portete), Girón (Girón y San Gerardo) y San Fernando (Chumblín y San Fernando) (Morán Reascos, 2017).

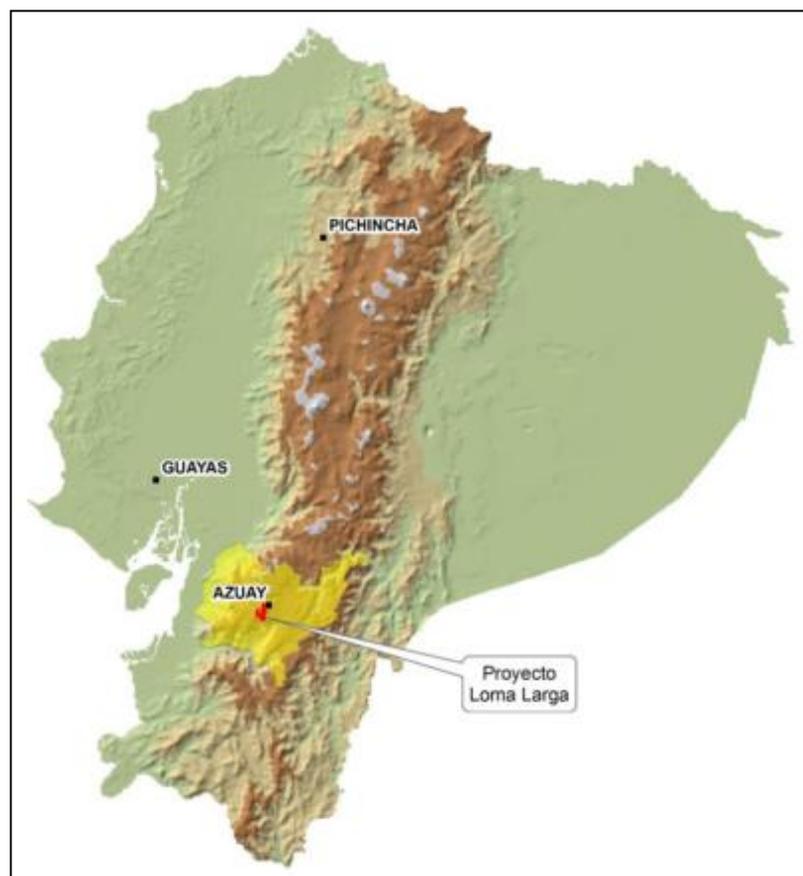


Figura 1.1. Ubicación del proyecto minero Loma Larga.

Fuente: (Morán Reascos, 2017).

La empresa INV Minerales Ecuador S.A cuenta tres concesiones (Cerro Casco, Río Falso y Cristal) que cubren un área de aproximadamente 8000 hectáreas. A este lugar se puede acceder a través de 40 km de carreteras pavimentadas desde la ciudad de Cuenca hasta San Gerardo y 18 km de camino de segundo orden (INV Metals, 2015).

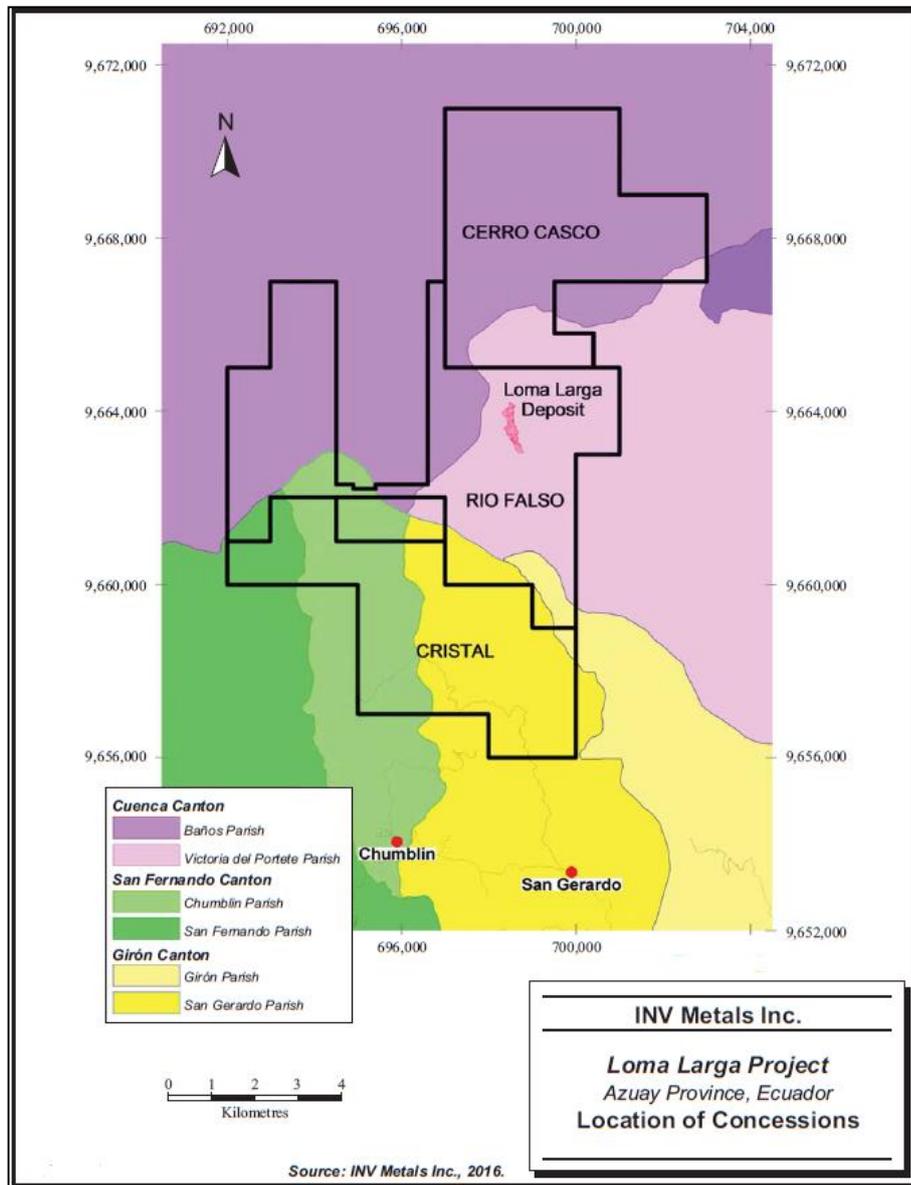


Figura 1.2. Ubicación de las concesiones mineras Cerro Casco, Río Falso y Cristal.

Fuente: (Cox et al., 2016).

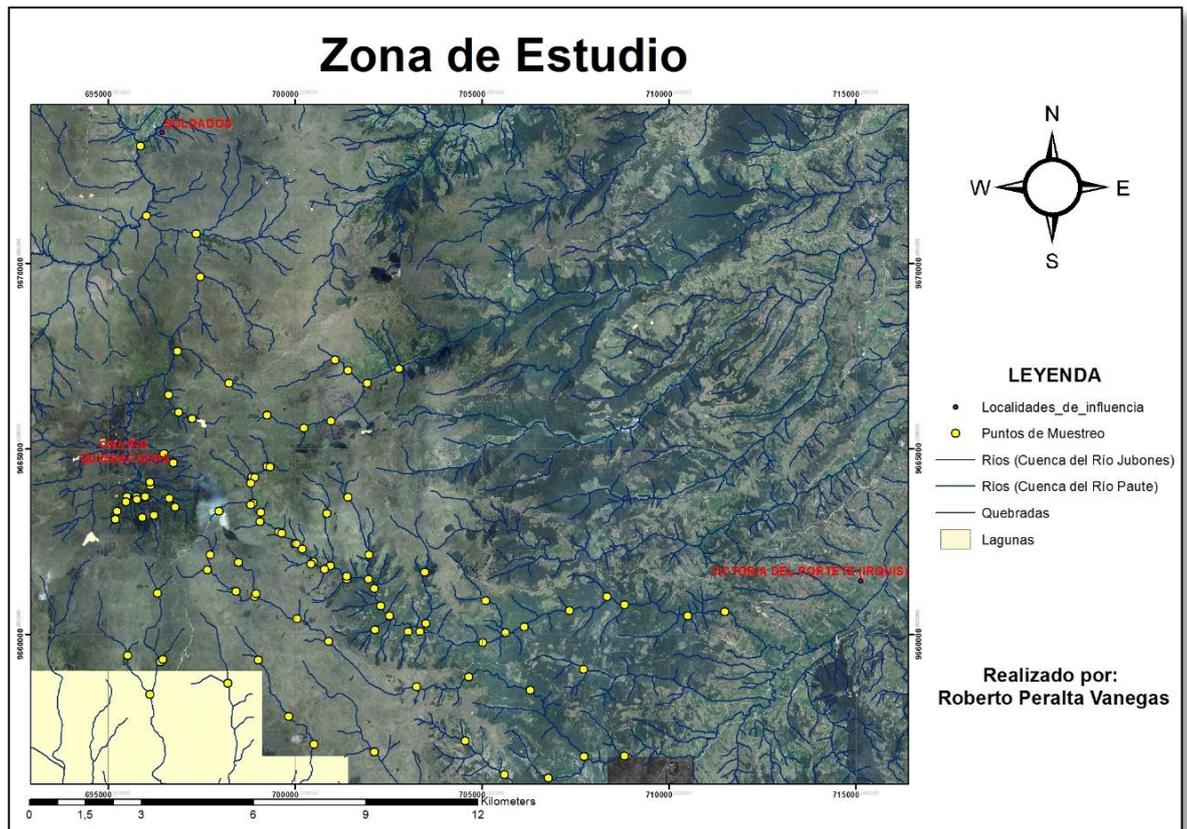


Figura 1.3. Zona de estudio y zona de influencia del proyecto Loma Larga.

1.1.2. Actividad antrópica.

Según datos del “Instituto Nacional de Estadísticas y Censos”, en la parroquia San Gerardo habitan 1119 personas (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2018) y es una de las parroquias más cercanas al proyecto minero Loma Larga.

Cerca de 560 personas de la parroquia, que representa el 49,6 % de la población, se encuentra en estado de atención prioritaria por su condición social; como: personas de la tercera edad, niños menores de 15 años y personas discapacitadas.

El 66% del suelo de la parroquia no está en condiciones de uso para actividades agrícolas. Sin embargo, como toda el área de influencia del proyecto minero, en la parroquia San Gerardo, la Población Económicamente Activa (PEA) se dedica a actividades como la ganadería y la agricultura, abasteciendo el consumo interno de lácteos y carne.

Se han detectado algunos problemas como: la presencia de cultivos en zonas de bosques, el incremento de la frontera agrícola, contaminación de cursos y quebradas ya que pobladores arrojan basura a estas fuentes de agua y por la quema de basura,

deforestación de bosques, alcoholismo a muy temprana edad, analfabetismo, etc. Acciones para contrarrestar estos problemas se encuentra en el ‘Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de San Gerardo’ (GAD San Gerardo, 2015).

1.1.3. Clima y vegetación.

1.1.3.1. Clima.

La zona de estudio posee un clima característico de páramo con lloviznas y lluvias habituales, acompañadas con granizadas y heladas. Las precipitaciones tienen un promedio de 1330 mm por año, con lluvias más intensas en los meses de noviembre y marzo. La precipitación media anual fue de 1077 mm entre los años 2006 y 2008.

La presencia de nieve es muy rara, sin embargo las temperaturas pueden descender por debajo de los 0°C. Las temperaturas oscilan entre 2.2°C y 17.1°C, teniendo el mes más caliente en diciembre y el más frío en agosto. La temperatura máxima durante el día se presenta entre las 12:00 y las 15:00 horas, cuando la radiación solar es más intensa, por el contrario las temperaturas mínimas ocurren entre las 3:00 y las 6:00 horas.

La velocidad del viento ha sido registrada en una estación meteorológica de la zona durante los años 2009 a 2010. Las velocidades más altas de viento suceden de julio a septiembre. La velocidad media máxima se registró en julio de 2009 a una velocidad de 7 m/s y la velocidad diaria del viento varía aproximadamente de 2,5 m/s hasta 4,75 m/s. La dirección del viento es predominante del oeste a este. (Cox et al., 2016).

La humedad atmosférica promedio en Loma Larga son de máxima 99,85% y media de 95,23 y la mínima es de 82,20%. Mientras que la presión atmosférica tiene un valor promedio de 625,04 mbar y los 10 valores diarios máximos fluctúan entre 626,94 mbar y 627,51 mbar, mientras que los 10 valores mínimos oscilan entre 622, 15 mbar y 622,40 mbar. Los valores son más regulares en época de lluvia en donde se presenta valores más altos, por el contrario en verano se presenta valores mínimos. (Jaramillo Ochoa, 2016).



Figura 1.4. Clima en el páramo de la zona minera Loma Larga.

1.1.3.2. Vegetación.

Los ecosistemas andinos son una de las zonas con mayor endemismo y diversidad. Estos ecosistemas, incluyen hábitats que se encuentran a mayor elevación y que suponen de zonas de gran importancia en la generación de servicios ambientales (Barros Q, Urgiles, Orellana, & Astudillo, 2016).

En el proyecto Loma Larga la vegetación predominante es el páramo herbáceo, este se encuentra dominado en su gran mayoría por *Calamagrostis intermedia*, que junto con *Orthrosanthus chimboracensis* forman una capa densa herbácea, debajo de estas se puede encontrar hierbas pequeñas como: *Hypochaeris sessiliflora*, *Oritrophium peruvianum*, *Genitianasedifolia*, *Gentianella hirculus*, *Halena weddelliana*, *Geranium multipartitum*, *Ranunculus praemorsus*, *Lachemilla hispidula*, *L. orbicula*, *Castilleja fissifolia*, *Bartsia spp*, *Valeriana microphylla*, *Eryngium humile*, entre otras (Barros Quito, 2015).

En esta zona de estudio se han registrado aproximadamente 480 especies de plantas vasculares. La población arbórea incluye 67 especies de: Astetaceae, Poaceae; como Quinoa, Quishuar, Chilca, Alas de Angel y Alisos.

A partir del año 2003, se ha construido en la zona de campamentos un vivero para la siembra de plantas y especies nativas (Morán Reascos, 2017).



Figura 1.5. Vegetación predominante de paramos en la zona minera Loma Larga.

1.1.3.3. Fauna.

En un estudio realizado por la Universidad del Azuay en la zona se registraron los siguientes resultados de biodiversidad que incluye la fauna: Herpetofauna; 420 registros de anfibios , pertenecientes a 12 especies asociadas a tres familias, Mastofauna; 174 registros agrupados en 19 especies y asociadas a 14 familias, Aves; 1084 registradas, pertenecientes a 67 especies agrupadas en 23 familias, Ictiofauna; 435 especies registradas pertenecientes a 2 especies y asociadas a una familia, Entomofauna; 674 registros pertenecientes a 90 familias y asociadas a 30 órdenes, Microinvertebrados acuáticos; 465 registros asociados a 54 familias y agrupadas en 17 órdenes (Barros Q et al., 2016).



Figura 1.6. Caelifera de páramo en las concesiones mineras de Loma Larga.

1.2. Marco geológico regional.

1.2.1. Geología regional.

La cordillera andina ecuatoriana varía de 100 hasta 120 km de ancho, presenta una actividad volcánica reciente sobre todo al norte, formando estructuras volcánicas superiores a los 4500 m de altura y está dividida en dos cadenas montañosas subparalelas separadas por un graben central. Al este se ubica La Cordillera Real que en su mayoría comprende cinturones lineales de rocas metamórficas, intruidas por rocas granitoides del Mesozoico temprano, cubierto en gran parte por volcánicos del Cenozoico. Hacia el occidente del graben se encuentra La Cordillera Occidental y donde se encuentra ubicado el proyecto minero Loma Larga, dominada por rocas volcánicas basálticas y volcanoclásticas del Mesozoico tardío al Cenozoico temprano y turbiditas clásticas instruidas por granitoides del Terciario medio tardío y sobreyacidas por margen continental post Eocénico, principalmente secuencias volcánicas calco alcalinas ácidas a intermedias. Por último, el graben interandino es una estructura extensional bordeada por fallas activas. Contiene gruesas y extensas secuencias volcanosedimentarias, terciarias a recientes y volcánicas que probablemente son anteriores al Oligoceno-Mioceno (PRODEMINCA, 2000).

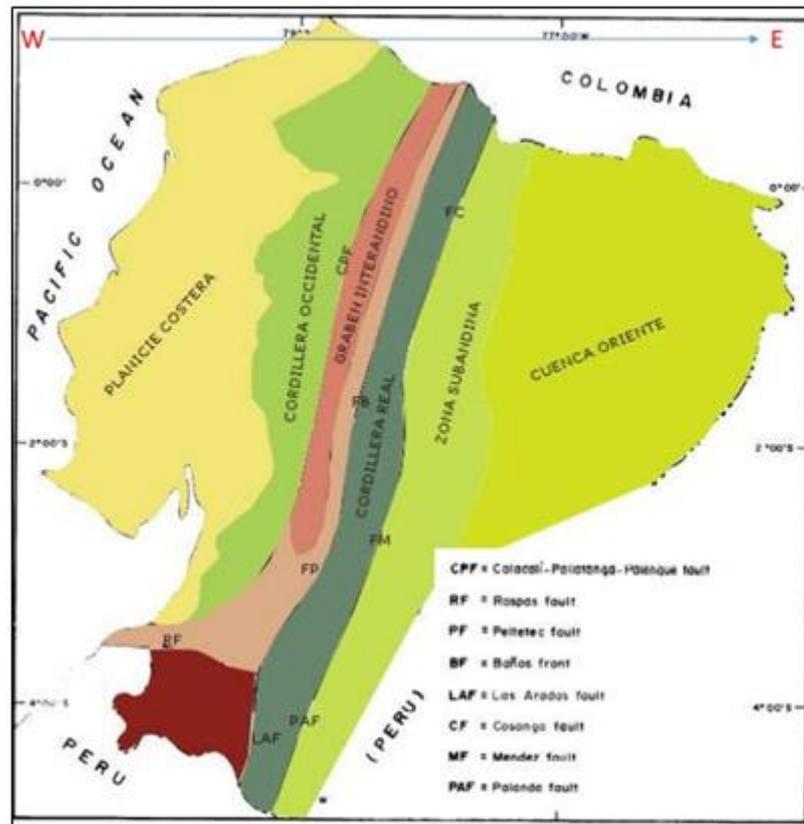


Figura 1.7. Mapa geológico del Ecuador

Fuente: www.slideshare.net

1.2.2. Geomorfología.

La geomorfología del Ecuador, se ha establecido por algunos fenómenos como la subducción de placas, orogenia, vulcanismo, litología, entre otros; que han creado en el área, características geomorfológicas como:

Colinas altas: son unidades geomorfológicas con una topografía colinada arrugada con una diferencia de altura relativa de 75-200 metros de pendiente de 14-20 %. En la zona del proyecto se encuentran elevaciones entre 3700 y 3800 m.s.n.m en la gran mayoría, con una altura de 3969 m.s.n.m la montaña Cerro Casco es la más alta del lugar.

Llanura subglaciar: es un relieve climático que su formación es de manera siguiente a la desaparición del hielo del terreno, apareciendo rocas pulidas, aborragadas, bloques erráticos, alterando con till subglaciar, sedimentos lacustres y supraglaciares, céspedes, drumlins y morrenas.

Relieves montañosos: aquí integran montañas que su altura y forma resultan de un plegamiento de las rocas superiores de la corteza terrestre y que aún mantienen rasgos evidentes de estructuras originales a pesar de haber sido afectado por procesos de denudación fluvio-erosional y glaciárica (INSIGMA Cía. Ltda, 2014).

La serie de ríos y quebradas que se originan en la zona forman una cuenca de drenaje radial, que trata de una red circular con canales que provienen de un punto elevado y viajan hacia una corriente principal que circula alrededor de la base de la elevación (Morán Reascos, 2017).

