



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GELOGÍA

**EVALUACIÓN DE LOS FACTORES QUE CONTROLAN LA GEOQUÍMICA DE
SEDIMENTOS FLUVIALES DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI, IV REGIÓN DE
COQUIMBO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

CAROLINA MIRALLES GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:

JUAN PABLO LACASSIE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

KATJA DECKART

LUISA PINTO

ESTE TRABAJO HA SIDO FINANCIADO POR EL SERVICIO NACIONAL DE
GEOLOGÍA Y MINERÍA.

SANTIAGO DE CHILE

2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
Geóloga
POR: Carolina Miralles González
Fecha: xx/11/2013
PROFESOR GUÍA: Juan Pablo Lacassie**

EVALUACIÓN DE LOS FACTORES QUE CONTROLAN LA GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS FLUVIALES DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI, IV REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE

En este trabajo se analiza la composición química de la fracción fina (<180µm) de 126 muestras de sedimento fluvial tomadas en los drenajes principales de la cuenca del río Elqui. Para ello se dispone de las concentraciones de 59 elementos químicos, óxidos mayores y elementos traza (de interés económico y ambiental).

A partir del análisis de estos datos, se logra dividir la cuenca en cinco zonas geográficas con firmas geoquímicas bien diferenciadas:

Zona 1: Rocas intrusivas y volcano-sedimentarias del Paleozoico, con altas concentraciones de C_{total} , Cd, K_2O , SiO_2 , Sn, entre otros. Controlada principalmente por litología, presencia de materia orgánica, mineralización de Sn y limitada por la falla Vicuña.

Zona 2: Ríos Seco, Toro, Turbio y Elqui al este del embalse Puclaro, con altas concentraciones de As, Cu, S_{total} , entre otros. Controlada principalmente por alteración hidrotermal y/o actividad minera, depósitos lacustres del Holoceno y limitada por el embalse Puclaro.

Zona 3: Rocas volcano-sedimentarias del Cretácico, con altas concentraciones de Al_2O_3 , CaO, MgO, Fe_2O_3 , MnO. Controlada principalmente por mineralización de Fe y Mn, litología, geomorfología e hidrodinámica y limitada por la falla Vicuña.

Zona 4: Quebrada Arrayán, con altas concentraciones de Au, Hg, S_{total} . Controlada principalmente por mineralización de oro y mercurio en el distrito Andacollo, depósitos de placeres en la quebrada Arrayán y actividad minera, como la utilización histórica de mercurio en la amalgamación de oro.

Zona 5: Parte baja de quebrada Marquesa, con altas concentraciones de Ag, Pb, Ba, Hg. Controlada principalmente por mineralización en los distritos Arqueros y Talcuna, y actividad minera.

Así, se lograron determinar seis factores de control preponderantes en la geoquímica regional de los sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui: 1. Litología paleozoica intrusiva al este de la Falla Vicuña; 2. Litología cretácica volcano-sedimentaria al oeste de la Falla Vicuña; 3. Zonas de alteración hidrotermal y/o actividad minera en los distritos El Indio-Tambo, Carmen de Río Seco, Andacollo, Arqueros y Talcuna; 4. Geomorfología e hidrodinámica; 5. Falla Vicuña, como límite para las características geoquímicas globales de la cuenca; y 6. Embalse Puclaro, trampa para los sedimentos tóxicos provenientes de la parte alta de la cuenca, evitando que gran parte de estos lleguen a la desembocadura del río Elqui en la ciudad de La Serena.

En el río Turbio se encuentra que las concentraciones de As y Cu están sobre el estándar internacional PEC, considerándose estos sedimentos como tóxicos según este parámetro. Sin embargo, hace falta realizar estudios más detallados para determinar la toxicidad de estos sedimentos sobre el ecosistema particular de la cuenca del Elqui.

En torno a la confluencia de los ríos Toro y La Laguna, además de las muestras de sedimento fluvial actual, se obtienen muestras de sedimento de terrazas fluviales. Se comparan sus concentraciones químicas con los sedimentos fluviales actuales. Se observa una disminución de las concentraciones de: Hg, Au, Ag y Pb, y un aumento en las concentraciones de: Zn, Cu, As y S_{total} . Estas variaciones se pueden atribuir a dos factores: 1. La introducción de sedimentos ricos en arsénico, yeso y arcillas provenientes de la erosión de los depósitos lacustres colgados del Holoceno, a lo largo del río Turbio; y 2. Aumento del volumen de detritos en las zonas de alteración neógenas producto de la intensa actividad minera llevada a cabo en los distritos El Indio-Tambo y Carmen de Río Seco. Para determinar si uno o ambos factores influyen en este cambio de concentraciones, se hace necesario realizar dataciones absolutas o relativas de las terrazas fluviales muestreadas.

A mis padres y hermanas.

Agradecimientos

Para empezar, agradezco infinitamente a mi familia. A mi padre, Osvaldo, por enseñarme el amor por los libros, la naturaleza y la ciencia. A mi madre, Maya, por enseñarme con tanto amor a descubrir el mundo y la vida. Este logro va dedicado a ustedes, porque sembraron en mí el anhelo por aprender y enseñar.

También agradezco a mis hermanas, Andre y Lore, compañeras de infancia y de vida, por apoyarme incondicionalmente, incluso en la distancia.

A las amigas del colegio, Daysi, Bety, Natalia y Zaria. A la amiga del alma, Dani Rubio. A las compañeras de aventuras, Fabi y Anita. A los amigos que me hicieron un lugar en esta ciudad monstruosa, Susi, Jota, Isma, Buho, Larry, Dragón, Gonzalo, Gaby, Leo, Hernán, Tutú, Javier (Locura), Mauro, Pancha, Tata, Don Ramón.

A los cabros de la pega, por hacer más amenas las jornadas laborales (sobre todo Gustavo, Waren y Roberto Nicolás). Al grupo de Geoquímica, por prestarme su apoyo y su buena onda.

Al Felipe por ser amigo y compañero.

A las gatas, Güiña y Chica, que me alegran la vida cada día. Y a la Mágica, que aún vive en mi corazón.

Y a todos quienes, por una u otra razón ya no están en mi camino. Gracias por hacer de esta vida algo hermoso y desconocido.

Finalmente, agradezco el apoyo brindado por la Unidad de Geoquímica del Servicio nacional de geología y minería para la elaboración de esta memoria. Y a los profesores de la comisión, Juan Lacassie, Katja Deckart y Luisa Pinto, por sus valiosos consejos.

Tabla de contenido

	Página
RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Geóloga	ii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Fundamentación y estado del arte.....	1
1.2 Objetivos	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
1.3 Hipótesis.....	2
1.4 Ubicación y vías de acceso.....	2
2. ANTECEDENTES GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO	4
2.1 Geomorfología.....	4
2.2 Clima.....	6
2.3 Caracterización hídrica	6
2.5 Marco geológico específico.....	9
2.6 Estructuras principales.....	16
2.7 Alteración hidrotermal y mineralización.....	18
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	27
3.1 Metodología de terreno.....	27
3.2 Metodología de laboratorio.....	30
3.2.1 Preparación de muestras	30
3.2.2 Análisis químico	30
3.3 Procesamiento de datos	31
3.3.1 Digitalización de mapas geológicos	31
3.3.2 Control de Calidad.....	32
3.3.3 Mapa de concentraciones	33
3.3.4 Gráficos de variación geográfica.....	35
3.3.4.1 Gráficos de variación geográfica normalizados.....	35
3.3.4.2 Comparación con estándar PEC.....	36
3.3.5 Redes neuronales artificiales.....	37
3.3.6 Comparación de sedimentos fluviales actuales y de terrazas fluviales.....	38
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	39

4.1 Digitalización de mapas geológicos.....	39
4.2 Control de Calidad	40
4.3 Mapas de concentraciones	42
4.3.1 Mapa de concentraciones de Ag.....	42
4.3.2 Mapa de concentraciones de Au.....	45
4.3.3 Mapa de concentraciones de Cu	50
4.3.5 Mapa de concentraciones de MnO.....	58
4.3.6 Mapa de concentraciones de Pb.....	60
4.3.7 Mapa de concentraciones de Zn.....	63
4.3.8 Mapa de concentraciones de As.....	65
4.3.9 Mapa de concentraciones de Sn.....	67
4.3.10 Mapa de concentraciones de Hg	70
4.4 Gráficos de variación geográfica.....	74
4.4.1 Gráficos de variación geográfica normalizados	74
4.4.1.1 A. Río Colorado y río La Laguna al sur de río Seco.	74
4.4.1.2 B. Río Turbio y río Elqui al este del embalse Puclaro.....	74
4.4.1.3 C. Río Elqui al oeste de quebrada Marquesa.	76
4.4.2 Comparación con estándar PEC.....	77
4.5 Redes neuronales artificiales.....	81
4.6 Comparación de sedimentos fluviales actuales y de terrazas fluviales.	88
5. CONCLUSIONES	98
5.1 Zonas geoquímicas	98
5.1.1 Rocas intrusivas y volcansedimentarias del Paleozoico	98
5.1.2 Ríos Seco, Toro, Turbio y Elqui al este del embalse Puclaro.	99
5.1.3 Rocas volcansedimentarias del Cretácico.	101
5.1.4 Quebrada Arrayán.....	103
5.1.5 Quebrada Marquesa.....	104
5.2 Comparación con estándar PEC.	105
5.3 Comparación de sedimentos fluviales actuales y de terrazas fluviales.....	105
5.4 Conclusiones generales.....	105
Referencias	107
ANEXO A: Gráficos de control de calidad	

ANEXO B: Gráficos de variación geográfica

ANEXO C: Redes neuronales artificiales

ANEXO D: Códigos y datos de muestras

Índice de figuras

	Página
Figura 4. 1. Geología y estructuras principales de la cuenca del río Elqui.	39
Figura 4. 2. Mapa de concentraciones de Ag con minas de Ag.	43
Figura 4. 3. Histograma de concentraciones de Ag y límites de clasificación de Jenks.	44
Figura 4. 4. Mapa de concentraciones de Ag, acercamiento a sector noroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de plata.	44
Figura 4. 5. Mapa de concentraciones de Ag, acercamiento a sector nororiental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de plata.	45
Figura 4. 6. Mapa de concentraciones de Au con minas de Au.	46
Figura 4. 7 Histograma de concentraciones de Au y límites de clasificación de Jenks.	46
Figura 4. 8. Mapa de concentraciones de Au, acercamiento a sector suroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de oro.	48
Figura 4. 9. Mapa de concentraciones de Au, acercamiento a sector noroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de oro.	49
Figura 4. 10. Imagen satelital de la zona central de la cuenca del Elqui. Se sobreponen puntos con concentraciones de Au clasificados, distritos mineros, minas de Au y drenajes y estructuras principales.	50
Figura 4. 11. Mapa de concentraciones de Cu con minas de Cu.	51
Figura 4. 12. Histograma de concentraciones de Cu y límites de clasificación de Jenks.	52
Figura 4. 13. Fotografía de la confluencia de los ríos Toro y La Laguna.	52
Figura 4. 14. Mapa de concentraciones de Cu, acercamiento a sector oriental de la cuenca y detalle de distritos mineros, zonas de alteración hidrotermal neógenas y minas de Cu.	53
Figura 4. 15 Mapa de concentraciones de Cd.	54
Figura 4. 16. Mapa de concentraciones de Cu, acercamiento a sector occidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Cu.	55
Figura 4. 17. Mapa de concentraciones de Fe ₂ O ₃ con minas de Fe.	56
Figura 4. 18. Histograma de concentraciones de Fe ₂ O ₃ y límites de clasificación de Jenks.	56
Figura 4. 19. Mapa de concentraciones de Fe ₂ O ₃ , acercamiento a sector nororiental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Fe ₂ O ₃	57
Figura 4. 20. Mapa de concentraciones de MnO con minas de Mn.	58
Figura 4. 21. Histograma de concentraciones de MnO y límites de clasificación de Jenks.	59
Figura 4. 22. Mapa de concentraciones de MnO con unidades geológicas volcano-sedimentarias.	59
Figura 4. 23. Mapa de concentraciones de Pb con minas de Pb.	60
Figura 4. 24. Histograma de concentraciones de Pb y límites de clasificación de Jenks.	61
Figura 4. 25. Mapa de concentraciones de Pb., acercamiento a sector noroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Pb.	61
Figura 4. 26. Mapa de concentraciones de Pb., acercamiento a sector suroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Pb. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.	62
Figura 4. 27. Mapa de concentraciones de Pb., acercamiento a sector oriental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Pb.	63
Figura 4. 28. Mapa de concentraciones de Zn con minas de Zn y zonas de alteración neógenas.	64

Figura 4. 29. Histograma de concentraciones de Zn y límites de clasificación de Jenks.	64
Figura 4. 30. Mapa de concentraciones de As con y zonas de alteración neógenas.....	65
Figura 4. 31. Histograma de concentraciones de Zn y límites de clasificación de Jenks.	66
Figura 4. 32. Mapa de concentraciones de As., acercamiento a sector nororiental de la cuenca del Elqui..	67
Figura 4. 33. Mapa de concentraciones de Sn.....	68
Figura 4. 34. Histograma de concentraciones de Zn y límites de clasificación de Jenks.	68
Figura 4. 35. Mapa de concentraciones de TiO ₂	69
Figura 4. 36. Mapa de concentraciones de Zr. P.	70
Figura 4. 37. Histograma de concentraciones de Hg y límites de clasificación de Jenks.....	72
Figura 4. 38. Mapa de concentraciones de Hg, acercamiento a sector oriental de la cuenca del Elqui con distritos mineros y zonas de alteración hidrotermal.....	72
Figura 4. 39. Mapa de concentraciones de Hg, acercamiento a sector occidental de la cuenca del Elqui con distritos mineros y zonas de alteración hidrotermal.....	73
Figura 4. 40. Gráficos de variación geográfica normalizados.	78
Figura 4. 41. Gráficos de variación geográfica con PEC para As, Cd, Zn y Ni.	79
Figura 4. 42. Gráficos de variación geográfica con PEC para Hg, Pb y Cu.....	80
Figura 4. 43. Mapa de muestras clasificadas según nodos de la red neuronal artificial.....	82
Figura 4. 44. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 1.....	83
Figura 4. 45. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 2.....	84
Figura 4. 46. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 3.....	85
Figura 4. 47. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 4.....	86
Figura 4. 48. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 5.....	88
Figura 4. 49. Mapa de comparación de concentraciones de Stotal en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.	90
Figura 4. 50. Mapa de comparación de concentraciones de As en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.	91
Figura 4. 51. Mapa de comparación de concentraciones de Cu en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.	92
Figura 4. 52. Mapa de comparación de concentraciones de Zn en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.	93
Figura 4. 53. Mapa de comparación de concentraciones de Hg en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.	94
Figura 4. 54. Mapa de comparación de concentraciones de Au en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.	95
Figura 4. 55. Mapa de comparación de concentraciones de Pb en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.	96
Figura 4. 56. Mapa de comparación de concentraciones de Ag en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.	97

Indice de tablas

	Página
Tabla 1. Límites máximos PEC	35
Tabla 2. Resultados de análisis estadístico de control de calidad	38

Indice de ecuaciones

	Página
Ecuación 1. Diferencia relativa para control de calidad	31
Ecuación 2. Varianza relativa para control de calidad	31
Ecuación 3. Error relativo global para control de calidad.....	31
Ecuación 4. Normalización de datos para gráficos de variación geográfica.....	33

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Fundamentación y estado del arte

El mapeo geoquímico de sedimentos fluviales es una herramienta muy útil para definir zonas de anomalías químicas, que pueden ser de interés para la geología económica o para el estudio de calidad ambiental de una zona determinada. Ambas aplicaciones son de importancia para lograr un desarrollo social sustentable.

Por definición, una anomalía es una desviación de la norma. Una anomalía geoquímica, más específicamente, es una irregularidad de los patrones geoquímicos que son normales para un área o terreno (Hawkes, 1962). Para determinar si un dato determinado es una anomalía geoquímica, se debe contar primero con una línea de base.

Se define línea de base geoquímica como la concentración de un parámetro químico (elemento, especie o compuesto) en un punto específico en el tiempo en una muestra de material geológico. Más que un valor dado, es una superficie fluctuante (Johnson, 2011).

Este trabajo de título se desarrolla en la cuenca del río Elqui. Se utilizan datos obtenidos por el Programa de Cartografía Geoquímica del Servicio Nacional de Geología y Minería, para las Hojas La Serena, Guanta y Pisco Elqui.

La composición química de las aguas y su carga en suspensión (fracción fina $<180 \mu\text{m}$) en el Río Elqui y sus tributarios es de interés, ya que ellas son la fuente de agua potable para más de 300.000 personas, así como la base de la economía agroindustrial de la Provincia de Elqui, centrada en cultivos de uva de exportación y en la producción piscuera. Por otra parte, en la cuenca del Río Elqui se ha desarrollado una intensa actividad minera, principalmente desde el siglo XIX (Guevara, et al., 2006).

En la cuenca del río Elqui, existen trabajos anteriores que abordan la geoquímica de sedimentos fluviales (Oyarzún, 2011). Sin embargo, si bien éstos cuentan con mediciones estacionales que permiten estimar variaciones temporales anuales, presentan una cantidad reducida de puntos de muestreo (10 sitios), que corresponden a las estaciones de medición que la Dirección General de Aguas (DGA) mantiene en el área.

El programa de Cartografía Geoquímica aporta con una gran cantidad de puntos de muestreo (aproximadamente una muestra cada 20 km^2), los que, aunque no cuentan con el control estacional de los sitios de (Oyarzún, 2011), permiten generar una primera aproximación a una línea de base geoquímica regional.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Determinar los principales factores que controlan las variaciones químicas más importantes en los sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui.

Objetivos Específicos

Caracterizar geográficamente la geoquímica de los sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui.

Determinar las variaciones químicas más importantes en el sedimento fluvial de los drenajes principales de la zona de estudio.

Estimar cuáles son los factores de control más importantes que influyen en la distribución geográfica de las concentraciones químicas encontradas en la zona de estudio.

Comparar las concentraciones químicas obtenidas de muestras de sedimento fluvial actual con las concentraciones obtenidas de muestras de terrazas fluviales.

1.3 Hipótesis

La composición química de la fracción fina ($<180\mu\text{m}$) de los sedimentos fluviales, es representativa de las características geológicas, antrópicas, biológicas e hidrodinámicas que se observan río arriba de un punto de muestreo dado y en el mismo punto.

Las muestras obtenidas de sedimento de terrazas fluviales son representativas de un período de deposición pre-industrial, es decir, anterior al desarrollo de actividad humana en la zona de estudio.

1.4 Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Elqui, ubicada en la Provincia del Elqui, IV Región de Coquimbo. Por el norte limita con el valle de la quebrada Los Choros y por el sur con el valle del río Limarí. En la figura 1.1 se observan las principales localidades y rutas de acceso de la cuenca del Elqui.

La cuenca del río Elqui está ubicada hacia el este de la ciudad de La Serena, entre las coordenadas $29^{\circ}21'$ y $30^{\circ}30'$ S, y $69^{\circ}48'$ y $71^{\circ}18'$ W. Los centros urbanos más importantes en la zona son las ciudades de La Serena y Vicuña, y los poblados de Rivadavia, Guanta, Paihuano, Pisco Elqui y Andacollo (ver Figura 1. 1).

El principal acceso a la zona de estudio es la Ruta 41, que cruza la cuenca en dirección aproximada oeste-este, desde La Serena hasta el límite con Argentina, pasando por

Vicuña y Guanta. Existen numerosos caminos de menor importancia que permiten acceder a gran parte de la cuenca (Unidad de sistemas de información geológica, Inédito.) (Figura 1. 1).

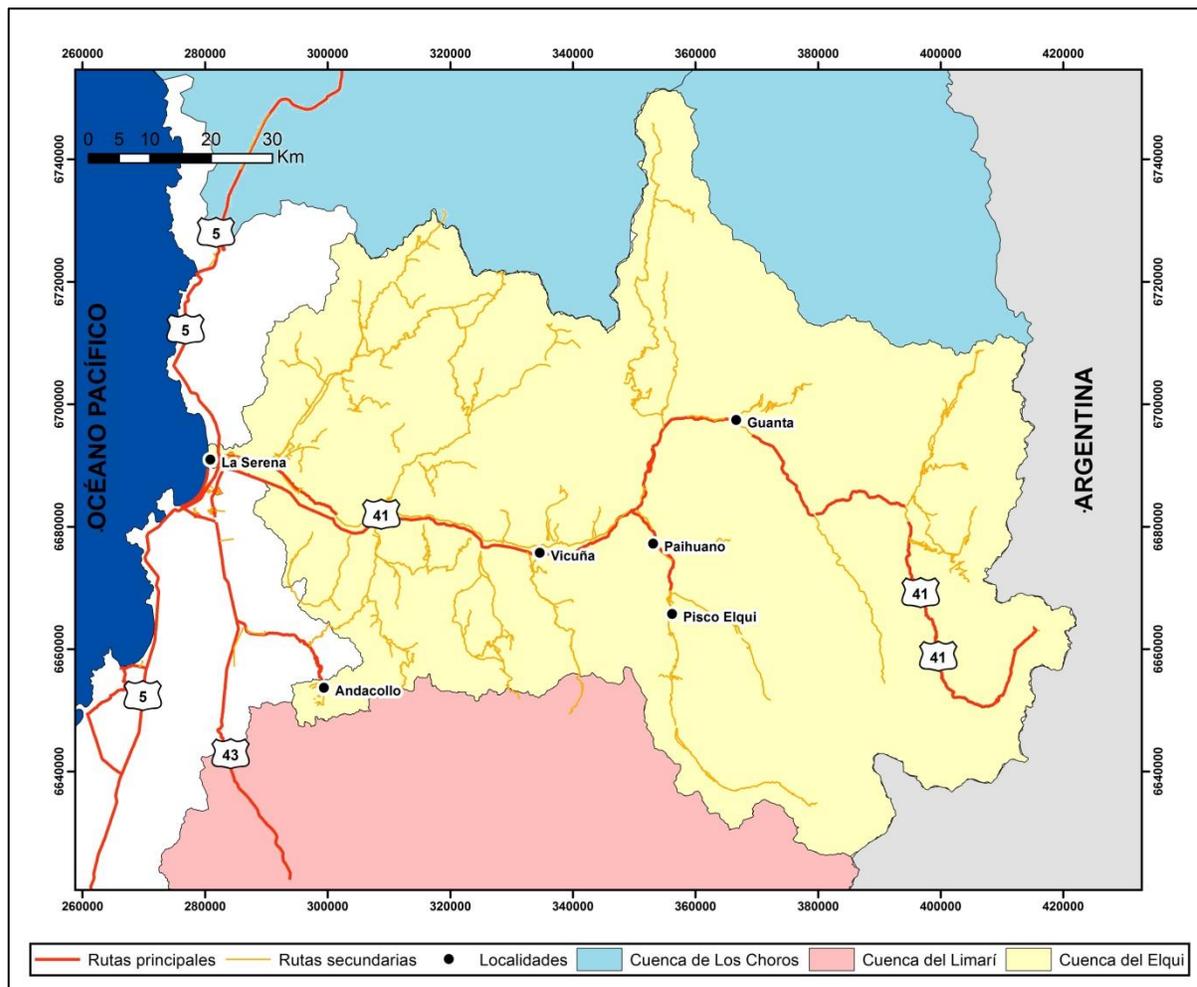


Figura 1. 1. Ubicación y principales vías de acceso a la cuenca del río Elqui y sus afluentes.

2. ANTECEDENTES GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Geomorfología

De mar a cordillera, en la cuenca del río Elqui se reconocen: 1) franja costera, 2) precordillera y 3) alta cordillera (Figura 2. 1) (Cepeda, 2008).

La precordillera y la alta cordillera están separadas por una estructura de carácter regional que cruza la cuenca del río Elqui de norte a sur: la Falla Vicuña (Cepeda, 2008).

La franja costera constituye la unidad geomorfológica más occidental y de menor altitud de la hoya hidrográfica. En ella se encuentran terrazas marinas que alcanzan ~120 a 130 m.s.n.m.. Esta franja se extiende ~25 km tierra adentro, hacia el interior del valle. En esta franja se incluye, además, la cordillera de la Costa (Cepeda, 2008).

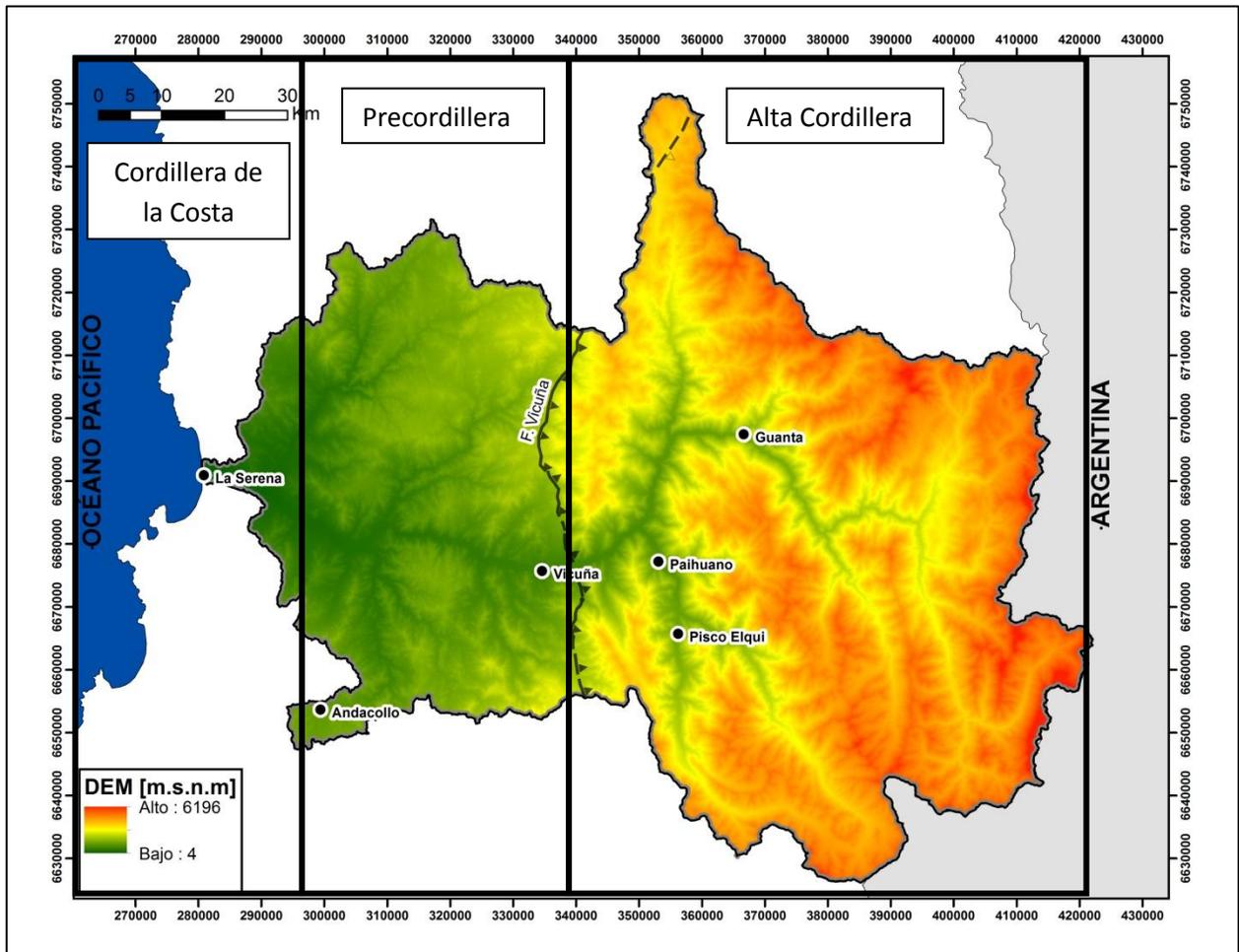


Figura 2. 1. División general de las principales unidades geomorfológicas en la cuenca del río Elqui.

La precordillera corresponde a los sectores de interfluvios o serranías presentes en la hoya hidrográfica. Se trata de un macizo montañoso de altitud regular que se encuentra muy disectado por la erosión fluvial. La precipitación promedio anual en la precordillera es cercana a los 100 mm, con una gran variabilidad interanual (Figura 2. 2) Esta pluviometría no permite la formación de cursos permanentes de agua; los escurrimientos son sólo esporádicos y ocurren en respuesta a precipitaciones intensas y concentradas, particularmente durante ocurrencias del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), durante el cual la precipitación aumenta marcadamente (Cepeda, 2008).

La alta cordillera constituye la sección más oriental y de mayor altitud de la hoya hidrográfica. Corresponde, básicamente, a aquella parte de la alta montaña de los Andes donde se originan los cursos de agua que forman el Río Elqui o Coquimbo, razón por la cual se la conoce como la Cordillera de Elqui. El área es muy compleja orográficamente y se caracteriza por poseer una apariencia maciza y alta, con altas pendientes. Hay diversas cumbres que alcanzan los 5.000 m.s.n.m.. En la actualidad, este macizo se encuentra surcado por numerosos ríos, esteros y quebradas cuya orientación es controlada por factores geológicos. (Cepeda, 2008).

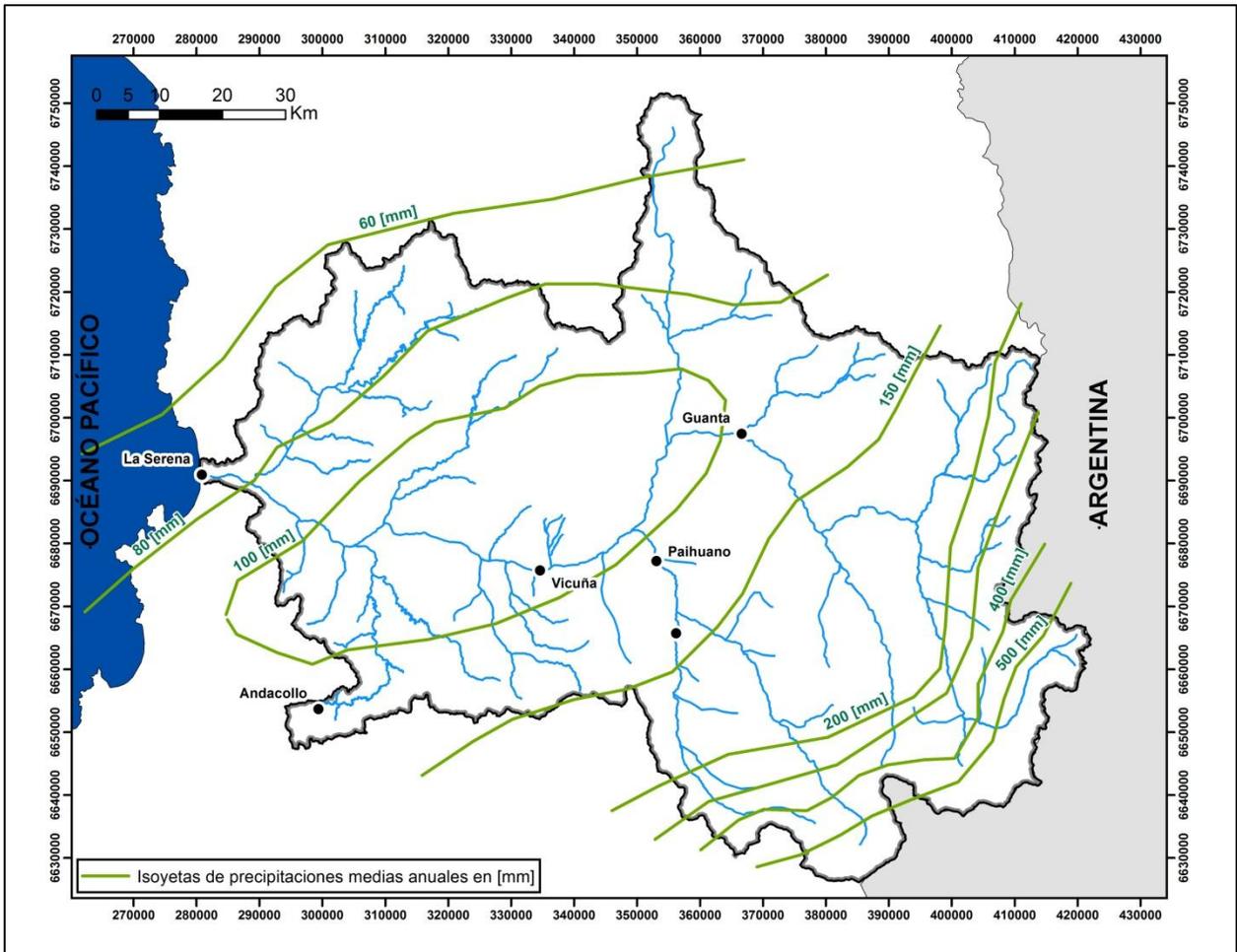


Figura 2. 2. Mapa de isoyetas cuenca del Río Elqui de precipitaciones medias anuales (mm) (Cepeda, 2008).

2.2 Clima

La cuenca hidrográfica del Río Elqui presenta un carácter árido con influencias del clima desértico del norte y del clima semiárido de Chile central. La precipitación es variable entre años. Aunque registros de 30 años promedian un valor ligeramente superior a 100 mm, este valor puede aumentar por un factor de dos o tres en años ENOS. La precipitación, principalmente nival, es mayor en la montaña andina, donde promedia cerca de 200 mm anuales con una gran variabilidad interanual. El clima está sometido a la acción de la circulación atmosférica anticiclónica, la Corriente de Humboldt y al efecto de la Cordillera de los Andes. Predomina el clima de estepa templada, con diferentes matices: costero o nuboso en la franja litoral y cálido-seco en el interior. (Cepeda, 2008).

2.3 Caracterización hídrica

La disposición de la red hidrográfica regional está controlada por los grandes accidentes verticales existentes y, por lo tanto, sus rasgos principales responden a tres orientaciones. Por orden de importancia decreciente éstas son N-S, NNO-SSE y NNE-SSO. Este control se puede observar en algunos de los diversos afluentes del Río Elqui que se abren camino en cajones cordilleranos estrechos y profundos, confinados por cerros que superan los 3.000 m.s.n.m.. Este sistema hídrico se drena hacia el Océano Pacífico y tiene una longitud aproximada de 240 km y una pendiente media de 1,1%. No presenta rápidos ni saltos en su recorrido. Tiene afluentes que le aportan cantidades importantes de agua, especialmente cuando ocurren eventos lluviosos con precipitaciones elevadas (Cepeda, 2008).

El cauce principal de la cuenca hidrográfica lo constituye el Río Elqui, también conocido como río Coquimbo. Este río se origina de la confluencia de los ríos Turbio y Claro o Derecho, hecho que ocurre 2 kilómetros aguas arriba de la localidad de Rivadavia (850 m.s.n.m.). Mientras que las aguas del Río Turbio descienden de cordones cordilleranos ubicados al noreste del sistema, las aguas del Río Claro lo hacen desde el sureste. Desde su origen hasta su desembocadura, en la Bahía de Coquimbo, el Río Elqui tiene una longitud este-oeste de ~75 km, transcurso en el que confluyen, por el norte, las quebradas Santa Gracia y Marquesa y, por el sur, las quebradas San Carlos, El Arrayán y Talca (Figura 2. 3) (Cepeda, 2008).

El Río Elqui tiene un caudal superficial promedio de ~7,1 m³/s, con una gran variabilidad interanual. Su régimen de crecidas depende de la altitud: en el tramo medio-alto (aguas arriba de la ciudad de Vicuña), las mayores crecidas, tanto en volumen como en caudal máximo instantáneo, ocurren durante primavera-verano; en el tramo medio-bajo (aguas abajo de la ciudad de Vicuña), mientras los caudales máximos instantáneos tienen un origen pluvial por lo que se manifiestan durante otoño-invierno, los mayores volúmenes de crecida tienen lugar durante primavera-verano. Los ríos afluentes del Elqui, el Turbio y el Claro, tienen un caudal promedio de 4,3 y 3,0 m³/s, respectivamente (Cepeda, 2008).

Las unidades geológicas más antiguas corresponden a una serie de unidades metamórficas, plutónicas y volcano-sedimentarias, de edad paleozoica a triásica inferior, que, en conjunto, constituyen el basamento de las secuencias meso-cenozoicas.