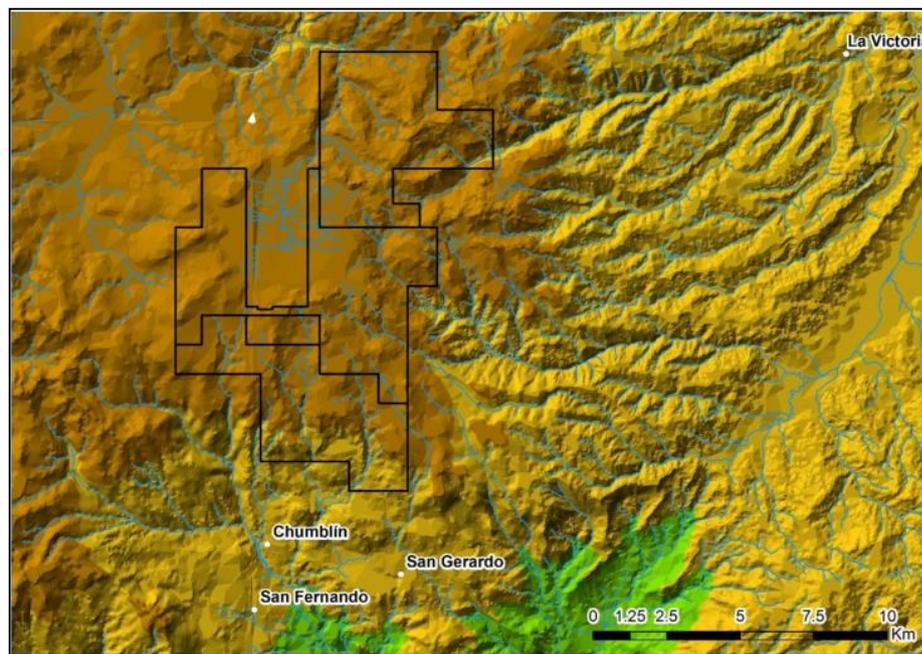


Figura 1.8. Mapa geomorfológico e Hidrográfico de la zona minera Loma Larga.

Fuente: (Morán Reascos, 2017).

1.2.3. Estratigrafía.

La estratigrafía del proyecto minero Loma Larga comprende flujos de rocas volcánicas relativamente jóvenes y volcanoclásticas que van desde el Oligoceno hasta Mioceno superior (tardío), estas formaciones se encuentran sobre rocas metamórficas. Se

analizó el Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 3° - 4° S, realizado por el Servicio Geológico Británico (Pratt, Figueroa, & Flores, 1997).

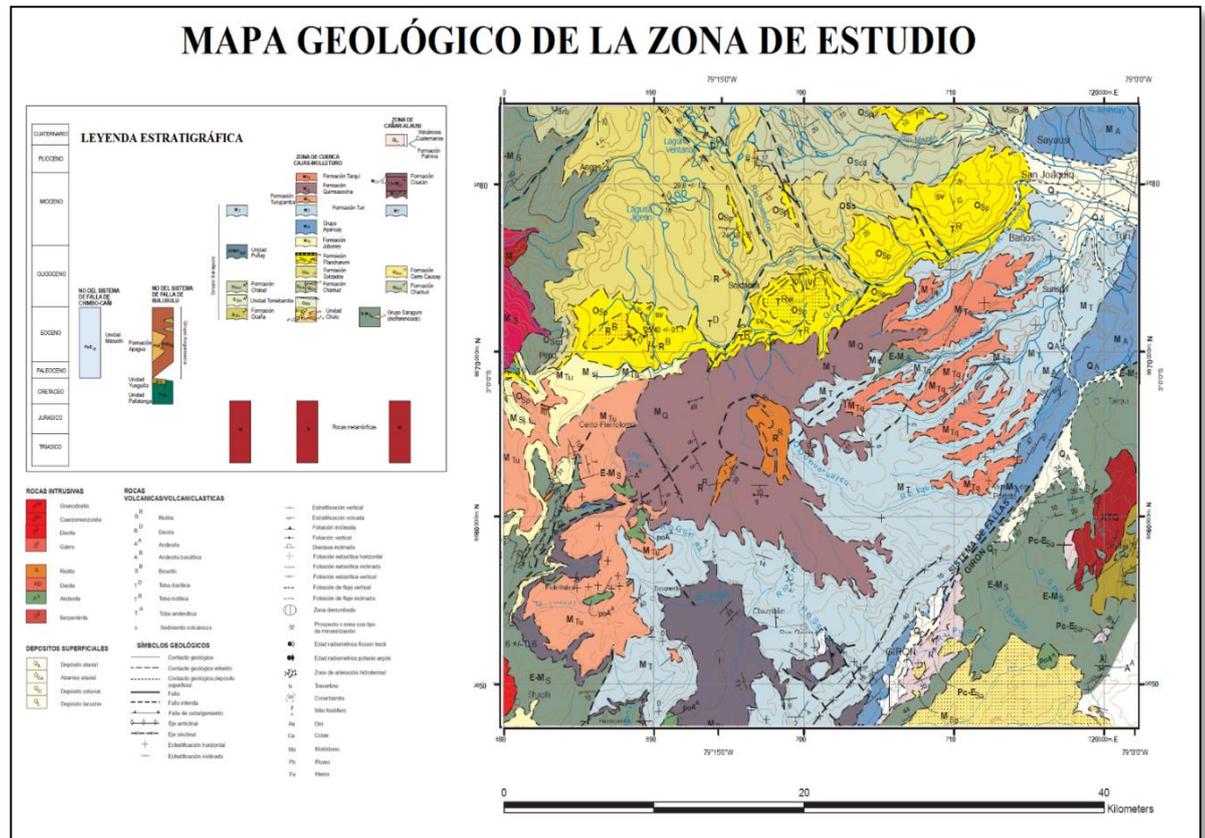


Figura 1.9. Mapa geológico de la zona de Loma Larga.

Fuente: (Pratt et al., 1997).

Rocas Metamórficas (M), estas rocas se encuentran extendidas a lo largo de la zona pero ocultas por rocas volcánicas más jóvenes al NE del sistema de fallas Jubones, ocurren en ventanas erosionales como San Pablo de Cebadas, Manú y en el río San Luis. Prevalcen rocas metasedimentarias incorporando algunas de bajo grado, tales como pizarras y conglomerados de clivaje. La mayor cantidad de afloramientos ocurre en un cinturón continuo al SE de la falla Bulubulu desde la quebrada Palma hasta el río Putucay. Existe una profunda declinación del grado metamórfico hacia el E, donde estratos con andalucita y biotita pasan a turbiditas no meteorizadas.

Grupo Saraguro (E-Ms), (Dunkley & Gaibor, 1997) este grupo de formaciones ocupa la mayor parte del área mapeada. Se basa esencialmente de tobas soldadas de flujo de ceniza de composición dacítica a riolítica, lavas andesíticas, material volcánico re TRABAJADO y rocas sedimentarias. Este grupo pierde su anchura

hacia la cordillera real; por otra parte, gran parte del Grupo Saraguro del área presente está indiferenciado pero se reconoce las siguientes seis unidades litológicas: Formación Las Trancas, Unidad Portovelo, Formación Plancharumi, Formación La Fortuna, Formación Jubones y Formación La Paz.

Formación Santa Isabel (Msa), (Pratt, Figueroa, & Flores, 1997) esta aflora en zonas de Santa Isabel y Girón, rodeadas por el Grupo Ayancay. Los estratos con primordialmente lavas y brechas tobáceas andesíticas con vetas de calcita, que alcanzan un máximo de 400 metros en el Río Rircay. La Formación está cubierta por más de 20 metros de conglomerados tobáceos rojo y tobas finas.

Grupo Ayancay (MA), (United Nations Development Programme, 1969) está expuesto entre Santa Isabel, Girón y Cuenca, primordialmente confinado entre el Sistema de Fallas Girón y el cinturón Gañarín. Abarca conglomerados rojizos, areniscas, limolitas y lutitas con escasos horizontes de tobas de caída en el aire y carbones. También, el grupo sobreyace al fallado, ladeado y erosionado Grupo Saraguro. Auenta y llega a ser dominado por conglomerados hacia el Sistema de Fallas Girón, con un fuerte sobrecorrimiento en el lado NO. El Grupo Ayancay va desde el Mioceno que es desde el periodo entre 18-10 Ma (Hungerbühler).

Formación Turi (Mr), (Erazo, 1957) presente al N del Sistema de Fallas Girón y al E del Cinturón Gañarín. Están presentes brechas tobáceas, conglomerados, areniscas ricas en debris andesítico y unas pocas brechas tobáceas primarias de composición andesítica. La forma del afloramiento es radial, con buzamientos suaves hacia el S y el E desde la caldera del Quimsacocha. Inicialmente se consideraba una edad del Pleistoceno; sin embargo, una datación por trazas de fisión indica una edad del Mioceno Tardío de periodos entre 8-9 Ma (Steinmann, 1997).

Formación Turupamba (M_{Tu}), (Pratt, Figueroa, & Flores, 1997) aflora al O de San Fernando y está combinado primordialmente por tobas riolíticas a decíticas con cantidades menores de lapilli de pómez. Esta dispuesta sobre la Formación Turi y por la Formación Quimsacocha. Su formación es el resultado de constantes caídas de ceniza menores intercaladas con periodos de sedimentación fluvial y lacustre.

Formación Quimsacocha (MQ), corona la Formación Turi alrededor de la caldera de Quimsacocha. Los estratos son lavas ricas de plagioclasa muy frescas. Esta formación no es clara pero se cree que va desde el Mioceno Tardío o más joven.

Formación Tarqui (M_{Tq}), (United Nations Development Programme, 1969) se visualiza principalmente en las faldas al oriente de la caldera de Quimsacocha donde sobreyace en la Formación Turi, también en el páramo entre Oña y Saraguro. En la zona de Quimsacocha se encuentran tobas ácidas fuertemente meteorizadas. Es de una matriz arenosa, rica en fragmentos líticos angulares, cuarzo, feldespatos y biotita, con fragmentos angulares de 10 a 50 mm de largo de andesita y una toba soldada rica en cuarzo. La formación Turi es de edad del Mioceno Tardío (Dunkley & Gaibor, 1997).

1.2.4. Estructuras.

El proyecto se encuentra dentro de dos sistemas de fallas regionales subparalelas: Girón al SE y Gañarín al NW, estas tienen una dirección entre 30° a 40° al NE. Actualmente están activas.

Las fallas Girón y Gañarín tienen un movimiento dextral y por consecuencia de este movimiento origina el sistema de fallas subordinado Río Falso con dirección N-S. LA actividad entre estos dos elementos de fallas origina el desarrollo de estructuras tipo dúplex que deja zonas extensas y favorece el emplazamiento de cuerpos mineralizados (Morán Reascos, 2017).

Sistema de Fallas Girón: comprende pliegues cerrados, fallas inversas y cabalgamientos con rumbo NNE a N. En muchos lugares en este sistema tiene una pronunciada convergencia hacia el NO y un carácter inverso. Un cabalgamiento en La Cría lleva la Unidad Sacapalca y el Grupo Saraguro sobre el Grupo Ayancay. El tectonismo principal del Sistema de Fallas Girón puede datarse en forma precisa porque en Uchuncay, esta trunca pliegues relacionados con cabalgamientos dentro del Grupo Ayancay con una fuerte discordancia angular.

Cinturón Gañarín: tiene un rumbo NNE, comprende áreas de alteración hidrotermal y una concentración de intrusiones subvolcánicas de riolita y andesita. Se identifican dos calderas, la del Jubones y Quimsacocha, a lo largo del cinturón el mismo que puede trazarse desde Zaruma en el S hasta el margen N del mapa en Quimsacocha. Algunas fallas con rumbo ESE ocurren en el NO del mapa, dentro de la Unidad Pallatanga. Ninguna parece tener una extensión mayor y desaparecen rápidamente en los estratos del Grupo Saraguro. La Serpentina se encuentra presente a lo largo de la Falla del Río Chico, sin embargo esta ocurrencia tiene un origen incierto (Pratt et al., 1997).

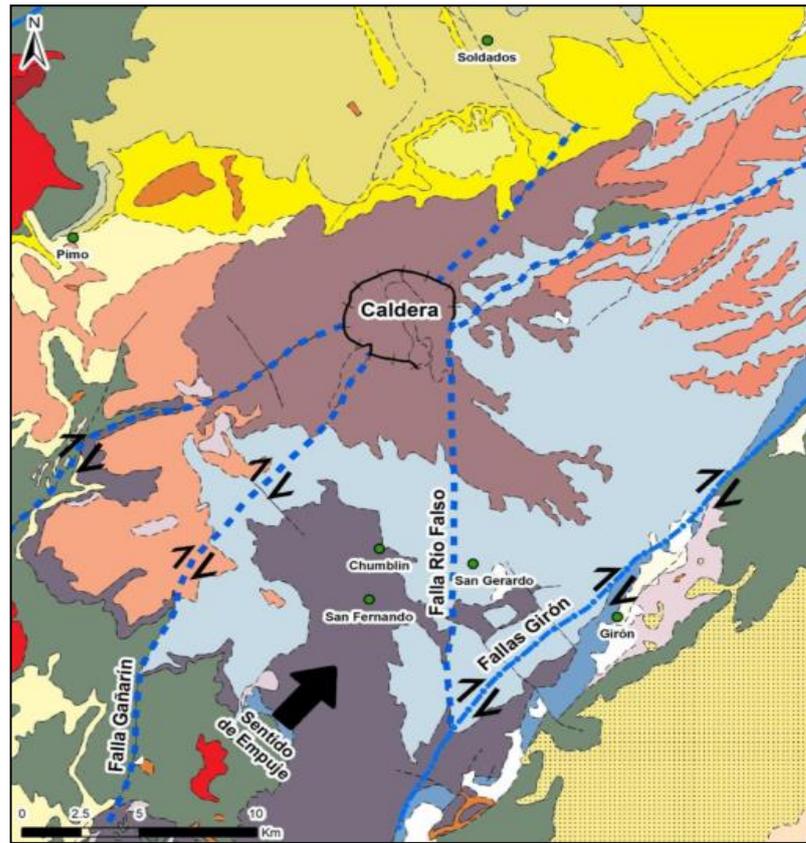


Figura 1.10. Sistema de fallas en la Zona minera Loma Larga.

Fuente: (Morán Reascos, 2017)

1.3. Marco geológico local.

1.3.1. Geología local.

El proyecto minero Loma Larga está ubicada entre las fallas Gañarín al noroeste y la falla Girón al suroeste. Una estructura de caldera derrumbada de 4 kilómetros de diámetro, el remanente de un estratovolcán erosionado que se encuentra a lo largo de la falla Gañarín y 400 metros de la mineralización principal de Loma Larga. La caldera del volcán está sustentada por cúpulas félsicas tardías y está cortada por un diatrema multifásico. La falla Río Falso, de norte a sur, que tiene la apariencia de ser una falla conjugada que une las fallas Gañarín y Girón, es la zona de alteración y fluidos mineralizantes (ver figuras 1.11 y 1.12).

En el área del proyecto y la zona colindante están presentes principalmente las formaciones Turi, Turupamba, Quimsacocha y Tarqui (figuras 1.11 y 1.12). Estas formaciones son planas para una inmersión suave y generalmente no afloran en la

concesión. Los afloramientos que están expuestos forman un patrón radial alrededor de la caldera y se separan suavemente hacia el sur y el este.

La formación Turi se trata de brechas tobáceas, conglomerados y areniscas con un alto contenido de clastos de brechas tobáceas. La formación Turupamba aflora solamente en la esquina suroeste de la concesión y contiene tobas riolíticas a dacíticas con una pequeña cantidad de tobas lapilli; también, parece que esta formación es el resultado de pequeñas caídas de cenizas con periodos de sedimentación lacustre y fluvial. La última se superpone a la formación Turi, que a su vez está cubierta por la formación Quimsacocha, que contiene el depósito mineral de Loma Larga, la que contiene flujos de lava andesíticos alternos con fenocristales frescos de plagioclasas, tobas andesíticas y brechas, distribuidos radialmente solo alrededor de la caldera.

La formación Tarqui aflora principalmente en el flanco oriental de la caldera, donde se encuentra sobre la formación Turi. Se superpone discordantemente a las formaciones más antiguas y tiene un grosor máximo de 400 metros. Contiguo del depósito mineral, la formación Tarqui se compone principalmente de tobas de riolita fírica de cuarzo fuertemente erosionada. Sin embargo, al norte, la unidad se compone de tobas finamente conglomeradas, areniscas tobáceas, conglomerados, también restos de plantas y carbón.

Tras el colapso de la caldera, se produjo un suceso intrusivo volcánico posterior a la mineralización, que dio lugar a domos dacíticos a riolíticos y criptodomas porfídicos de cuarzo y feldespato, emplazadas dentro y alrededor de la caldera en el Plioceno. En estas litologías acompañan las brechas relacionadas con el colapso de la caldera y las brechas diatomeas, que contienen clastos mineralizados. La mayoría de la zona de INV Metals está compuesta por restos aluviales del Plioceno y Cuaternario, morrena glacial y depósitos lacustres.

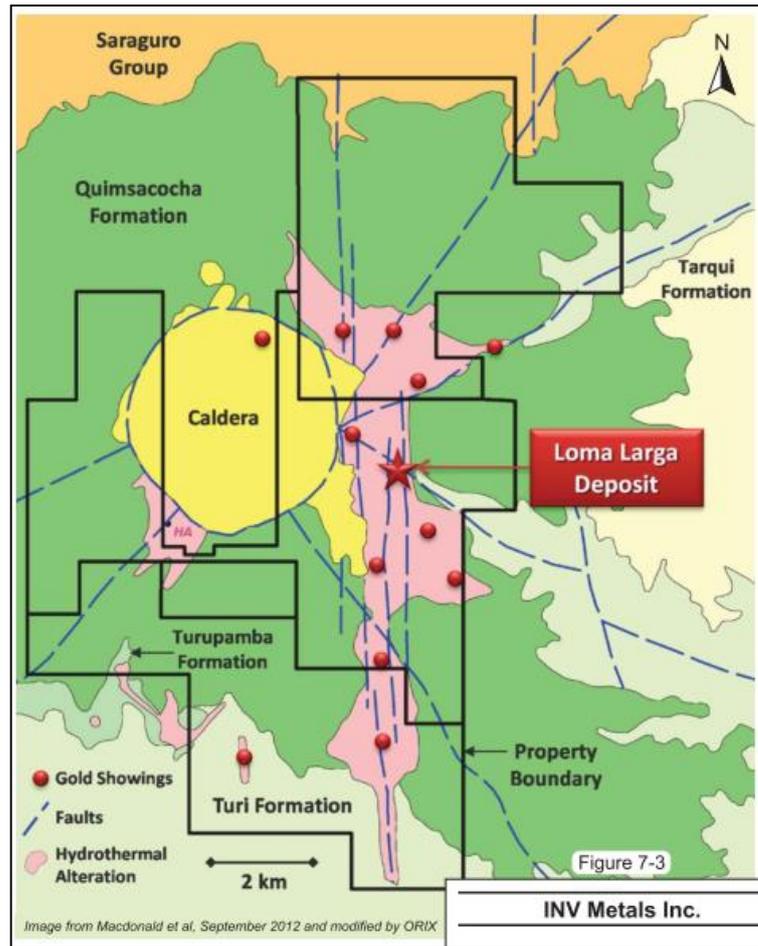


Figura 1.11. Geología local del proyecto minero Loma Larga.