En la Cordillera de la Costa afloran, en forma discontinua, rocas metamórficas y metasedimentarias del Paleozoico inferior al Carbonífero Inferior, que representan asociaciones de prisma de acreción y/o depósitos de antearco.

Sobre el basamento se apoyan formaciones sedimentarias del Triásico Medio-Jurásico Inferior cubiertas, en discordancia, por una potente secuencia volcánica, principalmente andesítica, con intercalaciones de calizas marinas neocomianas (Grupo Bandurrias) que, al sur de los 29°30', se desarrolla en forma continua, excepto por el paso de intercalaciones sedimentarias de ambiente marino, en la Formación Arqueros, a intercalaciones de ambiente transicional a continental, en la suprayacente Formación Quebrada Marquesa.

En el área precordillerana, cubriendo a la serie volcano-sedimentaria del Cretácico Inferior, se disponen las secuencias volcano-sedimentarias atribuidas, comúnmente, al Cretácico Superior (formaciones Cerrillos y Viñita) y al Terciario Inferior (Formación Los Elquinos).

En la Alta Cordillera aflora un extenso macizo granítico, de edad paleozoica superior-triásica inferior (Batolito Elqui-Limarí), asociado a una cubierta de volcanitas ácidas contemporáneas (Formación Matahuaico, Formación Pastos Blancos). Los granitoides intruyen a esquistos pelíticos y metabasitas (Complejo Metamórfico El Cepo) y a secuencias metasedimentarias marinas del Devónico-Carbonífero (Formación Hurtado, Formación Las Placetas). Intruyen, además, a una unidad de ortoneises de edad silúrica y protolito granítico (Neises de La Pampa), que se han interpretado como representantes de un terreno alóctono (Chilenia) soldado al continente sudamericano en el Devónico. Estas unidades, en conjunto, representan la prolongación en territorio chileno de las unidades geológicas fundamentales de la Cordillera Frontal de San Juan y Mendoza, que penetra en territorio chileno a la latitud 31°S, en la cordillera de Ovalle (nacientes del río Grande).

Las unidades meso-cenozoicas de la cobertura se disponen tanto en el flanco occidental como al este y también sobre el núcleo plutónico de la Cordillera Principal. La secuencia se inicia con depósitos sedimentarios del Triásico Medio-Superior, tanto marinos (Formación San Félix) como continentales (Formación Las Breas), cubiertas por rocas volcánicas andesíticas del Triásico Superior-Jurásico Inferior (Formación La Totorá, Estratos del Verraco). Cubriendo y, en parte, también engranando con éstas, se disponen secuencias clásticas y carbonatadas del Jurásico Inferior-Medio Inferior (Formación Lautaro, Formación Tres Cruces), depositadas en un ambiente marino de trasarco sobre una plataforma poco profunda. La secuencia triásico-jurásica culmina con depósitos sedimentarios continentales y volcanitas andesíticas y andesítico-basálticas del Jurásico Superior (formaciones Algarrobal, Mostazal, Picudo y Baños del Toro).

En el flanco occidental de la Cordillera Principal, sobre estas unidades se disponen las formaciones sedimentarias marinas y continentales del Cretácico Inferior (Formación

Río Tascadero y Formación Pucalume). Las unidades sedimentarias del Cretácico Inferior de la Alta Cordillera ocuparían al igual que el Grupo Chañarcillo, una posición de trasarco, respecto de la serie volcánica contemporánea, del sector costero y precordillerano.

La sucesión de ambientes marinos y continentales, que caracteriza el lapso triásico medio-cretácico inferior, culmina en el Cretácico Superior, dando paso a un ambiente exclusivamente continental, representado en el borde occidental de la Alta Cordillera, por los depósitos volcánicos del Cretácico Superior y Terciario Inferior y, al este del núcleo paleozoico, por el volcanismo del Terciario Superior. En este último sector, las secuencias volcánicas del Oligo-Mioceno (formaciones Doña Ana, Cerro de Las Tórtolas y Vallecito), a las cuales se asocian numerosas zonas de alteración hidrotermal, se disponen directamente sobre el zócalo paleozoico y las unidades mesozoicas.

A partir del Mioceno Superior no existe actividad volcánica en este segmento de la Alta Cordillera, lo que estaría relacionado con el inicio de la segmentación de la placa de Nazca y una subsecuente disminución en la inclinación del plano de Benioff. Esta situación estaría ligada, además, al particular estilo tectónico, dominado por la presencia de fallas inversas de alto ángulo, así como a la ausencia de valle central.

Otra característica notable de este sector del Norte Chico, es la disposición de las rocas plutónicas mesozoicas en franjas de dirección aproximada norte-sur, progresivamente más jóvenes hacia el este.

2.5 Marco geológico específico

Se presenta aquí un resumen con las características litológicas de las unidades geológicas presentes en la cuenca del río Elqui (Figura 2. 5), extraídas de las Hojas Guanta (Nasi, et al., 1990), Pisco Elqui (Mpodozis & Cornejo, 1988), Vallenar y parte norte de La Serena (Moscoso, et al., 1982), Andacollo-Puerto Aldea (Emparán & Pineda, 2006) y Vicuña-Pichasca (Pineda & Emparán, 2006). Listadas por orden de aparición de Oeste a Este y de Norte a Sur, son las siguientes:

- **Formación Coquimbo:** Conjunto de sedimentos marinos que afloran en la zona costera. En su sección inferior incluye areniscas amarillas, de grano medio a grueso, en parte limosas, con niveles de coquinas y, en su parte superior, areniscas amarillentas y conglomerados (localmente bolones), con niveles carbonatados fosilíferos.

Figura 2. 4. Marco geológico simplificado entre los 28°20 y 31°S. 1. Basamento del Paleozoico-Triásico Inferior; 2. Formaciones volcánicas y sedimentarias del Triásico-Jurásico; 3. Granitoides jurásicos; 4. Secuencias estratificadas del Cretácico Inferior; 5. Granitoides cretácicos; 6. Secuencias volcánicas del Cretácico Superior (ζ); 7. Secuencias volcánicas del Paleógeno; 8. Granitoides del Paleoceno-Eoceno; 9-10. Formación Doña Ana (9. Miembro Tilito; 10. Miembro Escabroso); 11. Intrusivos miocenos (Unidad Infiernillo); 12. Formación Cerro de Las Tórtolas (Mioceno Inferior-Medio); 13. Formación Vallecito (Mioceno Superior); 14. Sedimentos del Terciario Superior-Cuaternario; 15. Fallas normales e inversas. (Nasi, et al., 1990)

- **Gravas de Atacama:** Conjunto de sedimentos, poco a medianamente consolidados, de origen aluvial, que incluye conglomerados de bolones, gravas, arenas y ripios, con intercalaciones limosas, acumulados sobre las unidades de roca preexistentes en la zona, y disectados por las quebradas modernas. Presentan calizas y yeso en algunas capas finas.
- **Grupo Bandurrias:** Al sur de los 29°45' Lat. S, la secuencia denominada Grupo Bandurrias es dividida en dos unidades concordantes entre sí: la Formación Arqueros y la Formación Quebrada Marquesa. La Formación Arqueros es descrita como una secuencia de andesitas porfíricas y calizas marinas que lleva en su parte superior mantos de manganeso cuya base no se observa, y cuyo techo lo constituye la Formación Quebrada Marquesa. La Formación Quebrada Marquesa es descrita como una secuencia de rocas sedimentarias clásticas de origen continental y lavas andesíticas de color gris rojizo. Esta formación contiene en su parte media, mantos de manganeso; en algunos lugares presenta, cerca de la base, lentes de arenisca calcárea con fauna fósil.
- **Intrusivos Cretácicos:** Llamados "Franja Central" en la Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, están constituidos por extensos plutones que incluyen desde granitos a dioritas.
- **Formación Confluencia:** Se observa en la Hoja Andacollo-Puerto Aldea. Es una secuencia sedimentaria continental que comprende facies fluviales, constituidas por gravas gruesas con intercalaciones de areniscas y lentes de limos; y facies aluvionales, constituidas por brechas muy gruesas con abundante matriz limoarenosa.
- **Intrusivo de Tablalalume:** Batolito presente en las cercanías de la ciudad de Andacollo. Consiste en rocas granodioríticas tonalíticas y dioríticas.
- **Intrusivos Terciarios:** Denominados Franja Oriental en la Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, están constituidos por numerosos plutones, principalmente granodioríticos y graníticos, y en forma subordinada por cuerpos tonalíticos, monzodioríticos y dioríticos. En las Hojas Pisco Elqui y Guanta son descritos con mayor detalle y separados en: Unidad Bocatoma, Unidad Infiernillo, como parte de la Superunidad Cogotí.
 - **Unidad Infiernillo:** Formada por un rosario de pequeños stocks que afloran en las nacientes del río Ingaguás y en las cercanías del embalse La Laguna. La unidad infiernillo está formada por rocas calcoalcalinas, con contenido normal

a alto de potasio y características afines a los granitoides "I" de Chappell y White (1974). Sus características geoquímicas son parecidas a la Formación Doña Ana, sin embargo, la Unidad Infiernillo posee valores de U y Th muy elevados.

- Unidad Bocatoma: Está formada por tres plutones mayores, que presentan contactos tajantes y limpios con la roca de caja y escasos xenolitos o diques. El principal tipo petrográfico son granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.
- Formación Cerrillos: Conjunto de rocas predominantemente epiclásticas (conglomerados, brechas y areniscas) en su sección inferior y volcánico-epi-
piroclásticas (andesitas, brechas, conglomerados, con intercalaciones calcáreas, finas) en su sección superior.
- Formación Los Elquinos: Conjunto de lavas y rocas piroclásticas (tobas y brechas). Las brechas riolíticas basales de la formación, conforman un nivel macizo, cuya petrografía es la de una toba de cristales brechosa, con fragmentos accidentales de andesitas, fenocristales de cuarzo y feldespato potásico, dispuestos sobre una matriz vitroclástica. Las tobas y brechas piroclásticas, de composición fundamentalmente andesítica, son intercaladas por areniscas y conglomerados (volcaruditas y volcarenitas andesíticas) que, en parte, poseen también clastos de tobas y escasos fragmentos de riolitas o cuarzo engolfado. Las lavas son relativamente escasas, encontrándose desde andesitas porfídicas hasta andesitas vesiculares y dacitas.
- Formación Pucalume: En la Hoja Guanta y la Hoja Vallenar y parte norte de La Serena es definida como una secuencia de origen continental, constituida principalmente por rocas sedimentarias clásticas (conglomerados, areniscas y lutitas) y, subordinadamente, por depósitos piroclásticos (tobas y brechas riolíticas) y lavas andesíticas. En la Hoja Pisco Elqui se la define como una secuencia finamente estratificada, de areniscas y conglomerados rojos, limolitas y calizas lagunares con ostrácodos.
- Formación Algarrobal: Secuencia continental, formada por lavas y brechas, andesíticas, conglomerados, areniscas y lutitas, con intercalaciones de rocas piroclásticas.
- Formación Las Breas: Secuencia sedimentaria continental, constituida por areniscas, conglomerados y lutitas carbonosas, con intercalaciones de tobas riolíticas y brechas tobáceas.
- Formación Tres Cruces: Secuencia sedimentaria marina, constituida por conglomerados finos, areniscas cuarcíferas, areniscas calcáreas, calizas fosilíferas y lutitas.

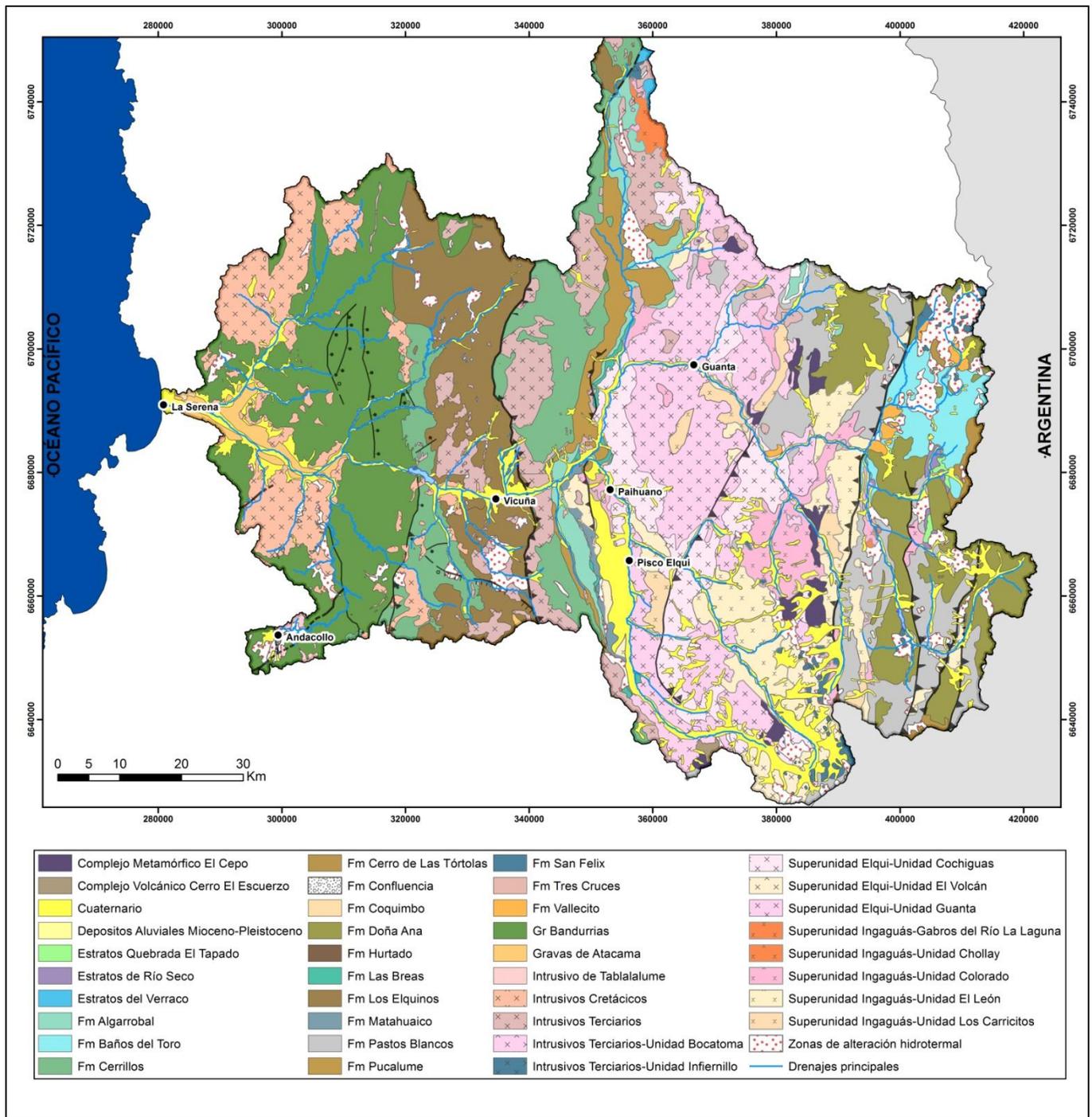


Figura 2. 5. Marco geológico específico de la cuenca del río Elqui. Compilado de las Hojas Guanta (Nasi, et al., 1990), Pisco Elqui (Mpodozis & Cornejo, 1988), Vallenar y parte norte de La Serena (Moscoso, et al., 1982), Andacollo-Puerto Aldea (Emparán & Pineda, 2006) y Vicuña-Pichasca (Pineda & Emparán, 2006).

- Formación Matahuaico: Conjunto de brechas, lavas y tobas riolíticas, y niveles sedimentarios intercalados (areniscas, conglomerados, lutitas).
- Formación San Félix: Secuencia sedimentaria formada por rocas clásticas gruesas (conglomerados), con intercalaciones de volcarenitas, grauwacas y lutitas, de origen marino.
- Unidad Chollay (Superunidad Ingaguás): La Unidad Chollay está constituida por rocas intrusivas de grano grueso y muy grueso, entre las que predominan monzogranitos y sienogranitos de biotita, con hornblenda muy subordinada o ausente, pero también se encuentran (en menor proporción y con menor frecuencia) facies de monzogranitos y granodioritas de hornblenda y biotita.
- Estratos del Verraco: Secuencia de rocas volcánicas, principalmente andesíticas, de aspecto macizo y color verde oscuro, en la que se intercalan brechas, conglomerados, areniscas y calizas marinas fosilíferas.
- Unidad El León (Superunidad Ingaguás): Numerosos cuerpos de monzogranitos y sienogranitos leucocráticos rosados de grano medio. No poseen inclusiones, ni están afectados por cataclasis, y es raro encontrar diques asociados a ellos.
- Unidad Colorado (Superunidad Ingaguás): Es heterogénea, la forman desde monzogranitos y sienogranitos gráficos, de grano grueso, hasta granitos gráficos de grano fino y pórfidos riolíticos con "ojos" de cuarzo. Sin inclusiones, con escasos diques y efectos cataclásticos.
- Unidad Guanta (Superunidad Elqui): Conjunto de plutones, formados por rocas leucocráticas de grano medio a grueso, y color verdoso a gris-blanquecino, que corresponden principalmente a tonalitas y granodioritas de hornblenda y biotita y, en forma subordinada, a dioritas, dioritas cuarcíferas y gabros. En el sector norte de la Hoja Pisco Elqui (nacientes de la quebrada Paihuano, quebrada El pangue), se encuentra, dentro del Plutón Guanta, gran cantidad de inclusiones microdioríticas y abundantes xenolitos de esquistos pelíticos.
- Unidad Cochiguás (Superunidad Elqui): Conjunto de plutones leucocráticos, de grano medio a grueso, constituidos por granodioritas y monzogranitos de biotita ± muscovita, que afloran en el curso inferior del río Cochiguás.
- Formación Pastos Blancos: Potente secuencia volcánica formada por lavas y brechas piroclásticas de composición riolítica y dacítica, a las cuales se asocian pórfidos riolíticos, lavas andesíticas y rocas sedimentarias continentales. En algunas muestras de ignimbritas se han encontrado grandes cristales de granate.
- Complejo Metamórfico El Cepo (CMC): Franja discontinua de rocas metasedimentarias. Muestran gran variabilidad litológica: desde metareniscas, con débil recristalización y estructuras sedimentarias primarias, hasta esquistos pelíticos de andalucita-cordierita y corneanas de biotita. Xenolitos de esquistos pelíticos, afines al CMC, son abundantes en granitoides carboníferos (Unidad EL Volcán) al norte del cerro El Volcán, en el valle del río Claro. Minerales de andalucita, en

algunos casos, presentan inclusiones carbonosas (quiasolita). Al sur del portezuelo El Cepo, en las nacientes de la quebrada El Hoyuelo, afluente del Ingaguás, existen algunos enclaves de esquistos, dentro de tonalitas foliadas, carboníferas. En ellos, además de la común asociación de cuarzo-albita-biotita, aparece granate junto a pequeños cristales de anfíbola.

- Complejo Volcánico Cerro El Escuerzo: Complejo de lavas andesíticas e intrusivos sub-volcánicos. Formado por andesitas porfídicas con estructura columnar, dacitas y pórfidos dioríticos (diques y filones).
- Formación Vallecito: Secuencia de brechas mal consolidadas, sedimentitas lacustres, yeso, e ignimbritas riolíticas.
- Unidad El Volcán (Superunidad Elqui): Granodioritas y granitos de grano grueso a muy grueso. El Plutón El Volcán incluye, entre los ríos Cochiguás y Hurtado, numerosos xenolitos y roof pendants de esquistos pelíticos.
- Formación Doña Ana: Secuencia volcánica constituida por dos miembros: el inferior (Miembro Tilito) formado por tobas ignimbríticas, riolíticas y dacíticas; y el superior (Miembro Escabroso), de lavas andesíticas y basálticas. El Miembro Escabroso incluye, a veces, fenocristales de augita y olivino (frecuentemente reemplazado por bowlingita).
- Unidad Los Carricitos (Superunidad Ingaguás): Conjunto de granodioritas de biotita, que afloran típicamente en el valle del río Turbio. Poseen escasos xenolitos e inclusiones básicas y no están asociadas a los enjambres de diques que caracterizan a los granitoides más antiguos.
- Formación Hurtado: Secuencia de areniscas y pizarras sub-verticales. Es una secuencia fundamentalmente pelítica, con intervalos recurrentes de cuarzarenitas y subfeldsarenitas, parte de cuya fracción detrítica (pertita, muscovita, cuarzo plutónico) deriva de la erosión de granitoides.
- Formación Baños del Toro: Secuencia volcánica andesítica, con intercalaciones de conglomerados, areniscas y lutitas.
- Gabros del río La Laguna (Superunidad Ingaguás): Forman sólo pequeños stocks, de algunas decenas de metros de diámetro, en el valle de La Laguna. El stock de la confluencia de la quebrada El Tapado con el río La Laguna es un monzogabro de clinopiroxeno de grano grueso.
- Estratos de Río Seco: Secuencia de rocas volcánicas andesíticas de textura afanítica o porfídica, con fenocristales de plagioclasa, incluidos en una masa fundamental de microlitas de plagioclasa y minerales máficos oxidados, que presentan como minerales de alteración, clorita y calcita relleno de vesículas y microvenillas.
- Estratos Quebrada El Tapado: Secuencia sedimentaria marina, constituida por areniscas calcáreas, calizas, volcarenitas y conglomerados finos, con intercalaciones de limolitas yesíferas y niveles de limonitas.

- Formación Cerro de Las Tórtolas: Secuencia de rocas volcánicas andesíticas. En su localidad tipo, está constituida por andesitas de anfíbola y biotita, aglomerados de bloques andesíticos con matriz tobácea, tobas de cristales andesíticos (en parte brechosas) y tobas silíceas; subordinadamente, se encuentran andesitas de augita.

2.6 Estructuras principales

A continuación se presenta un resumen de las estructuras principales (Figura 2. 6), obtenidas de las cinco cartas geológicas que convergen en la zona de estudio, las Hojas Guanta (Nasi, et al., 1990), Pisco Elqui (Mpodozis & Cornejo, 1988), Vallenar y parte norte de La Serena (Moscoso, et al., 1982), Andacollo-Puerto Aldea (Emparán & Pineda, 2006) y Vicuña-Pichasca (Pineda & Emparán, 2006).

Las rocas neocomianas (Grupo Bandurrias, principalmente) se ven afectadas por fallas normales de carácter local, pero que en ocasiones tienen importancia económica ya que, en algunos casos, controlan la alteración hidrotermal y la mineralización.

Al este de Andacollo se encuentra un sistema de fallas normales de orientación noroeste e inclinación hacia el este. Estas estructuras, Sistema de Falla El Romero, se reconocen por más de 50 km. Un segundo evento estructural se evidencia en la denominada Falla El Chape, de orientación NNE e inclinación hacia el este, que se extiende por aproximadamente 50 km. Esta estructura tiene un movimiento inicial normal, reactivado en forma inversa.

Al oriente de esta zona, el rasgo estructural más significativo corresponde a una estructura semicircular de 18 km de diámetro y desplazamiento normal. Esta estructura alberga, en su interior, las ignimbritas de los Estratos de Quebrada Yungay, rocas que se interpretan como producto del vaciamiento repentino de la cámara magmática, provocando posteriormente el colapso de las paredes que generan la estructura de la caldera Cerro Tololo.

La Alta Cordillera del Norte Chico presenta un estilo que se manifiesta en una serie de pilares (horst) de basamento y depresiones (grábenes). Algunas de estas depresiones revisten gran importancia económica (Graben El Indio) pues en ellas se preservó de la erosión una serie de yacimientos con mineralización de metales preciosos (El Indio, Tambo y Sancarrón).

Las principales fallas inversas, en la zona de estudio, son las fallas Vicuña, Rivadavia, Molino Yaco, Baños del Toro, La Laguna, Río Colorado y Olivares.

La Falla Vicuña constituye una estructura regional que se reconoce por más de 180 km entre Vallenar y Ovalle. En el sector de Vicuña, esta falla, con manteo de 45°E, tiene un salto relativo de aproximadamente 2 km, que se amortigua, hasta desaparecer al sur del río Tránsito.

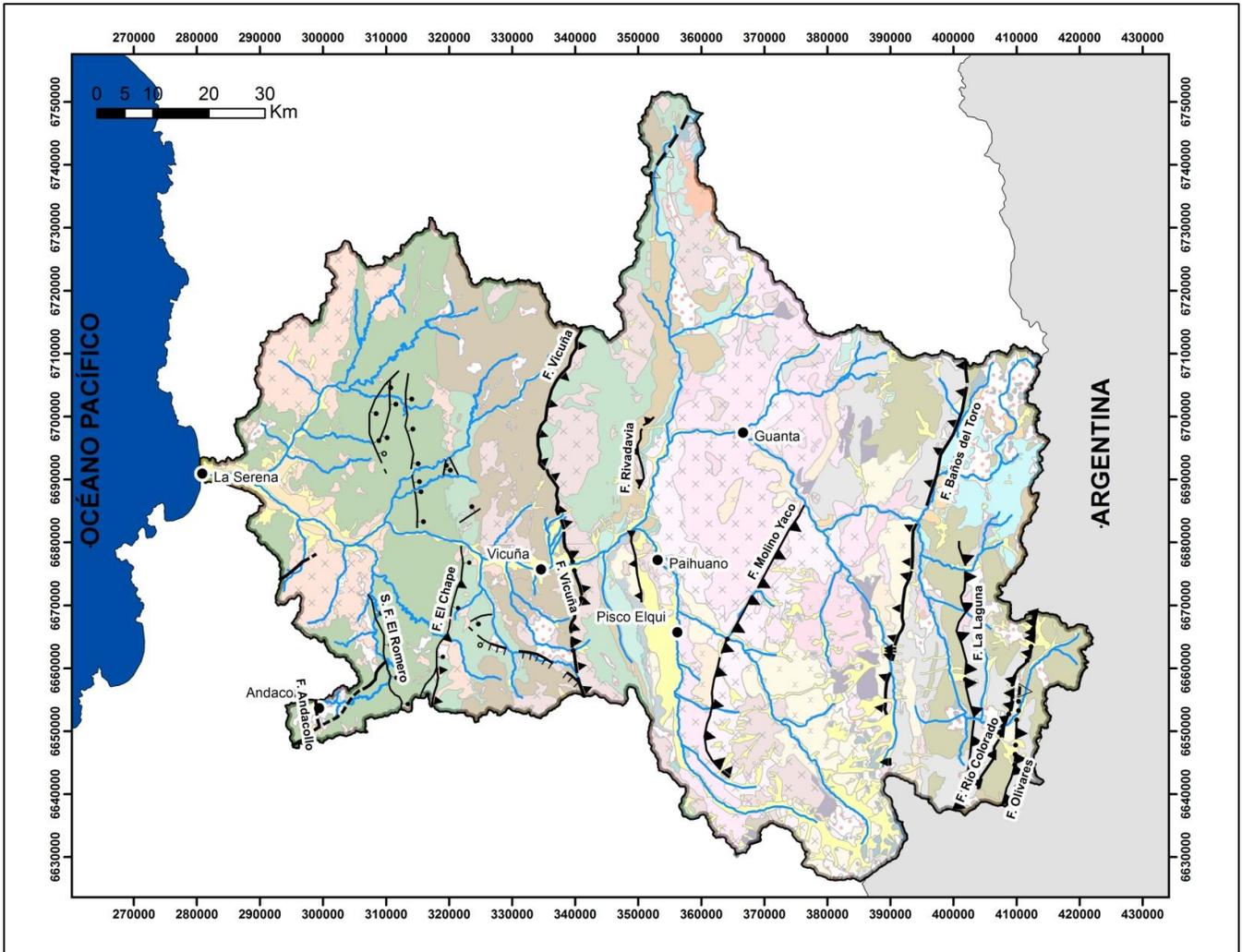


Figura 2. 6. Estructuras principales de la cuenca del río Elqui, compilada de cartas geológicas disponibles (Emparán & Pineda, 2006) (Moscoso, et al., 1982) (Mpodozis & Cornejo, 1988) (Nasi, et al., 1990) (Pineda & Emparán, 2006)

La falla Rivadavia corresponde a un conjunto de fallas inversas, de dirección NS-NNE, con inclinación hacia el oeste, que atraviesa la localidad del mismo nombre.

Debido a la ausencia de niveles estratificados marcadores de la deformación, la zona del Batolito Elqui-Limarí (BEL) ofrece un aspecto homogéneo y macizo. Sólo en el valle del Cochiguás, se observan fallas inversas de importancia (Falla Molino Yaco) que ponen en contacto diferentes unidades de rocas intrusivas.

La falla Baños del Toro, con manteos de 60°-80°W y rumbo NNE-NS, se reconoce por aproximadamente 100 km en territorio chileno, desde las nacientes del río Ingaguás por el sur, hasta el río Potrerillos por el norte. Al este del bloque de basamento central, limitado por la falla Baños del Toro, se encuentra el graben de El Indio, en el cual se disponen los afloramientos de formaciones neógenas. Al interior de esta depresión tectónica relativa, se encuentran extensas zonas de alteración hidrotermal y los yacimientos auríferos más importantes, conocidos en esta región.

La región de los ríos La Laguna y Colorado, al este del BEL y de la falla Baños del Toro, presenta un estilo estructural dominado por fallas inversas de alto ángulo que, inclinadas al este y oeste, limitan bloques de basamento (“pilares”).

Al sur de la Depresión del El Indio, en el valle de La Laguna, aparece todo un sistema de fallas inversas (fallas La Laguna, Río Colorado, Olivares, y otras), limitando pilares de zócalo de segundo orden, tales como el Horst de La Laguna. Al este del Horst de La Laguna, limitado por la falla Río Colorado, aparece un estrecho graben (Gaben del Río Colorado), bordeado al este por otra falla inversa: la falla Olivares, con manteo al este.

2.7 Alteración hidrotermal y mineralización

En la cuenca del río Elqui existen muchas minas, donde se explota, principalmente, Cu, Au, Ag, Mn, Fe y Baritina, entre otros (Sernageomin, 2012) (Figura 2. 7 y Figura 2. 8)

Las minas de recursos metálicos más importantes se agrupan en distritos mineros (Figura 2. 9). Los distritos mineros más importantes, desde un punto de vista tanto económico como histórico, son: Andacollo, Talcuna, Arqueros y El Indio-Tambo. Además, existen numerosas zonas de alteración hidrotermal que, en algunos casos, se asocian a mineralización económica (Figura 2. 9).

A continuación se presenta una descripción general de las áreas de alteración hidrotermal y de las zonas mineralizadas, según su distribución geográfica de oeste a este, a partir de la bibliografía revisada.

Franja Metalogénica del Cretácico Inferior (Cordillera de la Costa)

Entre los 26° a 32°S existe una franja que se extiende por más de 600 km, agrupando muchos yacimientos de Fe (magnetita-apatito) hospedados en rocas volcánicas del Cretácico Inferior, afectadas por metamorfismo de contacto producido por intrusivos del Cretácico Superior-Terciario. Estos depósitos están dentro del dominio del segmento meridional del Sistema de Falla de Atacama y forman lo que se conoce como la franja ferrífera chilena. Existen indicios menores de mineralización de cobre y de oro ligados al mismo contexto, particularmente en la periferia de los cuerpos ferríferos o en la zona de la Falla de Atacama (Maksaev, 2001).

Existen, además, depósitos estratoligados de Cu hospedados por rocas volcánicas y volcanoclásticas, como Talcuna. En zonas de contacto entre intrusivos del Albiano y calizas neocomianas existen skarns cupríferos.

- **Andacollo:** ubicado en las nacientes de la quebrada Arrayán, es un distrito complejo, incluye depósitos de Cu porfídico, Au epitermal en mantos y venas, o retrabajado en placeres, Cu y Hg en venas. Las venas y placeres han constituido la principal fuente de oro en Andacollo y han sido explotados desde tiempo prehispánicos. La mineralización de cobre en Andacollo fue descubierta por mineros de placeres hace 35-40 años. Aunque el Hg es raro en los depósitos de Cu porfídico, Andacollo es uno de los 3 depósitos de este tipo en el mundo donde se ha reportado Hg (Higueras, et al., 2004). La mineralización del pórfido

cuprífero de Andacollo se puede resumir como sigue: El sombrero contiene variadas cantidades de goethita, jarosita y hematita. El manto enriquecido presenta calcosina bordeando cantidades subordinadas de pirita y calcopirita. La mineralización hipógena consiste en pirita y calcopirita con cantidades moderadas de hematita, subordinadamente molibdenita y oro (Reyes, 1991). La mineralización de Cu está asociada a alteración potásica acompañada de albitización (Marquardt, 1980).

Las venas y mantos de Au, son periféricos al pórfido de Cu, a lo largo de su margen occidental. Los placeres se formaron principalmente por erosión de las venas y mantos, y están ubicados a decenas de metros o hasta 1 km desde la fuente aparente, en quebradas que cruzan el depósito porfídico de Cu. Las venas se asocian a adularia-hematita o halos de alteración clorítica. El sulfuro más común en los brotes de oro es la pirita (aurífera), que, cuando es de segunda generación, está acompañada por calcopirita, esfalerita, galena y cinabrio (Reyes, 1991). Los minerales de ganga son, generalmente, cuarzo y, localmente, calcita. La mineralización de oro está asociada principalmente a alteración

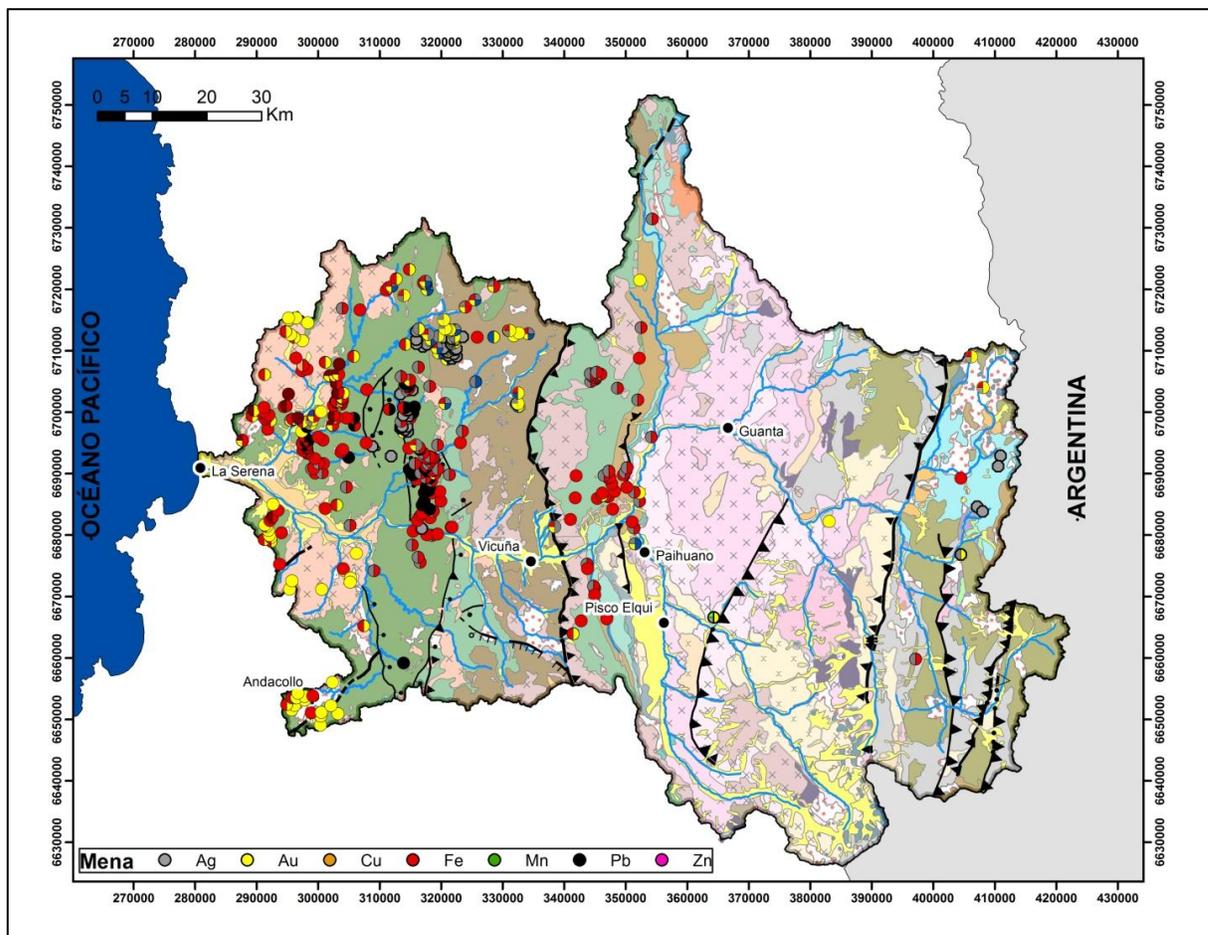


Figura 2. 7. Principales recursos minerales metálicos en la cuenca del río Elqui. Para la leyenda de la base geológica ver Figura 2. 5¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

potásica, presentando también alteraciones propilítica y argílica. La alteración potásica provoca la introducción de K_2O , el cual alcanza valores del 12-13% en algunas rocas (Reyes, 1991).