Fuente: (Cox et al., 2016)

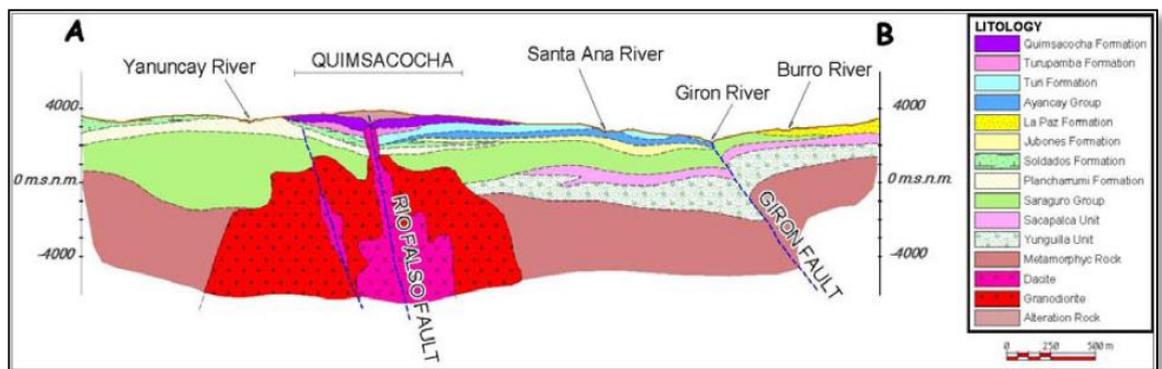


Figura 1.12. Corte geológico de la zona del proyecto Loma Larga.

Fuente: (IAMGOLD Technical Services, 2009)

1.3.2. Mineralización y tipo de depósito.

1.3.2.1. Mineralización.

Proyecto Loma Larga es un sistema epitermal de alta sulfuración con una mineralización de oro, plata y cobre, esta se formó por inyecciones de multifasicas fluidos hidrotermales controladas litológicamente y estructuralmente. La actividad mineralizadora de alteración se caracteriza por una fase de alteración temprana por una entrada fuerte de fluidos volátiles y ácidos que se enfriaron progresivamente y fueron neutralizados por su reacción con la roca de caja, esto dio lugar a capas silicificadas rodeadas por halos de alteración de minerales arcillosos. Los sulfuros y minerales de ganga asociados con la mineralización fueron depositados por fluidos posteriores dentro de los cuerpos silicificados (Cox et al., 2016).

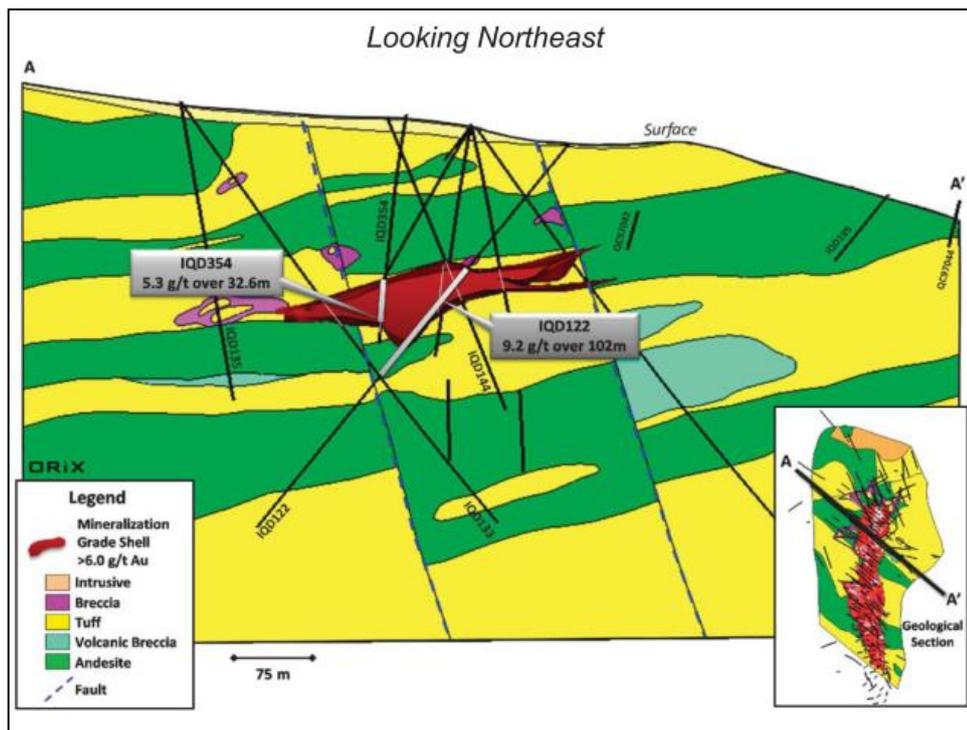


Figura 1.13. Forma del cuerpo mineral visto desde el noreste

Fuente: (Cox et al., 2016)

En la zona norte del cuerpo mineral se encontró una mineralización que contiene principalmente pirita, vestigios de enargita, baritina y oro. Hacia el sur, en el área de Río Falso, se encuentra la presencia de cinabrio, estibina, barita y pirita, mientras que en el norte de las áreas de Cerro Casco y Costillas se encuentran rastros de cinabrio y pirita (IAMGOLD Technical Services, 2009).

La mineralización epitermal de alta sulfuración de oro, cobre y plata en el depósito del proyecto también se controla estratigráficamente como ocurre en los contactos litológicos entre lavas y tobas andesíticas de la formación Quimsacocha y alcanza mayor espesor en las tobas más permeables.

La forma del cuerpo mineral es plano, con una pequeña inclinación hacia el oeste, tiene una longitud de norte a sur de 1600 m y una potencia de 120 a 400 m de este a oeste. También, desciende ligeramente hacia el norte de modo que la zona mineralizada está más cerca de la superficie en el extremo sur.

Las zonas mineralizadas se caracterizan por tener brechas múltiples y eventos de llenado en espacios abiertos y sulfuros tales como pirita, enargita, covelita, calcopirita y luzonita, en estados de alteración más bajos, tenantita y tetraedrita. Los intervalos de mayor grado de sulfuración suelen coincidir con mayor cantidad de enargita, barita y una intensa brecha hidráulica que contiene fragmentos redondeados y silicificados. También el oro visible es muy raro (Cox et al., 2016).

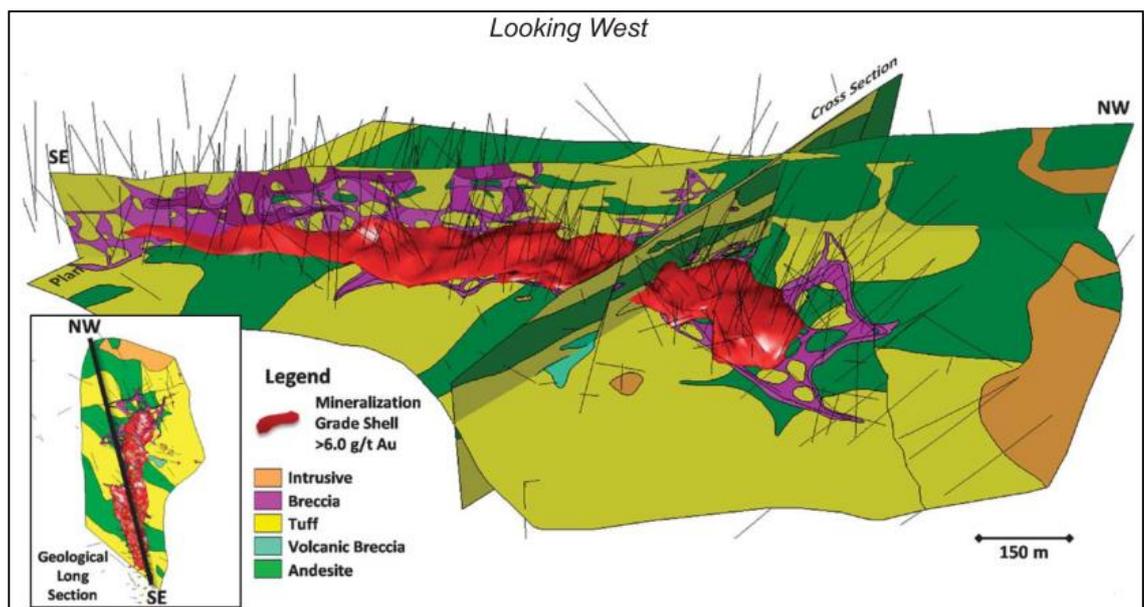


Figura 1.14. Forma del cuerpo mineral visto desde el oeste.

Fuente: (Cox et al., 2016)

1.3.2.2. Tipo de depósito.

Según el reporte técnico presentado por la empresa IAMGOLD en febrero del 2009 establece que el yacimiento de la zona de estudio es un sistema epitermal de alta sulfuración con metales de interés como oro, plata y cobre. Formado por la inyección

de fluidos multi-fase asociados con controles litológicos y estructurales. La mineralización del yacimiento consiste principalmente de pirita, enargita, barita y oro. El cuerpo mineral de sílice tiene la forma de un manto subhorizontal que se inclina un poco hacia el noroeste y tiene extensiones de 1300 m de norte a sur y 200 m de este a oeste. Es mejor desarrollado en el contacto entre tobas y flujos de lava andesíticas de la formación Quimsacochoa, obteniendo mayor espesor en las tobas.

Todo el sistema de alteración abarca un área de 12 km de N-S y 6 km de E-O a lo largo de zonas estructurales y muy típicas de un sistema de alta sulfuración con un núcleo cavernoso y sílice masiva, más lateralmente alunita, caolín, dickita, pirofilita; todo rodeado por un cerco de alteración argílica representada por las arcillas illita y esmectita, como se detalla en la figura 1.15. (IAMGOLD Technical Services, 2009)

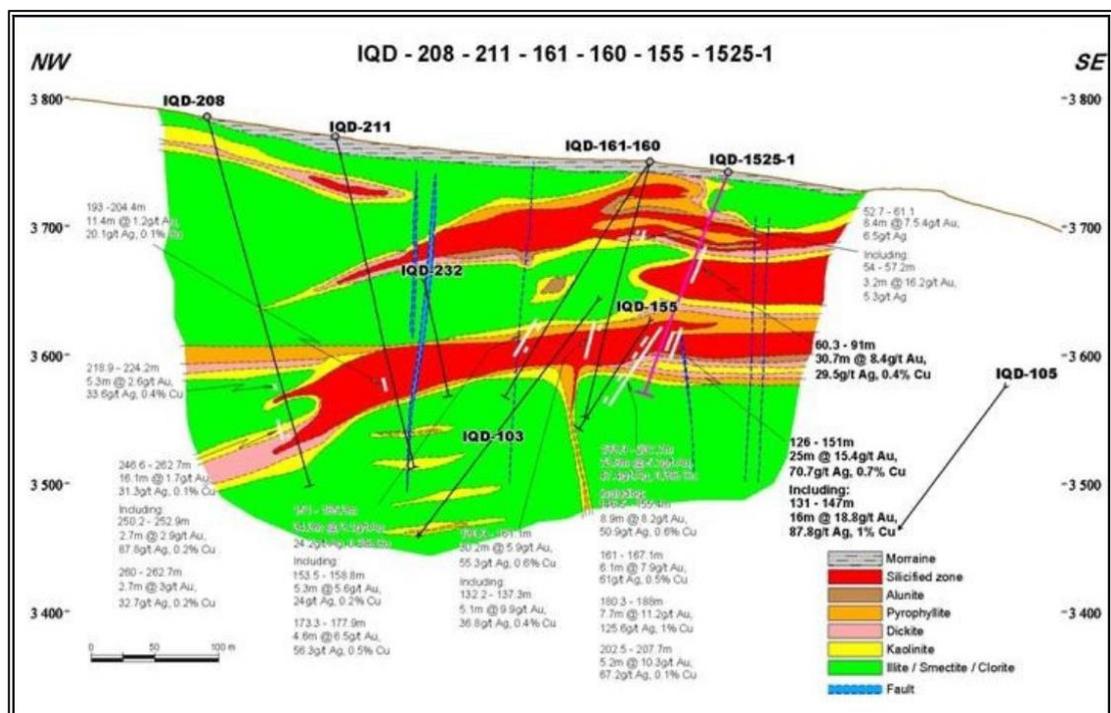


Figura 1.15. Tipo de depósito del proyecto minero Loma Larga.

Fuente: (IAMGOLD Technical Services, 2009)

1.4. Geoquímica.

Goldschmidt (1954) y Fortescue (1979, 1980, 1992) definen a la geoquímica como el papel que realiza los elementos químicos en la síntesis y descomposición que de los materiales naturales en todos sus aspectos (Viladevall i Solé, Navarro, & Pérez Guerrero, 1996).

Geoquímica se define como la ciencia que estudia la composición de la tierra, los procesos y reacciones químicas que rigen la composición de las rocas y el suelo, el transporte de productos químicos en el tiempo y en el espacio, y la interacciones de estos productos con la hidrosfera y atmosfera (Oyarzun, Cubas, & Higuera, 2010).

Geoquímica para Gibson (1949) es la historia natural de los elementos químicos fundamentada en cuatro principios:

1. Contenido de los elementos en la tierra.
2. Distribución y migración de los elementos en los minerales, en las rocas y en las diferentes capas de la tierra, en espacio y tiempo.
3. Establecimiento de los principios y normas que rigen la cantidad y distribución de los elementos individualmente.
4. Clase de alteración o mineralización (Rodríguez Alvarez, 2018).

1.4.1. Aplicaciones de la Geoquímica.

Los primeros usos de la geoquímica fue realizada por el “Padre de la geoquímica”, el estadounidense Frank Wigglesworth Clarke, en trabajos para determinar la composición de la tierra en 1924. Luego por el Suizo Victor Moritz Goldschmidt que presento estudios sobre las leyes de distribución geoquímica de los elementos.

La geoquímica en búsqueda de recursos naturales alrededor del mundo ha tenido gran éxito. La metodología y técnica para localizar y delimitar zonas mineralizadas, es muy rápida y de muy bajo costo, la cual le convierte en una herramienta muy eficiente. También, es una herramienta para identificar y localizar emisiones de contaminación por actividades antrópicas o por razones naturales.

En base a estos usos se divide en dos aplicaciones, como lo es la Prospección Geoquímica y la Geoquímica Ambiental.

1.4.1.1. Geoquímica de prospección o prospección geoquímica.

Tomando como base los principios de la distribución y del ciclo de los elementos químicos en la corteza terrestre, la prospección geoquímica es parte de la geoquímica aplicada que tiene como objetivo la localización y estudio de las anomalías geoquímicas (Fortescue, 1980).

Clarke (1924) indica que se deriva de los principios de la distribución y los ciclos de los elementos químicos de la tierra, lo que él denominaba “evolución y desintegración de la materia”.

Hawkes (1957) define como uno de los métodos para la investigación minera que se basa en la medida sistemática de las propiedades químicas de las materias naturales. Las anomalías pueden estar presente por la presencia de cuerpos ígneos que están sometidos a una alteración metamórficos en profundidad y erosión o transporte en superficie.

Boyle (1979) establece que la prospección geoquímica es la aplicación de principios, datos geoquímicos y biogeoquímicos, con el objetivo de establecer yacimientos económicamente rentables de minerales, gas y petróleo (Viladevall i Solé, 2008).

1.4.1.2. Geoquímica Ambiental.

La geoquímica ambiental (figura 1.16) es parte de la geoquímica aplicada que no tan solo abarcaría el papel de aquellos materiales naturales y sus efectos en el medio ambiente sino también el producto de los elementos químicos de efecto antrópico.

Por lo tanto, la geoquímica ambiental analiza los efectos de los procesos químicos naturales o del hombre sobre el medio ambiente. Por ejemplo en el proyecto minero “Loma Larga” en relación a la presencia del yacimiento mineral se puede producir efectos de contaminación por metales pesados de tipo natural o derivados de la futura explotación minera (Oyarzun et al., 2010).

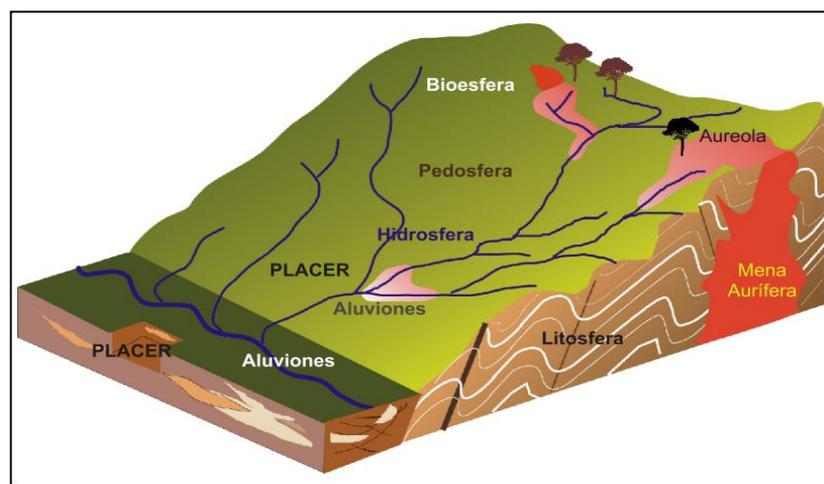


Figura 1.16. Paisaje Geoquímico.

Fuente: (Viladevall i Solé, 2008).

Fortescue (1980) define a la geoquímica ambiental como la geoquímica encargada de analizar los efectos antrópicos o actuando como una policía ambiental. Esta debería ampliar sus objetivos, abarcado a la prospección geoquímica y a la geo-epidemiología y definirse como “Geoquímica aplicada al medio ambiente” (Viladevall i Solé et al., 1996).

Uno de los temas que más debería poner énfasis la geoquímica ambiental es en la delimitación del grado y extensión de la contaminación. Por muchos años se aplicó la prospección geoquímica para determinar yacimientos; sin embargo, hoy en día se está utilizando estos mismos métodos para determinar el alcance de la contaminación causada por actividades mineras relacionadas con estos mismos yacimientos minerales.

1.4.2. Procesos geoquímicos en geoquímica ambiental.

La mayor parte de procesos químicos de origen natural se produce en la corteza terrestre y se puede clasificar en dos tipos: Procesos Primarios o ambiente geoquímico primario y Procesos secundarios o ambiente geoquímico secundario. Estos procesos son los que definen el “paisaje geoquímico”.

1.4.2.1. Procesos Primarios.

Según Beus y Grigorian (1977) son procesos que tienen lugar en la litósfera (figura 1.16) por debajo de la circulación de aguas metamórficas, originados principalmente por los mecanismos de la diferenciación magmática y por los procesos metamórficos que se desarrollan a temperaturas y presiones muy elevadas (Viladevall i Solé et al., 1996).

1.4.2.2. Procesos secundarios.

Estos procesos comprenden procesos de superficiales (figura 1.16) de erosión, formación de suelos transporte y sedimentación. Se caracteriza por condiciones de temperaturas y presiones muy bajas, presencia de abundante oxígeno libre y otros gases, y flujo de fluidos relativamente libre (López O, López M, Monsalve J, Carvajal B, & Pinto M, 2014). Los elementos en ambientes son liberados en suelos, agua, sedimentos y hasta en la atmósfera, estas se extienden mucho más que los procesos primarios y de aquí la utilidad en la prospección minera o para localizar anomalías de origen antrópico (Viladevall i Solé et al., 1996).

1.5. Geoestadística.

El término “Geoestadística” fue utilizado por primera vez por Georges Matheron en los años 60 y considerado como el padre de la Geoestadística, formalizando y generalizando matemáticamente técnicas desarrolladas por Daniel G. Krige (1941) que manejaba correlaciones espaciales para realizar predicciones de evaluación de reservas de oro en minas de Sudáfrica (Díaz Viera, 2002). La geoestadística se ha consolidado y desarrollado en los últimos 30 años como ciencia exclusivamente para el campo de la minería estimando valores desconocidos en base de valores conocidos, para la caracterización y estimación de los recursos y reservas. Esta técnica se ha extendido a campos como la hidrología, física del suelo, ciencias de la tierra y últimamente en la gestión ambiental (González, 2008).

Matheron (1962) define a la geoestadística como el formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de los fenómenos naturales (Díaz Viera, 2002).

Journel & Huijbregts (1978) establecieron que la geoestadística es una rama de la estadística que trata de fenómenos espaciales y su principal objetivo es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos.

Petitgas (1996) define como una aplicación teórica de las probabilidades a la estimación estadística de variables espaciales (Giraldo Henao, 2011).

Finalmente en términos mineros se define la geoestadística como la aplicación de las variables regionalizadas a la estimación de recursos mineros (Alfaro Sironvalle, 2007).

1.5.1. Etapas del análisis geoestadístico.

Valores en geoestadística, a diferencia de la estadística clásica, no se consideran independientes sino todo lo contrario, se suponen de manera implícita que están correlacionados, es decir que existe una dependencia espacial. Esto establece que entre más cercanos estén un punto de otro están más correlacionados y viceversa.

De tal manera el proceso de estimación y modelación de la función que describe la correlación espacial se llama análisis estructural y la estimación de valores en puntos no muestrales se aplica técnicas de interpolación “kriging” o a través de simulaciones condicionales (Díaz Viera, 2002).

Con lo expuesto anteriormente se puede decir que el análisis geoestadístico se divide en tres etapas:

1. Análisis exploratorio de datos.
2. Análisis estructural.
3. Predicciones (interpolación kriging u otros simuladores).

Estas etapas de análisis geoestadístico se puede observar en el flujograma del Capítulo 3, que analiza el mejor método de interpolación.

1.5.2. Gráficos estadísticos.

De la misma forma que se realiza un estudio exploratorio clásico y se cuenta con información georreferenciada se puede utilizar histogramas, diagrama de tallos y hojas y diagramas de caja y bigotes con el objetivo de identificar, localizar variabilidad, forma y observaciones extremas (Giraldo Henao, 2011).

1.5.2.1. Histogramas.

El histograma representa gráficamente las frecuencias de ocurrencia en función de valor, la cual consiste en dividir el rango de los valores en intervalos y visualizar la proporción de datos que caben dentro de cada intervalo (figura 1.17).

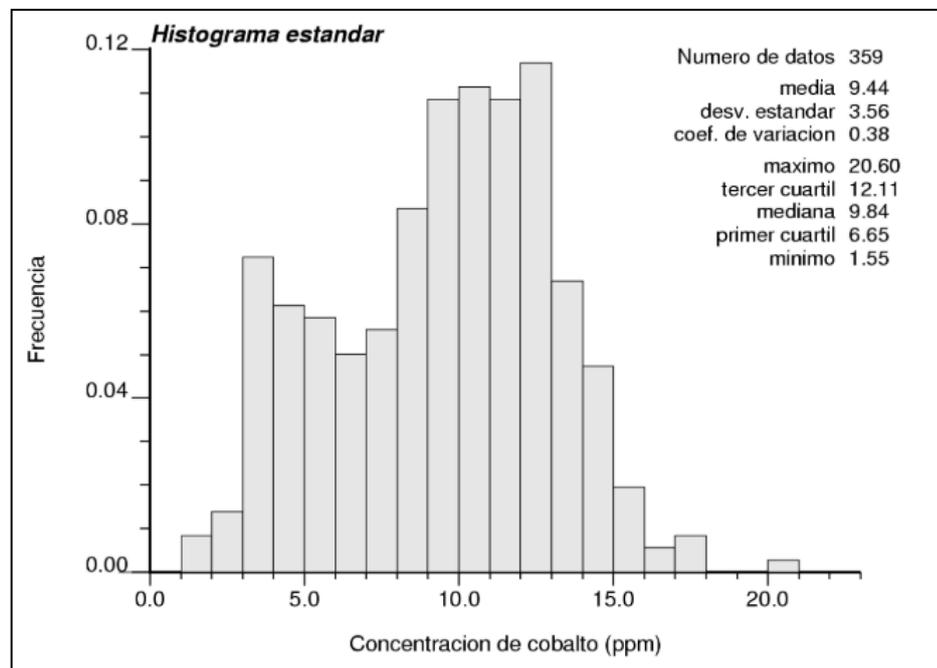


Figura 1.17. Ejemplo de histograma estándar.

Fuente: (Emery, 2013)

Realizar un histograma previo a las predicciones ayuda a detectar datos atípicos u *outliers*. Sin embargo datos atípicos no necesariamente son valores errados y jamás deberían ser eliminados sin una previa justificación, ya que podrían reflejar el comportamiento verdadero de una variable y eliminarlo impediría observar la ocurrencia de valores en lugares no muestreados (Emery, 2013).

1.5.2.2. Diagramas de caja y bigotes.

Estos gráficos utilizados por primera vez en 1952 por Spear y en 1977 Turkey los popularizó. Estos gráficos muestran la distribución de cinco grupos de datos: los extremos (hasta donde llegan los valores), los cuartiles inferior y superior (límites de la caja) y la mediana (línea horizontal dentro de la caja) (Soto Holt, 2009).

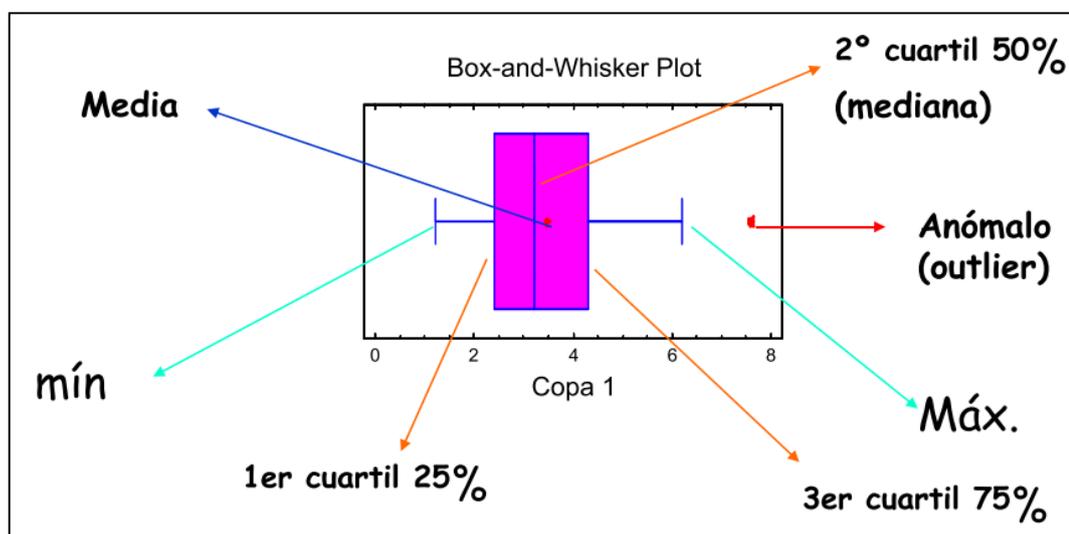


Figura 1.18. Ejemplo de diagrama de caja y bigotes.

Fuente: (González, 2008)

1.5.3. Valores resumen en geoestadística.

Es conveniente tener conocimiento de algunas funciones de la estadística básica que trata de los valores de distribución. Como por ejemplo:

1.5.3.1. Medidas de posición.

Media: es el promedio aritmético de los datos.

Mediana: es el valor en el cual la mitad de los valores están por encima de este valor y la otra mitad son menores a este.

Moda: es el valor más frecuente de la distribución.

Cuartiles o percentiles: valores que dividen a la población en igual número de datos.

Mínimo y máximo: establecen el rango en que se distribuyen los valores.

Estas medidas de posición se puede observar en la figura 1.18 del diagrama de caja y bigote.

1.5.3.2. Medidas de dispersión.

Varianza: describe la variabilidad de la distribución. Es la medida de la desviación o dispersión de la distribución.

Desviación estándar: es la raíz cuadrada de la varianza.

Coefficiente de variación: es la razón entre la desviación estándar y la media.

Rango intercuartil: es el ancho del intervalo entre el primer y el tercer cuartil que contiene la mitad de los datos (Emery, 2013).

1.5.4. Distribución Normal, ajuste de normalidad y coeficientes de correlación.

1.5.4.1. Distribución normal.

Una distribución normal quiere decir que la función de la densidad tiene una forma acampanada que es simetría con respecto de la media (valor máximo) y cuya dispersión crece a medida que aumenta la desviación estándar. La importancia de comprobar que valores tenga una distribución normal, se basa en que al momento de seleccionar un test estadístico para contrarrestar ciertos parámetros como la media, debe saberse si los mismos provienen de una población de distribución normal o no. De acuerdo a esto se seleccionara un test u otro (Soto Holt, 2009).

1.5.4.2. Ajustes de normalidad.

Prueba de Jarque-Bera: es una prueba asintótica de normalidad para grandes muestras, es decir es un proceso estadístico utilizado para determinar si una muestra o cualquier grupo de datos se ajusta a una distribución normal, tratando de validar hipótesis (ver figura 1.19).

$$H_0 = \frac{X - \mu_x}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n}}}$$

Figura 1.19. Ecuación para la prueba de normalidad de Jarque-Bera.

Fuente: (Mutis , 2014)

Pruebas de Anderson-Darling: uno de los métodos estadísticos más potentes para determinar la discrepancia con respecto a la normalidad. Se puede utilizar con un tamaño bajo muestral. En tamaños muestrales grandes puede rechazar la normalidad con tan solo pequeñas imperfecciones.

1.5.4.3. Coeficientes de correlación.

Coefficiente de correlación de Pearson: coeficiente de correlación más utilizado o también conocido como de correlación lineal, este determina hasta donde los valores de ambas variables son proporcionales entre ellos y no depende de las unidades de medida. El coeficiente toma valores entre 1 y -1, siendo 1 una correlación lineal perfecta positiva, -1 una correlación lineal perfecta pero negativa y 0 indica que tiene ausencia total de correlación lineal.

Coefficiente de correlación Spearman: este es un método no paramétrico que trabaja con los rangos de los datos y no son sus valores verdaderos y asume simplemente que los datos fueron medidos en escala ordinal que permite ordenarlos en rangos (Soto Holt, 2009).

1.5.5. Predicciones espaciales con el interpolador Kriging.

La definición “Kriging” es tomada del nombre del geólogo sudafricano Daniel G. Krige y que encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se caracteriza en minimizar el error cuadrático medio de predicción (Giraldo Henao, 2011).

Kriging es un término que ha sido utilizado para designar al mejor estimador lineal insesgado de un punto y al mejor promedio lineal de un bloque (Díaz Viera, 2002).

También lo definen como un interpolador exacto, esto quiere decir, la estimación de un lugar con un dato vuelve a dar el valor de este dato, mientras que la varianza kriging en este sitio es nula (Emery, 2013).

En expresiones mineras, el kriging consiste en encontrar la mejor estimación lineal que no produzca sesgo de valores de un bloque o zona considerando la información disponible (Alfaro Sironvalle, 2007).

Tabla 1.1. Tipos de proyecciones kriging y sus propiedades.

TIPO DE PREDICTOR	NOMBRE	PROPIEDADES
LINEAL	<ul style="list-style-type: none"> - Simple - Ordinario - Universal 	<ul style="list-style-type: none"> - Son óptimos si hay normalidad multivariada. - Independiente de la distribución son los mejores predictores linealmente insesgados.
NO LINEAL	<ul style="list-style-type: none"> - Indicador - Probabilístico - Log Normal, Trans-Gaussiano - Disyuntivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Son predictores óptimos

Fuente: (Giraldo Henao, 2011)

1.5.5.1. Tipos de Kriging.

Existen diferentes tipos de kriging, como por ejemplo:

Kriging ordinario o kriging puntual: asume que la variable es estacionaria y no tiene tendencia. Teniendo en su ecuación una constante desconocida (media), errores aleatorios y el lugar con unas coordenadas espaciales.

Kriging Universal: la ecuación es la misma que el ordinario pero tiene una tendencia específica que es modelada por una función polinómica, es decir que crea superficies que tienen en cuenta la autorrelación espacial de la variable a interpolar. No sólo predice valores, sino que proporciona el error de los mismos siendo estos un indicador. Esta técnica se aplica cuando se comprueba que los datos tienen tendencia lo que es todo lo contrario en los principios de estacionariedad del kriging ordinario.

Kriging Simple: es muy parecida al kriging ordinario salvo que se considera a la media de los datos una constante conocida y que la suma de los pesos nos da 1.

Kriging Indicador: establece a la variable de interés como valores continuos binarios. Es como si se pusieran 0 si esta debajo de algún valor y 1 si está por encima, de esta forma podríamos predecir la probabilidad de que la variable de interés este por encima de un determinado valor umbral el cual no es un interpolador lineal.

También existe un interpolador basados en más de una variable que es el **co-kriging** y dentro de este existe los mismos tipos de kriging (co-kriging ordinario, universal, simple e indicador, de probabilidad y disyuntivo).

Tanto el kriging como el co-kriging son métodos que como último objetivo es crear una superficie de valores estimados. En la figura 1.20 se muestran las exigencias que cada uno de estos interpoladores requiere (Moreno Jiménez, y otros, 2007).

Tabla 1.2. Tipos de kriging y las superficies que la generan.

Kriging y Cokriging	Predicciones	Errores típicos de la predicción	Mapas de Cuantiles	Mapas de Probabilidad	Errores típicos de los indicadores
Ordinario	X	X	X*	X*	
Universal	X	X	X*	X*	
Simple	X	X	X*	X*	
Indicador				X	X
Probabilidad				X	X
Disyuntivo	X ⁺	X ⁺		X ⁺	X ⁺
*Requiere la asunción de distribución multivariada normal. + Requiere la asunción de normalidad para los pares bivariados.					

Fuente: (Moreno Jiménez, y otros, 2007)

1.6. Estado del Arte.

Realizar modelamientos de la distribución geoquímica de metales pesados en suelos, agua o sedimentos fluviales hoy en día permite establecer la movilidad de los elementos en un medio contaminante; ya sea por la presencia de actividades antrópicas o naturales y establecer el origen de la presencia de éstos. Alrededor del mundo constantemente se están realizando estudios referentes a este tema, desde análisis de suelos en zonas de actividades mineras artesanales hasta análisis de la toxicidad de metales pesados en sedimentos de ríos por actividades industriales. A continuación se muestra recientes estudios geoquímicos que se realizan alrededor del mundo:

En México, específicamente en el Río Coatzacoalcos y la presa “La Zacatecana” se realizó una campaña de muestreos en sedimentos de río para determinar posteriormente mediante análisis de laboratorio los niveles totales de mercurio, ya que la presencia de actividades industriales en estas zonas hace que exista la presencia de este metal pesado. Se llegó a determinar una concentración que varía de 0,02 a 10 mg/kg de mercurio en sedimentos de los ríos que reciben descargas de estas actividades. Superando de esta forma los límites permisibles (Ramírez, 2009).

Se realizó un estudio de cadmio, plomo, cobre y zinc en los causes del río Huerva en Zaragoza-España. Se aplicó la metodología de prospección geoquímica y posteriormente se aplicó la caracterización de un modelo de dispersión de estos metales. Para ello se recolectaron doscientos once muestras de sedimento a lo largo del río Huerva y sus principales tributarios. Se aplicó un tratamiento clásico de estadística y después fueron analizados e interpretados los resultados para determinar las principales fuentes anómalas de estos elementos al cauce del río (Salazar, Collado, & Echarri, 2000).

Un estudio geoquímico-estadístico se realizó en sedimentos y quebradas del río Santa, departamento de Ancash-Perú. Se tomaron 57 muestras de sedimento para analizar catorce metales pasados. En el tratamiento estadístico de los datos se determinó que el zinc es el metal con más abundancia y el mercurio con menos presencia. También, se realizó un análisis del aumento de las concentraciones de estos metales a lo largo de las eras geológicas y un análisis de la presencia según la litología de la zona (Rivera, Chira, Campián, & Cornelio, 2008).

Se analizaron catorce metales pesados a lo largo de los ríos Chillón, Rímac y Lurín en Lima-Perú. Para esto se recolectaron 280 muestras de sedimentos, distribuidos a lo largo de estos ríos y sus principales quebradas. Se aplicó una metodología de un modelo de dispersión secundaria. Los resultados presentaron que el río Rímac tiene mayor presencia de metales pesados, seguido del río Chillón y finalmente el Lurín. Los metales presentan una muy buena distribución y se concentran en la parte superior (Rivera, Chira, Zambrano, & Petersen, 2007).

En la parroquia de San Bartolomé, cantón Sigsig, provincia del Azuay-Ecuador. Se tomaron 106 muestras de suelo en un área agrícola para determinar la concentración de metales pasados, mediante la aplicación de un modelo de dispersión

geoquímica secundario del yacimiento polimetálico y piscinas de relave abandonadas. Este estudio determinó áreas con altas concentraciones de metales pesados, que sobrepasan los umbrales que establece la normativa ambiental ecuatoriana. Finalmente, se propuso alternativas para el tratamiento de pasivos ambientales presentes en la zona (Valencia, 2017).

Se realizó una investigación de la distribución de metales pesados en Pengerang al sur de Malasia en sedimentos superficiales del área de extracción de Bauxita. Se determinó que existe un exceso de Pb y Se que sobrepasa los valores recomendados en algunos lugares de la zona. Este estudio se destaca por su incidencia en posibles riesgos ecológicos y la salud humana (Kusin, Azani, Hasan, & Sulong, 2018).

En las riberas del río Milo-Nueva Guinea, por primera vez se muestreo y se analizó para caracterizar geoquímicamente elementos principales, trazas y tierras raras para determinar los principales impactos ambientales por la presencia de minería artesanal y actividades antropogénicas. Los resultados de los análisis geoestadísticos determinaron que todos los sedimentos están más concentrados y enriquecidos naturalmente. Finalmente este estudio puede representar una referencia con respecto al desarrollo de la industria minera y el aumento de la población por la abundante presencia de recursos minerales (Kusin et al., 2018).

Al sur del departamento de Rivera-Uruguay se encuentra el pueblo de minas. Tiene la presencia de un yacimiento hidrotermal explotado a cielo abierto. Se realizó el estudio estadístico de datos con el fin de cuantificar las diferencias entre el método de muestreo estándar con el realizado en condiciones ideales. Mediante técnicas geoestadísticas se determinó la que los focos de alta ley no existe correlación entre el muestreo estándar y el muestreo ideal (Soto Holt, 2009).

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS

2.1. Tipo de estudio.

El tipo de estudio es descriptivo, exploratorio y de campo, ya que el objetivo es encontrar las variables de la caracterización geoquímica del área minera “Loma Larga”, para ello se tomaron muestras en el campo y delimitar las posibles áreas o distritos de interés metalogénico.

2.2. Muestreo de sedimentos.

Las campañas de reconocimiento y recolección de muestras, se basó en el método estándar que establece la FOREGS en su trabajo *Geochemical Mapping Field Manual* (Salminen et al., 1998) y en el trabajo de la Universidad Central del Ecuador ‘Manual para los formularios de muestreo’ (Napoleón, 2012) que establece protocolos para el análisis de condiciones como el clima, geología, etiquetado y ubicación de la zona muestreada.

Se realizó la primera campaña de reconocimiento de campo, que tuvo como objetivo principal capacitar a estudiantes de la carrera de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay, que acompañaron en el proceso de recolección de muestras, para que ejecutaran los protocolos planteados. Así como, recopilar información de estudios geoquímicos realizados anteriormente en la zona de estudio, establecer una cooperación con la empresa encargada del proyecto para las diferentes campañas de muestreos y reconocimiento de campo y establecer puntos estratégicos y significativos.



Figura 2.1. Tamizado de sedimentos fluviales.