Las venas de Hg contienen schwazita (tetraedrita de Hg), pirita, calcopirita, bornita y galena.

Al norte y noreste de Andacollo, existen yacimientos auríferos en rocas de una unidad plutónica del Cretácico (minas Huancarará, La Monja, Iván, Las Mollaquitas). La erosión de los yacimientos de oro ha originado la formación de placeres auríferos en la quebrada Andacollo (en la naciente de la quebrada Arrayán, junto a la localidad de Andacollo) y quebrada de Talca.

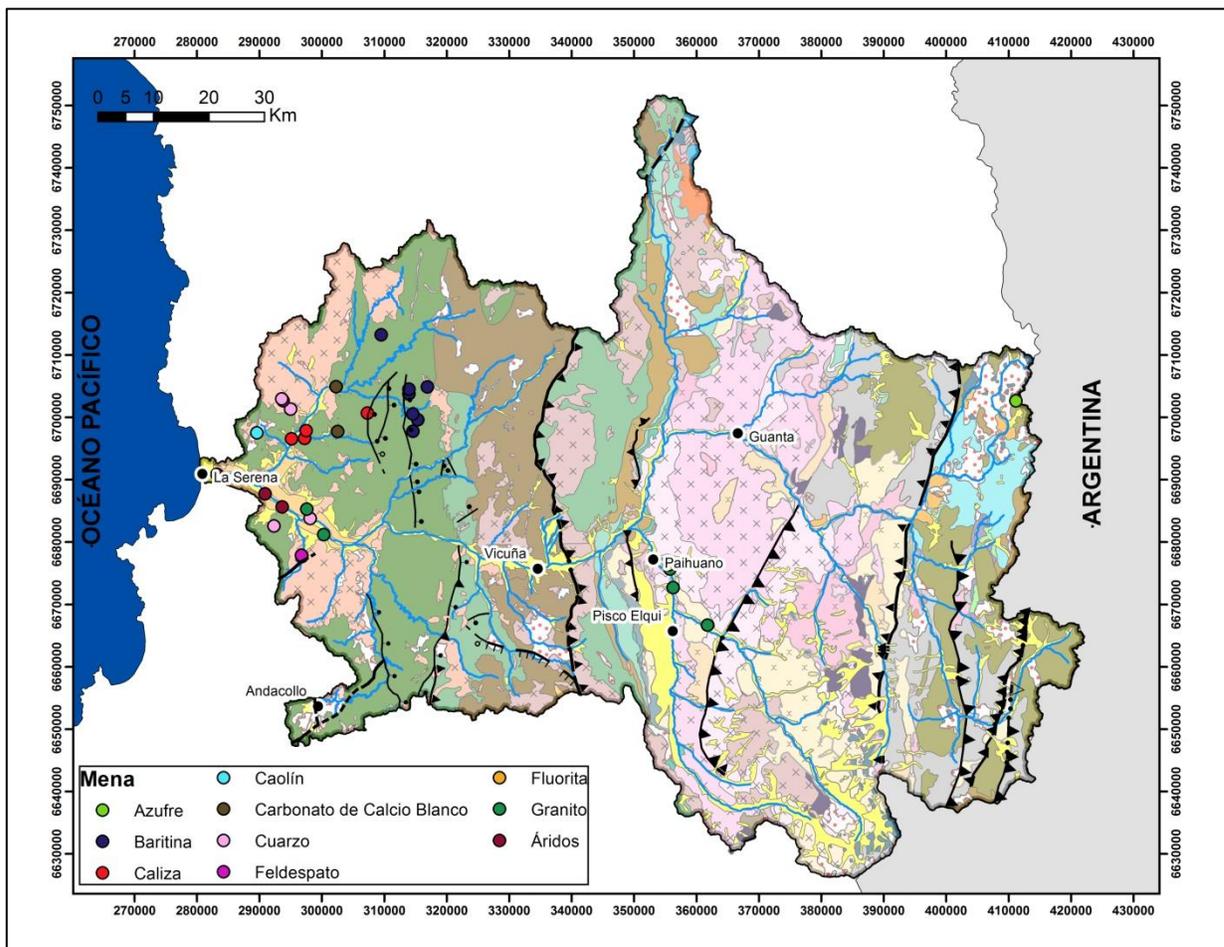


Figura 2. 8. Principales recursos minerales industriales en la cuenca del río Elqui (Sernageomin, 2012). Para la leyenda de la base geológica ver Figura 2. 5.

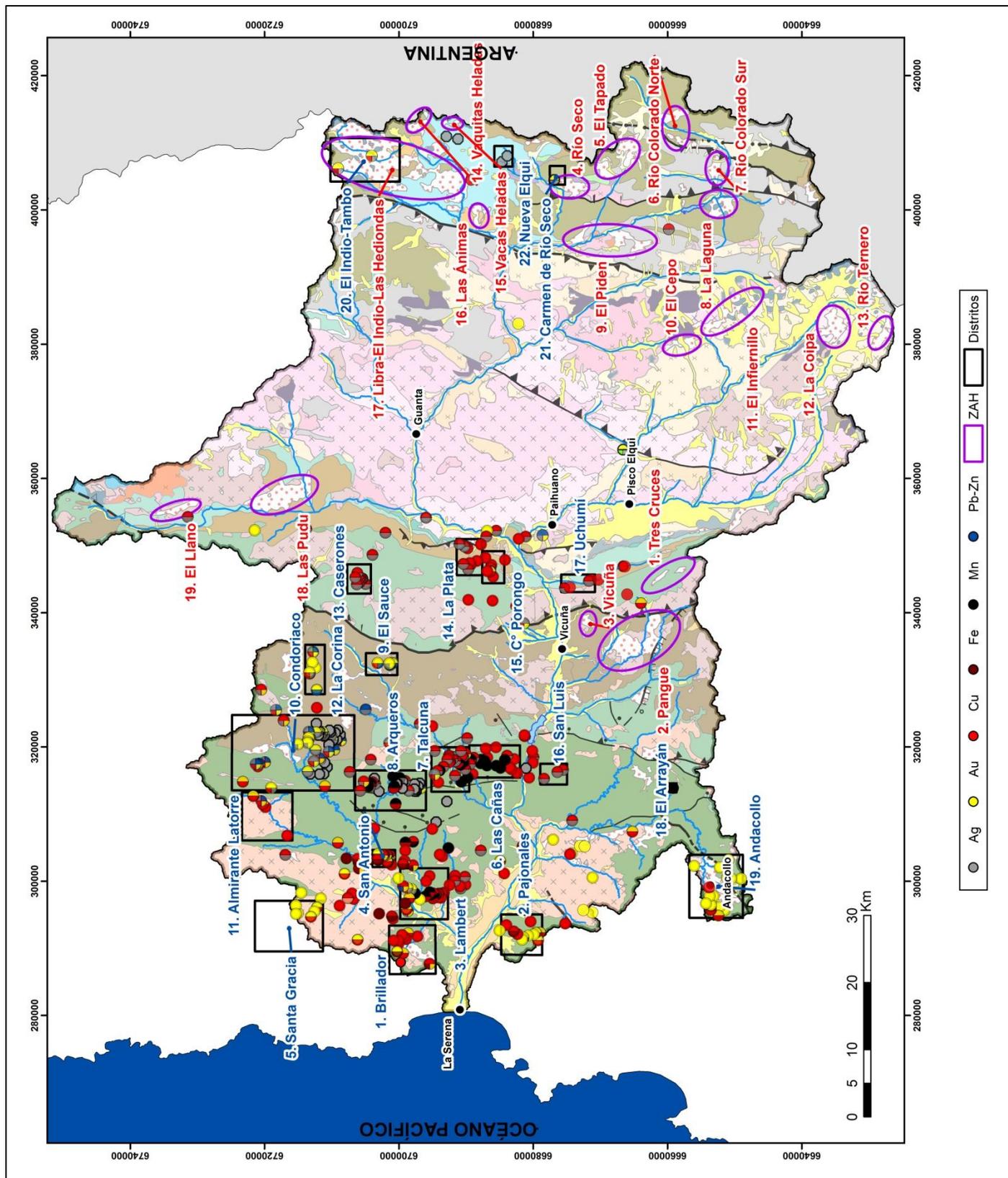


Figura 2. 9. Distritos mineros y zonas de alteración hidrotermal de la cuenca del Elqui. Rectángulos negros= Distritos mineros: 1. Brillador: Cu, Au (Ag, Fe); 2. Pajonales: Cu, Au (Fe); 3. Lambert: Cu, Mn, Au (Ag, Fe, Pb-Zn); 4. San Antonio: Cu, Au, Fe; 5. Santa Gracia: Au, Cu; 6. Las Cañas: Mn, Cu (Ag); 7. Talcuna: Cu, Ag, Mn (Au); 8. Arqueros: Ag, Cu, Mn (Au, Pb-Zn); 9. El Sauce: Au (Cu, Pb-Zn, Ag); 10. Condoriaco: Ag, Au, Cu (Pb-Zn); 11. Almirante Latorre: Cu, Au (Fe, Pb-Zn); 12. La Corina: Au (Cu, Pb-Zn, Ag); 13. Caserones: Cu, Ag (Au); 14. La Plata: Cu, Ag; 15. C° Porongo: Cu (Ag, Au); 16. San Luis: Cu (Ag); 17. Uchumí: Cu (Ag); 18. El Arrayán: Mn; 19. Andacollo: Au, Cu; 20. El Indio-Tambo: Au, Ag, Cu; 21. Carmen de Río Seco: Au, Ag (Sb); 22. Nueva Elqui: Ag. Elipses moradas= Zonas de alteración hidrotermal: 1. Tres Cruces, 2- Pangué, 3. Vicuña, 4. Río Seco, 5. El Tapado, 6. Río Colorado Norte, 7. Río Colorado Sur, 8. La Laguna, 9. El Piden, 10. El Cepo, 11. El Infiernillo, 12. La Coipa, 13. Río Ternero, 14. Vaquitas Heladas, 15. Vacas Heladas, 16. Las Ánimas, 17. Libra-El Indio-Las Hediondas, 18. Las Pudu, 19. El Llano.

- **Talcuna:** El distrito Talcuna se ubica en el centro de la quebrada Marquesa. Los yacimientos del distrito Talcuna son vetas y mantos de sulfuros de Cu, con contenidos menores de Ag, los cuales se han trabajado desde el siglo pasado en una docena de minas independientes. Existe, además, un manto con mineralización de Mn. Al sur del distrito, este manto alcanza gran desarrollo y ha sido intensamente explotado.

Los mantos cupríferos, que son los yacimientos de mayor potencial económico, se localizan en la Formación Quebrada Marquesa en dos Unidades. Los minerales de mena hipógenos incluyen: calcopirita, bornita, calcosina, galena y blenda. La ganga, también hipógena, es calcita, con cantidades menores de baritina, hematita, prehnita, albita, epidota y ceolita. La mineralización supérgena corresponde a: crisocola, malaquita, calcosina y covelina.

Existe una veta, denominada Socorro, que se diferencia de las demás porque está formada por bandas simétricas de calcita y baritina, con una fina disseminación de calcopirita, bornita, galena y escasa calcosina.

El manto con mineralización de Mn sobreyace directamente a los mantos cupríferos. La mineralización corresponde a: braunita, pirolusita, psilomelano, manganita y transmantita. En este horizonte se encuentran los yacimientos de Mn más importantes del país (Boric, 1985).

Franja Metalogénica del Cretácico Superior (Cordillera de la Costa-Precodillera)

Es una franja distribuida en la parte media del país al menos entre Copiapó y Rancagua. Incluye vetas mesotermales a epitermales de oro y plata. La mayor parte de las vetas auríferas corresponde a sistemas de tipo cuarzo-sulfuros-oro \pm cobre, sistemas de tipo carbonato-metales base-oro y depósitos epitermales. También se encuentran distritos clásicos de vetas mesotermales argentíferas hospedadas en rocas carbonatadas neocomianas como Arqueros

- **Arqueros:** Los depósitos epitermales tipo vena del distrito Arqueros se ubican 7 km al NW de Talcuna. El distrito Arqueros está actualmente inactivo, sus venas de plata fueron explotadas durante los años 1825-1881 y hasta hace algunos años se explotaba baritina. La mineralización ha sido descrita como arquerita, argentita, plata nativa, polibasita, cerargirita y pirargirita-proustita, con una ganga de baritina y calcita (Oyarzún, et al., 1998).

Mineralización y alteración hidrotermal asociadas a rocas del Mesozoico-Paleógeno (Precordillera-Alta Cordillera)

Los depósitos minerales emplazados en rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico y Paleógeno, se ubican generalmente en la periferia de los plutones terciarios (Superunidad Cogotí). En ellos se encuentran yacimientos estratiformes de Cu (Distrito Uchumí) y vetiformes polimetálicos de Au, Ag y Pb (Mina San Miguel).

- **Uchumí:** El distrito Uchumí corresponde a un grupo de yacimientos de tipo manto, que fueron explotados, en pequeña escala, entre las décadas de 1920 y 1970. Los mantos mineralizados de las minas Yume, Esperanza y Santa María, se ubican en areniscas en los niveles superiores de la Formación Pucalume. La mineralización está formada por pirita, calcopirita, bornita, calcosina, malaquita, atacamita, azurita y crisocola. La ganga contiene calcita, clorita y cuarzo (Mpodozis & Cornejo, 1988).
- **Mina San Miguel:** La mineralización presente en la Mina San Miguel, ubicada en la quebrada Dolores del río Claro, es una veta de Au, Ag y Pb, en calizas y areniscas de la Formación Tres Cruces. La mineralización contiene galena argentífera, pirita, blenda y oro en las limonitas; y está asociada a pequeños stocks terciarios (Superunidad Cogotí) expuestos en las cercanías.

Las zonas de alteración hidrotermal más importantes presentes en las rocas mesozoicas son Tres Cruces, El Pangue, Las Pudú y Quebrada El Llano.

- **Tres Cruces:** La zona de Tres Cruces se encuentra al este de la Falla Vicuña, afecta a lavas de la Formación Cerrillos en las cercanías del Plutón Peralillo. La zona alterada presenta núcleos aislados de intensa silicificación y halos sericíticos periféricos. La mineralización es muy escasa, cuando está presente corresponde a sulfuros lixiviados y disseminación fina de hematita, en las zonas silicificadas. Se ha detectado disseminación de sulfuros en profundidad.
- **El Pangue:** La zona de El Pangue está ubicada al oeste de la Falla Vicuña al sur del Vicuña, y afecta a rocas de la Formación Los Elquinos. Se trata de tres áreas alteradas que muestran un modelo concéntrico de alteración sericítica en el borde, intensa caolinización en la zona central y núcleos silicificados dispersos.
- **Las Pudu:** La zona de Las Pudu se ubica en la ladera oriental de la quebrada El Calvario, afecta a la Formación Algarrobal y la parte inferior de la Formación Pucalume. Los minerales de alteración son cuarzo, pirita, caolín, sericita, arcillas (montmorillonita), hematita y epidota. Se ha reconocido también la presencia de yeso.
- **El Llano:** La zona de Quebrada El Llano se ubica 8 km al norte de Las Pudu, afecta a rocas intrusivas del Paleoceno-Eoceno y a la Formación Algarrobal. Las rocas se encuentran fuertemente silicificadas, con argilización de feldespatos, con pátinas de limonitas y sin manifestaciones de mineralización metálica.

Mineralización en el Batolito Elqui-Limarí (Alta Cordillera)

El Batolito Elqui-Limarí (BEL), de edad paleozoica, aflora en el lado este de la Falla Vicuña. Las áreas mineralizadas en el BEL son muy escasas, se restringen a pequeñas vetas de cuarzo-oro en las Unidades Guanta y Cochiguás. En esta última existen numerosas vetas pegmatíticas, cuarzo-feldespáticas que, en Paihuano, están asociadas a mineralización de fluorita (Mina Mercedes).

- **Mina Lautaro:** En la quebrada El Pangué (Río Cochiguás) y teniendo como roca de caja a granodioritas con muscovita de la Unidad Cochiguás, se encuentra un grupo de cuatro pequeñas vetas auríferas de rumbo norte-sur emplazadas en una zona de fracturas paralelas a la Falla Molino Yaco, son rellenas por cuarzo lechoso, con mineralización primaria de pirita y arsenopirita. Este tipo de vetas auríferas es de común ocurrencia en el BEL. Entre ellas se pueden mencionar, por ejemplo, las vetas que se encuentran en el valle del río Turbio o inmediatamente al este de Los Horcones.
- **Pegmatitas con Fluorita:** En el valle del Elqui, existen dos pequeños yacimientos de fluorita: el primero, en Gualliguaica (Mina El Cine), y el segundo, en Paihuano (Mina Mercedes). La fluorita forma pequeños cuerpos lenticulares asociados a cuarzo, calcita, feldespato potásico, galena y blenda. Se ha señalado, además, la presencia de topacio.

Mineralización y alteración hidrotermal asociadas a rocas del Neógeno (Alta Cordillera)

En el margen oriental de la zona de estudio, adyacente a la frontera con Argentina, se encuentra una franja de zonas de alteración hidrotermal, con un ancho promedio de 25-30 km, que se extiende por más de 250 km, entre los 28° y 31°S.

Las zonas de alteración hidrotermal se ubican, en su gran mayoría, en depresiones tectónicas al este de los sistemas de fallas Baños del Toro. Al sur de los 30°S, existen también zonas de alteración al occidente de la falla Baños del Toro. Los fenómenos de alteración hidrotermal afectan a rocas volcánicas de las formaciones Doña Ana y Baños del Toro y también a rocas del basamento paleozoico. Además, muestran una estrecha relación espacial con los intrusivos de la Unidad Infiernillo. Gran parte de las rocas alteradas presentan un fracturamiento moderado a intenso y es característica la presencia de sulfatos (yeso, alunita, anhidrita, jarosita). Al este de la falla Baños del Toro abundan las zonas con alteración argílica intermedia o avanzada, mientras al oeste predominan las rocas con alteración cuarzo-sericítica. Algunas zonas de alteración presentan, en los sectores más altos, depósitos fumarólicos de azufre nativo y sínteres silíceos. El caso más relevante está representado por las azufreras del Toro, en las cercanías de El Indio, además de pequeños depósitos de azufre en las alteraciones del cerro El Volcán.

Asociados a esta franja de alteraciones, existe una serie de áreas con mineralización de metales preciosos. Al norte de los 30°S existen sectores con mineralización de oro-plata-cobre (El Indio, El Tambo) y de cobre (Las Hediondas), así como depósitos de plata, fuera de las áreas alteradas (Minas Nueva Elqui). Estos depósitos corresponden a yacimientos epitermales típicos, en los cuales la mineralización se dispone en vetas

y/o sistemas de vetas, “clavos” y brechas hidrotermales, encajadas principalmente en rocas con alteración argílica avanzada y cuarzo-sericitica. Al sur de los 30°S existen zonas de alteración hidrotermal que han sido objeto de exploración: Río Seco, La Laguna, Colorado y El Tapado, en el río La Laguna; El Infiernillo, La Coipa y Río Ternerero en las nacientes de los ríos Ingaguás y Claro.

- **Mina El Indio (Au-Ag-Cu):** El yacimiento El Indio se ubica en las nacientes del río Malo. Hasta 1976 la única actividad minera fue la realizada por pirquineros, mineros independientes que trabajaban operaciones pequeñas durante los meses de verano. En 1978 comenzó la actividad de exploración y desarrollo de la propiedad por parte de empresas de mayores recursos. El área mineralizada se encuentra en la Formación Doña Ana. La mineralización primaria es de dos tipos: vetas macizas de sulfuros y vetas de cuarzo-oro que cortan a las primeras.

La mineralización de las vetas macizas de sulfuros corresponde a un agregado cristalino de enargita y pirita de grano grueso, con cantidades subordinadas de tetraedrita, calcopirita, esfalerita y huebnerita. Parte del oro es nativo y se asocia a vetillas de cuarzo que cortan los sulfuros, pero también existe mineralización de Au asociada a la pirita. En superficie, las vetas de sulfuros se presentan lixiviadas, formando una masa silíceo porosa, con boxwork de enargita, con chalcantita, escorodita, jarosita, goethita y mackayita subordinadas.

Las vetas de cuarzo-oro son vetas de relleno, con texturas de brechización, bandeamiento y deposición coloidal, formadas por sílice criptocristalina, en forma de cuarzo, que aparece junto a variedades amorfas como calcedonia, ópalo y jaspe. Las vetas contienen, además, fragmentos de las rocas de caja silicificadas con alunita, caolín y pirofilita. La mineralización principal consiste en oro nativo que se presenta finamente diseminado dentro del cuarzo, en cúmulos irregulares y en vetillas. Los principales minerales asociados al oro nativo son pirita y tenantita, encontrándose, en forma subordinada, esfalerita, huebnerita y calcopirita. Ocasionalmente, este metal se encuentra asociado a enargita, galena y digenita. En las partes superiores de las vetas, el oro muestra una asociación con telurios (hessita, sylvanita, petzita, calaverita, krenerita y telurio nativo) y también con arseniatos y sulfatos (escorodita, osarizawaita, beudantita, entre otros).

- **Mina El Tambo (Au-Ag-Cu):** El Tambo se ubica 6 km al sureste de El Indio, dentro de la misma zona de alteración hidrotermal. El yacimiento se encuentra emplazado en rocas de la Formación Doña Ana, afectadas. La mineralización se encuentra en vetas y brechas hidrotermales. Las vetas están formadas por cuarzo, baritina y alunita. Localmente existen vetas de baritina de grano grueso y alunita intersticial, con oro visible en los planos de clivaje de la baritina, acompañado por telurio nativo. En profundidad, la alunita tiende a desaparecer, y la mineralización de oro se encuentra estrechamente relacionada a sectores silicificados, con enargita y pirita finamente diseminada.
- **Mina Las Hediondas (Cu):** Se ubica en el extremo sur de la extensa zona de alteración de Libra-El Indio- Las Hediondas. La alteración afecta a rocas de la Formación Baños del Toro. El fracturamiento es intenso, encontrándose sectores

brechizados, con una matriz de arcillas y yeso entre los fragmentos angulosos silicificados. La mineralización primaria corresponde a venillas de enargita, piritita y arsenopiritita, con una zona de sulfatos. La explotación se realizó principalmente en tajos superficiales, tanto en rocas como en escombros de falda, impregnadas con chalcantita.

- **Minas Nueva Elqui (Ag):** Las minas Nueva Elqui se ubican fuera del área de alteración hidrotermal de Libra-El Indio-Las Hediondas. Corresponden a una serie de vetas argentíferas encajadas en rocas de la Formación Baños del Toro. Consisten en una serie de venillas de cuarzo, calcita y baritina, con galena argentífera, tetraedrita y plata nativa con escasa piritita y blenda. Otros yacimientos vetiformes menores con mineralización de plata se ubican al norte del cerro de Las Tórtolas, en la parte superior de la quebrada Barriquitas. Allí, la Formación Baños del Toro está atravesada por una serie de vetas verticales a subverticales formadas, en parte, por cuarzo y limonitas argentíferas (minas Barriquitas y Vacas Heladas).
- **Azufreras del Toro:** Se ubican en Loma del Azufre (al sur de la mina El Tambo). El depósito está constituido, en su mayor parte, por una brecha maciza de fragmentos de rocas riolíticas fuertemente alteradas, con una matriz arcillosa amarilla y cementada por azufre nativo, el cual, localmente, también se encuentra en venillas y en bolsionadas irregulares. Sobre esta brecha, o bien, intercalada en la parte superior de ella, se encuentran niveles tobáceo-azufrosos finos y capas delgadas de sínter silíceo-arcilloso.
- **Río Seco:** En esta zona se encuentran labores mineras antiguas, que explotaron algunas vetas de cuarzo con oro, adyacentes al cuerpo central de brechas. Inmediatamente al noreste de la zona de alteración, se ubica la mina Carmen, una veta emplazada en una zona de falla de rumbo con mineralización de oro y plata, ganga de cuarzo y baritina, y abundantes sulfuros (galena, estilbita y piritita).
- **El Piden:** En la ladera occidental del río La Laguna, se observan vetas con mineralización de Cu y Ag (Mina San Antonio), que conforman un sistema de vetas menores y diaclasas mineralizadas con calcopiritita, bornita y calcosina, en la periferia de la zona de alteración El Piden.
- **Río Colorado:** En Río Colorado Sur, en la Formación Pastos Blancos se encuentra piritita diseminada, “pebbles breccia”, brechas hidrotermales y vetas de cuarzo con sulfuros lixiviados, bajo costras de sulfatos.
- **La Coipa:** En las nacientes del río Cochiguás (Prospecto Coipa), se encuentra un stockwork con venillas de molibdenita, en rocas de la Superunidad Elqui.
- **Río Ternero:** En las nacientes del río Claro, también se encuentran pequeños “mantos” de azufre nativo, cubiertos por costras de sulfato.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 Metodología de terreno

Para realizar este estudio se cuenta con 126 muestras de sedimento fluvial (Figura 3. 1). De éstas, 29 muestras fueron recolectadas durante el año 2009 por los geólogos Juan Pablo Lacassie y Alejandro Díaz, en el desarrollo un pre-proyecto de muestreo geoquímico de sedimentos fluviales para Sernageomin. Las 97 muestras restantes fueron recolectadas durante el año 2012, en el marco del proyecto de Cartografía Geoquímica del Plan Nacional de Geología de Sernageomin.

Las muestras fueron recolectadas a lo largo de los drenajes principales de la cuenca (Figura 2. 3), para lograr abarcar la mayor superficie drenada. Los puntos de muestreo fueron definidos a una distancia aproximada de de 4 km entre uno y otro a lo largo del cauce. En cada punto de muestreo se registraron las coordenadas geográficas y se realizó una breve descripción del lugar.

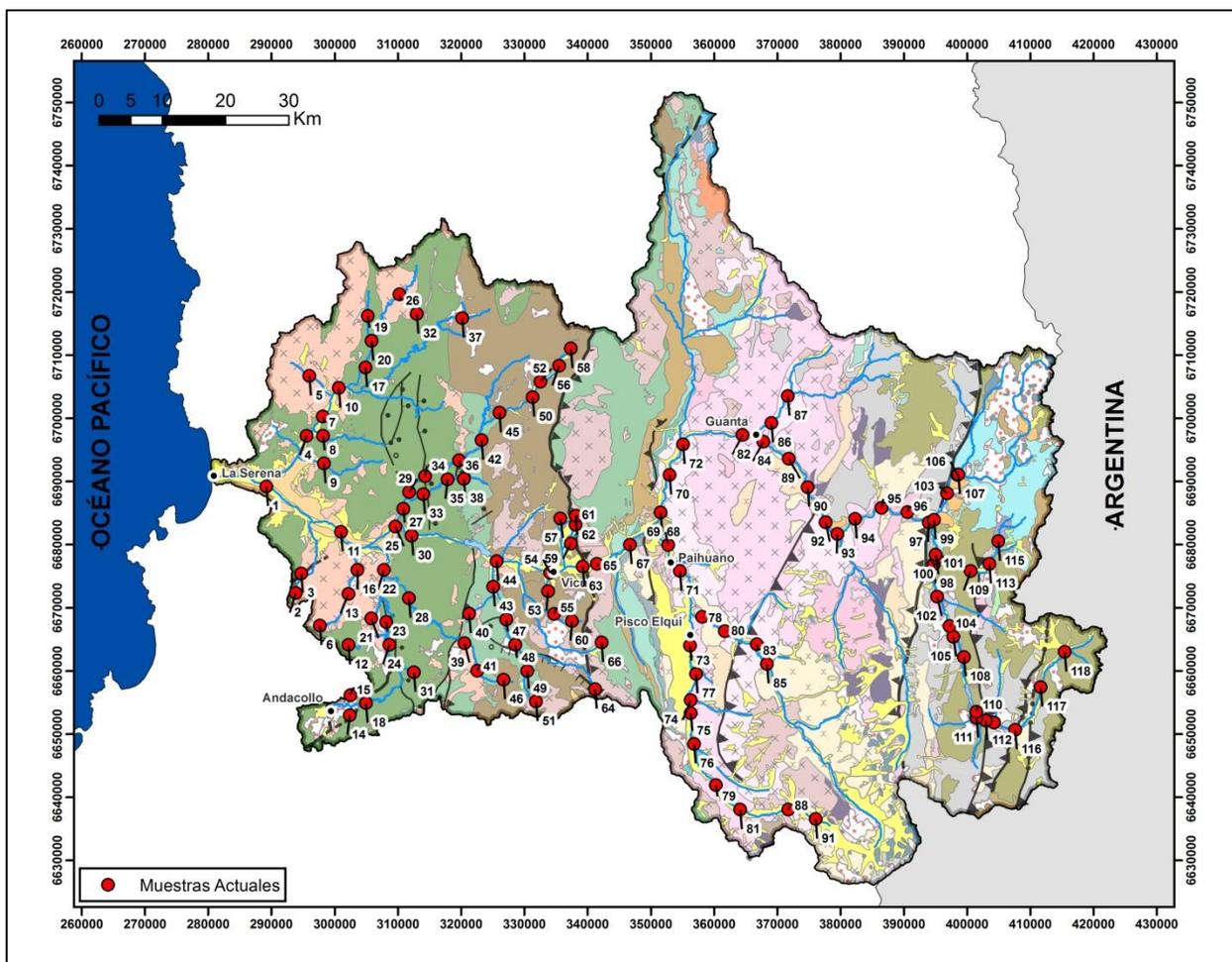


Figura 3. 1. Ubicación de puntos muestreados para muestras de sedimento fluvial actual, con códigos ficticios. Ver código real y datos de las muestras en Anexo D.

Cada muestra fue conformada por un compuesto (2 a 4 kg en total) de sub-muestras recolectadas en un tramo de entre 20 y 50 m a lo largo y ancho del canal, cuando era posible, y a una profundidad máxima de 5 cm en el lecho del mismo. La cantidad de sub-muestras tomadas y el radio de muestreo varían según el espesor del sedimento fino presente en el cauce muestreado.

Para ocho muestras ubicadas en un sector de interés (confluencia de los ríos Toro y La Laguna) se tomó una segunda muestra correspondiente a un compuesto de sedimentos de terraza fluvial, cuando era posible. En este caso se muestreó principalmente las capas de material fino, tamaño arena o limo, en un perfil vertical (Figura 3. 2).

Las muestras fueron tomadas utilizando una pala de PVC, almacenadas en bolsas de polietileno transparente y debidamente etiquetadas. Registrando, además, las coordenadas del punto de muestreo y características generales del entorno como color

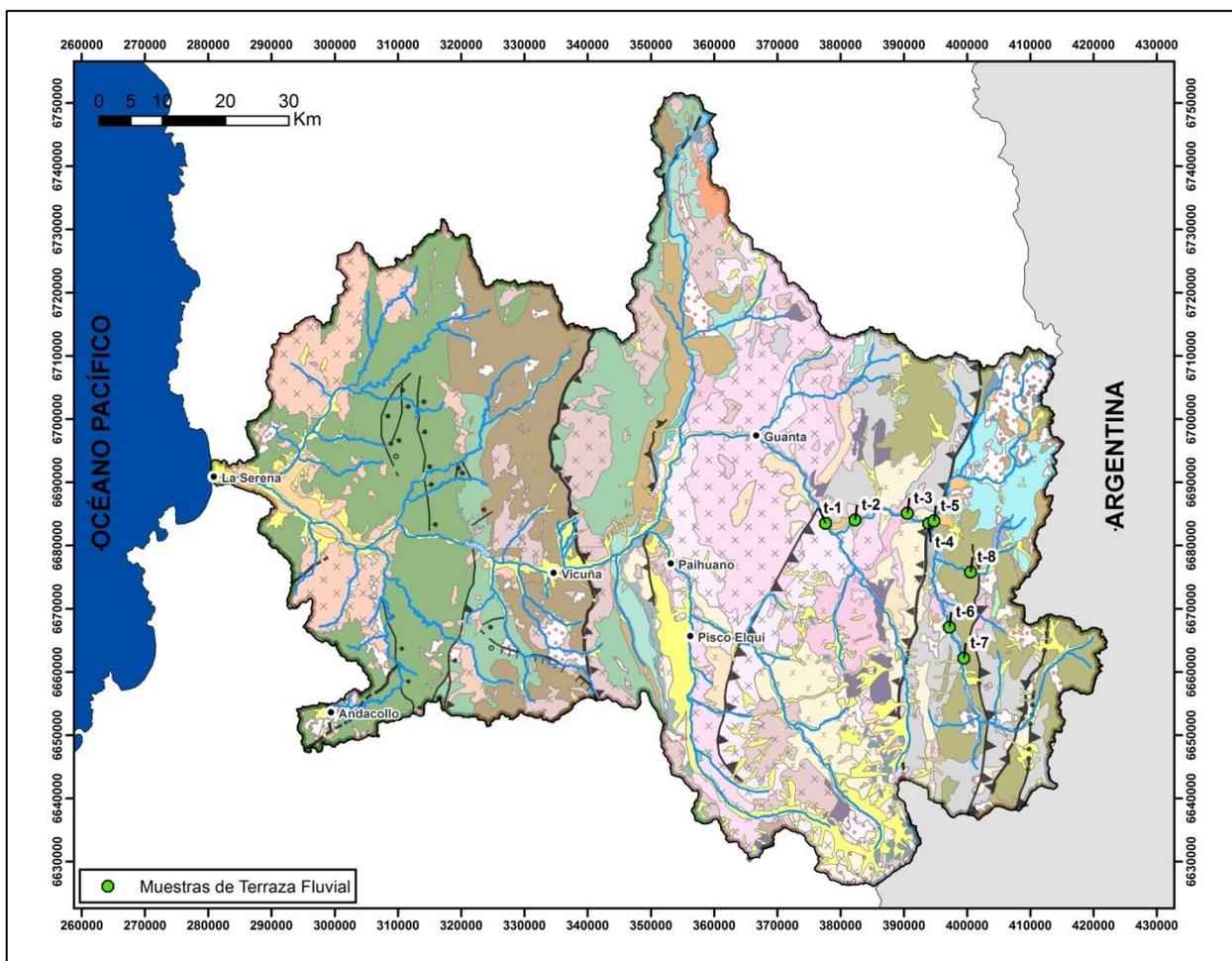


Figura 3. 2. Ubicación de puntos muestreados para muestras de sedimento fluvial actual, con códigos ficticios. Ver código real y datos de las muestras en Anexo D.

y tamaño de grano del sedimento, abundancia de vegetación o materia orgánica, mineralogía destacable, litología de laderas, etc.

Las muestras se clasificaron según las siguientes definiciones:

- Sedimento fluvial activo: muestras obtenidas de quebradas, esteros y ríos en donde se observa escorrentía en el momento en que se toma la muestra (Figura 3. 3-A)
- Sedimento fluvial reciente: muestras obtenidas de quebradas, esteros y ríos en donde no se observa escorrentía en el momento en que se toma la muestra, pero existen evidencias de escorrentía reciente (Figura 3. 3-B).
- Sedimento de drenaje: muestras obtenidas de drenajes en los que no se observan evidencias de escorrentía reciente (Figura 3. 3-C).
- Sedimento de terraza fluvial: muestras obtenidas de terrazas fluviales (Figura 3. 3-D).

Se considera, para este trabajo, que las muestras de sedimento fluvial activo, reciente y drenaje corresponden a sedimento actual. Por otro lado, se estima que las muestras de terraza fluvial tienen, por lo general, un carácter pre-industrial, es decir, representan la señal química de la cuenca sin aportes o influencias antrópicas.