Se recolectó 60 muestras de sedimento de los principales ríos de la zona de influencia del proyecto minero Loma Larga y sus principales tributarios manteniendo una distancia intermuestral de aproximadamente 1 km. Cada salida contaba con un líder de grupo, estudiantes de apoyo y un guía con el conocimiento de cómo llegar al punto de muestreo propuesto. En el punto se identificaba la zona de acumulación de sedimentos y con la ayuda de una pala se extrajo estos sedimentos para poder tamizarlos en húmedo a un tamaño menor a 250 μm . Se estimó de 200 a 300 gr de material y se trasladó en fundas plásticas previamente etiquetadas con el código de la muestra, coordenadas y fecha, con fotos para su respaldo y se llenó el formulario de muestreo. Ver anexo 2.

2.3. Preparación de la muestra.

Las muestras fueron desecadas en un horno eléctrico a una temperatura de 50 °C de 2 a 3 días dependiendo de la cantidad de agua en la muestra. Una vez seca se cuarteaba hasta obtener 100 gr aproximadamente (ver Anexo 3). Esta cantidad entró en un proceso de molienda en un pulverizador de tambor por aproximadamente 10 minutos hasta obtener unos 30 gramos de material menor a una malla 200 (75 μm).



Figura 2.2. Secado, triturado y tamizado de la muestra.

2.4. Ensayos de laboratorio.

La preparación y análisis de laboratorio se aplicó el método EPA 3052, que es una digestión nítrica asistida por microondas. El método EPA 3052 es aplicable para la digestión total de elementos traza como: aluminio, antimonio, arsénico, boro, bario, berilio, cadmio, calcio, cromo, cobalto, cobre, hierro, plomo, magnesio, mercurio, molibdeno, níquel, potasio, selenio, plata, sodio, estroncio, talio, vanadio y zinc.

Para extraer el plomo se tomó una muestra representativa de 5 gr con 10 ml de ácido nítrico (HNO_3) concentrado al 65 % y se digirió en un microondas CEM Mars 6 a 180 ± 5 °C, la rampa de calentamiento duró 20 minutos hasta llegar a los 180 °C y otros 15 minutos de mantenimiento para lixiviar los cationes que contengan plomo. Esta solución se filtró con papel filtro de laboratorio y se aforó a 100 ml con agua destilada.

Una vez aforado, se analizó la muestra mediante espectrofotometría de absorción atómica en un espectrofotómetro THERMO SCIENTIFIC ICE 3000 Series. Se trabajó en llama con una mezcla de gases aire/acetileno en el laboratorio químico de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay (ver anexo 3) hasta obtener los resultados de las concentraciones de Pb (ver Anexo 1).



Figura 2.3. Pesado, digestión con ácido nítrico, filtrado y aforado de la muestra.

CAPÍTULO 3

VALIDACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Para iniciar el proceso de validación e interpretación de datos se siguió el flujograma que indica el mecanismo para elegir el método de interpolación adecuado presentado en el “Taller de Geoestadística” del Instituto Espacial Ecuatoriano, impartida por Julio Moreno Izquierdo, como base metodológica para el presente capítulo y que se muestra en la Figura 3.1.

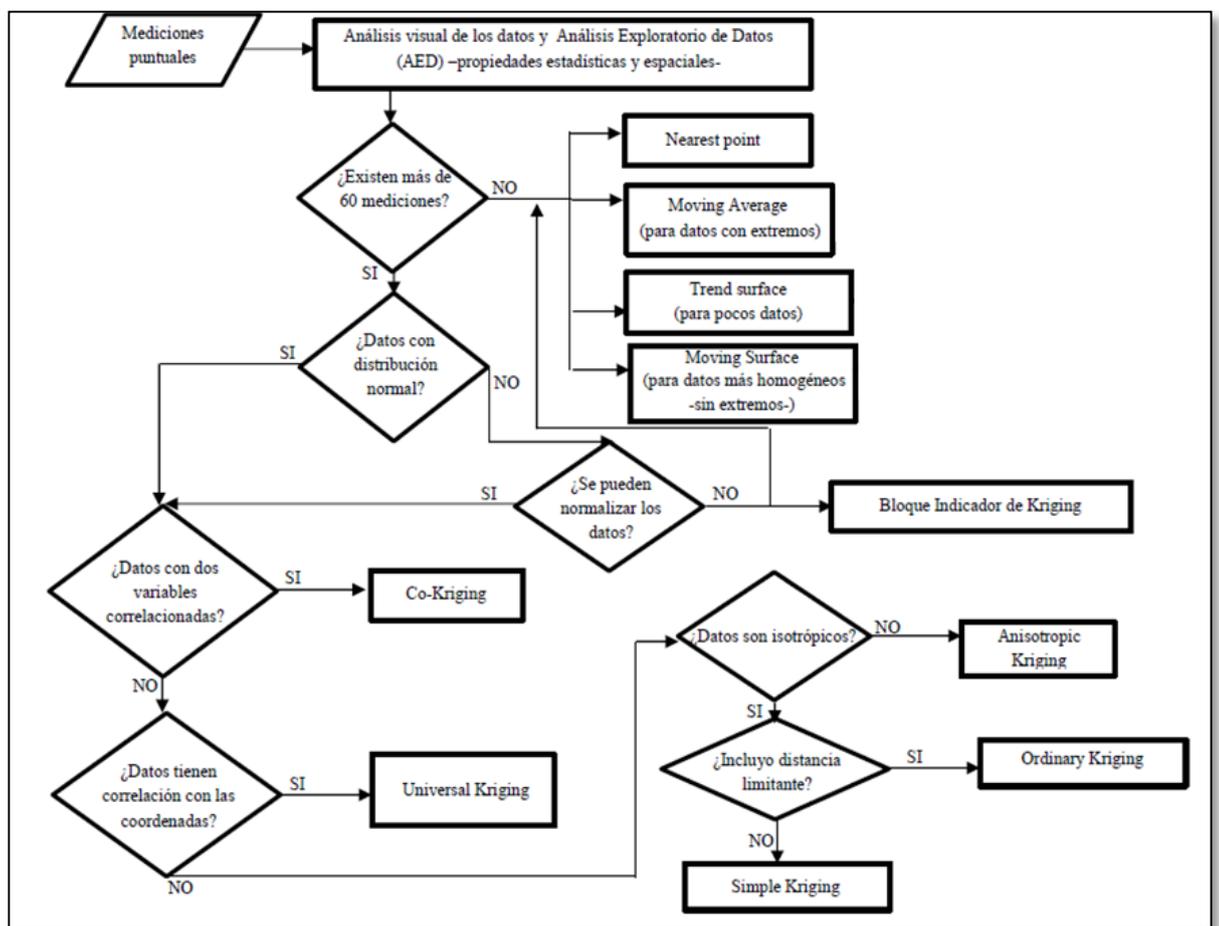


Figura 3.1. Flujograma para elegir el método de interpolación.

Fuente: PowerPoint del “Taller de geoestadística” de Julio Moreno Izquierdo – Dalence.

En primera instancia se realizó un recorrido visual de los datos de Pb obtenidos en el laboratorio y una comparación con el lugar de muestreo. Se realizaron 60 muestreos que presentan no-normalidad, sin embargo estos datos se pueden normalizar. Se realizó también mediciones de Cu que presentan una correlación muy baja con

respecto al Pb (ver tabla 3.1) pero presenta una considerable correlación con las coordenadas del eje X de la microcuenca del río Irquis (tabla 3.2) y con el eje Y de la microcuenca que alimenta al río Bermejós (tabla 3.3).

3.1. Pruebas de normalidad de los datos.

Antes de iniciar el análisis estadístico, es necesario realizar pruebas de normalidad; es decir, que los resultados de Pb cumplan una distribución normal como factor de seguridad en los cálculos, por esta razón se realizaron histogramas y pruebas de Jarque Bera y Anderson Darling que nos ayudaron a determinar la no-normalidad de la distribución de los datos, debido a que los tratamientos geoestadístico a aplicarse tienen el carácter de ser paramétricos, los datos fueron ajustados para conseguir la normalidad de su distribución, para ello se aplicó métodos de logaritmo, box-cox y de Jhonson, el método que más se apegó a la normalidad deseada fue de Jhonson como se pueden ver en el Anexo 6.

3.2. Diagrama de caja y bigote de Pb.

Datos con altas concentraciones de Pb generalmente están presentes muy cerca de la mineralización que puede falsear la información, para ello, se realizó un Box-Plot de los datos de Pb (figuras 3,3 y 3,4) que indican valores altos o bajos que pueden ser analizados; también, se puede identificar datos anómalos que se pueden encontrar ocultos estadísticamente.

El grupo muestral del río Colancay (BCLC-08) presentan valores bastante altos y un valor muy anómalo de Pb que podría alterar información (ver anexo 1). Sin embargo, por motivos de ubicación del punto muestral es de suma importancia incluirlo dentro de los cálculos estadísticos; ya que, se encuentra a 1,5 km de distancia del depósito mineral, la cabecera de este río se encuentra un canal de riego que se dirige a San Gerardo que está a menos de 1 km y este río alimenta al río Portete y posteriormente al río Tarqui.

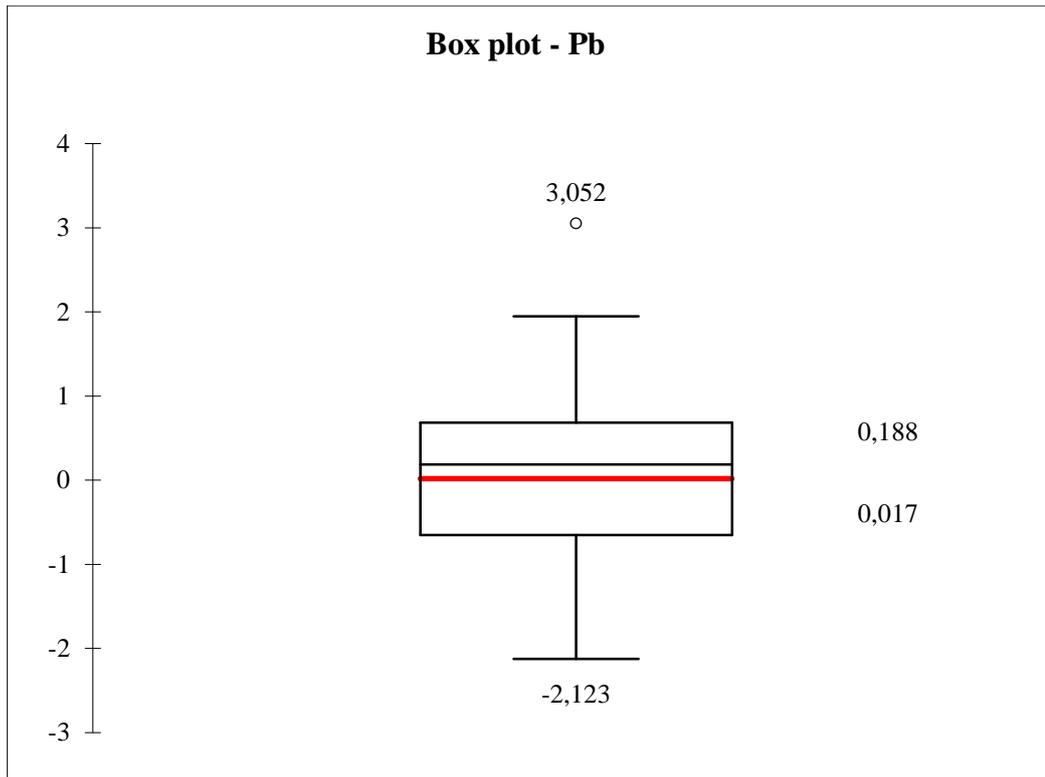


Figura 3.2. Diagrama de caja para valores de Pb.

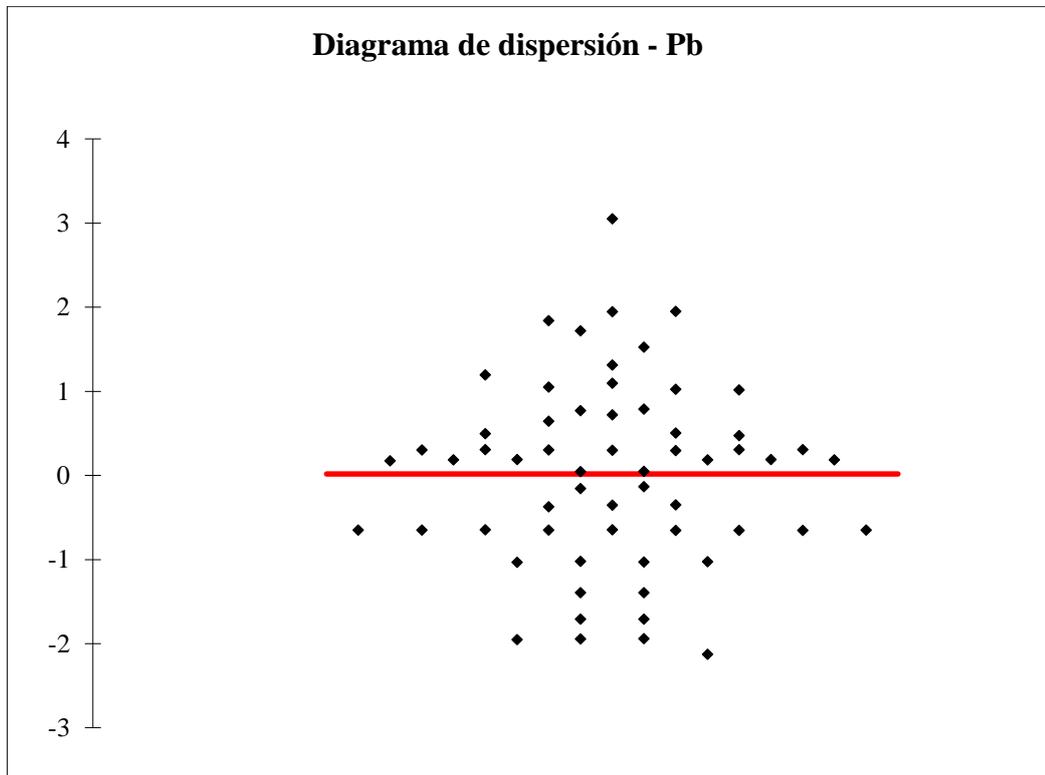


Figura 3.3. Diagrama de dispersión de Pb.

3.3. Pruebas de correlación lineal de Pearson con el Cu.

Se realizó una correlación lineal de Pearson para determinar la asociación que existe entre el Pb y el Cu dentro de la zona muestral. Los resultados muestran un coeficiente de correlación lineal positivo inferior a 0,4 (tabla 3.1), esto quiere decir que existe muy baja asociación entre estos dos metales.

Tabla 3.1. Coeficiente de correlación Pb-Cu.

Matriz (Coef. de correlación de Pearson):		
	Pb	Cu
Pb	1,000	0,398
Cu	0,398	1,000

3.4. Correlación con las coordenadas.

De igual manera se procedió a realizar otra correlación con respecto a las coordenadas pero se vio la necesidad de analizar esta correlación y comportamiento con las principales cuencas de los ríos del área de estudio como son el río Iruquis y el río Bermejós que aportan con sus aguas a ríos como el Tarqui y el Yanuncay, respectivamente.

3.4.1. Correlación con las coordenadas del río Iruquis.

Tabla 3.2. Coeficiente de correlación Pb-coordenadas en X

Matriz (Coef. de correlación de Pearson):		
	X	Concentración_Pb
X	1,000	-0,664
Concentración_Pb	-0,664	1,000

Los resultados de correlación encontrados permiten corroborar que la hipótesis de la dispersión geoquímica se valida toda vez que las concentraciones de Pb van disminuyendo conforme espacialmente nos alejamos de la zona mineralizada identificada (figura 3.5), el valor de correlación lineal de Pb con respecto a la coordenada X es significativo en esta dirección.

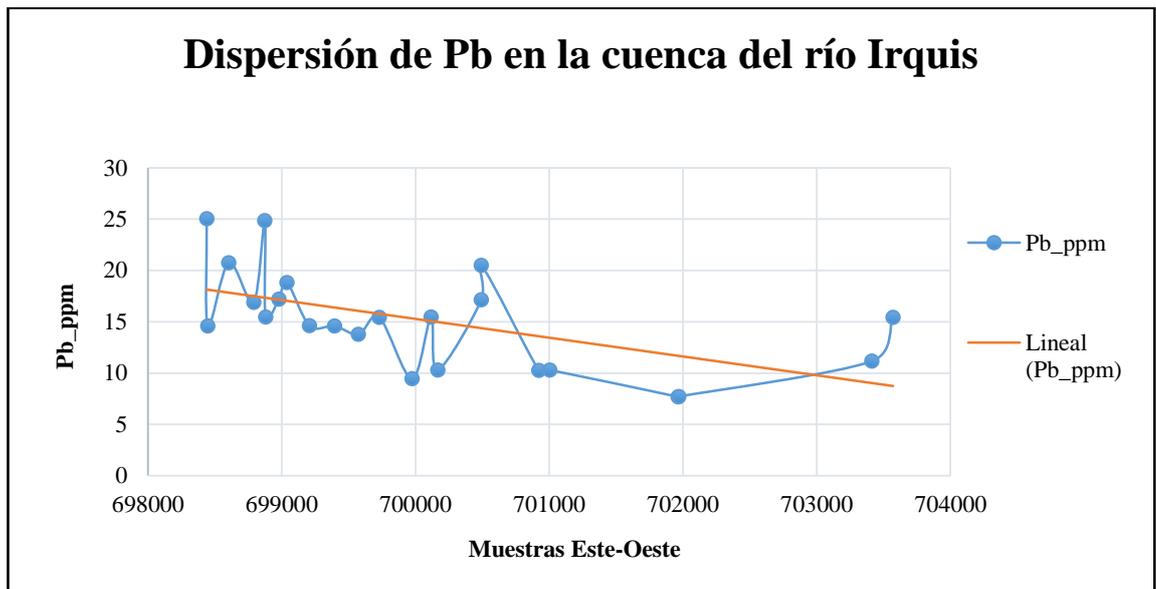


Figura 3.4. Dispersión de Pb en la cuenca del río Irquis.

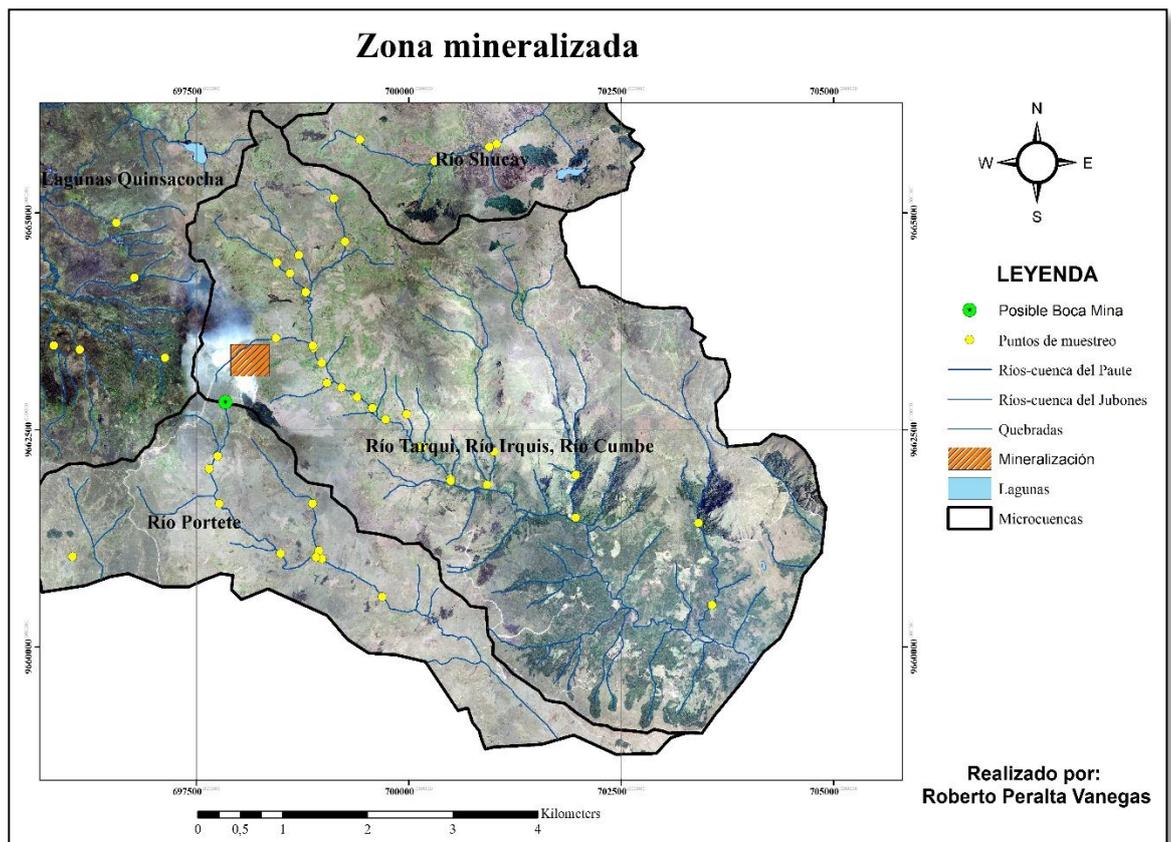


Figura 3.5. Mineralización identificada proyectada desde la microcuenca del río Irquis.