Figura 3. 3. Tipos de muestras: A. Sedimento fluvial activo; B. Sedimento fluvial reciente; C. Sedimento de drenaje; D. Sedimento de terraza fluvial.

Las muestras actuales incluyen 6 duplicados de terreno, que corresponden a una muestra tomada en el mismo punto y a partir del mismo sedimento que la muestra original, inmediatamente después de la toma de ésta. Se toma un duplicado cada 20 muestras, para fines estadísticos de control de calidad.

3.2 Metodología de laboratorio

3.2.1 Preparación de muestras

En el laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería las muestras activas fueron secadas en un horno a 27°C durante un período de 3 a 5 días (se utiliza esta metodología para evitar cambios mineralógicos de baja temperatura que suelen ocurrir en las arcillas). Sin embargo, debido a la limitada capacidad del horno, numerosas muestras debieron permanecer en sus respectivas bolsas durante varios días antes de ser secadas. En forma posterior al secado, las muestras fueron tamizadas en mallas de acero inoxidable (malla # 80) con el fin de separar la fracción fina <180 µm. De esta fracción se recuperaron aproximadamente 30 gramos de material fino (<180 µm), los cuales fueron pulverizados posteriormente con un mortero de ágata durante 3 minutos (Figura 3. 4). El material fino-pulverizado resultante se almacenó en frascos plásticos transparentes estériles y el material sobrante se guardó en bodega como respaldo.

3.2.2 Análisis químico

Los frascos con las muestras preparadas (tamizadas y pulverizadas) fueron enviados a Acme Labs (laboratorio canadiense con certificación internacional). Allí se determinó la abundancia total de óxidos principales mediante espectrometría de emisión ICP-ES y la abundancia de elementos traza mediante espectrometría de masa ICP-MS.

Se analizaron las concentraciones de 59 elementos químicos: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, Cr₂O₃, Fe₂O₃, MgO, MnO, P₂O₅, C_{total} y S_{total} en wt%; Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Hg, Tl y Se en ppm; y Au en ppb.

Para los análisis por ICP-ES, se tomaron muestras de 0,2 gramos las cuales fueron descompuestas mediante una digestión por ácido nítrico y fusión con metaborato-tetraborato de litio (Acme Labs, 2009).

Para el caso de los análisis por ICP-MS, se prepararon dos tipos de muestras: 1) Para análisis de tierras raras y algunos elementos traza: misma preparación que para el ICP-ES; 2) Para análisis de metales preciosos y metales base: se tomaron muestras de 0,5 gramos, las cuales fueron digeridas en Agua Regia (Acme Labs, 2009).



Figura 3. 4. Metodología de laboratorio. A: secado en horno a $<27^{\circ}\text{C}$. B: Cuarteado. C: Tamizaje y separación de fracción fina ($<180\ \mu\text{m}$). D: Pulverización de mortero de ágata.

3.3 Procesamiento de datos

3.3.1 Digitalización de mapas geológicos

Los mapas geológicos disponibles para la cuenca del río Elqui, al momento de realizar este trabajo, corresponden a:

- Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, escala 1:250.000 (Moscoso, et al., 1982);
- Hoja Pisco Elqui, escala 1:250.000 (Mpodozis & Cornejo, 1988);
- Hoja Guanta, escala 1:250.000 (Nasi, et al., 1990);
- Hoja Andacollo-Puerto Aldea, escala 1:100.000 (Emparán & Pineda, 2006);
- Hoja Vicuña-Pichasca, escala 1:100.000 (Pineda & Emparán, 2006).

Estas publicaciones, que se encuentran escaneadas, tienen diferentes escalas y algunas están bastante deterioradas dado su antigüedad, lo que hace difícil trabajar con ellas. Debido a esto se procedió a digitalizar la geología y estructuras principales de la zona que corresponde a la cuenca del río Elqui, a partir de estos mapas (Figura 3. 5).

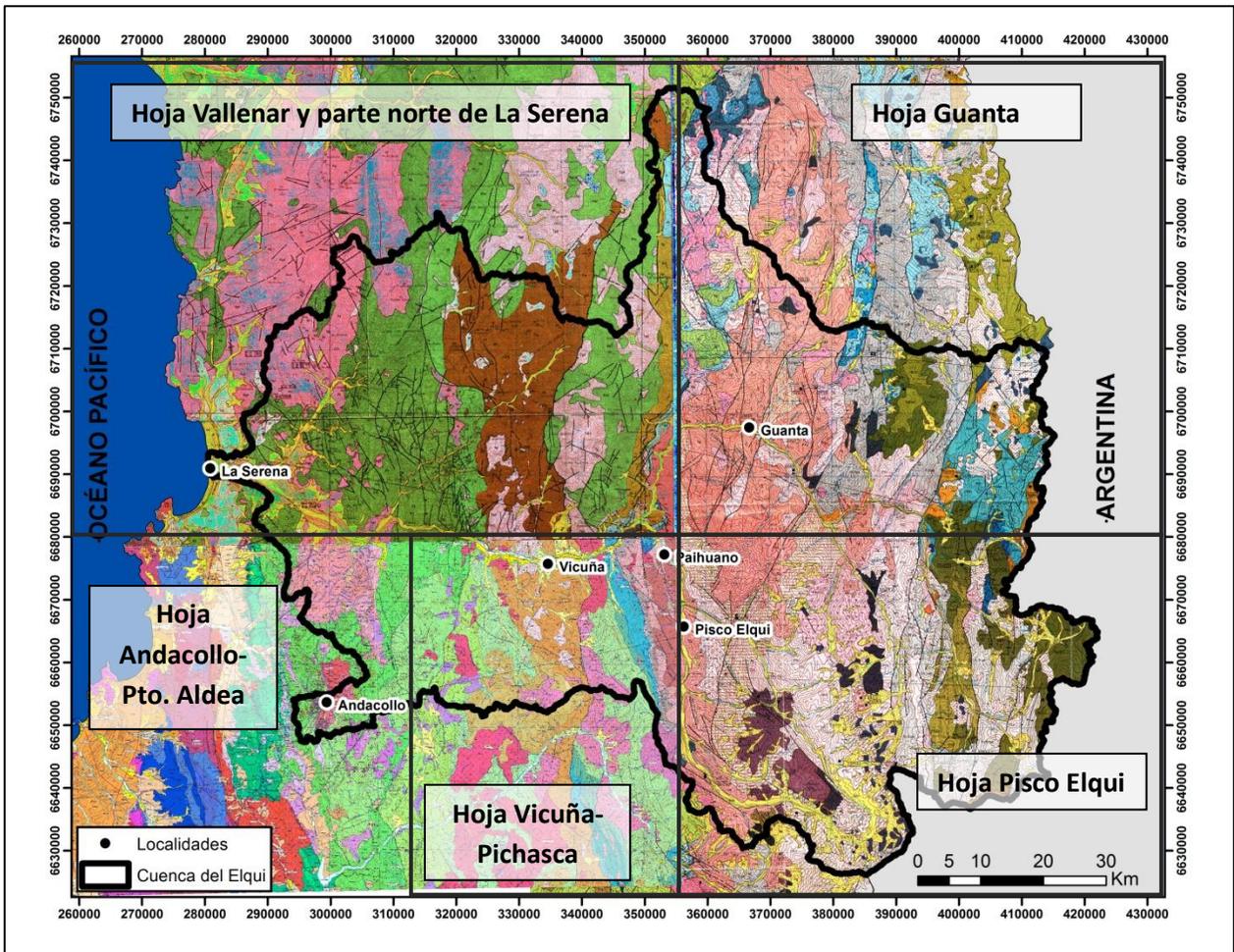


Figura 3. 5. Mapas geológicos disponibles Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, escala 1:250.000 (Moscoso, et al., 1982); Hoja Pisco Elqui, escala 1:250.000 (Mpodozis & Cornejo, 1988); Hoja Guanta, escala 1:250.000 (Nasi, et al., 1990); Hoja Andacollo-Puerto Aldea, escala 1:100.000 (Emparán & Pineda, 2006); Hoja Vicuña-Pichasca, escala 1:100.000 (Pineda & Emparán, 2006)

3.3.2 Control de Calidad

Se realizó un control de calidad del proceso de muestreo, preparación y análisis de las muestras. El fin de este análisis es estimar el error total de los datos, producto de los procesos mencionados más el error fundamental. Se entiende por error fundamental aquel error producto de la heterogeneidad propia de los sedimentos, no produce sesgo sistemático, sólo variabilidad en torno al valor real (Magri Consultores Ltda, 2012).

Para este análisis se utilizaron 6 duplicados de terreno. Si bien es una cantidad reducida de muestras duplicadas, corresponde a la razón de 1 duplicado cada 20 muestras recomendada (Magri Consultores Ltda, 2012).

Para cada elemento se calcularon las diferencias y varianzas relativas entre pares (original-duplicado), así como las estadísticas estándar: mínimo, máximo, media y varianza. Con estos datos se obtuvo el Error Relativo Global (Ecuación 2 y Ecuación 3).

Además, se realizaron los siguientes gráficos: duplicado vs original, diferencia relativa vs porcentaje acumulado (Ecuación 1).

La interpretación de estos análisis corresponde a la presentada en el curso “Muestreo y control de calidad para exploración y minería” realizado por Magri Consultores Ltda a geólogos de Sernageomin en enero de 2012. (Magri Consultores Ltda, 2012).

$$\text{Diferencia relativa } [\%] = 200 * \left[\frac{A - B}{A + B} \right]$$

Ecuación 1. Diferencia relativa para control de calidad.

$$\text{Varianza Relativa} = \frac{\text{Varianza}}{(\text{Media})^2}$$
$$\text{Varianza Relativa} = 2 * \frac{(A - B)^2}{(A + B)^2}$$

Ecuación 2. Varianza relativa para control de calidad.

$$\text{Error relativo Global } [\%] = \sqrt{\text{Varianza Relativa Media}} * 100$$

Ecuación 3. Error relativo global para control de calidad.

3.3.3 Mapa de concentraciones

Las concentraciones obtenidas para muestras actuales para cada elemento son proyectadas sobre el área de estudio utilizando el software ArcGis. Se generan mapas de puntos con clases definidas por la clasificación de cortes naturales de Jenks, mediante la cual, para un número arbitrario de clases, se maximiza la varianza entre estas clases y se minimiza la varianza dentro de cada clase (Smith, 2013). Para este trabajo se definen tres clases: alta, media y baja, representadas por los colores rojo, amarillo y verde respectivamente (Figura 3. 6).

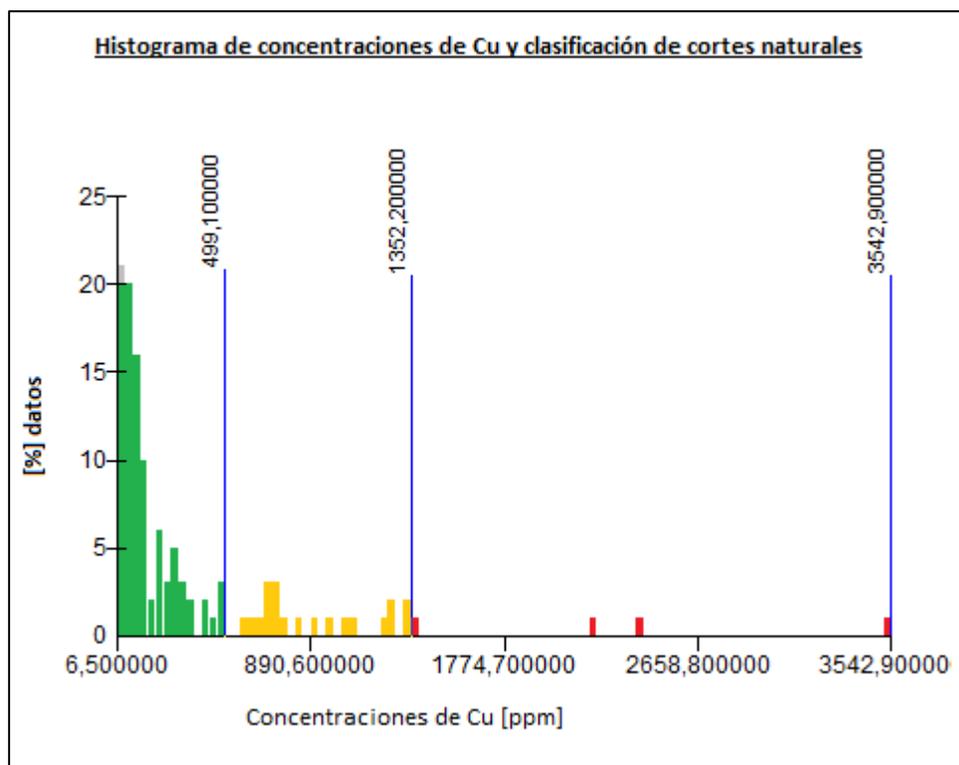


Figura 3. 6. Histograma de concentraciones de Cu con división de clasificación de Jenks.

La clasificación de cortes naturales de Jenks ofrecida por el software ArcGis define los límites de clases donde existen diferencias relativamente grandes en los valores de los datos. Esta es una clasificación específica del set de datos ingresado, en este caso de las concentraciones para un elemento particular, y no es útil para comparar múltiples mapas construidos en base a diferentes elementos (Esri, 2013).

Dada la gran cantidad de datos disponibles, para este análisis se consideraron sólo algunos elementos. La selección se realizó a partir de dos criterios:

- Elementos metálicos de interés económico considerados en la Base de Datos de Yacimientos Minerales de Chile (Sernageomin, 2012): Ag, Au, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn.
- Elementos traza que se consideran como muy tóxicos y a la vez fácilmente disponibles en muchos suelos en concentraciones que sobrepasan los niveles de toxicidad: Ag, As, Cu, Hg, Pb y Sn (Galán & Romero, 2008).

En los mapas de concentraciones, los datos se han agrupado en 3 clases, según la clasificación de cortes naturales de Jenks disponible en el software ArcGis. Se utiliza una escala de colores para representar estas clases: verde para concentraciones bajas, amarillo para concentraciones medias y rojo para concentraciones altas. Así, se puede observar, de manera general, la distribución relativa de concentraciones para cada elemento.

Estos mapas se consideran como una representación visual simplificada de los datos, que permite distinguir rápidamente las zonas donde se presentan las variaciones de concentración más importantes respecto a las concentraciones presentes en toda la cuenca. La plataforma digital, además, facilita la comparación de estos datos con la geología y estructuras, la ubicación de yacimientos, viñas, poblados u otros datos disponibles.

3.3.4 Gráficos de variación geográfica

Los gráficos de variación geográfica se utilizan para visualizar el comportamiento de la concentración de elementos químicos determinados a lo largo de un drenaje específico, con mayor detalle que en el mapa de concentraciones.

Los drenajes analizados con este método corresponden a los principales drenajes con escorrentía superficial permanente en la cuenca del Elqui: ríos Colorado, La Laguna, Turbio y Elqui (Figura 3. 7). El perfil de estos ríos cruza la cuenca del Elqui desde la Alta Cordillera hasta el mar, en dirección aproximada SE-NW hasta la localidad de Guanta, y E-W en el tramo final. De esta manera se tiene un control de las litologías y estructuras principales, las que se manifiestan, en general, en dirección N-S.

Se representa el cauce analizado como un perfil desde la cabecera hasta la desembocadura, donde se muestra la ubicación de las estructuras principales y las confluencias. A esto se suma la ubicación geográfica de las muestras de sedimento fluvial activo disponibles en el eje horizontal, y su concentración en el eje vertical para un elemento específico. Las muestras son mostradas con el código detallado en el Anexo D .

3.3.4.1 Gráficos de variación geográfica normalizados

Las concentraciones de todas las muestras del perfil estudiado, para cada elemento, son normalizadas a distribución normal, mediante la siguiente fórmula:

$$x_i' = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$

Ecuación 4. Normalización de datos a distribución normal con media cero y varianza uno.

Donde x_i es la concentración real, x_i' es la concentración normalizada, μ es la media de la distribución real y σ es la desviación estándar de la distribución real. Así, se consigue una distribución normal, con media normalizada $\mu' = 0$ y desviación estándar

normalizada $\sigma' = 1$. De esta manera se pueden comparar los gráficos de variación geográfica de elementos con concentraciones de distintas magnitudes.

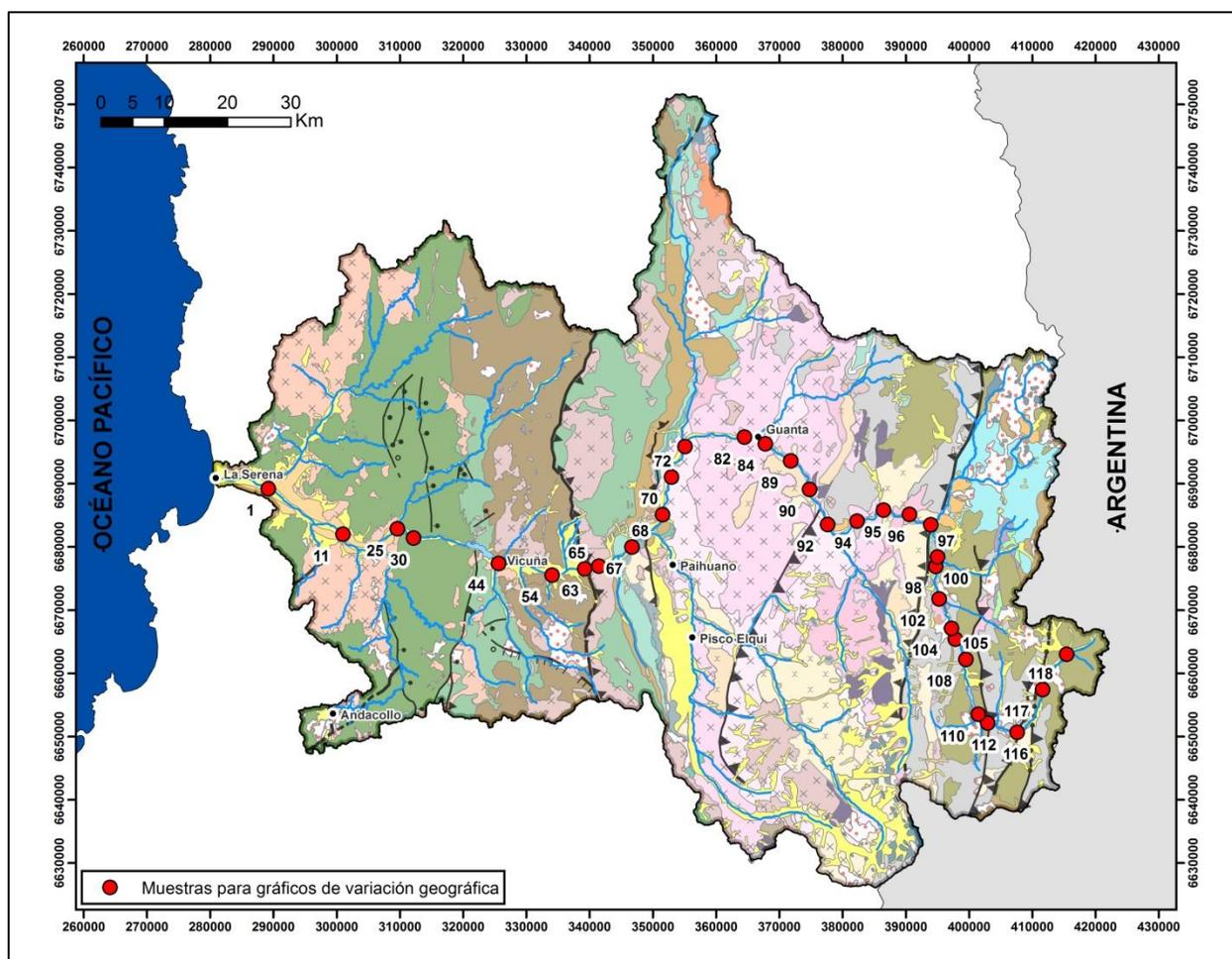


Figura 3. 7. Ubicación de muestras utilizadas para gráficos de variación geográfica. **Nombre de las muestras en código, ver código y datos en anexo**

3.3.4.2 Comparación con estándar PEC

Otro factor que será analizado con la ayuda de estos gráficos, es la toxicidad asociada al As, Cd, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn al encontrarse en elevadas concentraciones en los sedimentos. Para ello se trazó sobre cada gráfico correspondiente, el valor máximo establecido por el parámetro PEC (Tabla 1) (MacDonald, et al., 2000). Este parámetro, establecido por consenso internacional, dice que cuando existen sedimentos con concentraciones superiores a estos valores máximos, existe una alta probabilidad de observar efectos adversos sobre organismos que conviven con los sedimentos. Se

puede asumir, entonces, que el PEC establece un criterio para determinar ciertos niveles de toxicidad de un sedimento.

Tabla 1. Límites máximos PEC (MacDonald, et al., 2000)

ELEMENTO	As	Cd	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
PEC [ppm]	33	4,98	149	128	1,06	48,6	459

3.3.5 Redes neuronales artificiales

Una red neuronal artificial es un modelo computacional basado en las estructuras y funciones de redes neuronales biológicas. Se utiliza un modelo de redes neuronales artificiales auto-organizativas, llamado Growing Cell Structures (GCS), que permite generar mapas bidimensionales a partir de un conjunto de datos multidimensionales. Este mapeo es capaz de preservar las relaciones de vecindad del conjunto de datos de entrada, además de representar las regiones de alta densidad de este conjunto en el espacio de salida. Es decir, se obtienen cúmulos de datos tales que, se minimiza la varianza dentro de cada cúmulo y se maximiza la varianza entre cúmulos (Fritzke, 1993). De esta manera se pueden visualizar las diferencias geoquímicas de los datos analizados, dando cuenta de correlaciones de primer orden y permitiendo una percepción visual de las relaciones entre variables (Lacassie, 2004).

En este trabajo, el conjunto de datos de entrada corresponde a un conjunto de m vectores n -dimensionales, con “ n ” igual al número de elementos químicos analizados con este método y “ m ” igual al número de muestras.

Para la construcción de las redes neuronales artificiales, se utiliza el software Growing Cell Structures Visualisation (GCSVIS) Toolbox (Walker, et al., 1999), distribuido gratuitamente en internet y ejecutado en el software MatLab.

Se realizan diferentes pruebas de entrenamiento de redes neuronales artificiales, variando los siguientes parámetros:

- Número de nodos a agregar: se refiere a cuantos nodos se agregan a la red antes de que el entrenamiento se considere completo.
- Número de épocas por nodo: se refiere a cuantas veces se presenta el set de datos de entrenamiento ante la red antes de agregar un nodo.
- Normalización de los datos: el set de datos puede ser normalizado a una distribución normal de media cero y varianza 1.

3.3.6 Comparación de sedimentos fluviales actuales y de terrazas fluviales.

Se realizaron mapas de concentración de barras para los elementos de interés ambiental y económico (Ag, As, Au, Cu, Hg, Stotal, Zn y Pb) para los cuales se proyectan las concentraciones de estos elementos en las muestras de sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales, como barras verticales paralelas.

Los puntos considerados para este análisis corresponden a los puntos donde se tomaron muestras de sedimento de terrazas fluviales, es decir, en torno a la confluencia de los ríos Toro y La Laguna.

Esto permite visualizar la variación temporal en la concentración de los elementos analizados. Asumiendo que los sedimentos de terraza fluvial corresponden a un período pre-industrial en la cuenca del Elqui, se puede estimar la influencia de factores antrópicos, en este caso la minería desarrollada en la parte alta de la cuenca.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Digitalización de mapas geológicos

La digitalización de los mapas geológicos facilita la complementación de la información disponible, permitiendo superponer y seleccionar capas de información de manera expedita (Figura 4. 1).

En paralelo a este proceso, se generó una base de datos con las unidades geológicas presentes en la cuenca del río Elqui y sus descripciones, especificando las hojas Geológicas de las cuales han sido extraídas. De esta manera no se pierde información al momento de consensuar la información de distintos mapas, tales como la misma formación con nombres diferentes o descripciones con distintos niveles de detalle.

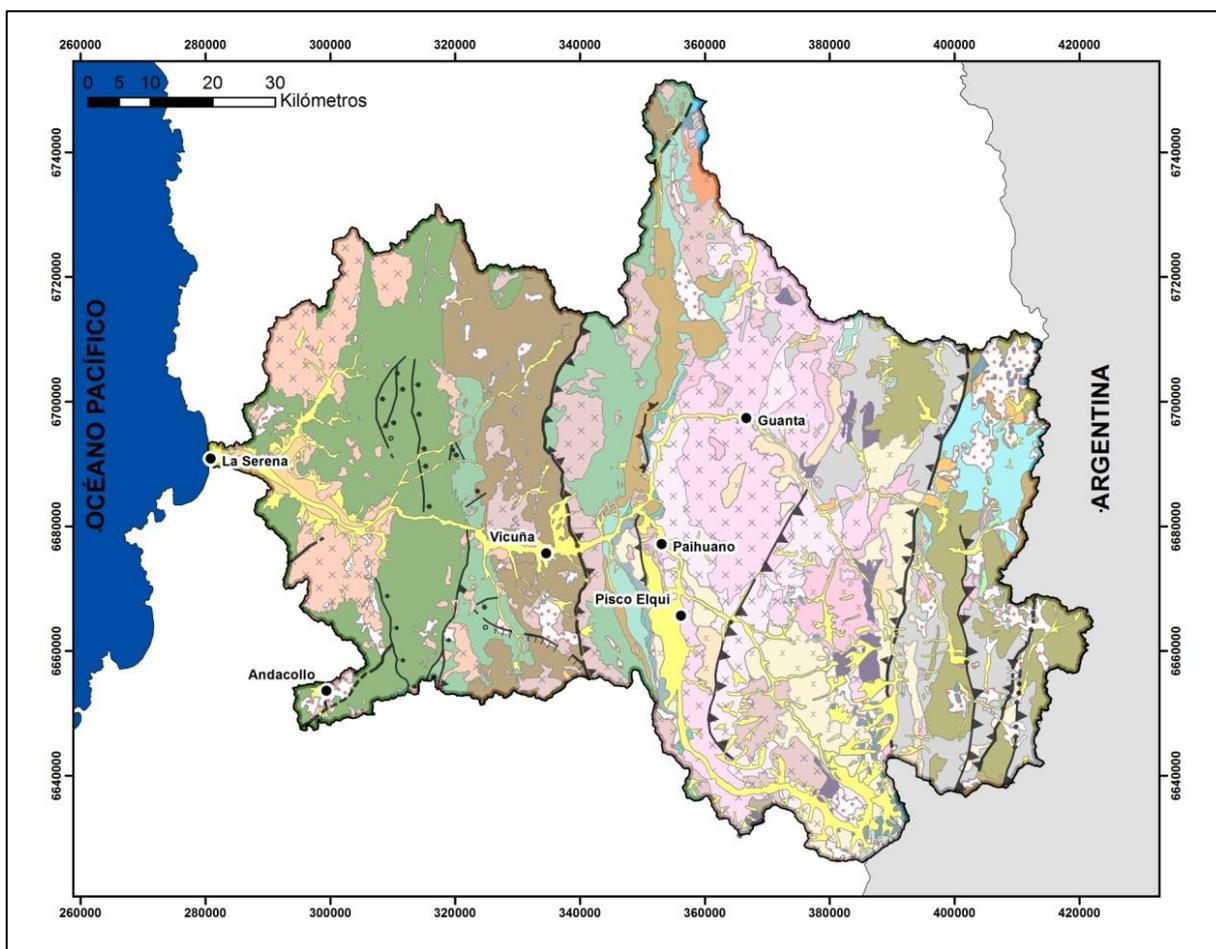


Figura 4. 1. Geología y estructuras principales de la cuenca del río Elqui, resultado de la compilación y digitalización de los mapas geológicos existentes. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5

4.2 Control de Calidad

A continuación se muestra la Tabla 2, que resume los resultados del análisis de control de calidad realizado con los seis duplicados de terreno disponibles.

Tabla 2. Resultados de análisis estadístico de control de calidad (continúa en página siguiente).

Elemento	N° muestras bajo LD	Diferencia Media	Varianza Relativa Media	Error Relativo Global [%]	Regresión		
					R2	Pendiente	Intersec.
Au	1/6	0,65	0,38	61,31	0,50	0,92	-0,39
W	1/6	-0,04	0,31	56,02	0,75	0,93	0,11
Be	4/6	-0,17	0,16	39,67	0,15	1,50	-0,25
Bi	4/6	0,01	0,13	35,61	0,70	1,12	-0,03
Cd	3/6	0,03	0,09	30,25	0,80	0,81	0,01
Sb	1/6	-0,03	0,08	29,15	0,95	0,88	0,06
Hg	1/6	0,00	0,08	27,60	0,85	0,73	0,01
Sn	0	0,33	0,07	27,22	0,25	0,50	0,50
Th	0	-1,15	0,04	19,37	0,94	0,99	1,20
Nb	0	-0,87	0,03	17,53	0,90	1,00	0,88
Cr ₂ O ₃	0	0,00	0,03	15,98	0,81	0,75	0,00
V	0	-22,33	0,02	15,46	0,60	0,79	82,26
Mo	0	-0,02	0,02	14,66	0,28	0,50	0,45
Hf	0	-0,30	0,02	14,31	0,90	0,93	0,71
Ta	0	-0,10	0,02	14,04	0,97	1,16	-0,01
Zr	0	-11,57	0,02	13,21	0,88	0,95	24,10
Fe ₂ O ₃	0	-0,75	0,01	12,18	0,66	0,79	2,91
U	0	-0,12	0,01	12,14	0,93	0,90	0,35
TiO ₂	0	-0,12	0,01	11,21	0,44	0,96	0,17
Ctotal	0	0,02	0,01	8,42	0,98	0,91	0,04
Cu	0	-2,70	0,01	8,30	0,88	1,02	1,05
Ni	0	-0,43	0,01	7,81	0,77	0,75	3,61
MnO	0	-0,01	0,01	7,50	0,99	0,97	0,02
Zn	0	-4,50	0,01	7,41	0,96	0,95	9,09
Cs	0	-0,17	0,00	6,37	1,00	1,04	-0,20
Pb	0	-0,53	0,00	6,26	0,99	1,04	-0,10
Se	5/6	-0,02	0,00	5,25	1,00	1,21	-0,01
P ₂ O ₅	0	0,00	0,00	5,06	0,97	1,03	-0,01
Co	0	-0,70	0,00	5,05	0,86	0,91	2,65
La	0	-1,12	0,00	5,01	1,00	1,10	-1,01
Nd	0	-0,73	0,00	4,88	0,99	1,06	-0,85
Dy	0	0,07	0,00	4,82	0,98	0,89	0,38
Yb	0	0,04	0,00	4,40	0,98	0,93	0,12
Ba	0	-10,00	0,00	4,33	1,00	0,99	17,15
Gd	0	-0,21	0,00	4,11	1,00	1,11	-0,28
Sc	0	-0,67	0,00	3,98	0,99	0,99	0,87
Sr	0	7,72	0,00	3,93	0,97	1,10	-49,88
As	0	-0,48	0,00	3,76	1,00	1,03	-0,31
Pr	0	-0,24	0,00	3,76	1,00	1,10	-0,33
Ce	0	-0,82	0,00	3,71	0,99	1,05	-1,70
Lu	0	-0,01	0,00	3,69	0,99	1,09	-0,02

Continuación de Tabla 2. Resultados de análisis estadístico de control de calidad.

Elemento	N° muestras bajo LD	Diferencia Media	Varianza Relativa Media	Error Relativo Global [%]	Regresión		
					R2	Pendiente	Intersec.
Y	0	-0,65	0,00	3,51	0,99	1,07	-0,96
Stotal	2/6	0,01	0,00	3,50	1,00	0,88	0,00
CaO	0	0,05	0,00	3,26	0,99	0,88	0,62
Na ₂ O	0	0,03	0,00	3,22	0,77	0,86	0,36
Sm	0	-0,04	0,00	3,10	1,00	1,08	-0,37
Er	0	-0,05	0,00	3,08	0,99	1,07	-0,11
Ga	0	0,38	0,00	3,00	0,81	0,90	1,43
Ho	0	-0,02	0,00	2,88	0,99	1,07	-0,04
Tm	0	0,00	0,00	2,80	0,99	1,06	-0,02
SiO ₂	0	0,66	0,00	2,65	0,89	0,89	5,35
Eu	0	-0,02	0,00	2,55	0,99	1,18	-0,21
Tb	0	-0,01	0,00	2,44	1,00	1,13	-0,07
Rb	0	-0,45	0,00	2,33	0,99	1,05	-2,25
K ₂ O	0	-0,02	0,00	1,80	0,99	1,01	0,01
Al ₂ O ₃	0	0,13	0,00	1,29	0,98	0,91	1,29
MgO	0	-0,01	0,00	1,20	1,00	1,03	-0,06
Ag	4/6	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00
Tl	4/6	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00

La Tabla 2 está ordenada de mayor a menor según el error relativo global. Se destacan en fondo verde los elementos cuyo error relativo global es superior al 15% recomendado (Magri Consultores Ltda, 2012) para duplicados de terreno, estos son: Au, W, Be, Bi, Cd, Sb, Hg, Sn, Th, Nb, Cr₂O₃ y V. En letras rojas se destacan los elementos que presentan más del 10% recomendado (Magri Consultores Ltda, 2012) de los datos con diferencia relativa mayor al 10%, estos son: Au, W, Be, Bi, Cd, Sb, Hg, Sn, Mo, Hf, Ta, Zr, Cttotal, Ni, Zn y Cs (ver Anexo A).

Además, se muestran los índices de la regresión lineal realizada comparando las muestras originales con las duplicadas. Así como también el número de muestras duplicadas cuyos resultados químicos se encuentran bajo el límite de detección para cada elemento.

Se observa que los elementos que presentan muestras con resultados bajo el límite de detección, en general, tienen un error relativo global alto, estos son: Au, W, Be, Bi, Cd, Sb y Hg; con excepción de: Se, Stotal, Ag y Tl. Se considera que la cantidad de datos sobre el límite de detección debe ser mayor o igual al 50%. Los elementos que no cumplen con este criterio son: Be, Bi, Se, Ag y Tl; en estos casos el control de calidad puede resultar en un análisis incorrecto.

En el caso del Au, que presenta los mayores valores de error relativo global, se puede asociar este resultados al “efecto pepita” que afectan frecuentemente los análisis de oro. Esto sucede cuando la muestra ha incorporado alguna pepita de oro al azar, aumentando erráticamente la concentración de este elemento para esta muestra en comparación a las muestras que no presentan pepitas (Maksaev, 2001).

En los gráficos de duplicados vs originales y diferencia relativa absoluta vs porcentaje acumulado (ver Anexo A), se puede visualizar la distribución de los datos. Si los valores de las muestras duplicadas corresponden a los mismos valores de las muestras originales, el primer gráfico debería comportarse de manera lineal con pendiente 45° e intersección del eje Y en cero; mientras el segundo gráfico debería mostrar diferencias relativas absolutas cercanas a cero. En general, los elementos que presentan una menor correlación lineal y mayores diferencias relativas absolutas, presentan también mayores errores relativos globales.

Se observan 12 muestras que presentan valores bajo el límite de detección. Para ellas se considera una concentración igual a la mitad del límite de detección. En la Tabla 1 se comprueba que los elementos con mayor error relativo global presentan muestras bajo el límite de detección. Sin embargo, las muestras con mayor cantidad de datos bajo el límite de detección no necesariamente presentan un error relativo global alto (Se, Ag, Tl), para estos casos el control de calidad no es confiable.

En base a un análisis general de estos datos, se estima que los elementos que presentan menor precisión en el control de calidad serían: Au, W, Be, Bi, Cd, Sb, Hg, Sn, Th, Nb, Cr₂O₃, V, Ag y Tl. Para ellos se debe tener un cuidado especial a la hora de interpretar resultados.

4.3 Mapas de concentraciones

4.3.1 Mapa de concentraciones de Ag

Las concentraciones altas y medias de Ag se agrupan, principalmente, en las quebradas Marquesa y Santa Gracia (Figura 4. 2 y Figura 4. 4), con la excepción de una muestra de concentración media de plata ubicada en el río Seco (Figura 4. 5). Además de una muestra de concentración media ubicada en el río Elqui río abajo de quebrada Marquesa (Figura 4. 4).