3.4.2. Correlación con las coordenadas del río Bermejos.

Tabla 3.3. Coeficiente de correlación de Pb-coordenada en Y.

Matriz (Coef. de correlación de Pearson):		
	Y	Concentración_Pb
Y	1,000	-0,433
Concentración_Pb	-0,433	1,000

Los resultados de correlación encontrados permiten corroborar que la hipótesis de la dispersión geoquímica se valida toda vez que las concentraciones de Pb van disminuyendo conforme espacialmente nos alejamos de la zona mineralizada identificada (figura 3.7), el valor de correlación de Pb con respecto a la coordenada Y es significativo en esta dirección.

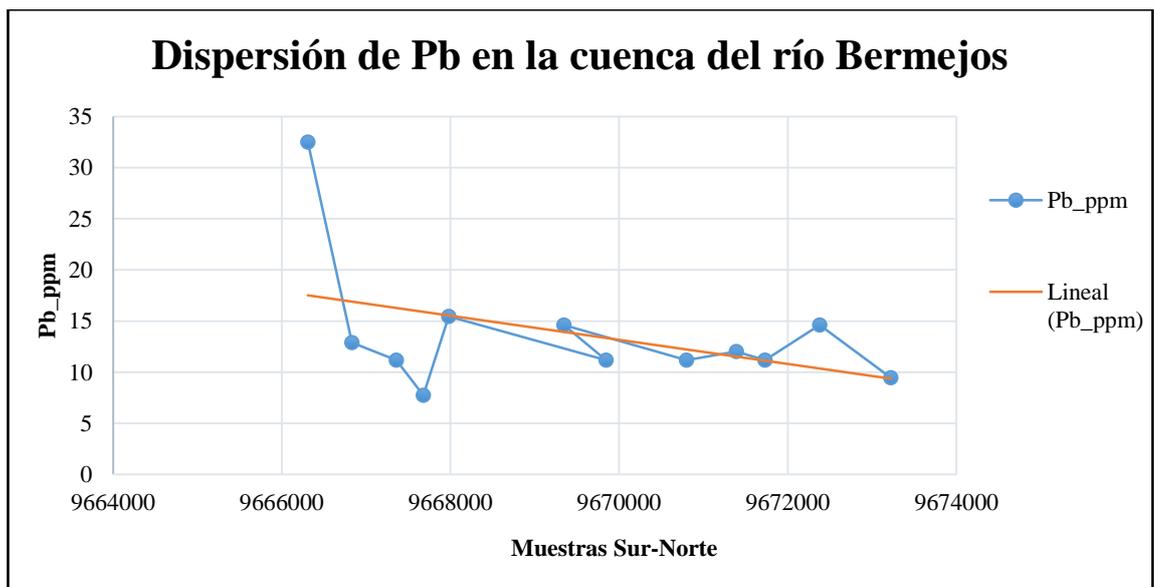


Figura 3.6. Dispersión de Pb en la cuenca del río Bermejos.

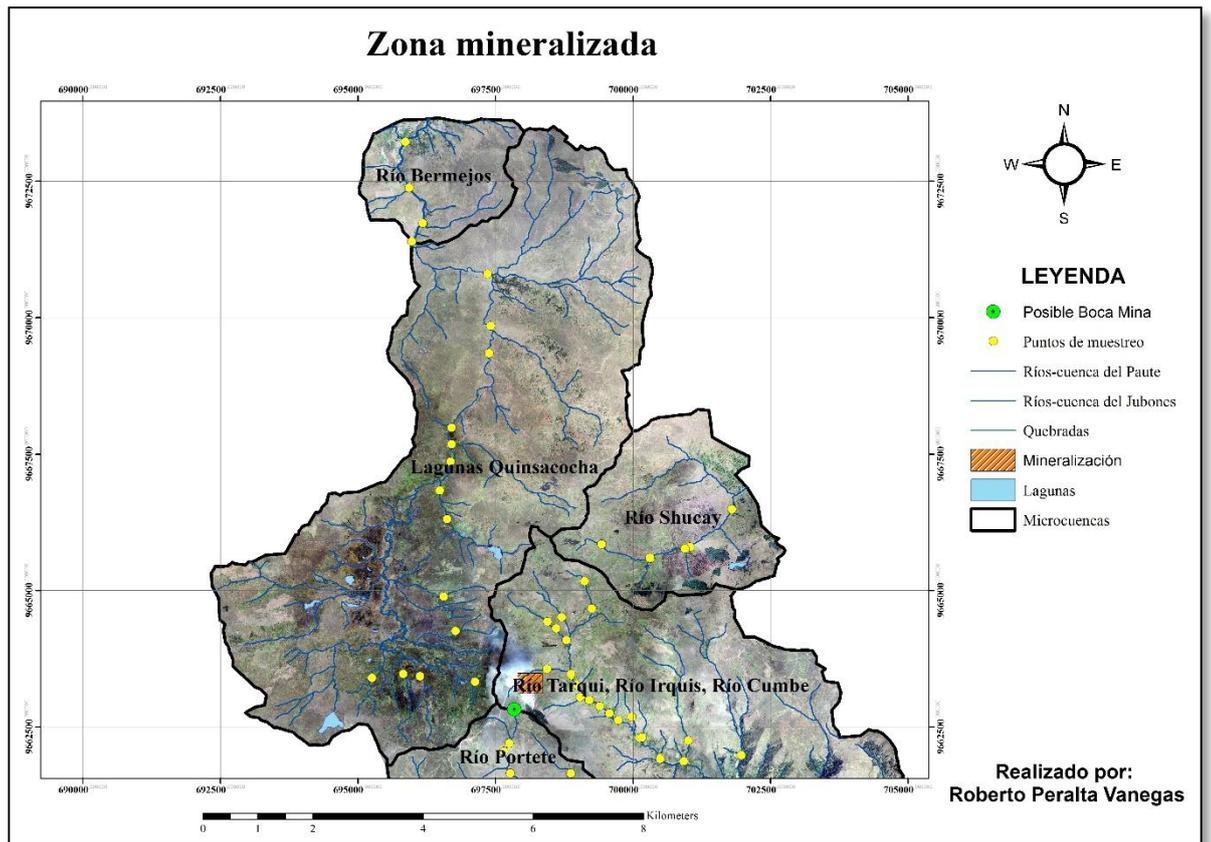


Figura 3.7. Zona mineralizada proyectada desde la microcuenca que alimenta al río Bermejos.

3.5. Elaboración del modelo de dispersión.

Con la ayuda del Kriging Universal se interpolaron los datos de Pb normalizados obteniendo un mapa de dispersión muy satisfactorio porque el rango de error es inferior al 5% (Figura 3.8). Sin embargo por motivos de interpretación y análisis de resultados se realizó un mapa con valores de Pb reales el cual entregando un mapa de características similares al de valores normalizados como se puede ver en la figura 3.9.

El modelo de dispersión geoquímica generado cumple las condiciones de la hipótesis planteada; es decir valores entre 80 y 275 ppm se encuentran muy cercanos a la mineralización identificada y un comportamiento razonable que varía entre 6 y 22 ppm en la mayor parte de la zona de estudio, de esta manera se ha identificado 2 zonas de potencial anomalía geoquímica positiva.

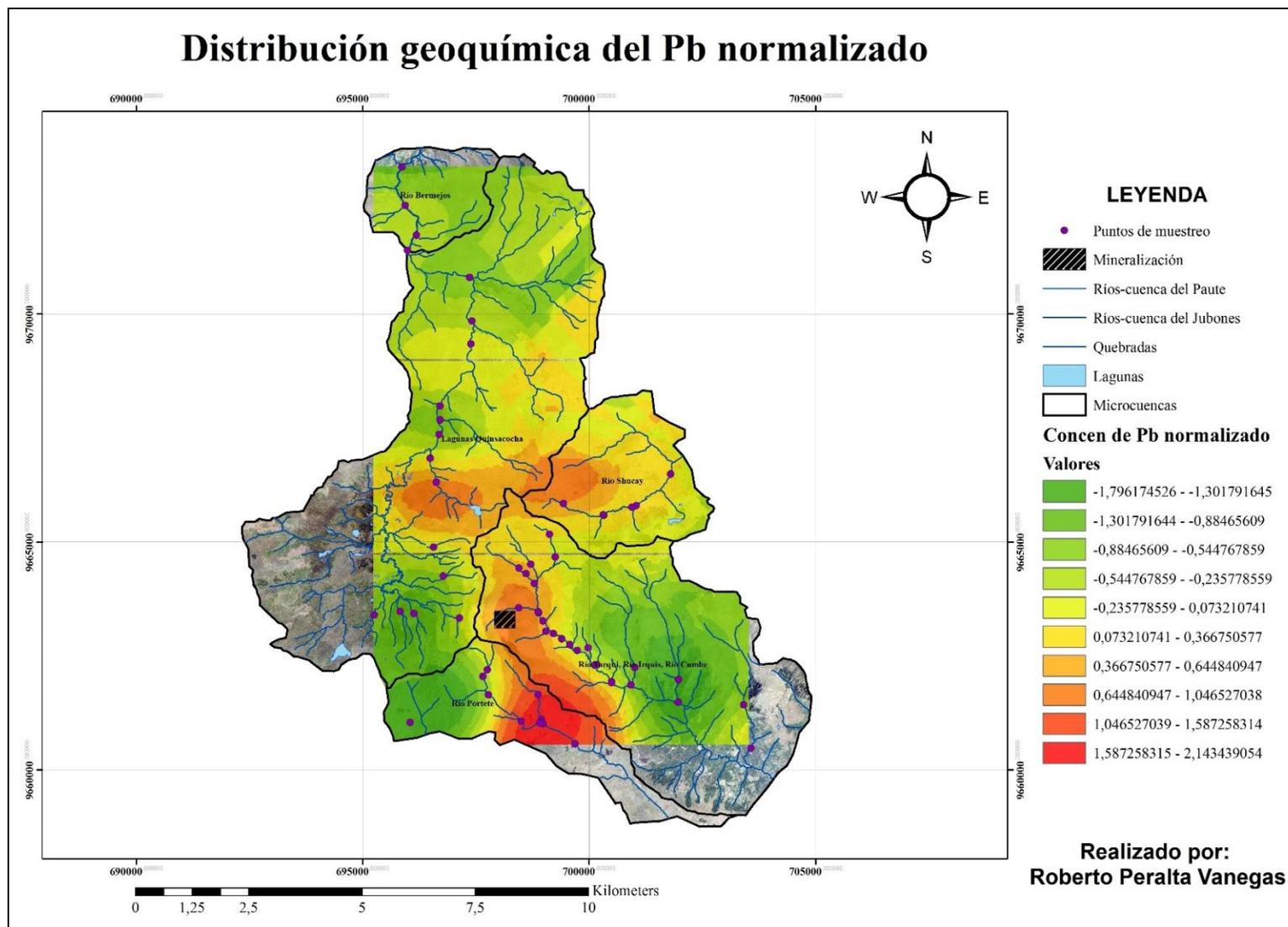


Figura 3.8. Mapa de la distribución geoquímica normal de Pb.

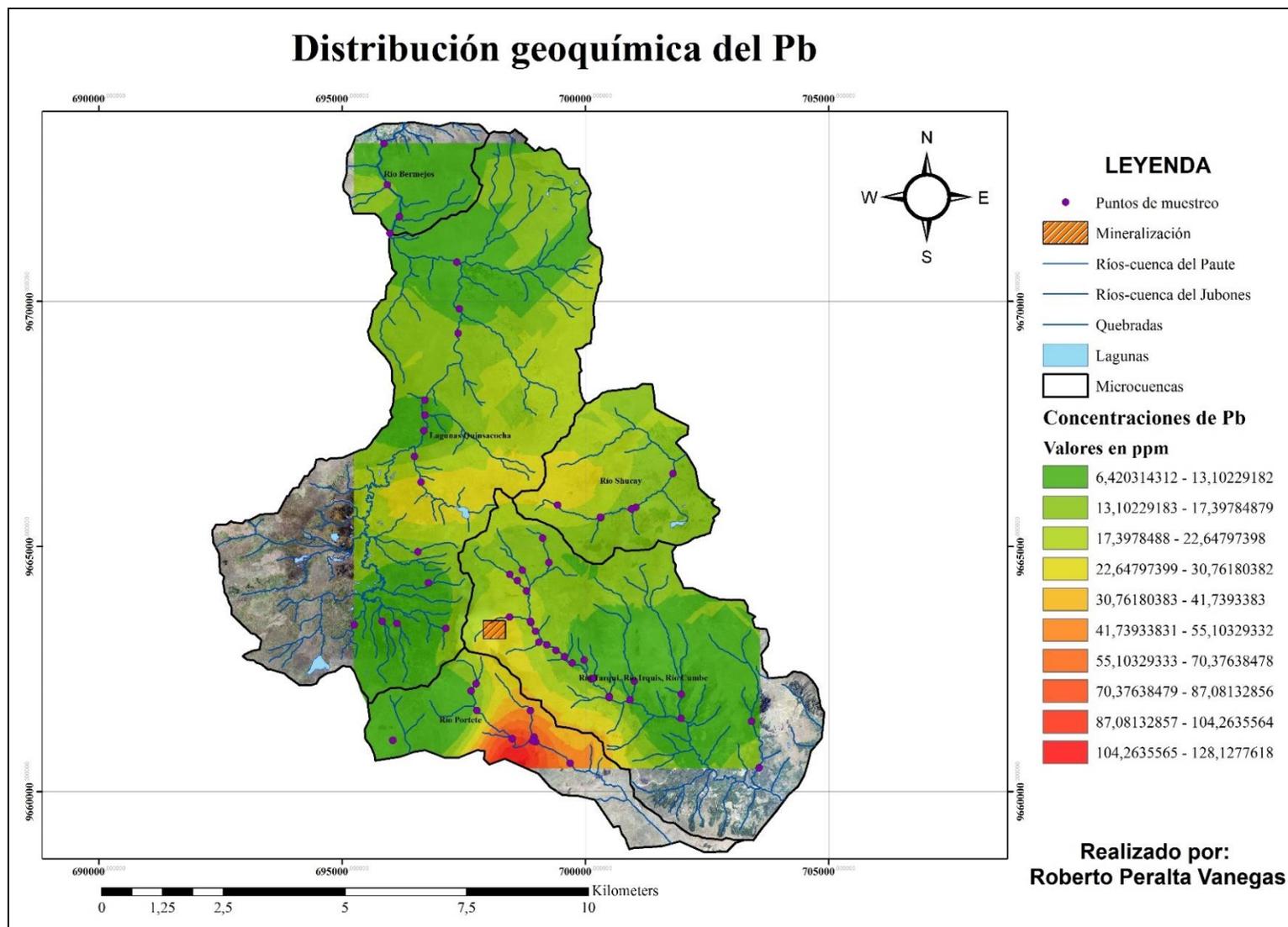


Figura 3.9. Mapa de la distribución geoquímica de Pb.

En la cabecera del río Shucay en dirección oeste hasta la laguna Chuyacocha y que posteriormente alimenta al río Bermejos se encuentran valores entre 22 y 30 ppm, estos datos parecen bastante coherentes ya que la ubicación de esta anomalía se encuentra a menos de 2 km de distancia de la zona mineralizada.

En la cabecera de la microcuenca del río Portete se encuentran datos anómalos que van desde 40 hasta 128 ppm y es la zona con mayor grado de concentración de Pb en toda el área de estudio. Al no registrarse ninguna actividad antrópica en las inmediaciones de esta zona y que sea foco de contaminación se presume que puede ser el resultado natural de la presencia de varias zonas mineralizadas que están aledañas a la mineralización principal y que no son económicamente rentables pero con la capacidad suficiente para dotar una notable cantidad de Pb a los sedimentos de las quebradas cercanas. Esta presunción se basa en que existe una mineralización de alta sulfuración y con elevadas cantidades de óxidos. Cabe destacar que en la parte superior de esta microcuenca existe un canal que aporta agua a la comunidad de San Gerardo, además el área con alta concentración se encuentra a menos de 2 km de la posible boca mina de proyecto. Sin embargo como es tendencia en este estudio, que mientras más se aleja de la mineralización la concentración de Pb desciende y por no contar río abajo con actividades antrópicas de consideración.

Los resultados presentados en estos mapas de dispersión geoquímica de Pb son generados a raíz de datos obtenidos de muestreos de sedimentos fluviales, por este motivo el margen de error en las predicciones son mucho más elevadas conforme se aleje de los ríos o quebradas. Pero son indicadores de alta precisión para determinar focos de contaminación o para ubicar zona donde exista de forma natural la lixiviación de metales pesados que son transportados por el agua y depositados en estas cuencas sedimentarias.

3.5.1. Resultados en la microcuenca del río Irquis.

Es una de las microcuencas más estudiadas desde la cabecera hidrográfica del río Irquis hasta 6 km aguas abajo, incluyendo sus principales tributarios y teniendo una distancia intermuestral de 200 a 500 m. Ya que en esta microcuenca se encuentra ubicada la mineralización (figura 3.10) y los afluentes aledaños son los más influenciados por el transporte y sedimentación de metales.

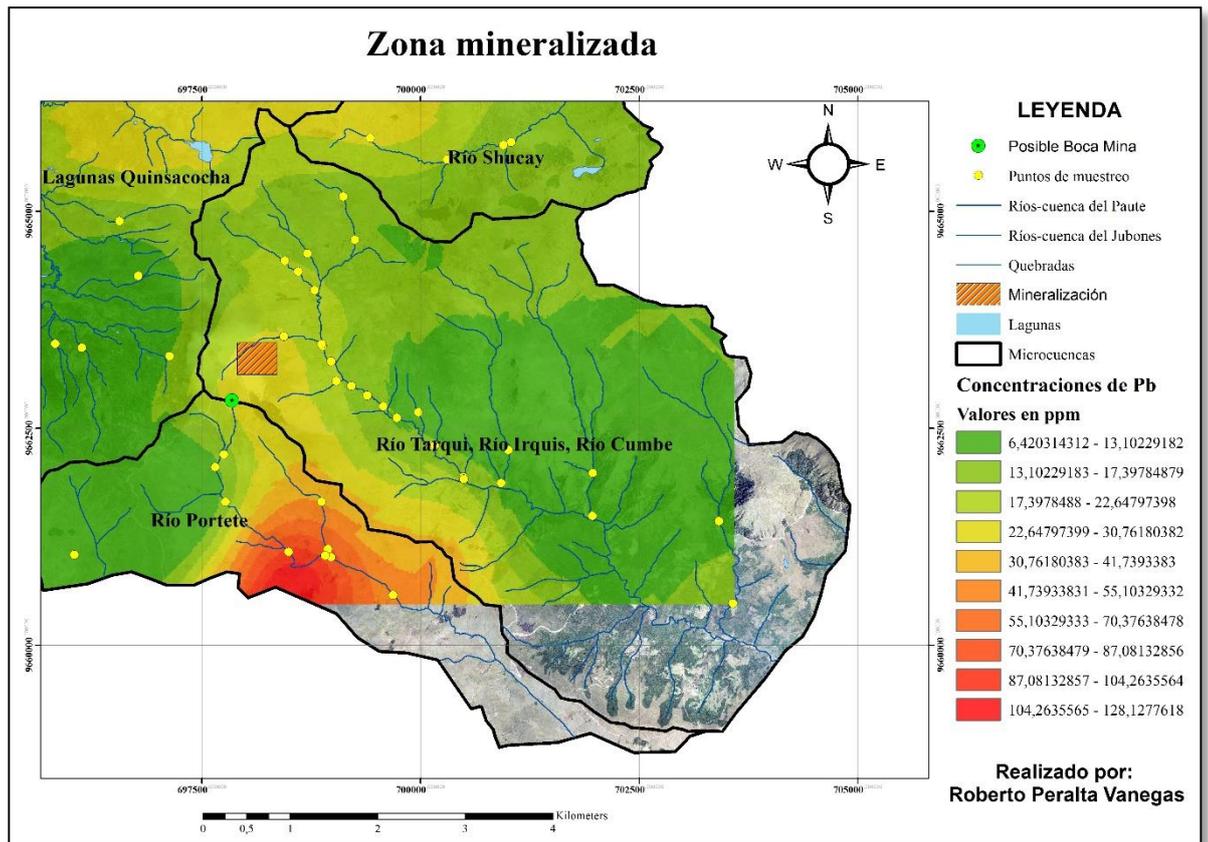


Figura 3.10. Modelo de dispersión geoquímica de Pb en la cabecera hidrográfica de la microcuenca del río Iruquis.

La concentración de Pb oscila en un rango muy moderado entre 6 y 22 ppm a lo largo del río principal. Teniendo los valores más elevados en la parte superior y conforme avanza el río aguas abajo, alejándose del depósito mineral, las concentraciones disminuyen considerablemente. La quebrada que se encuentra sobre la mineralización (ver Figura 3.10) tiene valores de 25 ppm, que están fuera de este rango, pero al llegar al río principal estos valores bajan de 15 a 20 ppm. No se identificó ninguna actividad antrópica de consideración para que altere los resultados, de esta manera estos valores son el resultado de alteraciones naturales que afectan a las rocas y suelos.

3.5.2. Resultados en la microcuenca del río Bermejós.

Esta es otra de las microcuencas que se realizó el análisis por tener al río Bermejós y que posteriormente alimenta al río Yanuncay, el cual es uno de los ríos más importantes de la ciudad de Cuenca (Figura 3.11).

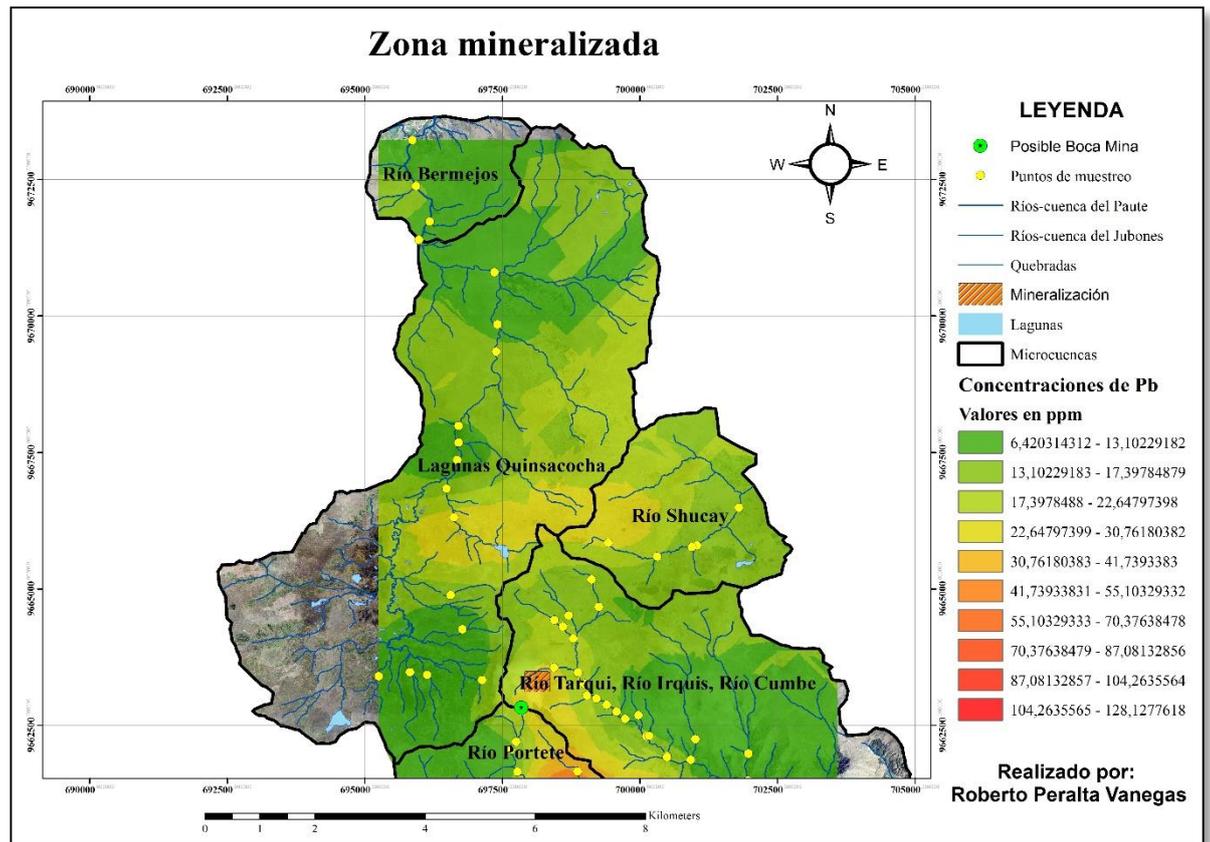


Figura 3.11. Modelo de dispersión geoquímica de Pb en la cabecera hidrográfica de la microcuenca del río Bermejos.

A lo largo de todo el río Bermejos, que va desde la laguna de “Chuyacocha” hasta la comuna de Soldados, en general presenta concentraciones de Pb que están dentro del rango de 6 hasta 22 ppm (Figura 3.11). Sin embargo en la zona de esta laguna presenta valores un poco atípicos para este grupo muestral con concentraciones que van desde 25 a 30 ppm pero tendencia que presentan son similares a las del río Irquis, es decir en la parte superior de la fuente hídrica están las concentraciones más altas y conforme se aleja los valores disminuyen hasta tener concentraciones de 6 a 12 ppm en las cercanías de la comunidad de Soldados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

Los gráficos de dispersión de Pb han permitido analizar, determinar y localizar los umbrales de anomalías geoquímicas de este metal en sedimentos fluviales en la zona de influencia del proyecto minero Loma Larga. También ha sido de gran ayuda para estimar las potenciales causas de éstas anomalías.

Al finalizar este trabajo se ha comprobado la hipótesis planteada de la distribución geoquímica de Pb, con la ayuda del tratamiento estadístico y con el modelo de dispersión generado. Teniendo una media esperada de 22 ppm en casi toda la zona y que es relativamente baja comparando con los resultados de otras investigaciones similares en otros lugares (Salazar et al., 2000) pero con valores superiores a los 65 ppm encontrados en las partes altas de la zona de estudio.

Las características de las aureolas asociadas a las anomalías detectadas en las partes altas de la microcuenca del río Portete son por la presencia de un yacimiento mineral de alta sulfuración metálica, debido a la meteorización natural de estas rocas que se encuentran dispuestas por toda esta zona de estudio y que son transportadas por el agua a las cuencas sedimentarias de ríos y quebradas.

El comportamiento del Pb en las microcuencas de los ríos Irquis y Bermejos son muy parecidos, manteniendo valores entre 20 y 25 ppm en las partes altas y una tendencia de descenso en las concentraciones hasta llegar a rangos de 9 a 10 ppm en las partes bajas.

La metodología empleada en la toma de muestras y tratamiento, hasta obtener los resultados tiene muy buen sustento analítico para poder generar futuros estudios y sobre todo realizar monitoreos ante una posible explotación minera y relacionar esta actividad con la movilidad de los metales pesados.

Finalmente, la utilización del kriging universal como interpolador fue satisfactorio y lógico, porque permitió realizar una base de error y probable error con un resultado inferior al 5 % considerando el análisis de 60 muestras.

Recomendaciones.

Se sugiere realizar el análisis de correlación con otros metales pesados como arsénico, cadmio, estaño, cromo y zinc, que son característicos en zonas mineralizadas de alta sulfuración y con la utilización del interpolador Co-kriging para mejorar el ajuste del modelo de dispersión geoquímica de Pb.

Es de vital importancia poder realizar un segundo muestreo principalmente en las zonas de valores atípicos y verificar esta información realizando análisis de la movilidad de Pb en agua.

Es como objeto de estudio una interrogante generada al transcurso de este trabajo: ¿Cuál es la dinámica con la que el contenido de Pb y los demás metales pesados en los sedimentos pasan al sistema hídrico?

El modelo de dispersión geoquímica nos permite establecer de primera fuente el estado natural de concentraciones de metales pesados, una vez iniciados las actividades de explotación minera se asume que el modelo original puede sufrir variaciones al cambiar las condiciones de sitio (mina y relavera) que alteran la movilidad de metales pesados mediante procesos de acidificación del agua especialmente. Es necesario entonces generar un proceso de monitoreo continuo con el propósito de verificar la variaciones en el modelo geoquímico original.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro Sironvalle, M. A. (2007). *Estimación de Recursos Mineros. Escuela Nacional Superior de Minas de París*.
https://doi.org/www.cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/ALFARO_Cours_00606.pdf
- Barros Q, S., Urgiles, V., Orellana, D., & Astudillo, P. (2016). *Análisis de registros de biodiversidad en los páramos de las concesiones mineras de INV Metals, en el sur de los Andes Ecuatorianos*.
- Barros Quito, J. S. (2015). *Influencia de las actividades antropogénicas sobre la comunidad de aves de páramo en los Andes sur del Ecuador*.
- Cox, J. J., Altman, K. A., Robson, D. M., Masun, K., Robertson, L., & Diaz, C. A. (2016). *TECHNICAL REPORT ON THE LOMA LARGA PROJECT , AZUAY PROVINCE , ECUADOR* (Vol. 1).
- Díaz Viera, M. A. (2002). *Geoestadística aplicada. Instituto de Geofísica*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Emery, X. (2013). *Geoestadística. Universidad de Chile*.
- Giraldo Henao, R. (2011). *Introducción a la geoestadística (Teoría y Aplicación)*. Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0627-7>
- GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO PARROQUIAL DE SAN GERARDO. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de San Gerardo (Propuesta y Modelo de gestión).
- González, G. (2008). Análisis Geoestadístico-Concepción González García (2008).
- IAMGOLD Technical Services. (2009). Quimsacocha Gold Project , Azuay Province , Ecuador NI-43-101 Technical Report Report prepared by, (February).
- INSIGMA Cía. Ltda. (2014). *Elaboración del Plan de Manejo del Área Nacional de Recreación Quimsacocha*.
- Jaramillo Ochoa, V. (2016). *CARACTERIZACION PRELIMINAR DE LA GEOMORFOLOGIA E HIDROLOGIA DE LA MICROCUENCA DEL RIO IRQUIS, PARROQUIA VICTORIA DEL PORTETE, CANTON CUENCA-*

PROVINCIA DEL AZUAY.

- Kusin, F. M., Azani, N. N. M., Hasan, S. N. M. S., & Sulong, N. A. (2018). Distribution of heavy metals and metalloids in surface sediments of heavily-mined area for bauxite ore in Pengerang, Malaysia and associated risk assessment. *Catena*, 165(February), 454–464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.029>
- López O, A., López M, M., Monsalve J, R., Carvajal B, L., & Pinto M, A. (2014). Antecedentes de una exploración minera geoquímica. *Curso de Geología Estructural*.
- Morán Reascos, D. V. (2017). *Análisis de continuidad de extensión de la mineralización alrededor del sistema de alta sulfuración Loma Larga*.
- Napoleón, E., Fonseca, C., Quisphe, D., & Sandoval, G. (2012). *Manual para los Formularios de Muestreo Sedimentos*.
- Oyarzun, R., Cubas, P., & Higuera, P. (2010). Geoquímica Ambiental e Indicadores Geobotánicos, 1–9.
- Pratt, W. T., Figueroa, J. F., & Flores, B. G. (1997). Mapa geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 3°-4° S. *Instituto Geológico Militar*.
- PRODEMINCA. (2000). *Evaluación de distritos mineros del Ecuador. Potencial minero metálico y guías de exploración*.
- Ramírez, P. R. (2009). Muestreo y análisis de mercurio en sedimentos del río Coatzacoalcos y la presa “La Zacatecana,” 47.
- Rivera, H., Chira, J., Campián, M., & Cornelio, F. (2008). Análisis correlacional y evolutivo de los metales pesados en sedimentos del río Santa entre Huaraz – Carhuaz, departamento de Ancash. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 11(21), 19–24. Retrieved from http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol11_n21/a03vol11n21.pdf
- Rivera, H., Chira, J., Zambrano, K., & Petersen, P. (2007). Dispersión secundaria de los metales pesados en sedimentos de los ríos Chillón , Rímac y Lurín Departamento de Lima, 10, 19–25.

- Salazar, P. A., Collado, J. A. M., & Echarri, F. J. T. (2000). Dispersion De Metales Pesados En Los Sedimentos Fluviales Del Cauce Alto Del Rio Huerva (Zaragoza, España). *Estudios Geol*, 56, 229–237.
- Salminen, R., Tarvainen, T., Demetriades, A., Duris, M., Fordyce, F. M., Gregorauskiene, V., ... Williams, L. (1998). FOREGS geochemical mapping field manual. *Clinical Neurophysiology*, 22(1), 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2011.06.016>
- Soto Holt, A. (2009). *Estudio estadístico para la validación del muestreo geoquímico en perforaciones de producción, mina aurífera Arenal, Minas de Corrales, Rivera, Uruguay. Universidad de la Republica*. Retrieved from <http://www.bib.fcien.edu.uy/files/etd/pasan/uy24-14127.pdf>
- Valencia, F. (2017). Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé, 133–138.
- Viladevall i Solé, M. (2008). La Prospección Geoquímica. *Universitat de Barcelona*, 20. Retrieved from <http://www.publicacions.ub.edu/refs/indices/06952.pdf>
- Viladevall i Solé, M., Navarro, R. V., & Pérez Guerrero, D. (1996). Geoquímica aplicada al medio ambiente. *Universitat de Barcelona*, 30(1995).

ANEXOS

Anexo 1: Resultados de concentraciones de Pb y Cu en ppm.

N°	X	Y	Cuenca	Código	Concentración_Pb en ppm	Concentración_Cu en ppm	Pb_Norma	Cu_Norma
1	698790	9664088	IRQUIS	AIRQ-01	16,90676	24,21693	0,474138944	0,697541648
2	698604	9664304	IRQUIS	AIRQ-02	20,76569	20,38353	0,789305233	0,526375845
3	698448	9664426	IRQUIS	AIRQ-03	14,59921	26,42627	0,187746607	0,776909051
4	698879	9663445	IRQUIS	BIRQ-01	15,46218	89,05225	0,30833618	1,654822597
5	698873	9663469	IRQUIS	BIRQ-02	24,84398	198,16313	1,017490342	2,144389246
6	698439	9663556	IRQUIS	BIRQ-03	25,03900	20,33765	1,026756014	0,523980323
7	698978	9663268	IRQUIS	CIRQ-01	17,22104	91,44339	0,505678925	1,67161478
8	699208	9662987	IRQUIS	CIRQ-02	14,61726	54,52145	0,190480634	1,331974527
9	699394	9662875	IRQUIS	CIRQ-03	14,59802	50,80999	0,1875654	1,283172093
10	699574	9662749	IRQUIS	CIRQ-04	13,77716	51,31869	0,051317684	1,290114779
11	696561	9664886	CRATER	BCRA-01	13,74496	36,63298	0,045441427	1,044687498
12	696774	9664255	CRATER	BCRA-02	11,16859	97,11611	-0,64828636	1,709568214
13	697130	9663328	CRATER	BCRA-03	12,04789	10,43464	-0,348290996	-0,76340698
14	696130	9663425	CRATER	BCRA-04	8,58610	27,53562	-1,706269356	0,812933615
15	695824	9663472	CRATER	BCRA-05	11,15721	93,15975	-0,652732985	1,683368599
16	695256	9663397	CRATER	BCRA-06	11,15363	9,31298	-0,654135108	-1,338009465
17	696045	9661040	CASCO	AZHR-01	8,57705	11,86130	-1,709088743	-0,325201675
18	697752	9662196	COLLANCAY	BCLC-01	26,61661	22,76948	1,097552649	0,638800796
19	697654	9662050	COLLANCAY	BCLC-02	10,29871	7,13328	-1,022695608	-2,11068977
20	697771	9661649	COLLANCAY	BCLC-03	6,86976	10,42347	-2,123349941	-0,768112859
21	698869	9661650	COLLANCAY	BCLC-04	40,37532	16,22726	1,524833817	0,254030328
22	698944	9661105	COLLANCAY	BCLC-05	49,96807	17,36716	1,718785955	0,342515465
23	698978	9661011	COLLANCAY	BCLC-06	65,46557	15,53927	1,950057141	0,193159903
24	698911	9661031	COLLANCAY	BCLC-07	65,33822	12,59655	1,948435872	-0,179030015
25	698494	9661072	COLLANCAY	BCLC-08	275,41589	27,92844	3,052310267	0,825161012
26	699687	9660575	COLLANCAY	BCLC-09	57,61635	14,05709	1,842401318	0,034980105
27	696622	9666308	BERMEJOS	BBER-01	32,51378	18,70121	1,312867824	0,431202809
28	696487	9666833	BERMEJOS	BBER-02	12,88406	12,59866	-0,130798207	-0,178657315
29	696683	9667359	BERMEJOS	BBER-03	11,16124	8,59127	-0,65115733	-1,681451208
30	696705	9667678	BERMEJOS	BBER-04	7,73719	12,62090	-1,938424826	-0,174746006
31	696705	9667982	BERMEJOS	BBER-05	15,46588	11,14330	0,308813289	-0,511281606
32	697411	9669845	BERMEJOS	BBER-06	11,17662	9,69672	-0,645157029	-1,12667476

33	697387	9669345	BERMEJOS	BBER-07	14,61210	10,05522	0,189699187	-0,937688945
34	697357	9670798	BERMEJOS	BBER-08	11,16496	9,68660	-0,649704158	-1,132236971
35	695983	9671392	BERMEJOS	BBER-09	12,03288	10,05724	-0,352733785	-0,936679521
36	696179	9671729	BERMEJOS	BBER-10	11,17740	8,60371	-0,644852936	-1,676413968
37	695932	9672378	BERMEJOS	BBER-11	14,60134	10,77592	0,188069207	-0,631314489
38	695865	9673221	BERMEJOS	BBER-12	9,46192	4,23197	-1,391465273	-2,538530432
39	699120	9665169	SHACA	ASHA-01	11,97059	20,51786	-0,371399761	0,53333152
40	701036	9665795	SHACA	ASHA-02	14,51329	10,71093	0,174591362	-0,654802092
41	700946	9665761	SHACA	ASHA-03	15,38428	13,25794	0,298225878	-0,072409781
42	700318	9665585	SHACA	ASHA-04	11,16429	8,95775	-0,649965164	-1,519833691
43	700307	9665594	SHACA	ASHA-05	25,57547	11,05149	1,051635244	-0,539396558
44	698706	9664511	SHACA	ASHA-06	19,77969	16,98098	0,721044449	0,314044147
45	699251	9664668	SHACA	ASHA-07	12,77301	20,07075	-0,156654567	0,509842724
46	701799	9666488	SHACA	ASHA-08	15,40131	11,45941	0,300447933	-0,422662413
47	699427	9665843	SHACA	ASHA-09	29,06887	11,44456	1,195183156	-0,426567209
48	699040	9663042	IRQUIS	AIRQ-02-01	18,82108	19,43073	0,647746831	0,474438306
49	699730	9662618	IRQUIS	AIRQ-02-02	15,42289	31,08545	0,303253828	0,914893955
50	699974	9662680	IRQUIS	AIRQ-02-03	9,46109	10,43307	-1,391804996	-0,764064529
51	700117	9662296	IRQUIS	AIRQ-02-04	15,46314	28,98200	0,308459441	0,856710828
52	700166	9662306	IRQUIS	AIRQ-02-05	10,28529	10,03174	-1,028815779	-0,94942984
53	700492	9661934	IRQUIS	AIRQ-02-06	17,15097	25,29356	0,498765884	0,737604122
54	700493	9661914	IRQUIS	AIRQ-02-07	20,51844	15,06940	0,772794201	0,147543321
55	701005	9662247	IRQUIS	AIRQ-02-08	10,30097	10,04703	-1,021664865	-0,94177051
56	701969	9661980	IRQUIS	AIRQ-02-09	7,71542	11,13044	-1,943623962	-0,515150343
57	703412	9661428	IRQUIS	AIRQ-02-10	11,16491	13,32813	-0,649721558	-0,062146956
58	700922	9661867	IRQUIS	AIRQ-02-11	10,27815	11,47764	-1,032075998	-0,417902939
59	701965	9661487	IRQUIS	AIRQ-02-12	7,68757	11,45268	-1,950232263	-0,424430747
60	703570	9660479	IRQUIS	AIRQ-02-13	15,42875	12,56969	0,30401459	-0,183791399

Anexo 2: Descripción de la metodología utilizada para el muestreo de sedimentos.