Las muestras de concentración media de Ag de la quebrada Santa Gracia, se ubican inmediatamente río abajo de la confluencia con los drenajes que cortan los distritos Arqueros y Condoriaco (quebradas Arqueros y Condoriaco, respectivamente), donde uno de los principales productos explotados ha sido la plata (Figura 4. 4). La señal se mantienen a lo largo de la quebrada principal, probablemente recibiendo aportes de los distritos Lambert y Brillador. No se dispone de muestras en las quebradas Arqueros y Condoriaco, pero se esperaría encontrar altas concentraciones de Ag en ellas.

Las muestras de concentraciones altas y medias de Ag de la quebrada Marquesa se encuentran en el sector del distrito Talcuna, donde existe un gran número de pequeñas minas de Ag, y continúan río abajo a lo largo de la quebrada (Figura 4. 4). Son las muestras que presentan las mayores concentraciones de plata en la cuenca del Elqui (Figura 4. 2).

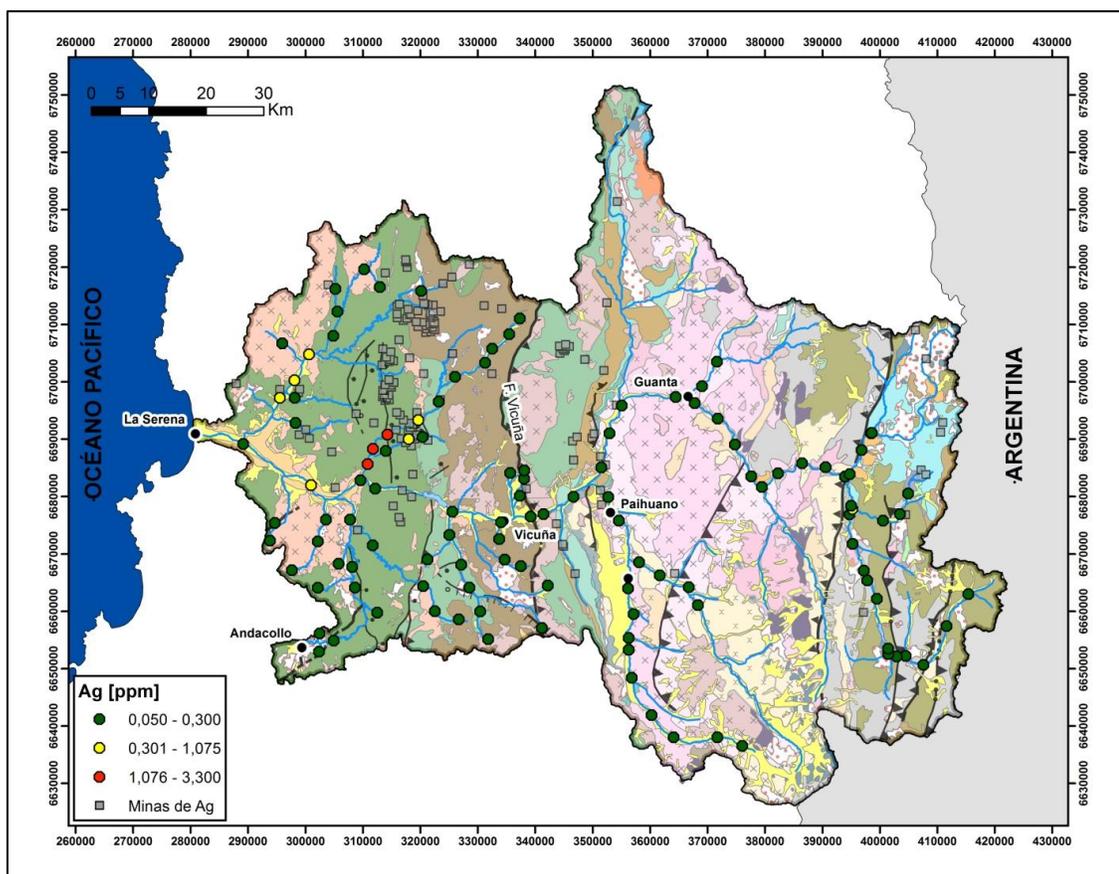


Figura 4. 2. Mapa de concentraciones de Ag con minas de Ag. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

La muestra tomada en el río Elqui inmediatamente río abajo de la confluencia con la quebrada Marquesa, presenta concentración baja de Ag (Figura 4. 4). Esto puede deberse a la alta energía de transporte que tiene el río Elqui, siempre activo, en comparación con la escorrentía superficial esporádica de la quebrada Marquesa, presentándose un fenómeno de dilución de concentración de Ag. Sin embargo, aproximadamente 10 km río abajo de la confluencia de la quebrada Marquesa con el río Elqui, se observa una muestra con concentración media de Ag (Figura 4. 4). La deposición en este punto se podría asociar a la presencia de depósitos de gravas pertenecientes a las Gravas de Atacama que aparecen en esta zona.

Por la misma razón propuesta en el párrafo anterior, el fenómeno de dilución, se podría explicar la ausencia de concentraciones medias o altas de Ag en el río Elqui en las zonas de alteración de rocas mesozoicas, donde abundan las minas de Ag, pero la energía de transporte del río es bastante alta (Figura 4. 2).

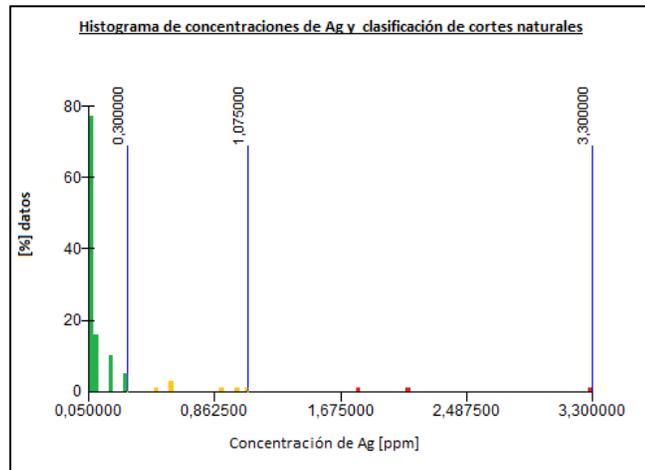


Figura 4. 3. Histograma de concentraciones de Ag y límites de clasificación de Jenks.

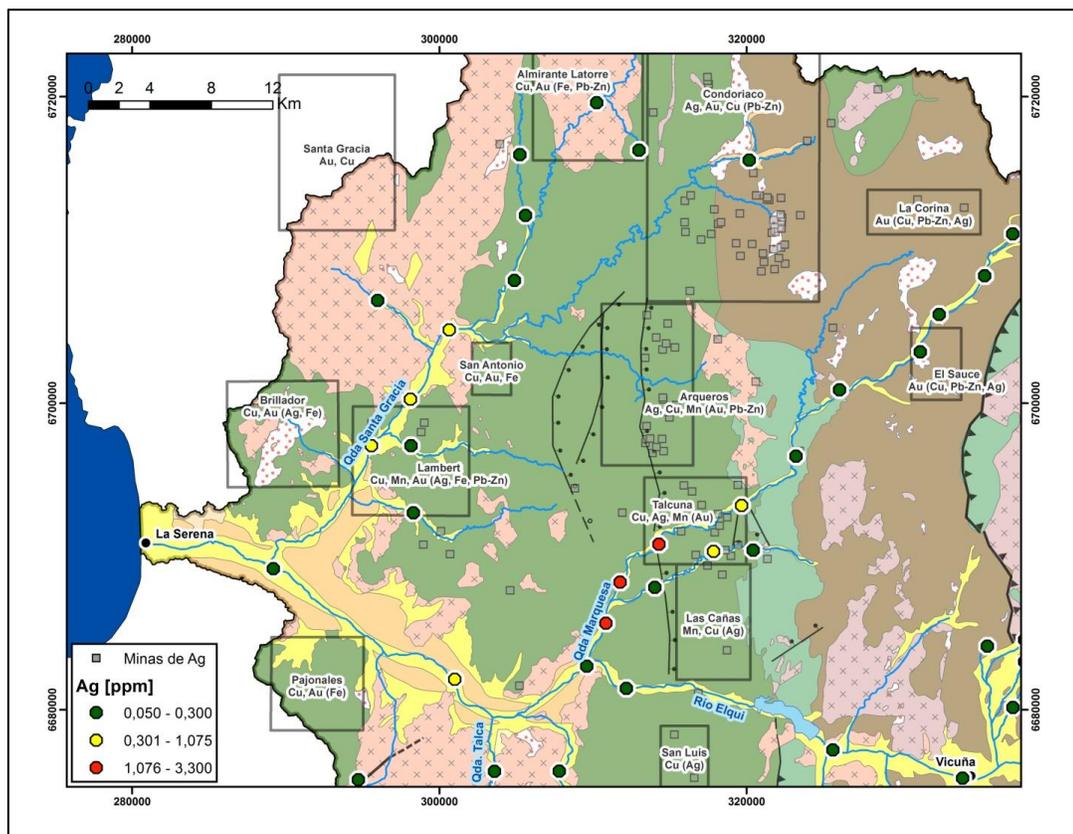


Figura 4. 4. Mapa de concentraciones de Ag, acercamiento a sector noroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de plata. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

Además, se encuentra una muestra con concentración media de Ag en la parte baja del río Seco, que podría tener relación con la presencia de vetas argentíferas emplazadas

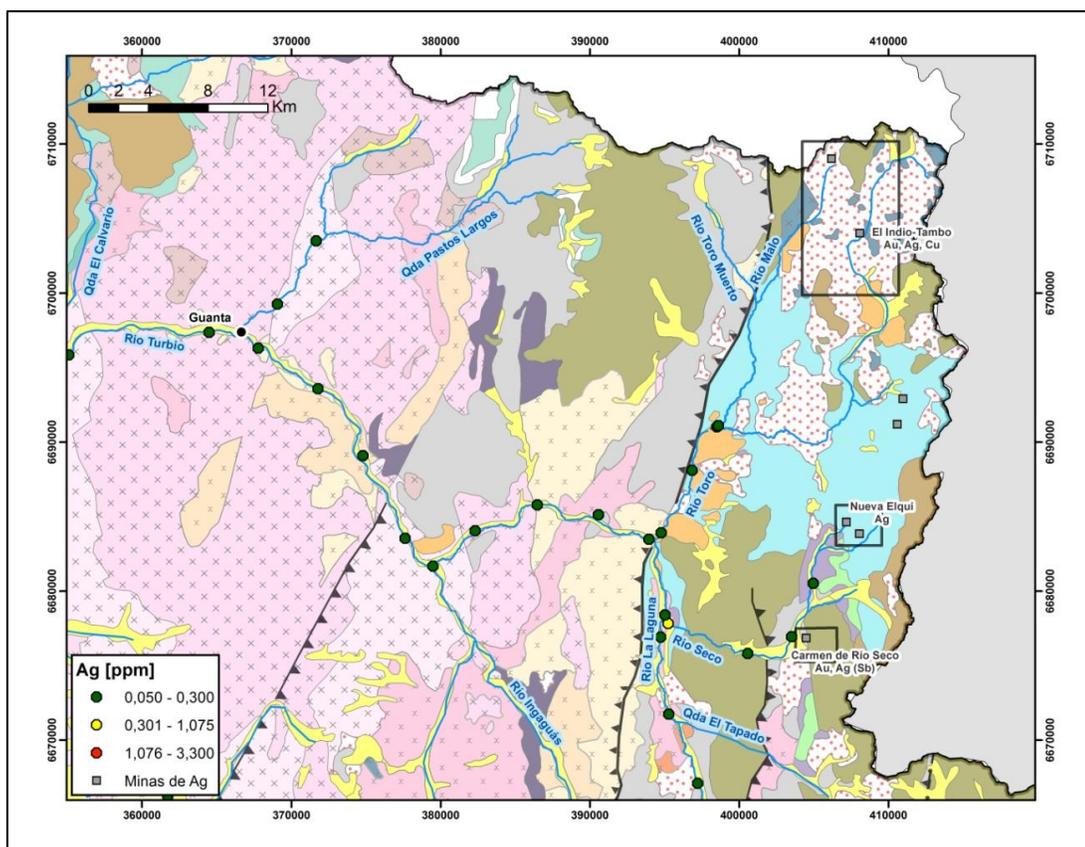


Figura 4. 5. Mapa de concentraciones de Ag, acercamiento a sector nororiental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de plata. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

en la parte alta del río Seco, las cuales han sido recientemente explotadas (Minas Nueva Elqui y Mina Carmen de Río Seco) (Figura 4. 5).

El control de calidad no presenta datos precisos para la Ag, ya que muchas muestras duplicadas se encuentran bajo el límite de detección. Sin embargo, en el mapa de concentraciones se observa una distribución concordante con lo esperado, donde las mayores concentraciones de Ag se encuentran asociadas a las zonas con mayores mineralizaciones de plata, que están o han estado en explotación.

4.3.2 Mapa de concentraciones de Au

Las mayores concentraciones de Au se observan en la quebrada Arrayán, río abajo del distrito minero Andacollo, y en la quebrada Talca (Figura 4. 8). Se observan, también, concentraciones medias de Au en las quebradas Marquesa y Santa Gracia, así como en el río Elqui inmediatamente río abajo de la Falla Vicuña.

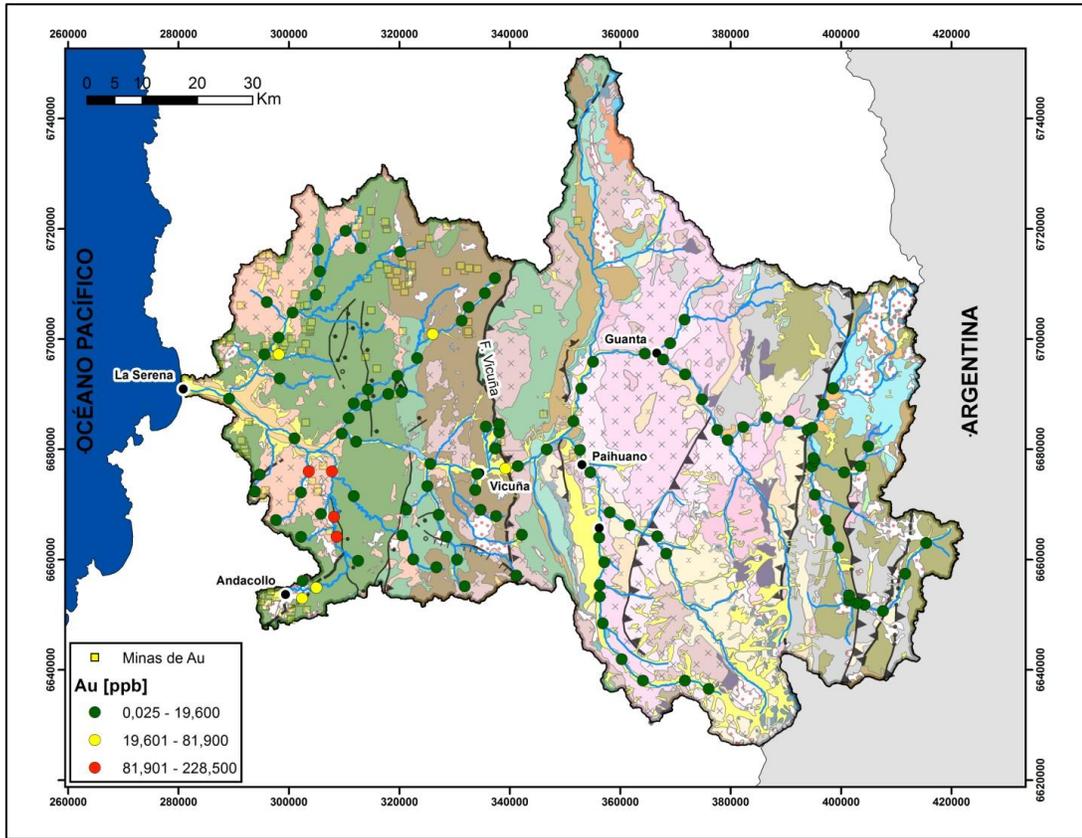


Figura 4. 6. Mapa de concentraciones de Au con minas de Au. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

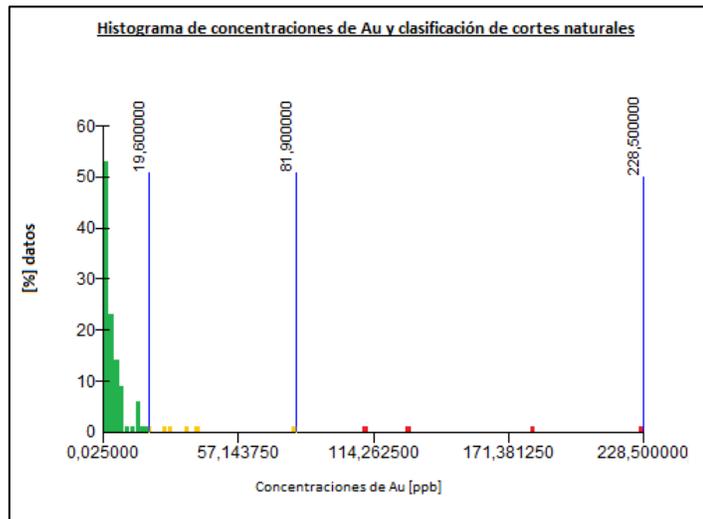


Figura 4. 7 Histograma de concentraciones de Au y límites de clasificación de Jenks.

En la quebrada Arrayán se observa que las altas concentraciones se restringen a la quebrada principal, mientras en los afluentes existen concentraciones bajas (Figura 4. 8). De esta manera se puede determinar que la fuente de estos sedimentos ricos en Au es el distrito Andacollo. Este distrito incluye depósitos de Au tipo manto, epitermales y de placer, estos últimos registrados hasta los que han sido explotados desde hace más de 6 siglos (Higuera, et al., 2004). Las altas concentraciones de Au encontradas río abajo de este distrito podrían tener relación tanto con el proceso natural de transporte-deposición que ha formado los depósitos de placeres registrados históricamente a lo largo de la quebrada, como con las técnicas de extracción artesanal poco eficientes utilizadas a lo largo de los años.

La muestra con alta concentración de Au en la quebrada Talca, se encuentra río debajo de un sector caracterizado por la existencia de placeres auríferos originados por yacimientos de Au encajados en rocas intrusivas cretácicas (Emparán & Pineda, 2006) (Figura 4. 8). Una causa probable de esta acumulación podría ser la presencia de gravas pertenecientes a la Formación Confluencia.

El punto con concentración media ubicado en un afluente de la quebrada Santa Gracia se encuentra en el distrito Lambert, donde existen varias minas de Au muy cercanas al punto de muestreo (Figura 4. 9).

El punto con concentración media ubicado en la quebrada Marquesa se encuentra río abajo del distrito El Sauce, donde existen diversas minas de Au (Figura 4. 9). La muestra que está dentro del cuadrángulo correspondiente al distrito El Sauce, presenta una concentración baja de Au, lo que puede deberse a que las minas de Au no están, en general, dentro de su área de influencia.

Estas señales de concentración media de Au en las quebradas Marquesa y Santa Gracia, aparecen en zonas cercanas a las posibles fuentes de mineralización aurífera, mientras que río abajo de estos puntos las quebradas mencionadas presentan concentraciones de Au bajas (Figura 4. 9). Esto se podría explicar por la escasa escorrentía superficial que caracteriza la parte baja de la cuenca del Elqui, donde la energía de transporte es baja.

Por otro lado, se observa una muestra de concentración media en el río Elqui que se ubica justo al oeste de la Falla Vicuña (Figura 4. 10). La fuente del Au en este punto proviene probablemente de diversas zonas de mineralización en la parte alta de la cuenca (Figura 2. 9).

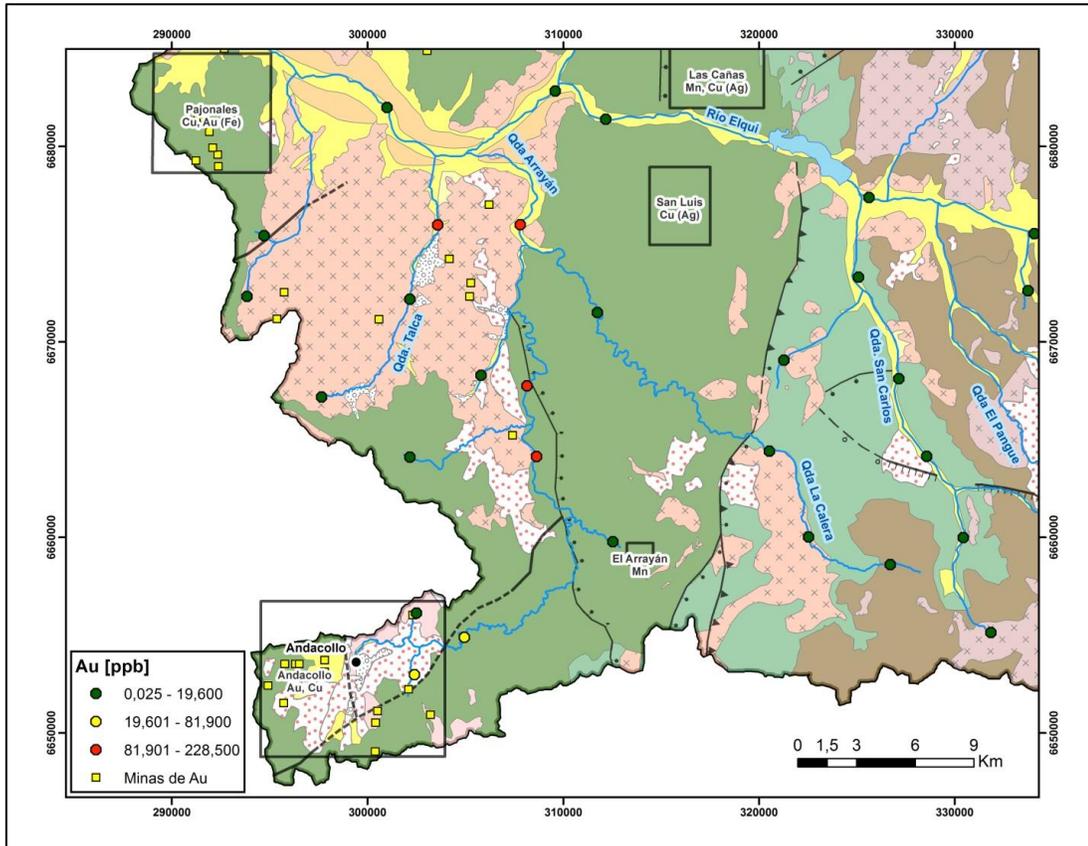


Figura 4. 8. Mapa de concentraciones de Au, acercamiento a sector suroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de oro. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

La Falla Vicuña divide la cuenca del Elqui en dos zonas geomorfológicamente distintas: al este se encuentran principalmente rocas intrusivas, de alta dureza, que alcanzan grandes altitudes, observándose ríos encajonados en quebradas angostas y de laderas empinadas; al oeste de la Falla Vicuña se encuentran principalmente rocas sedimentarias, de menor dureza y altitudes medias, con quebradas anchas y de laderas menos empinadas (Figura 2. 1 y Figura 2. 5). En el río Elqui este cambio geomorfológico se aprecia de manera bastante evidente, al observar el ancho (perpendicular a la dirección de flujo del río) de los sedimentos cuaternarios: de aproximadamente 1 y 2,5 km, al este y al oeste de la Falla Vicuña, respectivamente (Figura 4. 10).

Se puede esperar, entonces, un enriquecimiento de minerales densos, incluyendo Au, en los sedimentos cuaternarios que encajan al río Elqui al oeste de la Falla Vicuña. Así, se puede explicar la concentración media de Au encontrada en este sector de dos maneras: 1) La acumulación gravitacional al oeste de la Falla Vicuña ha enriquecido en minerales densos los sedimentos cuaternarios encajantes, los que aportan su contenido, incluyendo oro, al cauce actual del río, y 2) el río Elqui aún presenta una disminución en su energía de transporte provocada por el cambio geomorfológico asociado a la Falla Vicuña y asociada también a la canalización artificial para

actividades agrícolas (que se asientan sobre los sedimentos cuaternarios) (Figura 4. 10).

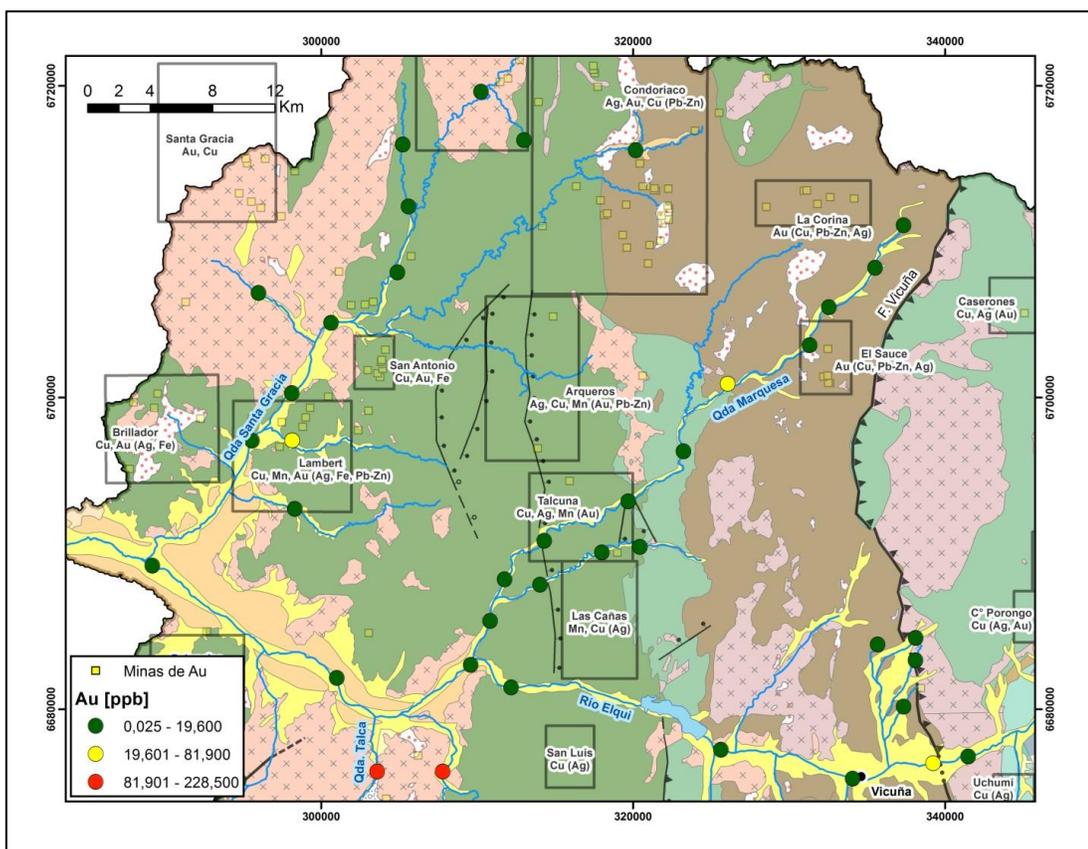


Figura 4. 9. Mapa de concentraciones de Au, acercamiento a sector noroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de oro. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

Probablemente la alta energía de transporte del río Elqui no permite la deposición de Au en otros puntos muestreados a lo largo de su cauce.

Si bien, en el control de calidad el Au presenta el error relativo global más grande y no muestra una buena correlación lineal, es un comportamiento esperable para este elemento, que suele encontrarse naturalmente en forma de pepitas y formando placeres. Además, en el mapa de concentraciones se observan distribuciones concordantes con los antecedentes de la zona, mostrando las mayores concentraciones de Au en sectores asociados a las mayores mineralizaciones de Au que están o han estado en explotación.

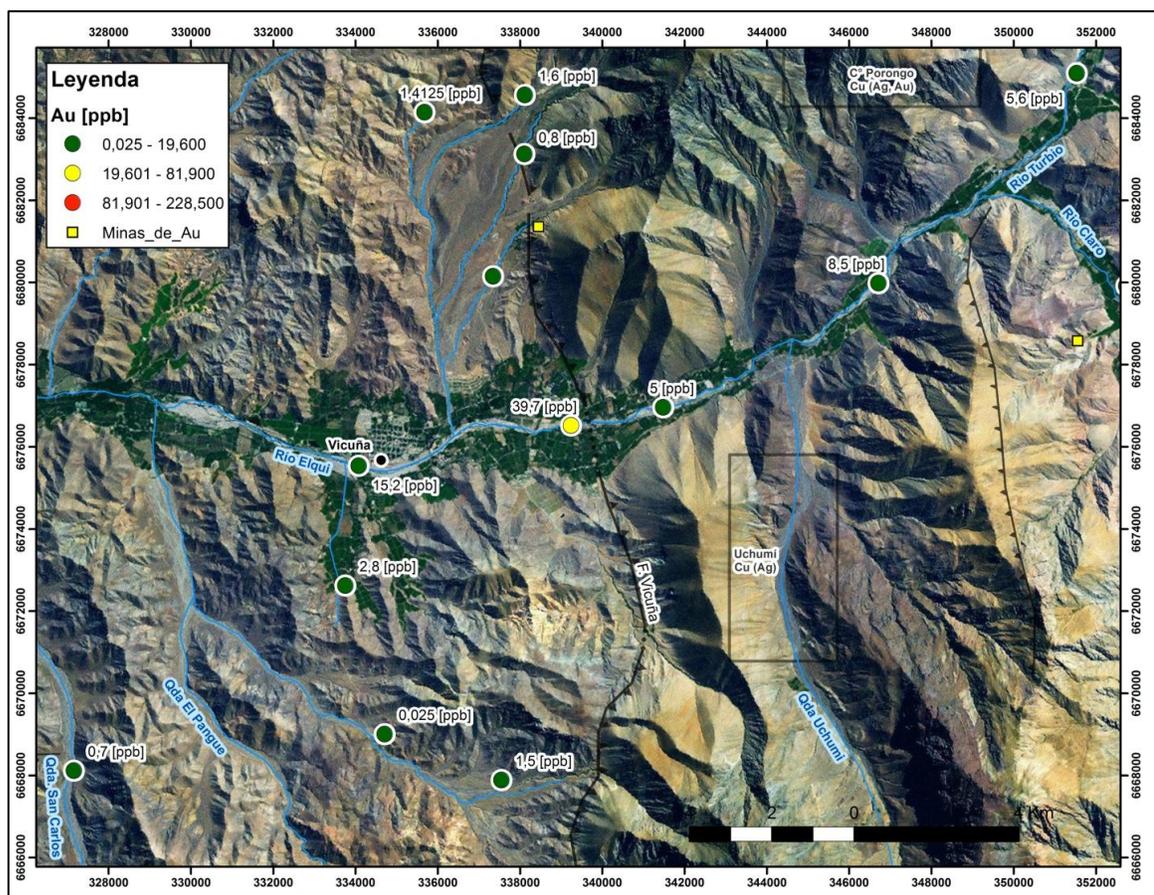


Figura 4. 10. Imagen satelital de la zona central de la cuenca del Elqui. Se sobreponen puntos con concentraciones de Au clasificados, distritos mineros, minas de Au y drenajes y estructuras principales.

4.3.3 Mapa de concentraciones de Cu

Las concentraciones altas y medias de Cu se agrupan en los ríos Elqui y Turbio, al este del embalse Puclaro, y en las quebradas Arrayán, Marquesa y Las Cañas (Figura 4. 11 y Figura 4. 14).

La fuente del Cu presente en los ríos Elqui y Turbio tendría relación con los yacimientos de Cu asociados a la franja metalogénica del Neógeno y a los distritos Caserones, La Plata, Cerro Porongo y Uchumí (Figura 4. 14).

La aparición de esta señal de concentraciones medias y altas río abajo de la confluencia de los ríos Toro y La Laguna (Figura 4. 14), podría relacionarse a procesos de sorción y coprecipitación asociados a cambios de pH y contenido de arcillas en el río Turbio. Según datos de las estaciones fluviométricas monitoreadas por la DGA (León, et al., 2005), el río Toro presenta un pH de 5.2, mientras que el río La Laguna tiene un pH de 7.5.

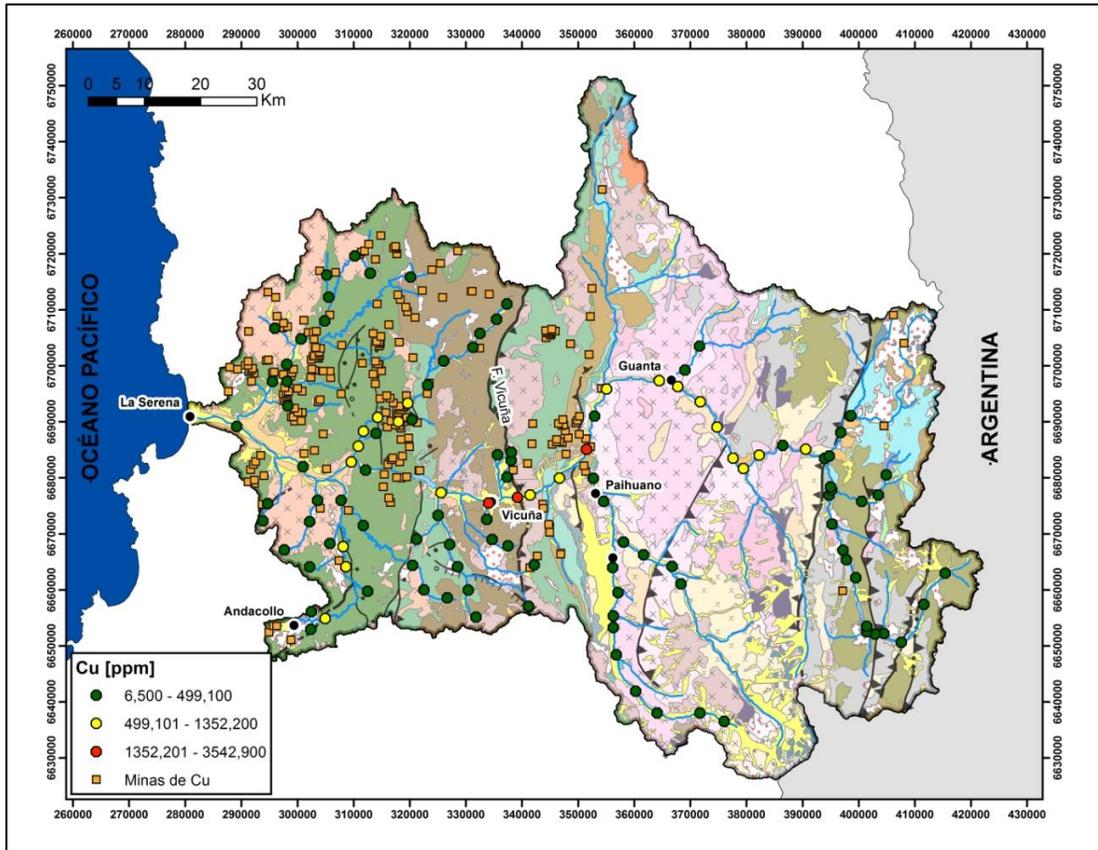


Figura 4. 11. Mapa de concentraciones de Cu con minas de Cu. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

El drenaje ácido del río Toro provendría de la amplia zona de alteración Libra-El Indio-Las Hediondas (Figura 2. 9), asociado también al distrito El Indio. Es razonable esperar que este drenaje ácido presente un contenido alto de iones metálicos en solución. Efectivamente, en la (Figura 4. 13) se observa como el río Toro presenta aguas turbias, de color café-grisáceo, que claramente llevan material en suspensión. Mientras que en la misma figura, el río La Laguna se presenta con aguas cristalinas.

Al aumentar el pH, río abajo de la confluencia con el río La Laguna, ocurre un proceso de sorción de estos iones metálicos en moléculas como arcillas, oxi-hidróxidos de Fe-Mn, carbonatos o materia orgánica (Helios & Kyziol, 1990).