Capacitación y reconocimiento de campo.



Ubicación de punto para el muestreo con la ayuda de un GPS.



Elección de la mejor zona de acumulación de sedimentos.



Recolección de sedimentos fino de quebradas y río.



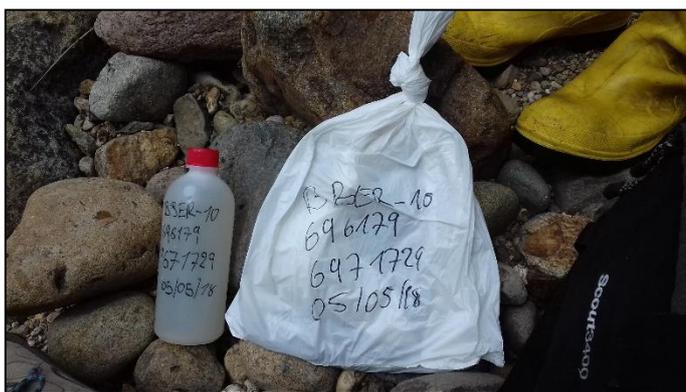
Tamizado en húmedo hasta obtener un cantidad de 200 a 300 gr.



Colocación de sedimentos en una funda plástica para su transporte.



Etiquetado de la muestra con el código correspondiente, coordenadas y fecha del muestreo.



Anexo 3: Descripción de la metodología utilizada de la preparación de la muestra.

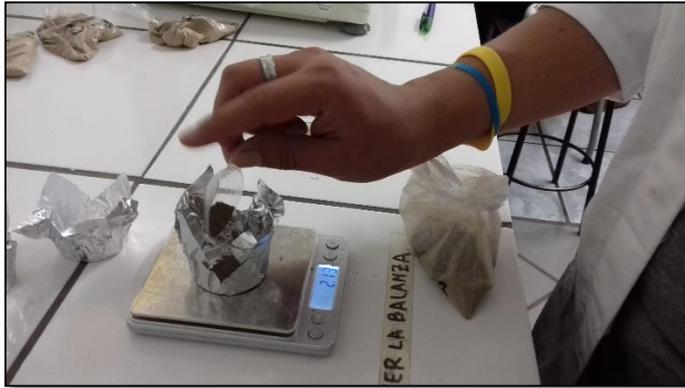
	<p>Disecado de la muestra en un horno eléctrico.</p>
	<p>Cuarteo de la muestra.</p>
	<p>Molienda en un pulverizador de tambor</p>



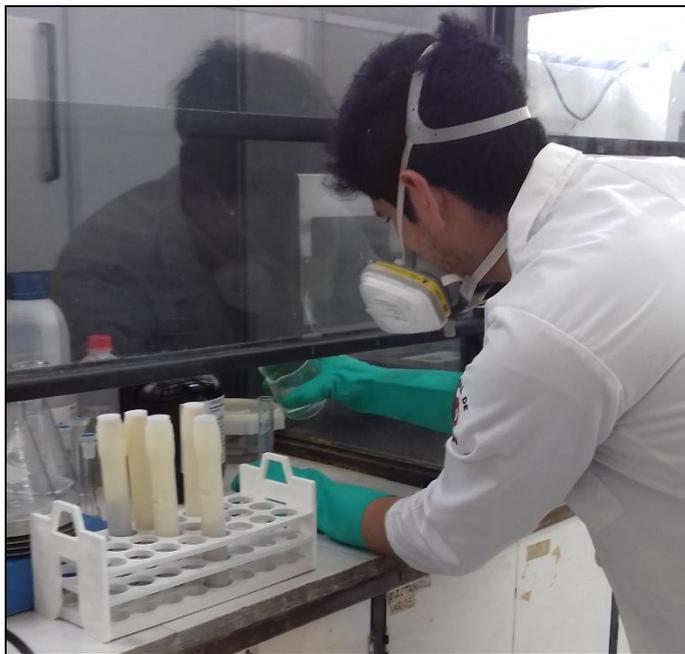
Tamizado de la muestra hasta tener un tamaño menor de 75 μm y obtener 30 gr aproximadamente.



Anexo 4: Descripción de la metodología utilizada para el análisis del laboratorio.



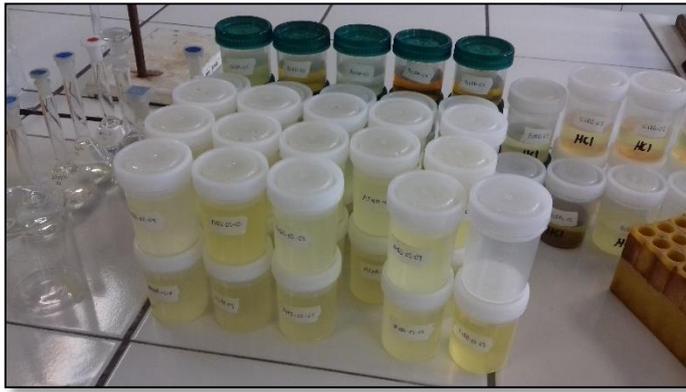
Pesado de una muestra representativa de 5 gr.



Colocación de 10 ml de ácido nítrico (HNO_3).



Filtrado de la solución y aforado a 100 ml con agua destilada.



Análisis de la muestra
aforada mediante el
método de
espectrofotometría de
absorción atómica.



Anexo 5: Estadísticas descriptivas de los datos de las concentraciones de Pb.**- Datos No normalizados**

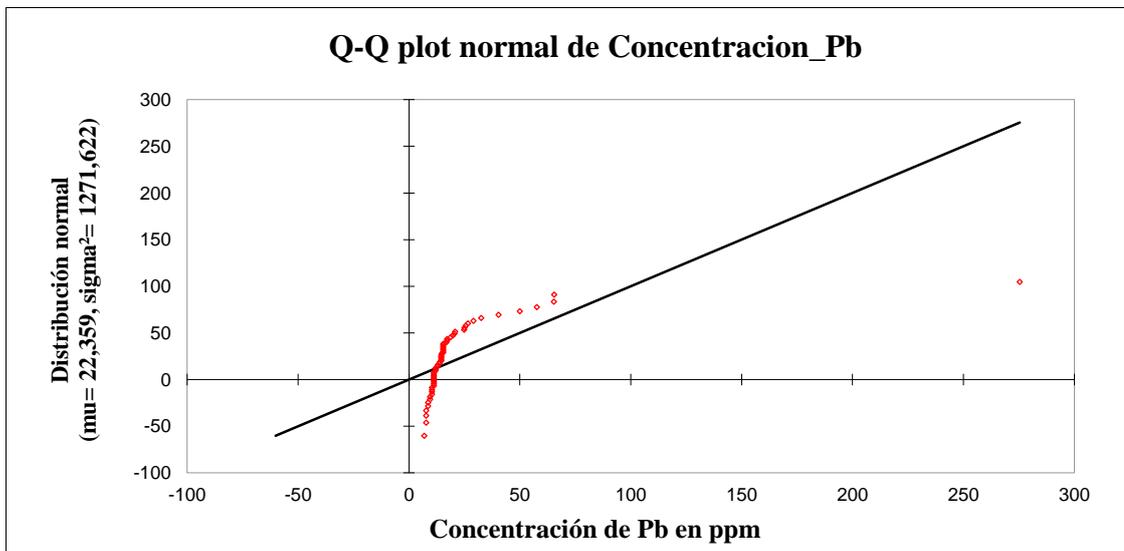
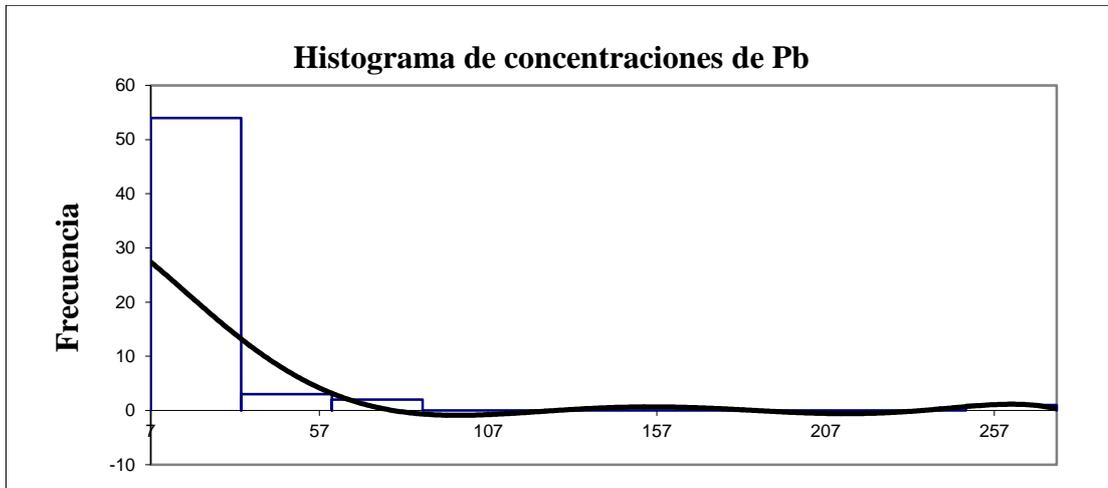
Características	Concentración _Pb
Núm. de valores utilizados	60
Núm. de valores ignorados	0
Núm. de val. min.	1
% de val. min.	1,667
Mínimo	6,870
Primer cuartil	11,163
Mediana	14,599
Tercer cuartil	19,300
Máximo	275,416
Rango	268,546
Suma	1341,549
Media	22,359
Media geométrica	16,139
Media armónica	14,006
Curtosis (Pearson)	39,368
Asimetría (Pearson)	6,021
Curtosis	44,541
Asimetría	6,335
CV (desviación típica/media)	1,595
Varianza de muestra	1250,429
Varianza estimada	1271,622
Desviación típica de muestra	35,361
Desviación típica estimada	35,660
Desviación típica media	14,984
Desviación absoluta mediana	3,439
Desviación típica de la media	4,604
Límite inf. IC de la media	13,147
Límite sup. IC de la media	31,571

- **Datos Normalizados.**

	T_Pb
Núm. de valores utilizados	60
Núm. de valores ignorados	0
Núm. de val. min.	1
% de val. min.	1,667
Mínimo	-2,123
Primer cuartil	-0,651
Mediana	0,188
Tercer cuartil	0,684
Máximo	3,052
Rango	5,176
Suma	1,029
Media	0,017
Media geométrica	
Media armónica	0,833
Curtosis (Pearson)	-0,164
Asimetría (Pearson)	0,144
Curtosis	0,035
Asimetría	0,151
CV (desviación típica/media)	63,894
Varianza de muestra	1,181
Varianza estimada	1,201
Desviación típica de muestra	1,087
Desviación típica estimada	1,096
Desviación típica media	0,864
Desviación absoluta mediana	0,834
Desviación típica de la media	0,141
Límite inf. IC de la media	-0,266
Límite sup. IC de la media	0,300

Anexo 6: Histogramas y pruebas de normalidad de Pb.

- Datos de Pb sin normalizar



Prueba de Anderson-Darling:	
A ² de Anderson-Darling	12,354
p-value unilateral	< 0,0001
Alpha	0,05

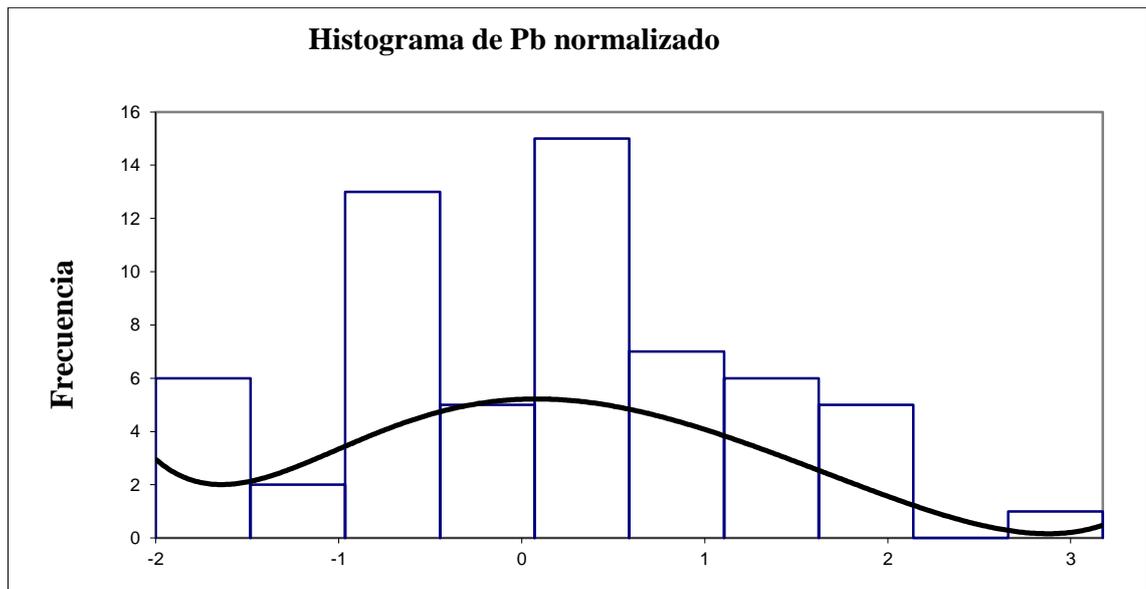
Conclusión:

Prueba de Jarque-Bera:	
JB (valor observado)	5360,954
JB (valor crítico)	5,991
GDL	2
p-value unilateral	< 0,0001
Alpha	0,05

Al umbral de significación Alfa=0,050 se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.

Dicho de otro modo, la no-normalidad es significativa.

- **Datos de Pb normalizados.**



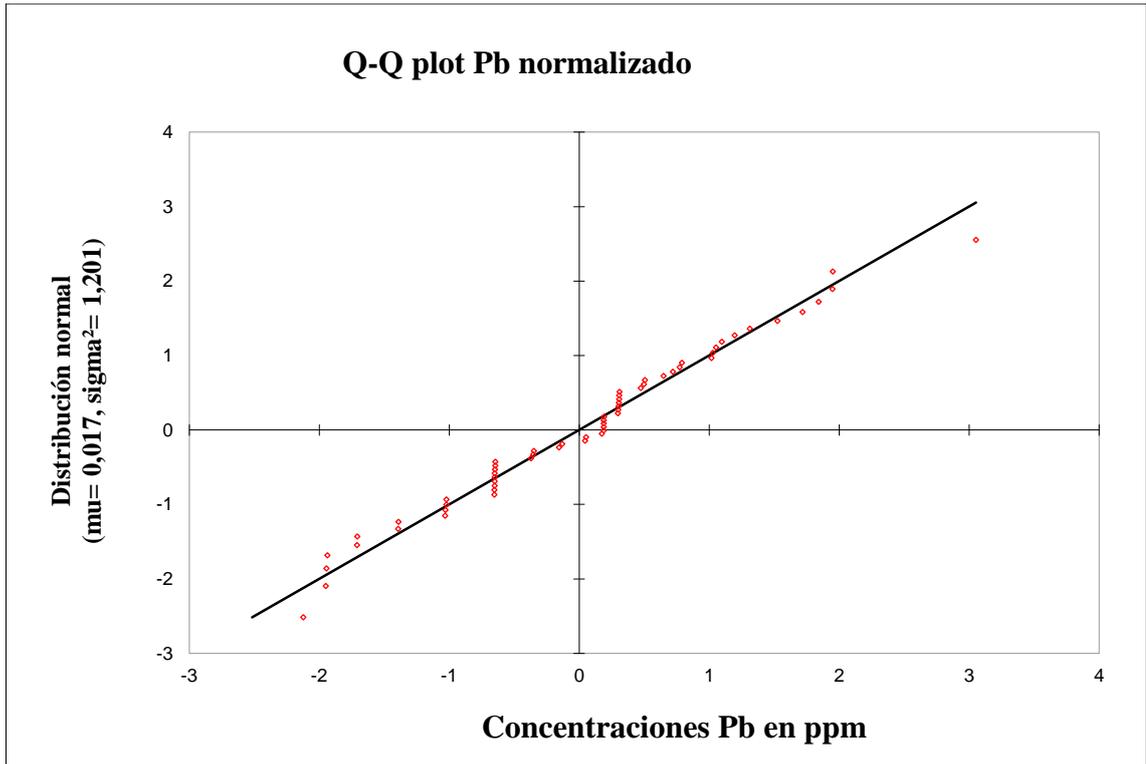
Prueba de Shapiro-Wilk:	
W (valor observado)	0,981
p-value unilateral	0,466
Alpha	0,05

Prueba de Jarque-Bera:	
JB (valor observado)	0,232
JB (valor crítico)	5,991
GDL	2
p-value unilateral	0,890
Alpha	0,05

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0,050 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual la muestra sigue una ley normal.

Dicho de otro modo, la no-normalidad no es significativa.



Anexo 7: Propiedades de datos del interpolador Kriging Universal.

INPUT DATASETS	
Dataset	C:\ARCGIS\Puntos y concentración Pb, Cu\Concentracion_Pb_Cu_trans
Type	Feature Class
Data field 1	Concentrac
Records	60
Method	Kriging
Type	Universal
Output type	Prediction
Dataset #	1
Trend type	Const
Transformation	Log
Trend removal	Local Polynomial Interpolation
Power	0
Output type	Prediction
Exploratory trend surface analysis	0
Searching neighborhood	Standard
Neighbors to include	10
Include at least	2
Sector type	Four and 45 degree
Major semiaxis	2,143.985959053279
Minor semiaxis	2,143.985959053279
Angle	0
Variogram	Semivariogram
Number of lags	12
Lag size	315.906.388.415.475
Nugget	0.075961145219
Measurement error %	100
Model type	Stable
Parameter	2
Range	2,143.985959053279
Anisotropy	No
Partial sill	0.433756631004