A lo largo de estos ríos se encuentran litologías que podrían estar aportando en:

- Materia orgánica, proveniente de las zonas de cultivo que se presentan en las zonas bajas de los ríos Ingaguás, Claro y estero Guanta.
- Arcillas, provenientes de las zonas de alteración presentes en la parte alta de la cuenca del Elqui, o de la alteración o meteorización de los feldespatos o micas del

Batolito Elqui-Limarí (Carrasco, 2013) (Astudillo, 2011), o de los depósitos lacustres del Holoceno (Figura 4. 13) ricos en arcillas (Lillo, 2009).

- Oxi-hidróxidos de Fe, provenientes de las zonas de alteración de la parte alta de la cuenca del Elqui.

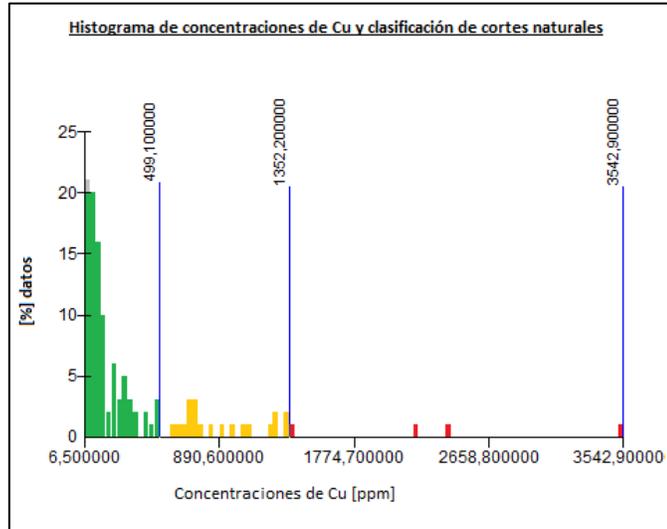


Figura 4. 12. Histograma de concentraciones de Cu y límites de clasificación de Jenks.



Figura 4. 13. Fotografía de la confluencia de los ríos Toro y La Laguna.

Talcuna y Las Cañas ejercen una influencia importante en el contenido de Cu de los sedimentos de esta aparte de la cuenca.

La muestra ubicada justo río abajo de la confluencia de quebrada Marquesa con el río Elqui (Figura 4. 16), presenta concentración media de Cu, a diferencia de lo que sucede con la Ag, que presenta baja concentración en este punto, pero alta concentración en la muestra subsiguiente, 10 km río abajo en el río Elqui.

Esto también podría tener relación con el potencial iónico mayor en el Cu que en la Ag, que facilitaría la presencia de Cu en minerales densos que serían depositados cerca de la confluencia.

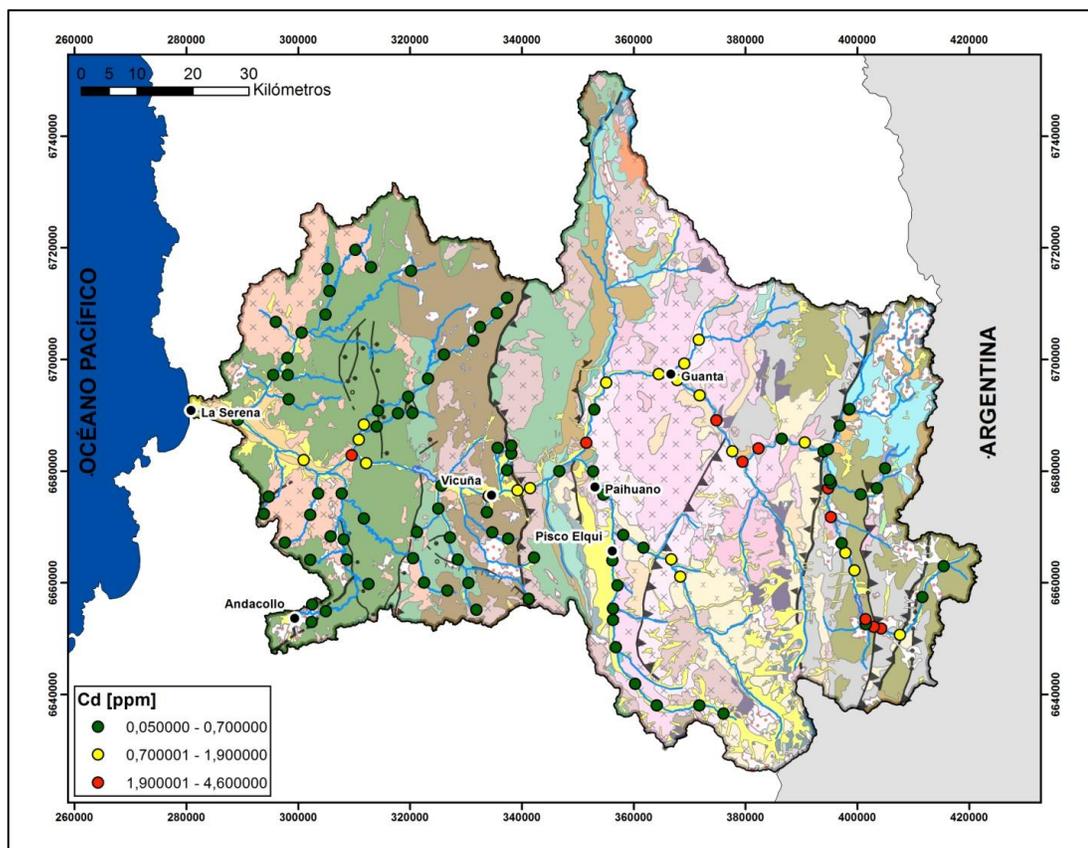


Figura 4. 15 Mapa de concentraciones de Cd. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

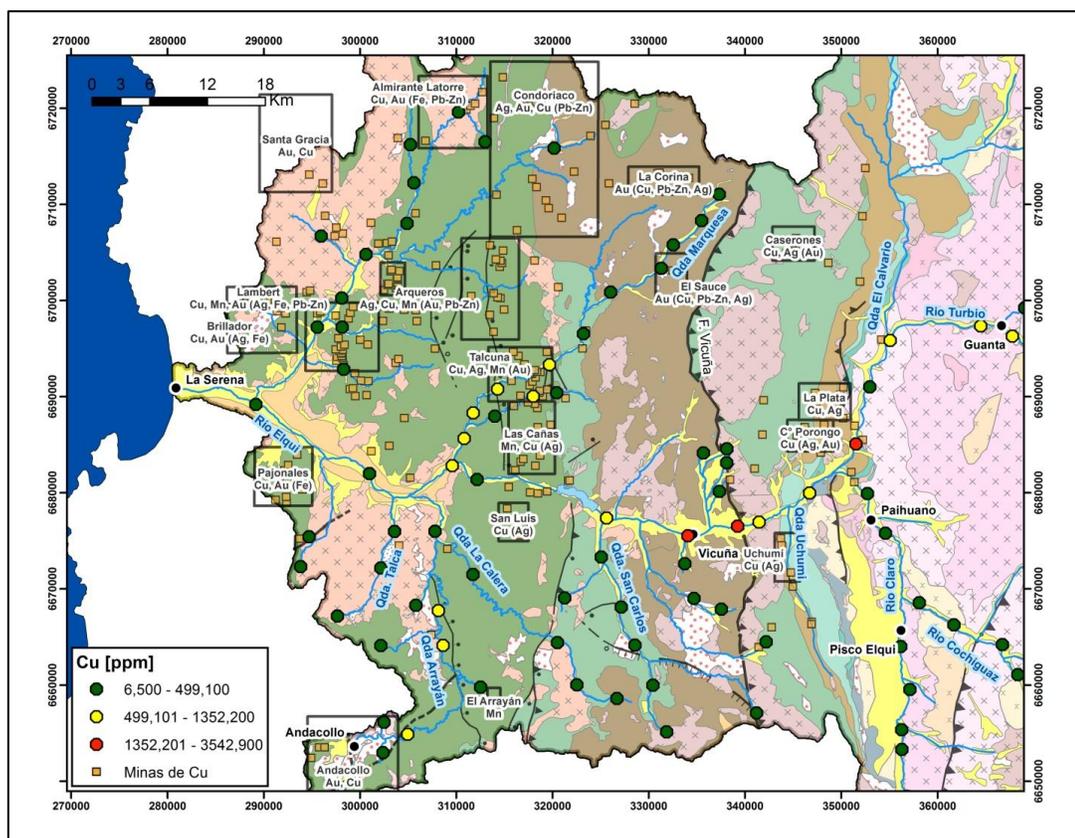


Figura 4. 16. Mapa de concentraciones de Cu, acercamiento a sector occidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Cu. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

4.3.4 Mapa de concentraciones de Fe_2O_3

Las concentraciones altas y medias de Fe_2O_3 se agrupan principalmente al oeste de la Falla Vicuña, en las quebradas afluentes del río Elqui. En esta zona se encuentran las franjas metalogénicas del Cretácico, en las que se encuentran muchos yacimientos de magnetita-apatito, en la llamada franja ferrífera chilena. En esta zona existen muchas minas de hierro, algunas asociadas a los distritos Almirante Latorre, San Antonio, Brillador, Lambert (Figura 4. 17 y Figura 4. 19). Estas minas podrían estar actuando como fuentes de hierro para los sedimentos de la quebrada Santa Gracia.

Otra fuente de hierro pueden ser algunos minerales asociados a zonas de alteración relacionadas a yacimientos de Cu, como limonita o sulfuros.

Además, es probable que exista mineralización de Fe cerca de los contactos de las rocas intrusivas con las rocas volcano-sedimentarias del Cretácico, que definen la franja ferrífera. Esta mineralización no siempre es económica, por lo que no estaría registrada en la base de datos de recursos minerales metálicos (Sernageomin, 2012) utilizada en este trabajo.

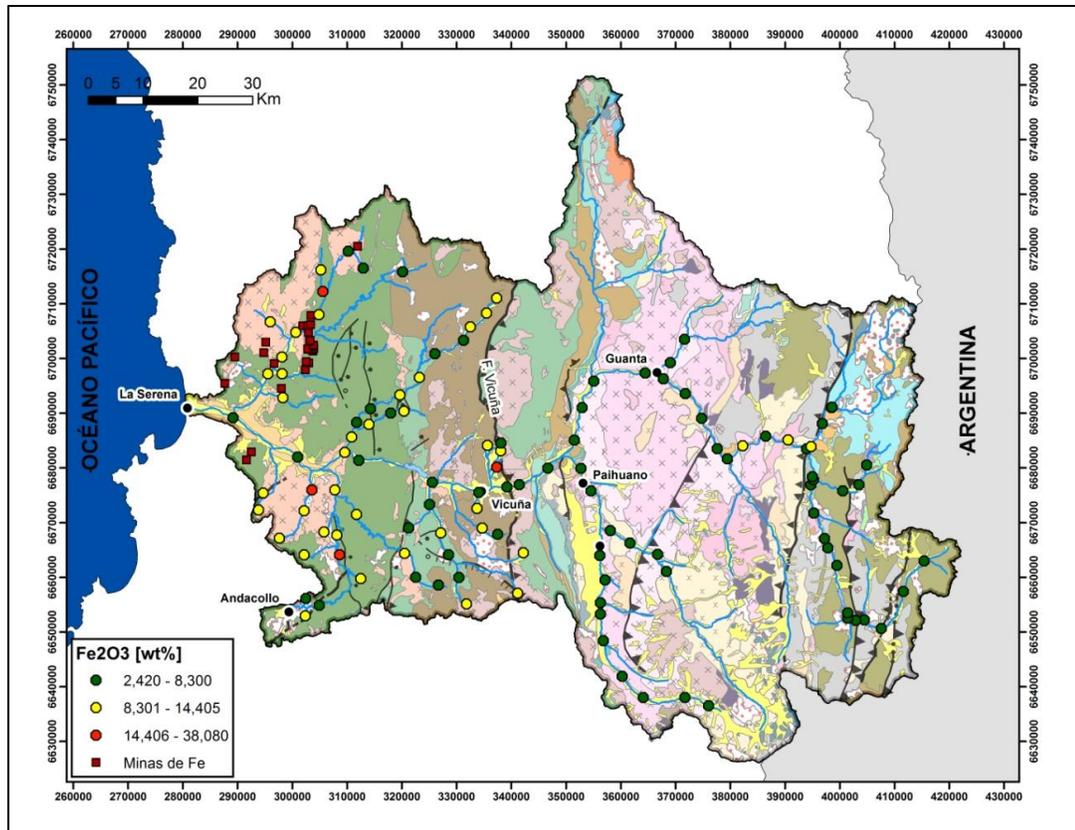


Figura 4. 17. Mapa de concentraciones de Fe₂O₃ con minas de Fe. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

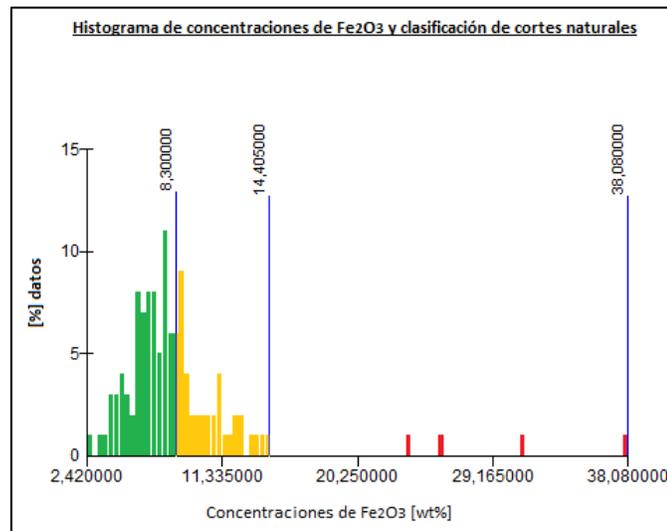


Figura 4. 18. Histograma de concentraciones de Fe₂O₃ y límites de clasificación de Jenks.

Las bajas concentraciones en el río Elqui, al oeste de la Falla Vicuña, son concordantes con la constante escorrentía superficial del río, que no permitiría la deposición de los minerales de Fe provenientes de sus afluentes.

En las quebradas laterales, en cambio, la escorrentía superficial es escasa o nula, permitiendo la deposición de minerales de Fe más cerca de las fuentes.

Las concentraciones medias de Fe_2O_3 observadas en la parte alta de la cuenca podrían tener relación con los sulfuros, sulfatos e hidróxidos de Fe, subordinados a la mineralización de Cu y Au, encontrados en la zona de alteración Libra-El Indio-Las Hediondas, donde se encuentra el distrito El Indio. Estas concentraciones medias de Fe_2O_3 sufren fluctuaciones en la parte alta del río Turbio, probablemente debido a las variaciones en la energía de transporte del río dado su comportamiento meándrico. Además, probablemente existe aporte aluvial proveniente de sedimentos lacustres colgados que se presentan de manera puntual en esta sección del río Turbio, los que podrían provocar un efecto de dilución del Fe_2O_3 en algunas muestras cercanas a estos depósitos lacustres.

A partir de la confluencia con el río Ingaguás, las concentraciones de Fe_2O_3 en el río Turbio y luego en el Elqui, permanecen bajas. Lo anterior permite suponer que el aporte de los afluentes correspondientes sería escaso en Fe_2O_3 o que se ve diluido por la adición de otros componentes.

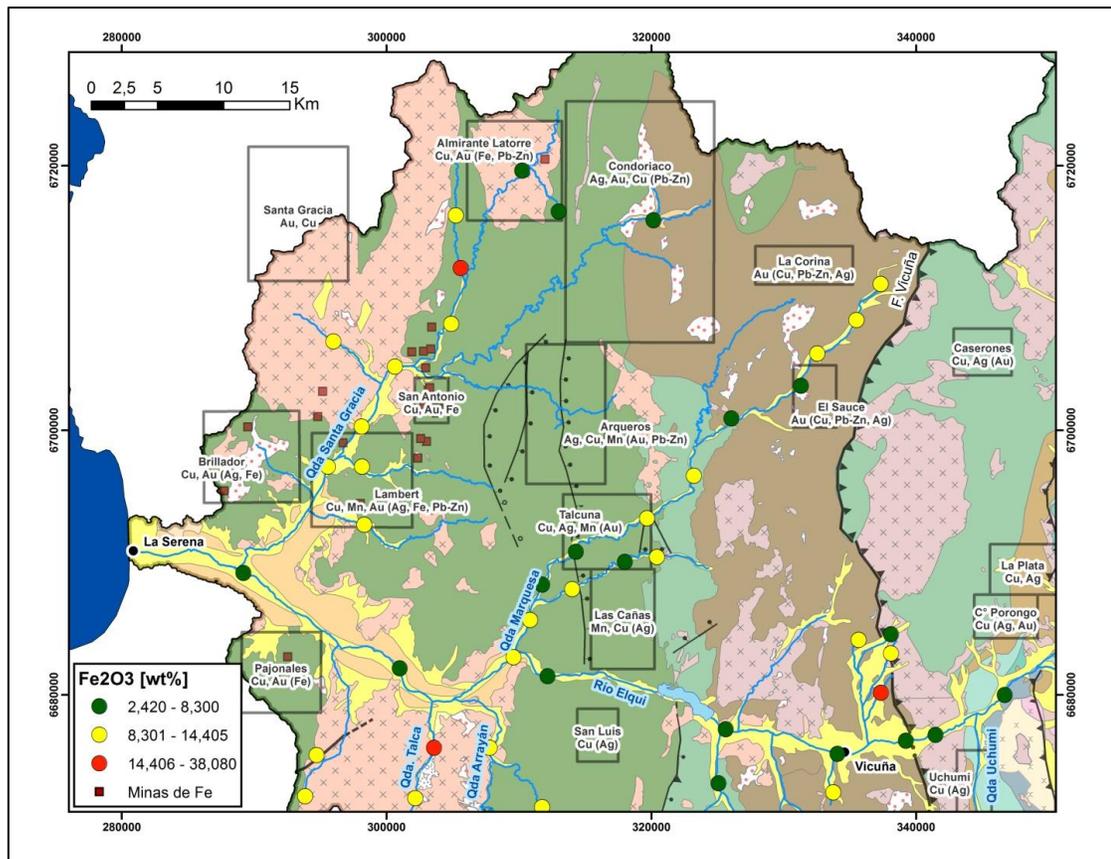


Figura 4. 19. Mapa de concentraciones de Fe_2O_3 , acercamiento a sector nororiental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Fe_2O_3 . Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

4.3.5 Mapa de concentraciones de MnO

Las muestras con concentraciones altas y medias de MnO se agrupan principalmente al oeste de la Falla Vicuña, en las quebradas Santa Gracia, Marquesa, Talca, Arrayán, La Calera, Vicuña y Las Mollacas, y al sur de Vicuña. Además, se observan concentraciones altas y medias en los ríos Cochiguás, Turbio y La Laguna (Figura 4. 20).

En el Grupo Bandurrias se encuentran, intercalados, mantos de manganeso. De hecho, es en esta formación donde se encuentran los yacimientos de manganeso más importantes de Chile. Probablemente muchas de las muestras ubicadas sobre esta formación presenten aportes de manganeso a partir de estos mantos.

Existen muestras con concentraciones altas y medias de MnO, además, en zonas que cortan otras unidades (no sólo sobre el Grupo Bandurrias), y en los ríos Cochiguás, Turbio y La Laguna.

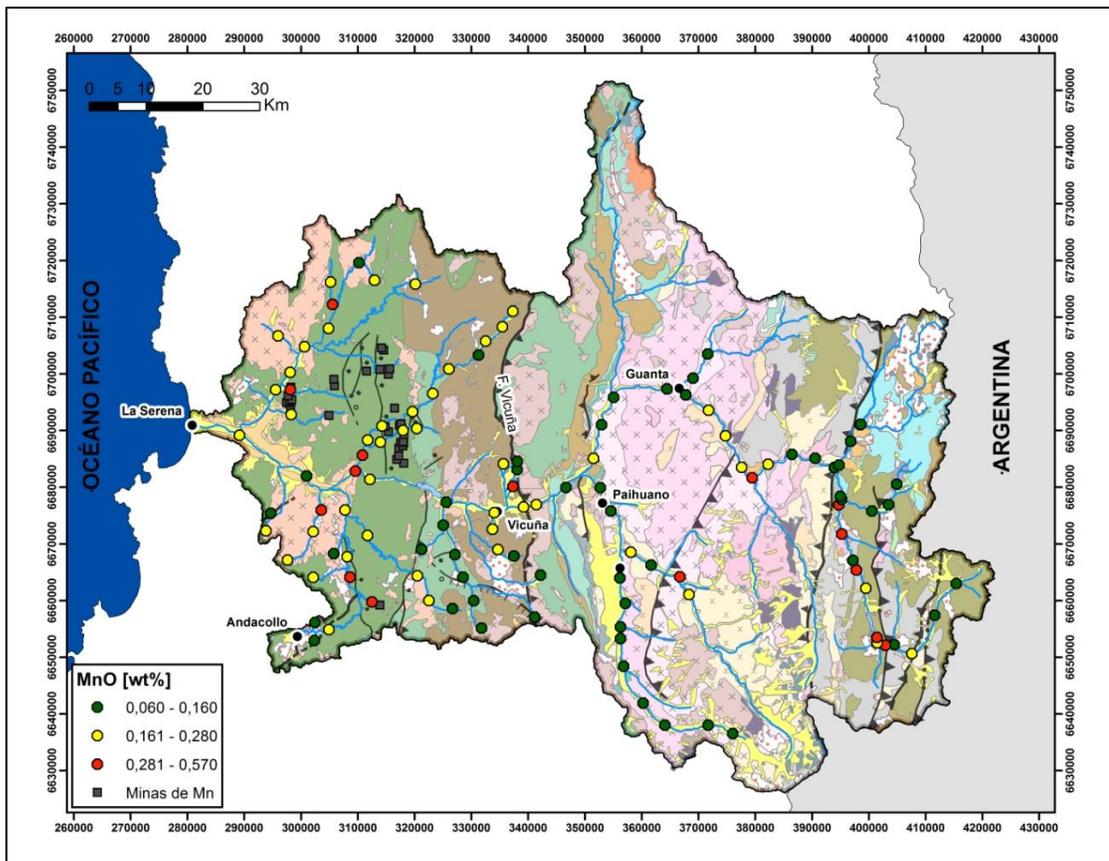


Figura 4. 20. Mapa de concentraciones de MnO con minas de Mn. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

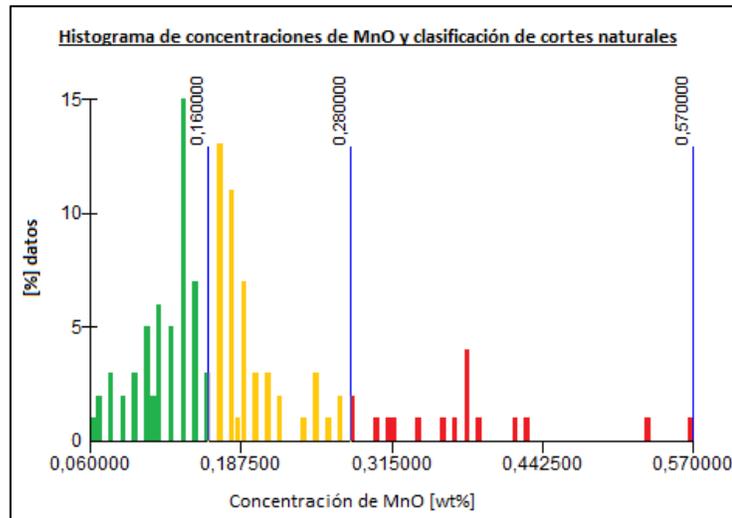


Figura 4. 21. Histograma de concentraciones de MnO y límites de clasificación de Jenks.

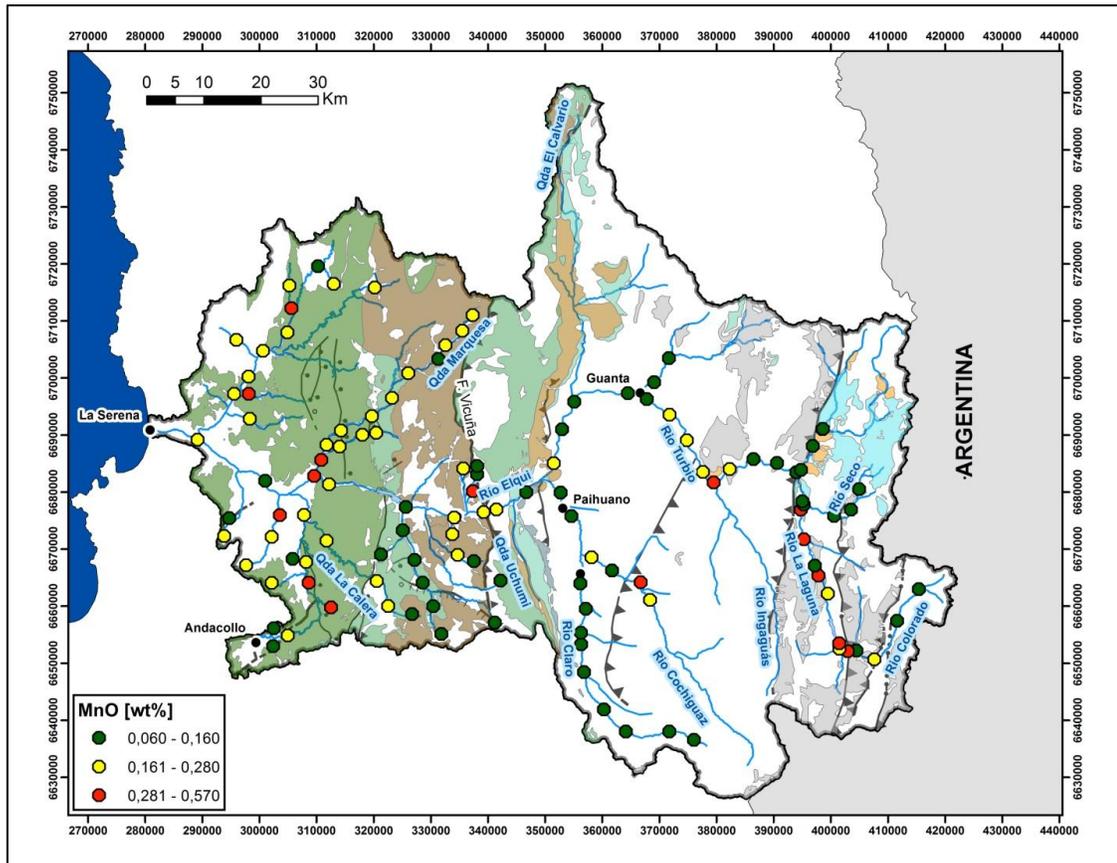


Figura 4. 22. Mapa de concentraciones de MnO. Unidades geológicas representadas corresponden a unidades de carácter volcánico-sedimentario. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

La distribución de concentraciones de MnO observada en la (Figura 4. 22) presenta concentraciones altas y medias de MnO asociadas, generalmente, a las unidades volcano-sedimentarias de la cuenca del Elqui.

Dado, que los depósitos de manganeso se suelen relacionar con depósitos volcano-sedimentarios (Vassallo, 2008), como es el caso del Grupo Bandurrias, la distribución de concentraciones de MnO observada podría sugerir la existencia de depósitos manganesíferos en algunas de las demás unidades volcano-sedimentarias de la cuenca del Elqui.

4.3.6 Mapa de concentraciones de Pb

Las muestras con concentraciones altas y medias de Pb se encuentran en las quebradas Santa Gracia, Marquesa, Las Cañas, Talca y Arrayán, además de los ríos Claro, La Laguna, Seco, Elqui y estero Guanta (Figura 4. 23).

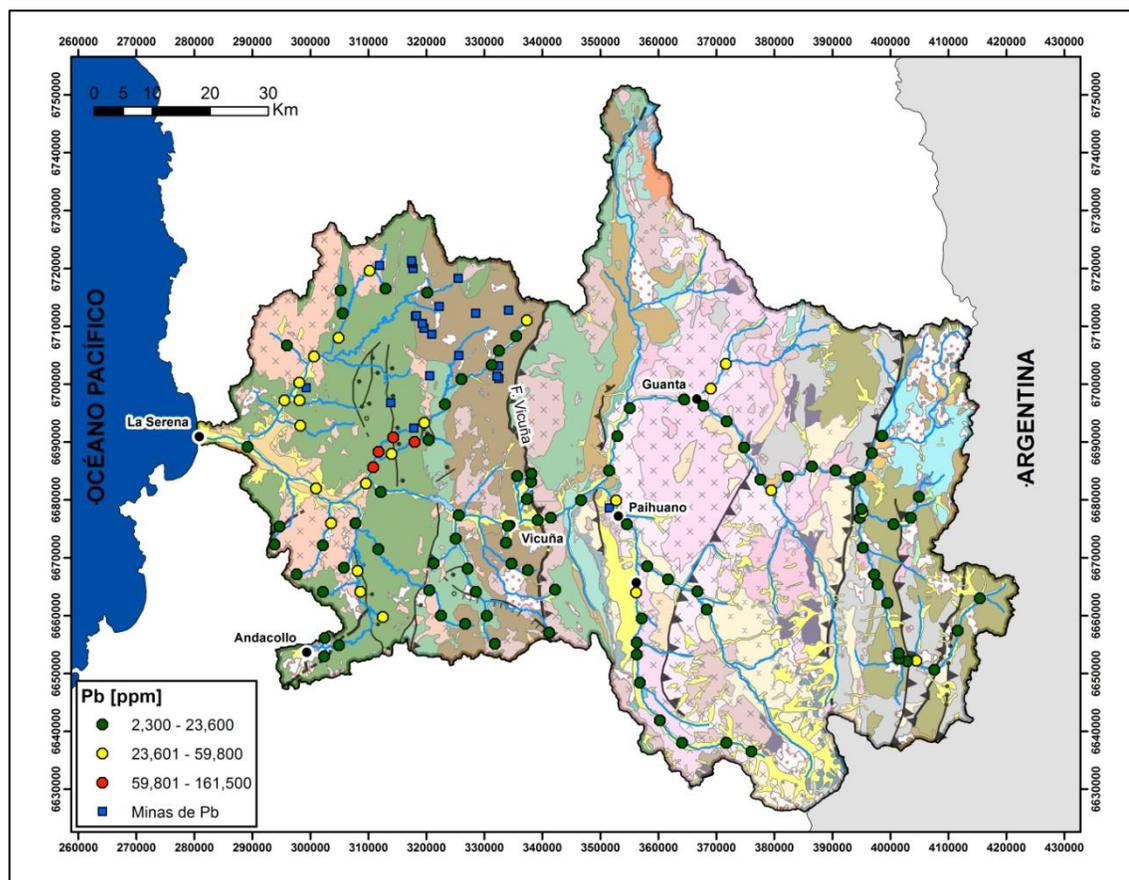


Figura 4. 23. Mapa de concentraciones de Pb con minas de Pb. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

Las muestras de concentración media de Pb en la quebrada Arrayán, no provienen del distrito Andacollo, como se puede observar en el mapa (Figura 4. 26), más bien provienen del afluente que cruza el distrito Arrayán (Mn). En este caso, estas muestras estarían actuando como indicador de una posible fuente de Pb cercana al distrito Arrayán.

En la parte baja de río Claro se encuentra la mina San Miguel, donde se explota un yacimiento de plomo relacionado a la Formación Tres Cruces, muy cerca del punto de concentración media que se observa en el mapa (Figura 4. 26). Se puede sugerir que la muestra de concentración media de Pb ubicada río arriba por el río Claro, serviría como indicador de posible mineralización de Pb en su zona de influencia.

En la mina Carmen de río Seco existe mineralización de galena, lo que podría relacionarse con la concentración media de plomo encontrada en el río Seco justo antes de la confluencia con el río La Laguna (Figura 4. 27).

La muestra con concentración media de Pb en el río La Laguna podría estar relacionada a las zonas de alteración hidrotermal cercanas (Figura 4. 27).

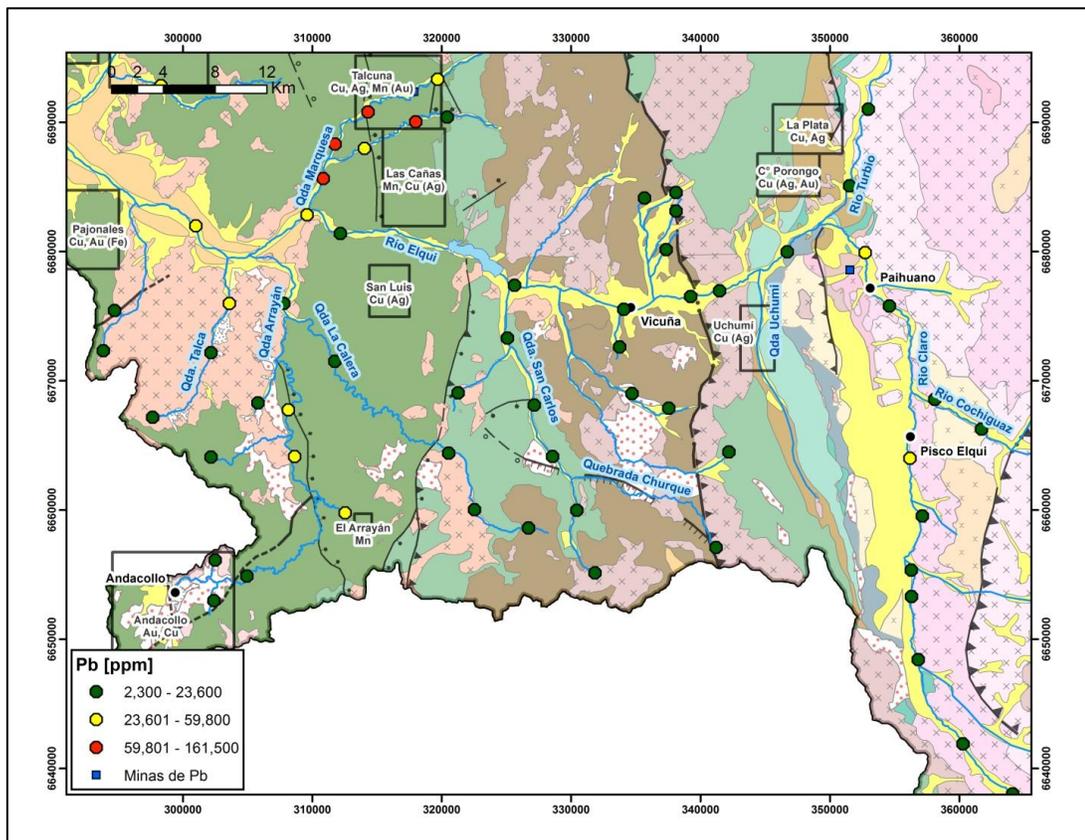


Figura 4. 26. Mapa de concentraciones de Pb., acercamiento a sector suroccidental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Pb. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

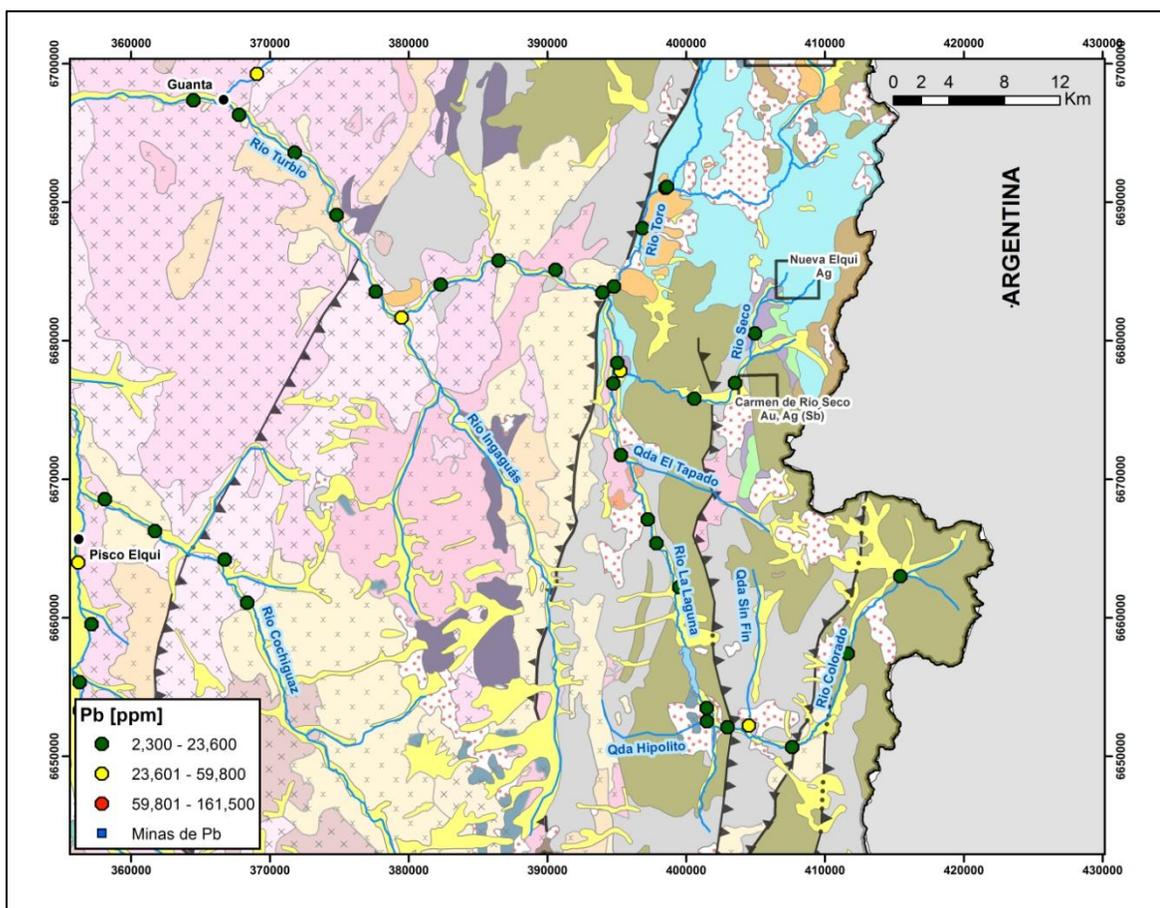


Figura 4. 27. Mapa de concentraciones de Pb., acercamiento a sector oriental de la cuenca del Elqui y detalle de distritos mineros y minas de Pb. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

4.3.7 Mapa de concentraciones de Zn

Las concentraciones medias y altas de Zn se agrupan principalmente al este de la Falla Vicuña, salvo por la quebrada Marquesa y un par de muestras en el río Elqui.

En quebrada Marquesa se observan dos puntos con concentraciones medias de zinc, los que coinciden con dos puntos de concentraciones alta y media de plomo. En la parte alta de esta quebrada existen minas de Pb-Zn, que se pueden relacionar con la fuente del Zn.

El Zn tiene mayor movilidad que el Pb (Helios & Kyziol, 1990), lo que podría explicar el aumento de concentraciones de Zn en la parte baja de la quebrada Marquesa, donde se presentan las mayores concentraciones de Pb (Figura 4. 25). Como el Pb tiene menor movilidad, el aumento de concentraciones de este elemento ocurriría más cerca de la fuente.

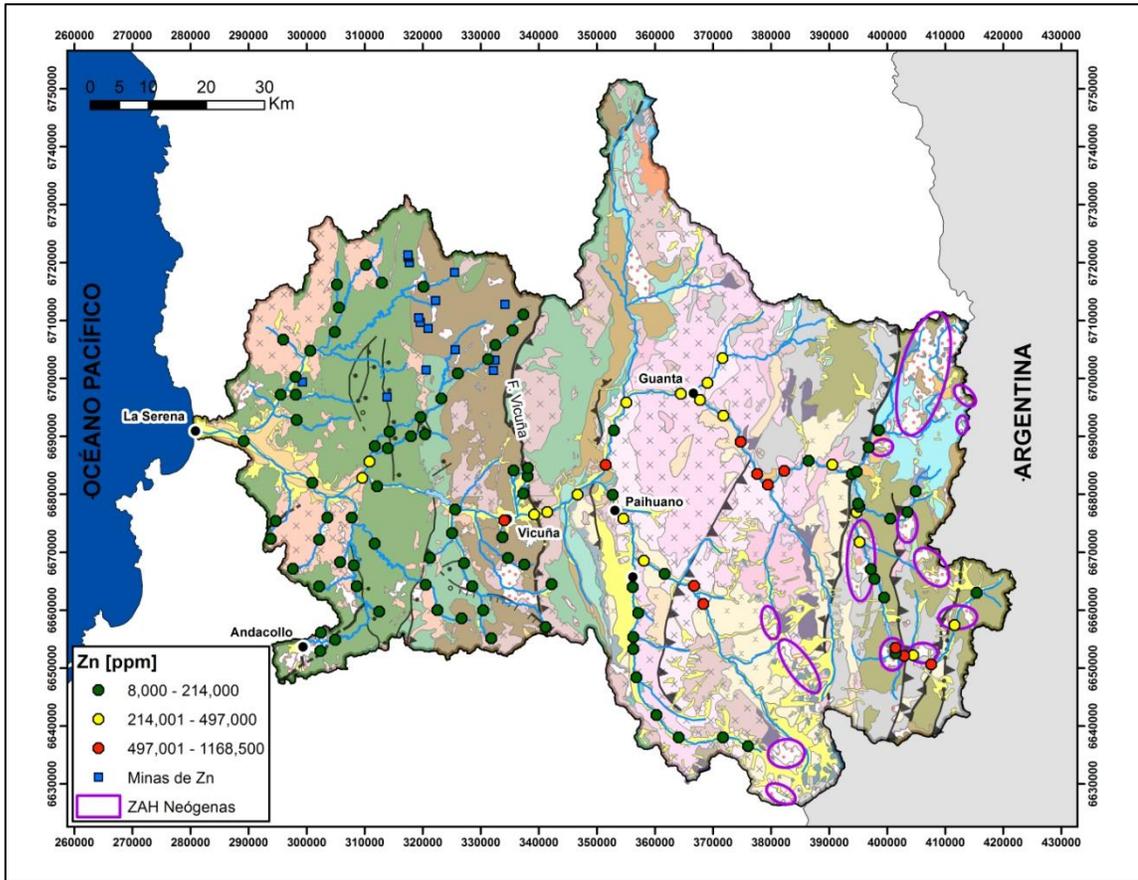


Figura 4. 28. Mapa de concentraciones de Zn con minas de Zn y zonas de alteración neógenas. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

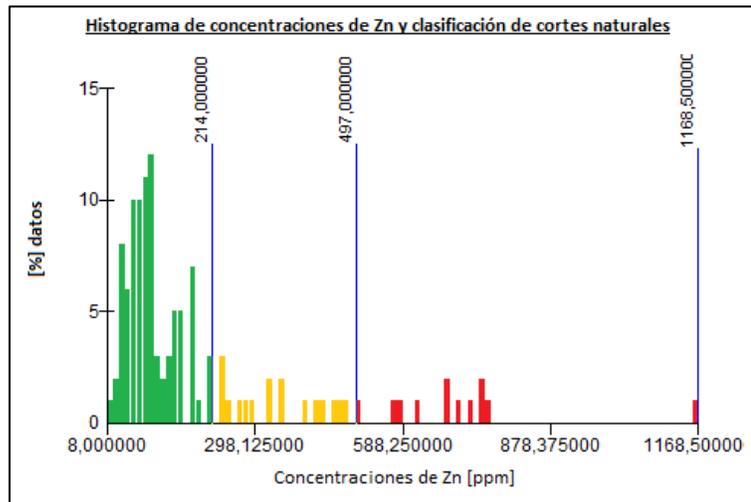


Figura 4. 29. Histograma de concentraciones de Zn y límites de clasificación de Jenks.

En el río Turbio y Elqui al este del embalse Puclaro, las concentraciones altas y medias de Zn tendrían relación con la sorción y coprecipitación asociadas a oxi-hidróxidos de Fe-Mn, arcillas, carbonatos o materia orgánica (Helios & Kyziol, 1990), referida para el caso del Cu.

En la parte alta de la cuenca se observan la mayor cantidad de puntos con concentraciones altas y medias de Zn. La fuente de estos sedimentos podría estar relacionada con las zonas de alteración neógena (Figura 4. 28), como propone Astudillo (2011).

4.3.8 Mapa de concentraciones de As

El Arsénico presenta concentraciones altas y medias al este del embalse Puclaro, a partir de las nacientes del río Turbio (Distrito El Indio) y el río Seco (Minas Nueva Elqui y Mina Carmen de Río Seco), donde se encuentran la zonas de alteración neógena asociadas a mineralización de arseniatos (como enargita) (Figura 4. 30).

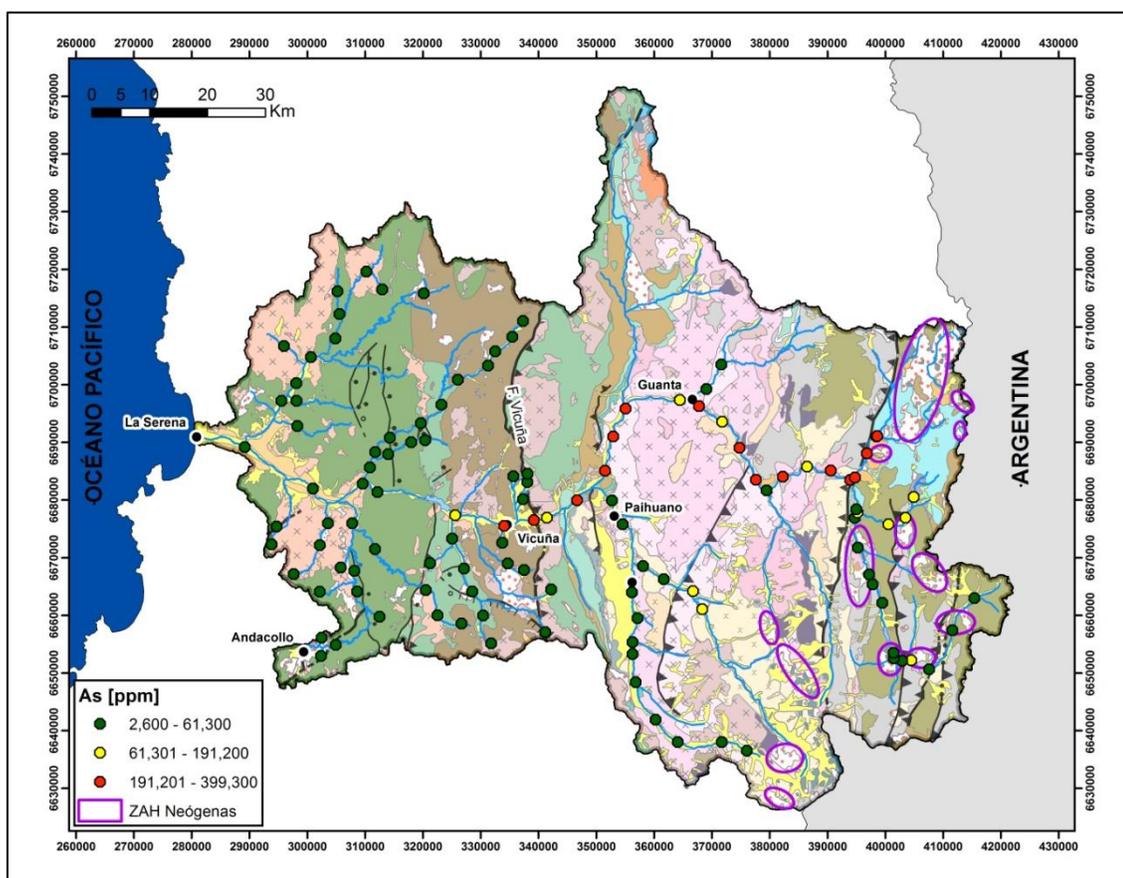


Figura 4. 30. Mapa de concentraciones de **As** con y zonas de alteración neógenas. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

Las concentraciones de As se mantienen relativamente altas, con ciertas fluctuaciones, a lo largo del río Turbio y la parte alta del río Elqui, hasta el extremo oriental del embalse Puclaro. Al oeste del embalse las concentraciones de As se mantienen bajas, como sucede con las concentraciones de Cu. Esto, nuevamente, sugiere que el embalse se comporta como una “trampa”, en este caso acumulando el As presente en los sedimentos del río Elqui.

En el río Cochiguás se tiene dos muestras con concentraciones medias de As (Figura 4. 32), las que podrían estar relacionadas a las zonas de alteración neógena asociadas a la Unidad Infiernillo, que se encuentran en el límite oriental de la cuenca del Cochiguás.

También se encuentra una muestra con concentración media en el río La Laguna (Figura 4. 32), ésta corresponde a la base de un afluente que se extiende hacia el norte, casi hasta el río Seco, suponiendo una relación con las zonas de alteración neógena.

Al igual que con el Au o el Cu, para el As se observa un control geomorfológico dado por la Falla Vicuña, aumentando la concentración de As inmediatamente río abajo de ella (Figura 4. 32).

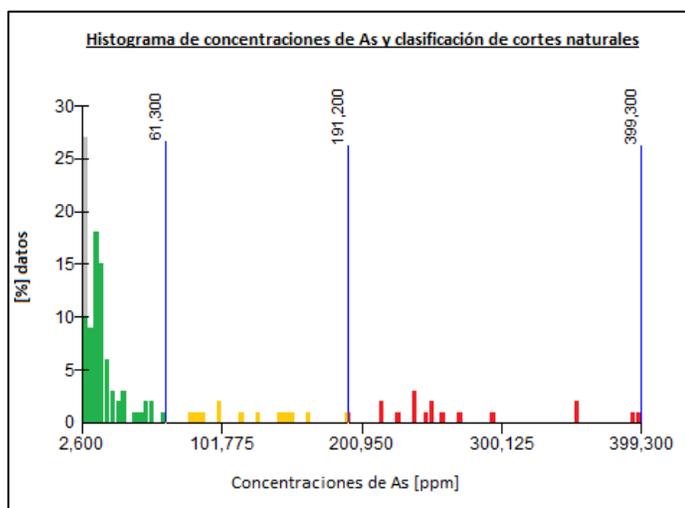


Figura 4. 31. Histograma de concentraciones de Zn y límites de clasificación de Jenks.

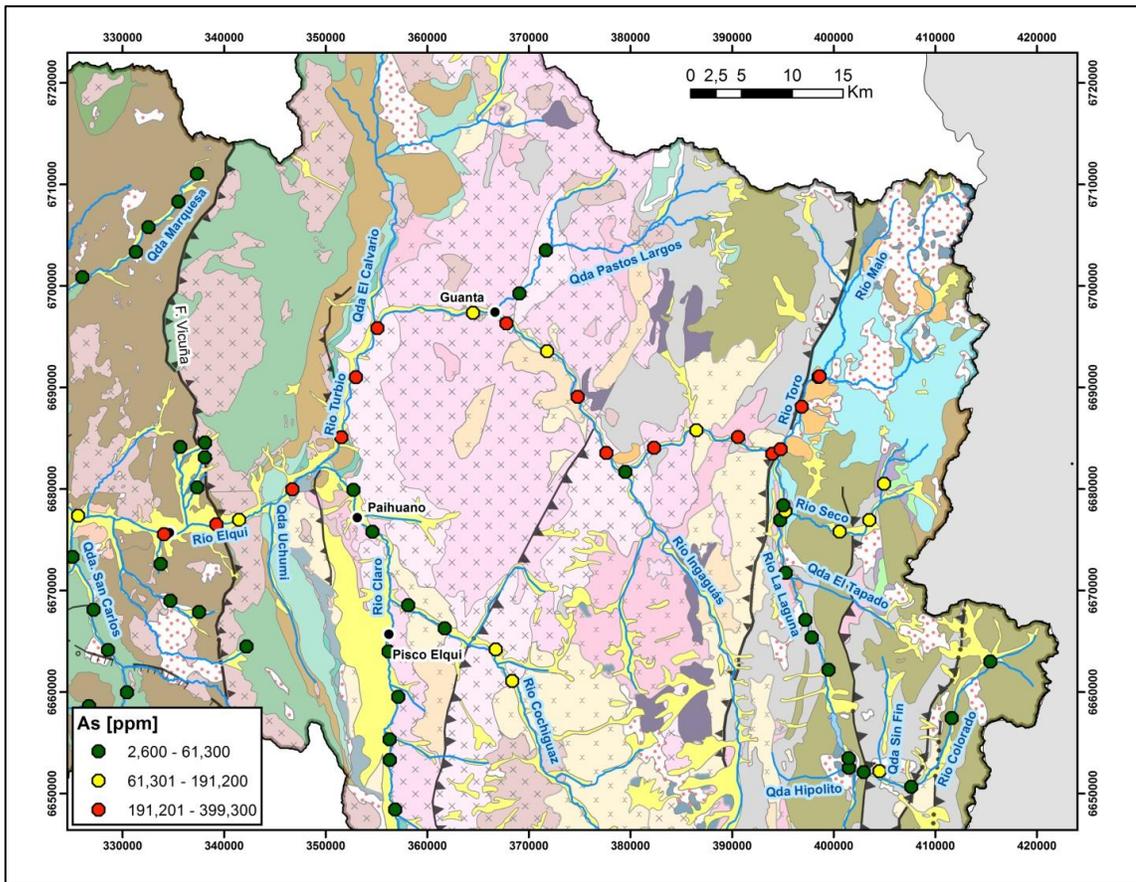


Figura 4. 32. Mapa de concentraciones de As., acercamiento a sector nororiental de la cuenca del Elqui. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

4.3.9 Mapa de concentraciones de Sn

La mayor agrupación de puntos con concentraciones medias de Sn se encuentra en los ríos Claro y Cochiguás. También se observan concentraciones altas y medias en los ríos La Laguna y Toro, Estero de Guanta y las quebradas Vicuña, Arrayán, Talca, Santa Gracia, y en la parte baja del río Elqui (Figura 4. 33).

Las concentraciones medias y altas de Sn observadas en el Batolito Elqui-Limarí (BEL), podrían estar indicando la presencia de depósitos estaníferos (casiterita) asociados a las concentraciones medias o altas observadas en Zr (Figura 4. 36) y TiO₂ (Figura 4. 35) (Vassallo, 2008).

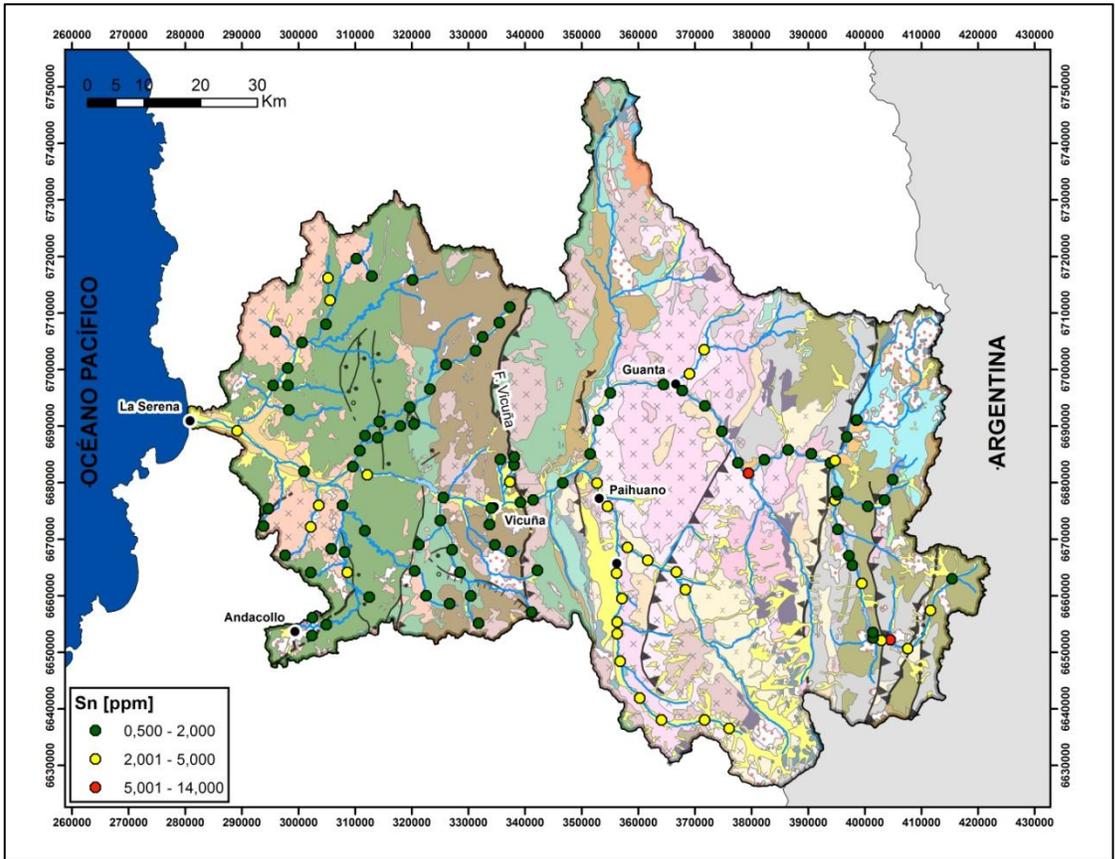


Figura 4. 33. Mapa de concentraciones de Sn. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

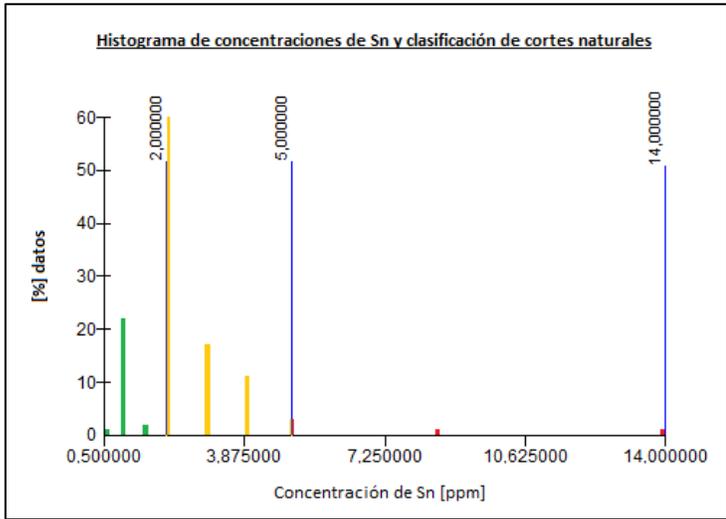


Figura 4. 34. Histograma de concentraciones de Zn y límites de clasificación de Jenks.

La casiterita podría provenir de granitoides del BEL. Dada su alta densidad ($\sim 7\text{gr/cm}^3$) (Ralph, 2013) se puede asumir que la fuente de este mineral no debe estar muy lejos de los sedimentos muestreados.

Las concentraciones medias de Zr y TiO_2 en correspondencia con estas muestras, podrían ser indicadores de depósitos tipo placer de Sn en los ríos Claro y Cochiguás, así como en otros puntos en la parte occidental de la cuenca.

Pesticidas con contenido de Sn podrían estar influyendo en esta señal, sin embargo la agricultura se desarrolla sólo en la parte baja de estos ríos, mientras que la señal de Sn es alta desde las nacientes donde no hay agricultura.

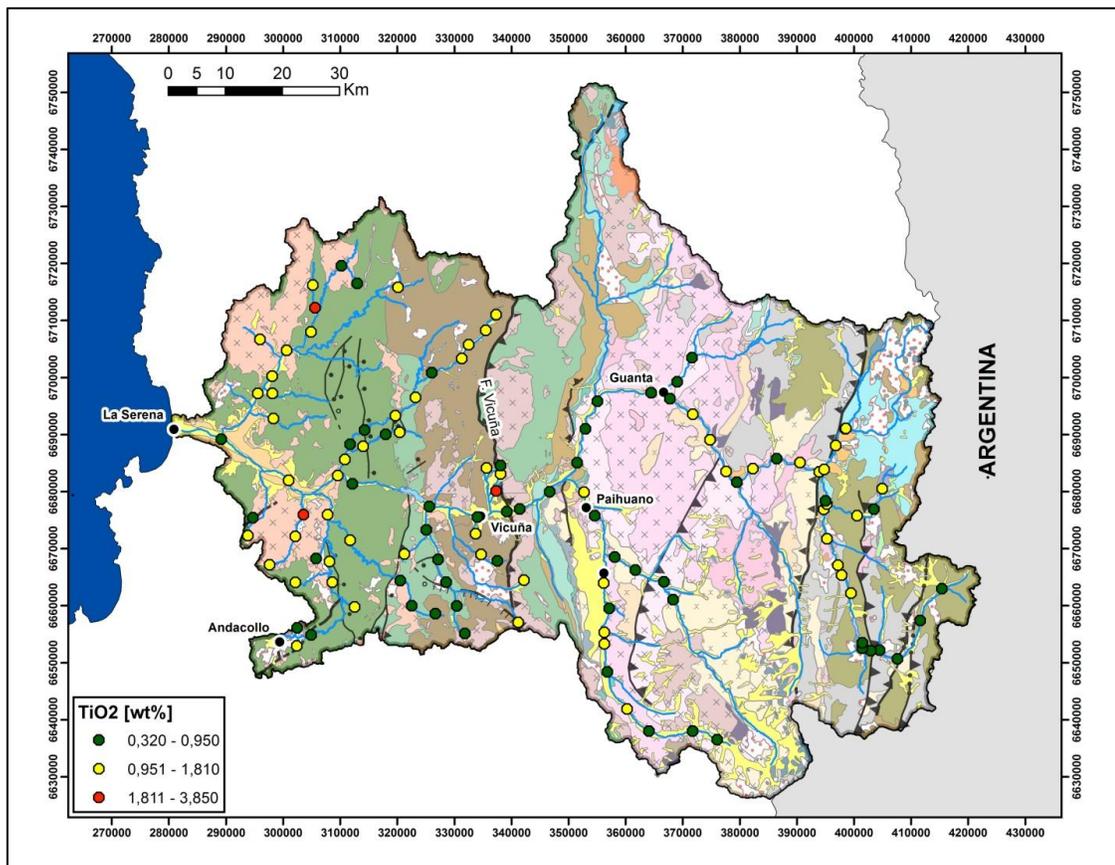


Figura 4. 35. Mapa de concentraciones de TiO_2 . Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

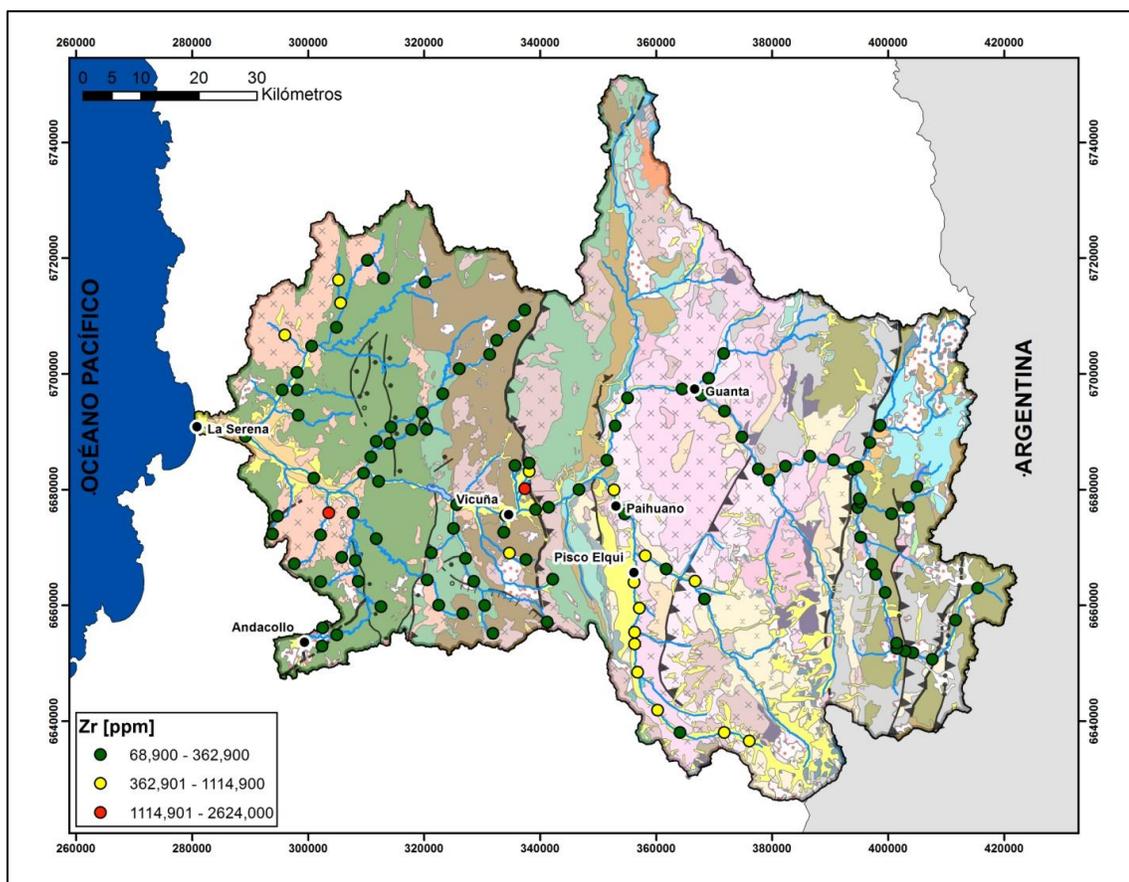


Figura 4. 36. Mapa de concentraciones de Zr. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

4.3.10 Mapa de concentraciones de Hg

Las mayores concentraciones de Hg se encuentran en la quebrada Arrayán, río abajo del distrito Andacollo (Figura 4. 37 y Figura 4. 38). Estas concentraciones serían producto de dos fuentes: la existencia de venas con mineralización de Hg en el distrito Andacollo, y la utilización de Hg metálico para la amalgamación de Au en la minería artesanal y semi-industrial (Higuera, et al., 2004). Si bien, el Hg escapa fácilmente a la atmósfera, el aporte continuo, producto de las dos fuentes mencionadas, funcionaría como una recarga constante del sistema.

Al norte de Andacollo aflora un intrusivo del Cretácico que presenta zonas con mineralización de Au, algunas minas que explotan estos yacimientos se ubican en la ladera oriental de la quebrada de Talca (Minas Huancará y La Monja), y otras en las nacientes de la quebrada El Zapallo, al oeste de la quebrada de Talca (Iván y La Mollaquita). Se observa una muestra con concentración media de Hg ubicada en la quebrada de Talca, en el mismo punto donde se ha encontrado una alta concentración de Au (Figura 4. 8). No se tienen antecedentes detallados respecto a la mineralización

de los yacimientos de estas minas, pero se sabe que la erosión de las zonas mineralizadas relacionadas a ellas producen depósitos de placeres de Au en esta quebrada. Se puede sugerir que la concentración de Hg en este punto estaría asociada a la mineralización aurífera. Se propone la misma explicación para la muestra ubicada en la naciente de la quebrada.

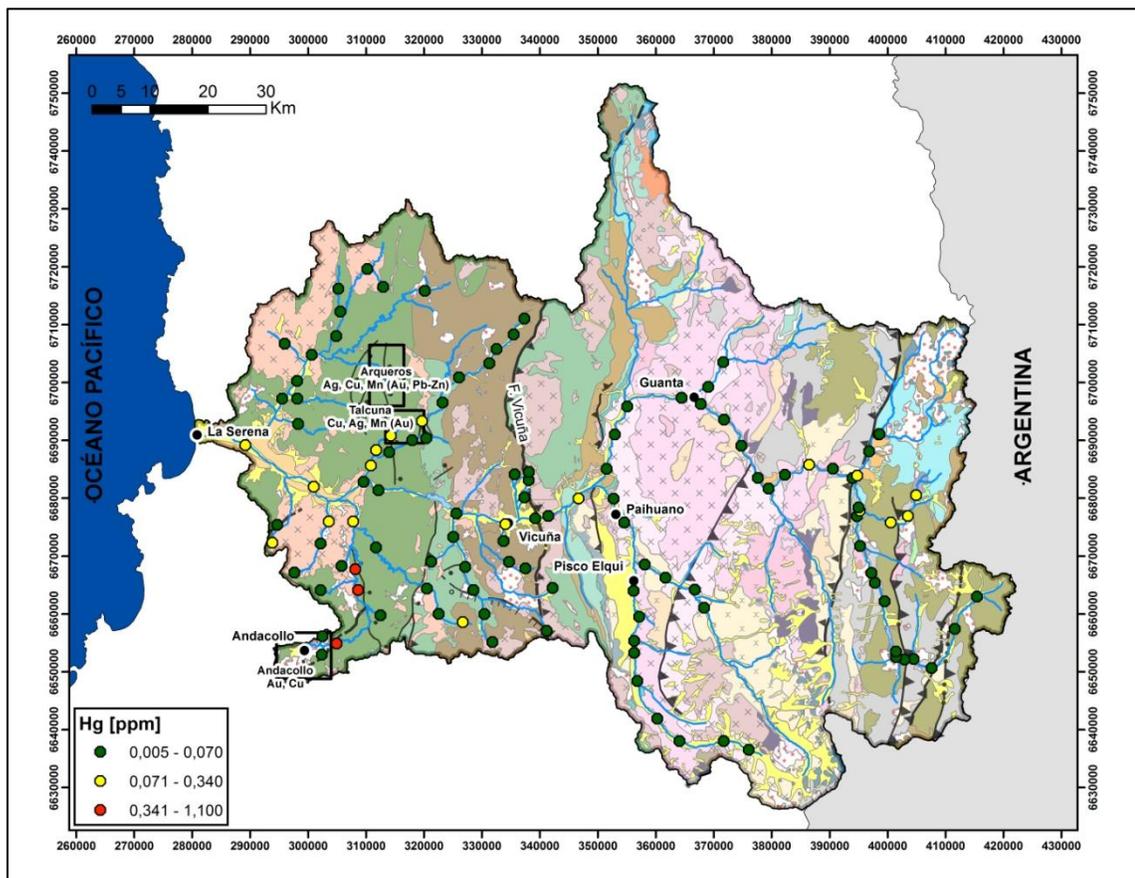


Figura 4-29. Mapa de concentraciones de Hg. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5. Para nombres de drenajes principales ver Figura 2. 3.

Al norte de Andacollo aflora un intrusivo del Cretácico que presenta zonas con mineralización de Au, algunas minas que explotan estos yacimientos se ubican en la ladera oriental de la quebrada de Talca (Minas Huancará y La Monja), y otras en las nacientes de la quebrada El Zapallo, al oeste de la quebrada de Talca (Iván y La Mollaquita). Se observa una muestra con concentración media de Hg ubicada en la quebrada de Talca, en el mismo punto donde se ha encontrado una alta concentración de Au (Figura 4. 38). No se tienen antecedentes detallados respecto a la mineralización de los yacimientos de estas minas, pero se sabe que la erosión de las zonas mineralizadas relacionadas a ellas producen depósitos de placeres de Au en esta quebrada. Se puede sugerir que la concentración de Hg en este punto estaría asociada

a la mineralización aurífera. Se propone la misma explicación para la muestra ubicada en la naciente de la quebrada.

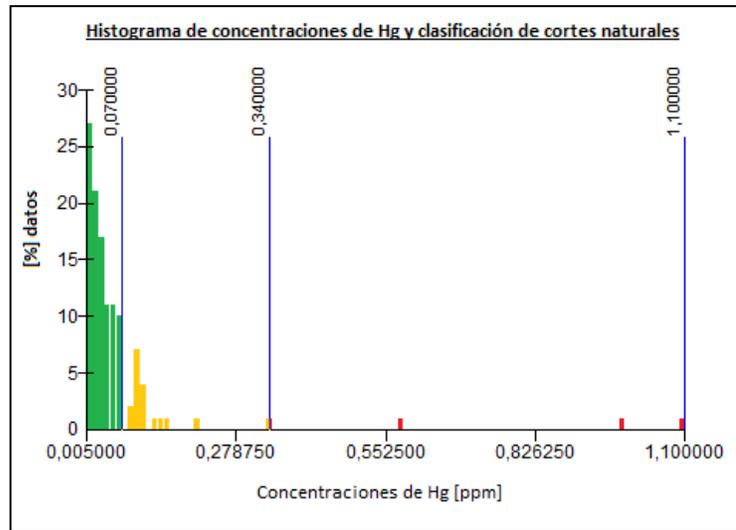


Figura 4. 37. Histograma de concentraciones de Hg y límites de clasificación de Jenks.

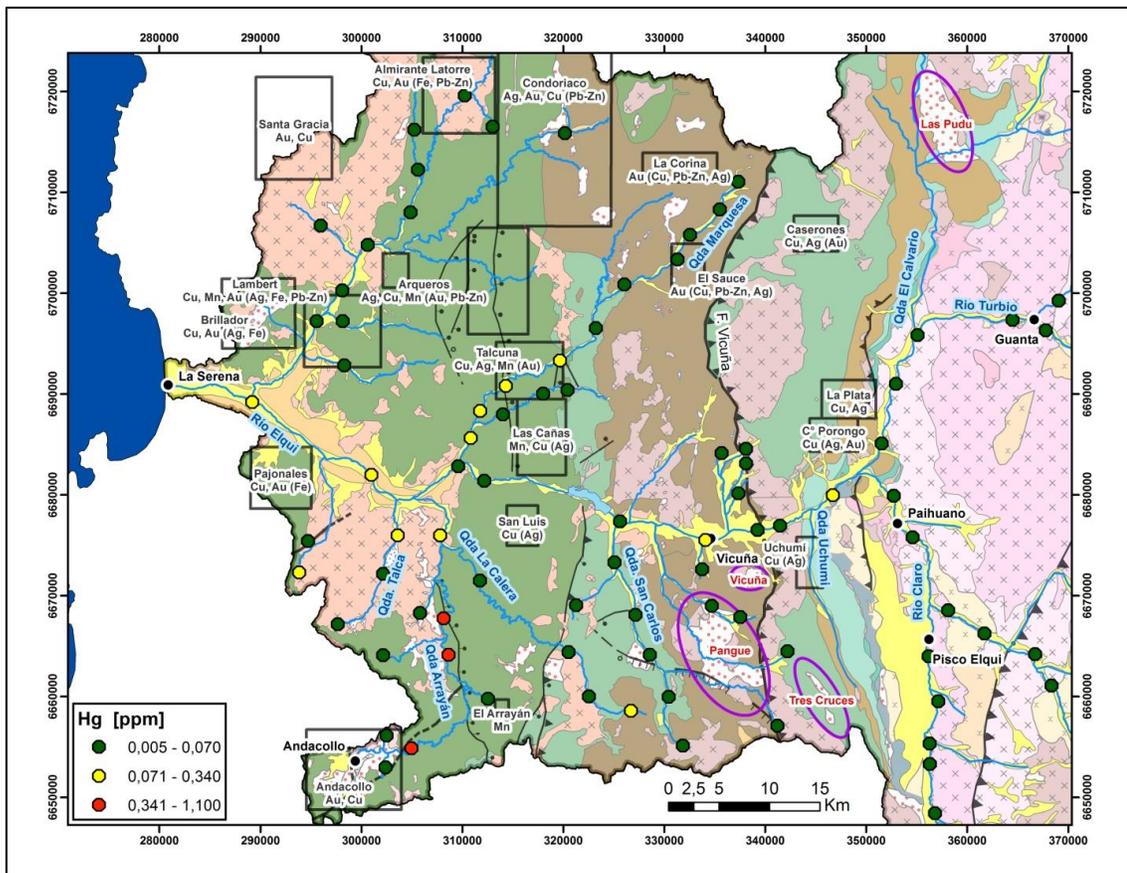


Figura 4. 38. Mapa de concentraciones de Hg, acercamiento a sector oriental de la cuenca del Elqui con distritos mineros y zonas de alteración hidrotermal. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

Las concentraciones medias observadas en la quebrada Marquesa serían producto de la mineralización de Arquerita, una amalgama de Ag y Hg, perteneciente al distrito Arqueros.

Existe una muestra con concentración media de Hg en la cabecera de la quebrada La Calera, al este de la quebrada Arrayán (Figura 4. 38). Esta muestra podría estar indicando la presencia de mineralización de mercurio, probablemente aurífera o argentífera.

Probablemente las muestras con concentraciones medias de Hg ubicadas en los ríos Seco, Turbio y Elqui, río arriba del embalse Puclaro (Figura 4. 39), tengan relación con la mineralización de Au y/o Ag asociada a las zonas de alteración neógenas y mesozoicas.

Las muestras con concentración media de Hg ubicadas en la parte baja del río Elqui (Figura 4. 37), en cambio, parecen tener relación con el sedimento aportado desde las quebradas Arrayán y Marquesa.

No queda claro qué factor es más importante para la distribución de concentraciones de Hg: la mineralización de mercurio o la utilización de este para extracción de oro.

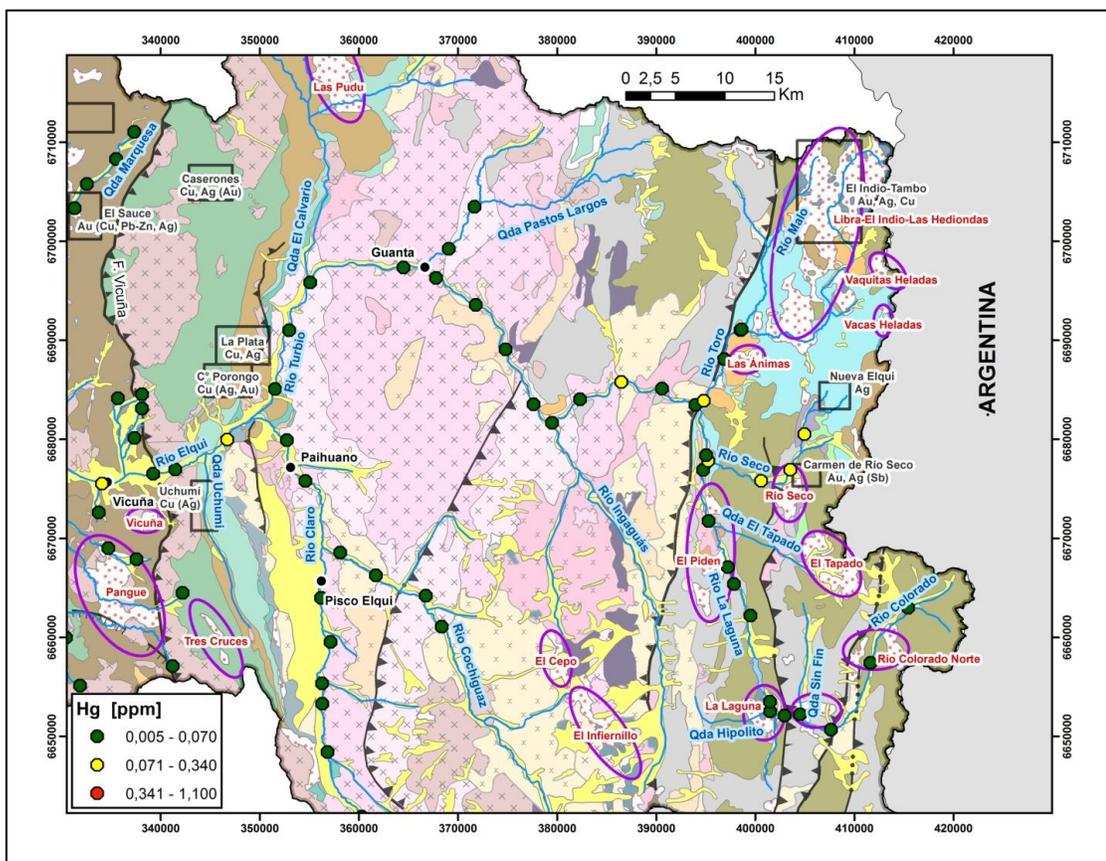


Figura 4. 39. Mapa de concentraciones de Hg, acercamiento a sector occidental de la cuenca del Elqui con distritos mineros y zonas de alteración hidrotermal. Para leyenda de unidades geológicas ver Figura 2. 5.

4.4 Gráficos de variación geográfica

Se muestran estos gráficos en el Anexo B. Se hará una breve descripción y discusión de los resultados.

4.4.1 Gráficos de variación geográfica normalizados

Se puede dividir el perfil en tres sectores con características geoquímicas distintivas: A. Río Colorado y río La Laguna al sur de río Seco; B. Río Turbio y río Elqui al este del embalse Puclaro; C. Río Elqui al oeste del embalse Puclaro.

A continuación se describirán estos sectores de manera general:

4.4.1.1 A. Río Colorado y río La Laguna al sur de río Seco.

Este sector se caracteriza por tener, para la mayoría de las muestras, concentraciones por sobre la media de: Na₂O, Hf, Nb, Ta, Zr, LREE, HREE (Figura 4. 40); y bajo la media de: Stotal, Al₂O₃, Cs, Sr, Mo, Cu, Pb, As, Sb, Bi, Hg, Tl.

Las altas concentraciones de Zr y Hf, se pueden relacionar con la abundante presencia de zircones en la Formación Pastos Blancos. El contenido de zircones en estos sedimentos podría verse aumentado por la actividad glaciaria presente en esta zona, debido al glaciar El Tapado. La erosión glaciaria produciría una disminución del tamaño de grano de los minerales menos resistentes a la meteorización mecánica, lo que resultaría en una reconcentración de zircones.

Por otro lado, Hf, Nb, Ta, Zr, LREE y HREE corresponden a elementos incompatibles HFSE (High Field Strength Elements), que suelen formar parte de minerales accesorios como zircón, esfeno y apatito.

La alta concentración de Na₂O en este sector podría provenir de las plagioclasas sódicas muy comunes en los granitos, en este caso del Batolito Elqui-Limarí.

A pesar de que existen diversas zonas de alteración hidrotermal en este sector, además de un par de minas de Cu, Ag y Au, los elementos asociados a mineralización económica presentan concentraciones bajas o medias. Probablemente esto se relaciona con la intensa actividad minera desarrollada en otros sectores de la cuenca del Elqui (El Indio, Andacollo, Talcuna, entre otros), que elevarían las medias de concentraciones de elementos asociados a zonas de alteración hidrotermal y de interés económico.

4.4.1.2 B. Río Turbio y río Elqui al este del embalse Puclaro.

Este sector se caracteriza por presentar, en general, concentraciones sobre la media de: Stotal, Al₂O₃, P₂O₅, Co, Cs, Sr, Mo, Cu, Zn, Ni, As, Sb, Bi, Hg y Tl (Figura 4. 40).

Además, presenta concentraciones por debajo de la media de: Ctotal, CaO, Na₂O, K₂O, MnO, Cr₂O₃, Ba, Be, Hf, Nb, Sn, Ta, Zr, LREE, HREE y Ag.

Elementos como S, Cu, Mo, As, Sb, Hg y Tl se asocian al distrito El Indio-Tambo. La alta concentración de estos elementos ocurre río abajo de la confluencia con el río Toro, lo que corrobora que la fuente probable de ellos se relaciona a la mineralización asociada a las zonas de alteración neógenas que albergan a minas como El Indio, El Tambo y Las Hediondas.

Los elementos que presentan bajas concentraciones en este sector, se asocian a minerales formadores de roca, que podrían asociarse a las rocas encajantes que corresponden, principalmente, al Batolito Elqui-Limarí (BEL) y rocas volcano-sedimentarias del Mesozoico. En el BEL no se encuentran zonas de alteración hidrotermal ni yacimientos de importancia, estos están, más bien, en las cercanías de los contactos del BEL con las rocas volcánicas mesozoicas. Esto sugiere que la señal química proveniente del río Toro y, probablemente, de otras zonas de alteración presentes en los afluentes involucrados, es de una intensidad considerable, ya que diluiría la química de las rocas encajantes.

Además, se debe considerar la existencia, a lo largo del río Turbio, de afloramientos colgados de sedimentos lacustres del Holoceno Inferior, formados por capas de yesos y arcillas, y que presentan concentraciones extraordinariamente altas de arsénico, que han sido atribuidas a la mineralización arsenical presente en las zonas de alteración hidrotermal neógenas (Lillo, 2009).

Las muestras 54 y 68 presentan los más altos peaks de concentración de Cu (Figura 4. 40). Estas muestras se encuentran en un sector que recibe afluentes de tres distritos mineros: La Plata (Cu, Ag), Cerro Porongo (Cu, Au) y Uchumí (Cu, Ag) (Figura 4. 11).

La concentración de Au presenta un peak máximo en la muestra 63, inmediatamente río abajo de la Falla Vicuña. La fuente probable de oro sería la mineralización relacionada a las zonas de alteración neógenas y/o al distrito Cerro Porongo. Mientras, el abrupto aumento de concentración en este punto, se podría relacionar con el cambio geomorfológico e hidrodinámico asociado a la Falla Vicuña.

Al verificar qué sucede con otros elementos asociados a minerales densos, que podrían ser afectados por acumulación gravitacional, se observa que en la muestra 63 existe un aumento, respecto a la muestra 65 (inmediatamente río arriba), en las concentraciones de: Ctotal, Stotal, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, P₂O₅, MnO, Sc, Co, Cs, Ga, Nb, Ta, Th, U, V, W, HREE, Mo, Cu, Pb, Ni, As, Cd, Bi, Ag, Au, Hg y Tl. Mientras los elementos que presentan una disminución en concentración son: SiO₂, CaO, Na₂O, K₂O, Hf, Rb, Sr, Zr, LREE, Zn, Sb y Se (ver anexo B). En general, los elementos asociados a minerales densos tienden a aumentar su concentración inmediatamente río abajo de la Falla Vicuña, con excepción del Zr.

4.4.1.3 C. Río Elqui al oeste de quebrada Marquesa.

Este sector se caracteriza por presentar, en general, concentraciones sobre la media de: Fe₂O₃, C_{total}, CaO, Na₂O, MnO, Sc, Ba, Pb, Ag, Au y Hg (Figura 4. 40). Por otro lado, presenta concentraciones por debajo de la media de: S_{total}, Al₂O₃, P₂O₅, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sr, Ta, Th, U, W, Zr, LREE, HREE, Mo, Cu, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Tl, Se.

Los elementos con altas concentraciones en este sector, se pueden asociar a la zonas de alteración presentes en los afluentes de la zona, donde la mineralización incluye calcita, manganeso, baritina y plata.

Los afluentes Quebrada Marquesa, Quebrada Santa Gracia y Quebrada Arrayán, son los de mayor importancia en este sector, dado el tamaño de sus zonas de influencia que, además, incluyen algunos de los distritos mineros más importantes de la cuenca del Elqui.

El punto de control de la quebrada Marquesa corresponde a la muestra 26 (ver Anexo B). Si se comparan las concentraciones de las muestras 26 y 30, se observa un aumento, río abajo, en las concentraciones de: C_{total}, Fe₂O₃, MgO, CaO, TiO₂, P₂O₅, MnO, Cr₂O₃, Sc, Ba, Co, Cs, Hf, Nb, Sr, Ta, Th, U, V, Zr, LREE, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, Cd, Sb, Ag y Tl. Por otro lado, disminuyen las concentraciones de: SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, Ga, Rb, Sn y HREE (ver anexo B).

Los elementos que presentan un aumento en su concentración corresponden a elementos que se asocian a minerales densos. En Quebrada Marquesa la escorrentía superficial es escasa, sin embargo, cuando esta ocurre y se junta con el río Elqui, debe haber una pérdida de energía de transporte, lo que promueve la deposición de minerales pesados en el río Elqui río abajo de la confluencia.

Además, entre los elementos que aumentan su concentración, se encuentran elementos que se pueden relacionar con la mineralización económica existente en los distritos Las Cañas, Talcuna, Arqueros, El Sauce, La Corina y Condoriaco, donde se explota principalmente Cu, Fe, Mn, Pb-Zn, Ag, Au y baritina (Figura 2. 9).

El MnO presenta su peak máximo en este punto. Probablemente esté controlado por los mantos de Mn existentes en el Grupo Bandurrias.

El punto de control de las quebradas Arrayán y Talca corresponde a la muestra 11. Al comparar sus concentraciones con la muestra 26 (inmediatamente río arriba), se obtiene que existe un aumento en las concentraciones, río abajo, de: C_{total}, S_{total}, CaO, K₂O, Ba, Rb, Sr, HREE, Pb, Sb, Ag y Hg. Por otro lado, disminuyen las concentraciones de: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, P₂O₅, MnO, Co, Ga, Hf, Nb, Sn, Ta, U, Zr, LREE, Mo, Cu, Zn, Ni, Cd y Tl (ver Anexo B).

La disminución de elementos que se asocian a minerales formadores de roca, aún más luego de la disminución vista en la muestra 26, sugiere que en este punto la geoquímica está controlada en mayor grado por las zonas de alteración hidrotermal y/o yacimientos presentes en las quebradas Arrayán y Talca. Efectivamente, los elementos que

presentan un aumento en sus concentraciones, corresponderían a elementos asociados a minerales de alteración.

Un caso interesante es el del Hg, que presenta su peak máximo de concentración, a lo largo del perfil, en este punto (punto 26). Esto se puede relacionar con la utilización histórica de Hg para la extracción artesanal e industrial de Au en el distrito Andacollo, que data de tiempos prehispánicos hasta la actualidad, además de la mineralización de Hg presente en este distrito (Reyes, 1991). Si bien el Hg es altamente volátil, estos resultados sugieren que los sedimentos provenientes del distrito Andacollo mantienen un alto contenido de Hg hasta llegar al río Elqui.

4.4.2 Comparación con estándar PEC

Los elementos que sobrepasan el estándar PEC son As, Cu y Zn (Figura 4. 41 y Figura 4. 42).

Para el arsénico se tiene que las muestras que sobrepasan el PEC se ubican río abajo del río Seco y río arriba del embalse Puclaro. Sin embargo, río abajo del embalse Puclaro las concentraciones de As son cercanas al PEC.

Si bien el embalse Puclaro estaría actuando como trampa para el arsénico, disminuyendo de manera importante su concentración en los sedimentos del río Elqui, los sedimentos que llegan a la ciudad de La Serena aún contienen arsénico.

Para el cobre, las concentraciones están por sobre el PEC a lo largo de los ríos Turbio y Elqui. Mientras que para el zinc las muestras que presentan concentraciones por sobre el PEC se ubican en torno a los ríos Colorado, Ingaguás, Claro y la quebrada Vicuña.

Si bien el PEC ha sido reconocido como un estándar internacional de calidad de sedimentos fluviales que permite identificar zonas de concentraciones altamente tóxicas, para reforzar sus resultados debe ser usado en combinación con otras herramientas de estimación de la calidad de los sedimentos (MacDonald, et al., 2000).

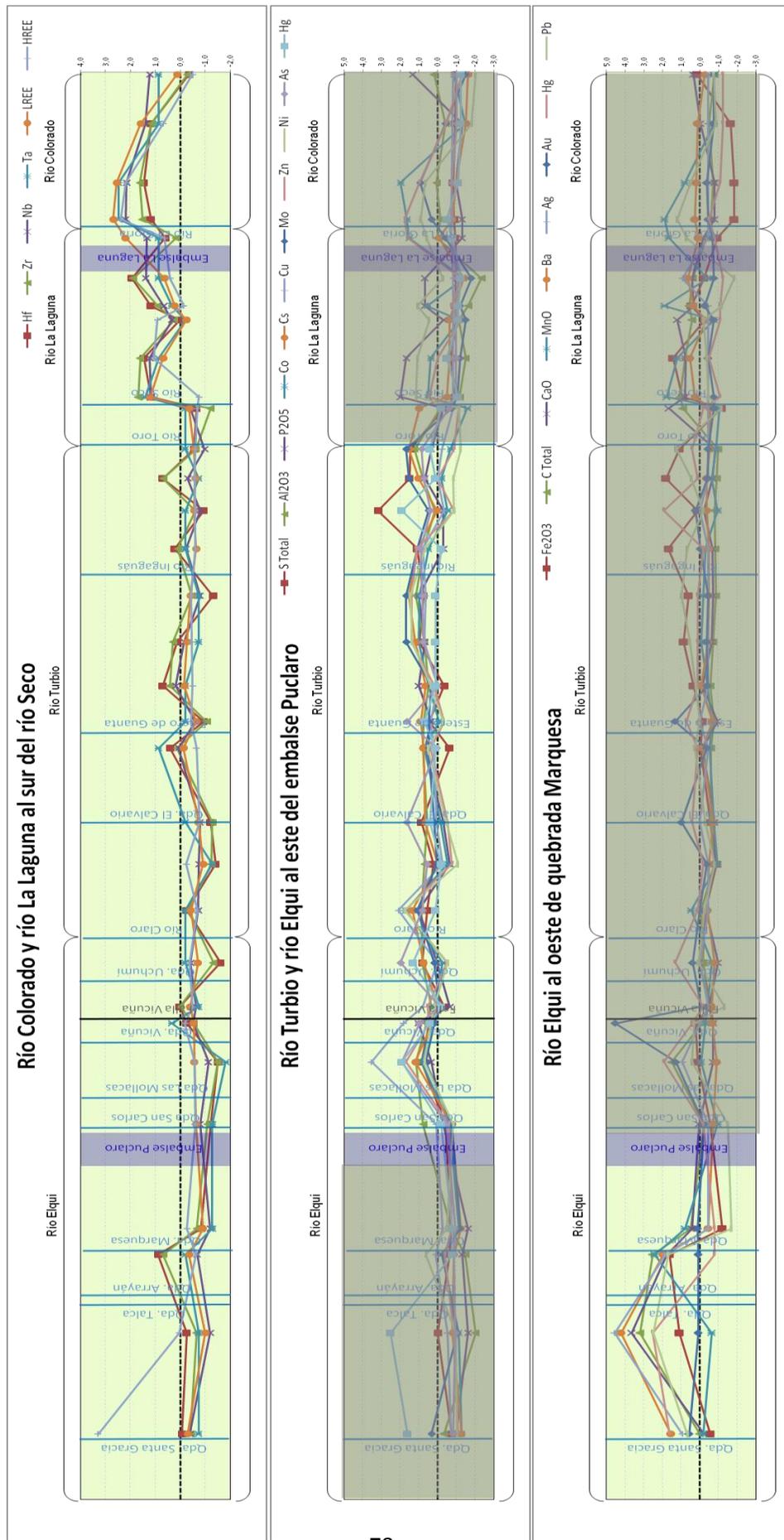


Figura 4. 40. Gráficos de variación geográfica normalizados. Se muestran elementos con concentraciones altas para cada zona descrita en el texto.

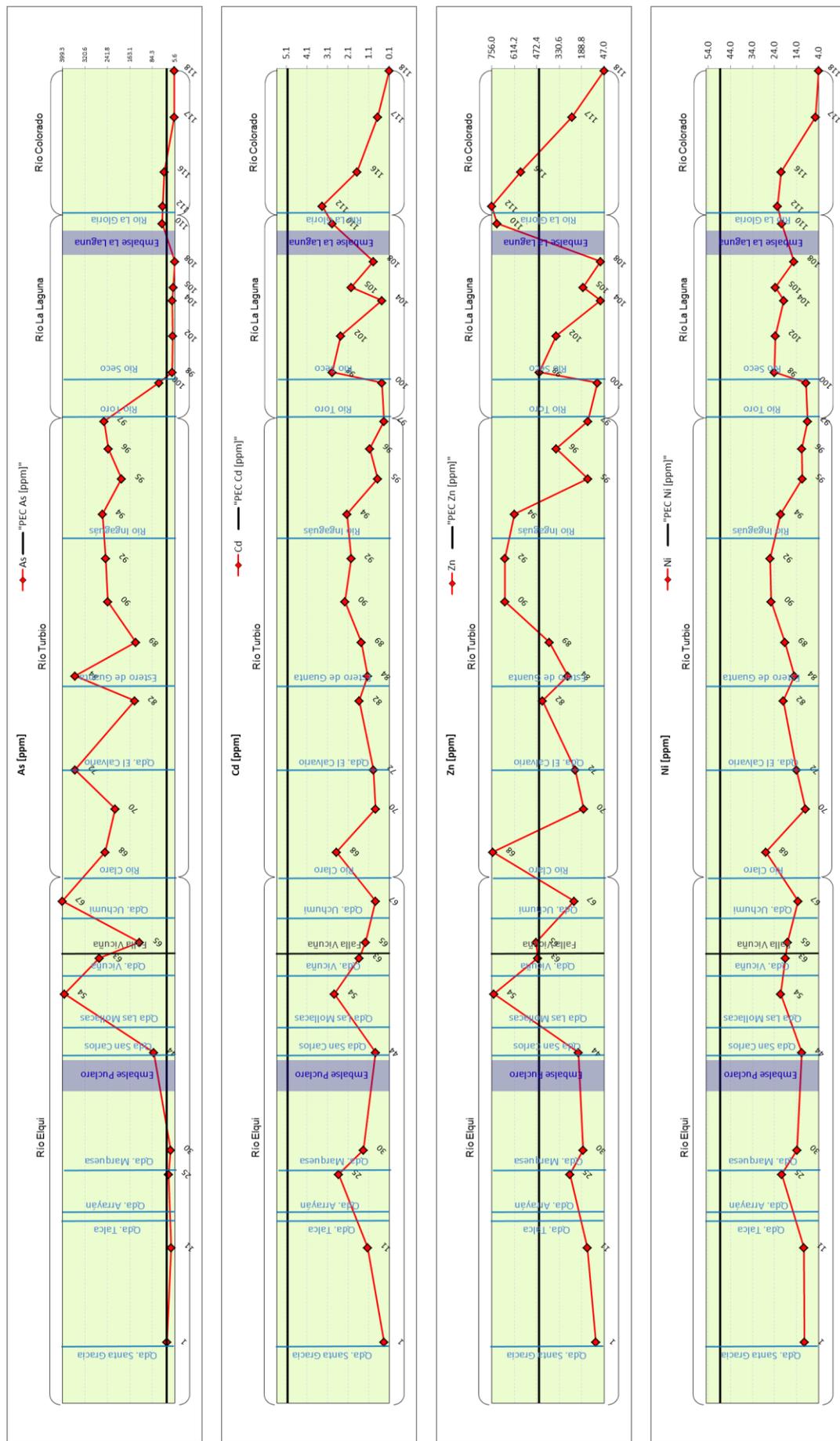


Figura 4. 41. Gráficos de variación geográfica con PEC para As, Cd, Zn y Ni.

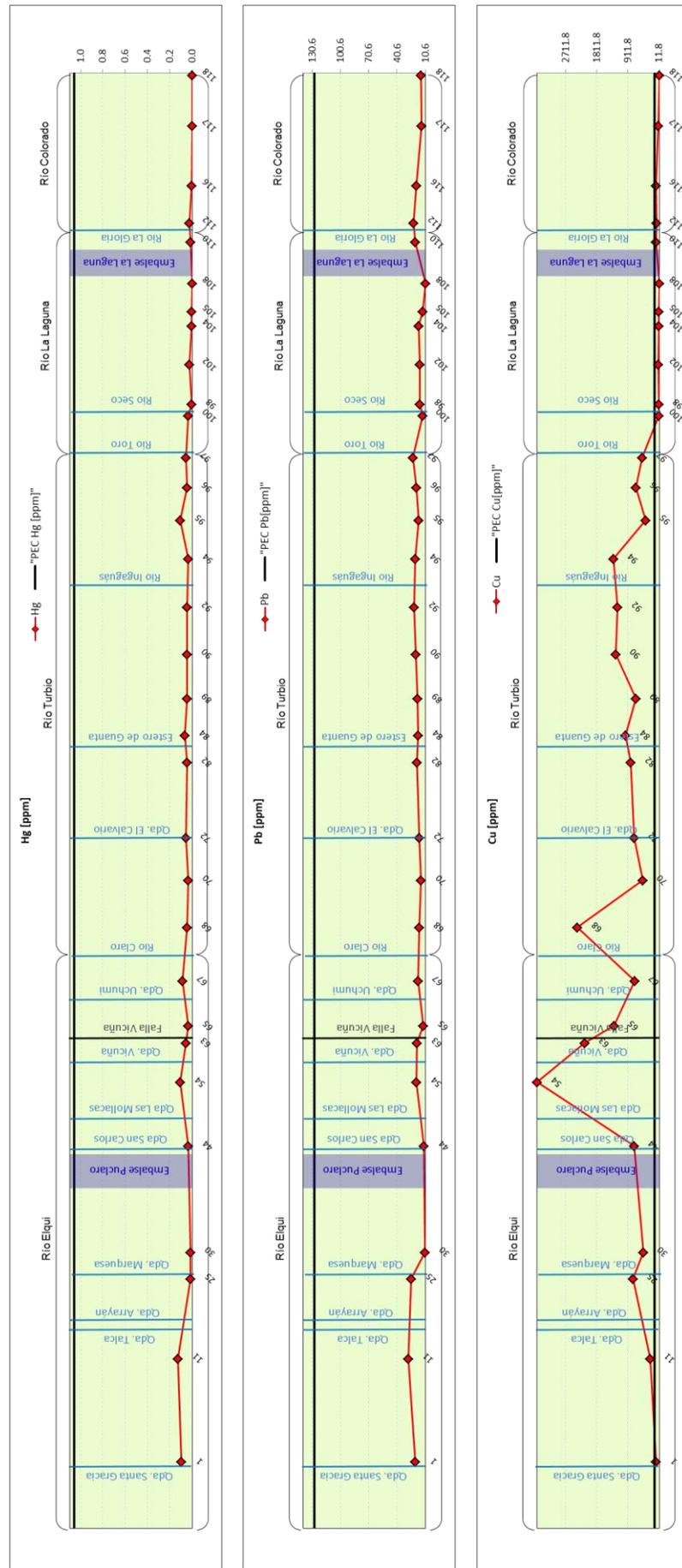


Figura 4. 42. Gráficos de variación geográfica con PEC para Hg, Pb y Cu.

4.5 Redes neuronales artificiales

Se escogió una red neuronal artificial de cinco nodos (ver Anexo C), principalmente debido a que la representación geográfica de los nodos muestra claras relaciones con factores de importancia en la cuenca (estructurales, hidrodinámicos, litológicos, etc.). Los parámetros utilizados para la red neuronal seleccionada son:

- Número de nodos finales: 5
- Número de épocas por nodo: 1000
- Datos normalizados a distribución normal con media cero y varianza uno.
- Se agrupan las tierras raras livianas (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd) y las tierras raras pesadas (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y), ya que muestran, en general, un comportamiento similar y una correlación muy cercana a 1.

Se obtienen 5 nodos (Figura 4. 43), caracterizados por presentar las mayores concentraciones o firmas geoquímicas, de los siguientes elementos (entre paréntesis los elementos de concentraciones medias-altas):

Nodo 1: CaO, Co, Cr₂O₃, Fe₂O₃, Ga, Hf, MgO, MnO, Nb, P₂O₅, Sc, Ta, Th, TiO₂, U, V, W, Zr (HREE, LREE).

Nodo 2: As, Bi, Cs, Cu, Ni, Stotal, Se, Sr, Tl, Zn (Al₂O₃, Cd, Ga, Rb, SiO₂).

Nodo 3: Al₂O₃ (CaO, MgO).

Nodo 4: Be, Ctotal, Cd, HREE, K₂O, LREE, Rb, SiO₂, Sn (Na₂O, U, Zn).

Nodo 5: Ag, Au, Ba, Bi, Hg, MnO, Na₂O, Pb, Stotal, Sb (Cu).

En la (Figura 4. 43) se proyectan los puntos muestreados, en colores que representan el nodo al cual pertenece cada punto. Se observa una sectorización geomorfológica: los nodos 2 y 4 se agrupan principalmente al este de la Falla Vicuña, mientras que los nodos 1, 3 y 5 se encuentran principalmente al oeste de la Falla Vicuña.

Los nodos 3 y 4 se distribuyen de manera bastante amplia a ambos lados, oeste y este respectivamente, de la Falla Vicuña. Esto podría indicar que sus firmas geoquímicas son controladas principalmente por la litología predominante, ya sea volcano-sedimentaria para el nodo 3 o ígnea-volcánica para el nodo 4.

Los nodos 1, 2 y 5, en cambio, tienen una distribución geográfica más bien acotada, lo que podría estar indicando la influencia de factores de carácter local.

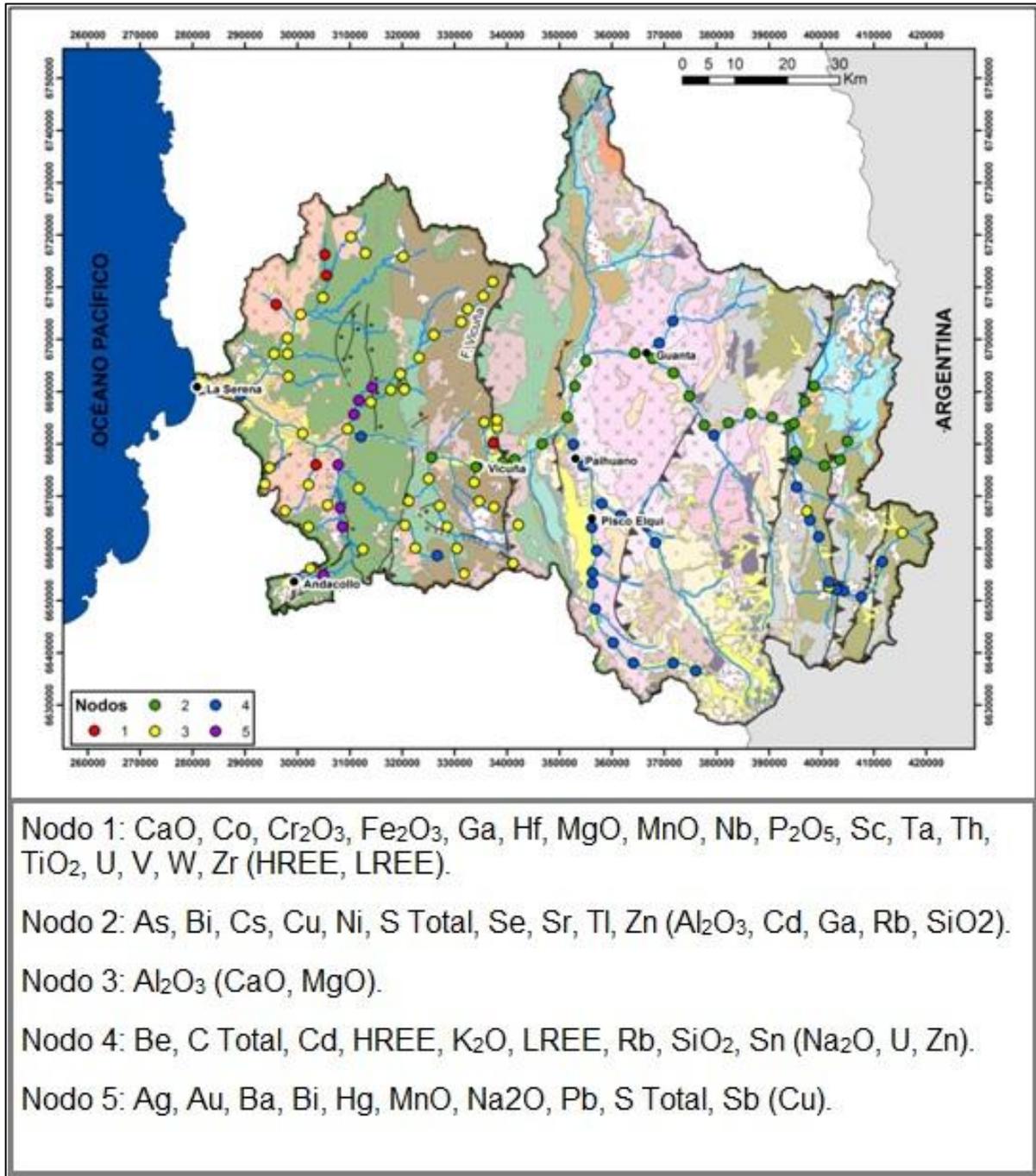


Figura 4. 43. Mapa de muestras clasificadas según nodos de la red neuronal artificial escogida y las firmas geoquímicas características para cada nodo.

Nodo 1

Las muestras pertenecientes al nodo 1 se presentan distribuidas puntualmente en algunas quebradas del sector occidental de la cuenca (Santa Gracia y Talca), y en el flanco occidental del cerro Mamalluca (norte de Vicuña) (Figura 4. 44). La signatura química de este nodo incluye elementos que, generalmente, se encuentran en minerales densos: Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , Zr.

Estos cinco puntos, evaluados en los mapas de concentraciones de Zr, corresponden a puntos aislados con concentraciones altas y medias de Zr. Podría tratarse de “trampas” de minerales pesados. Las condiciones para generar estas “trampas” estarían dadas, entre otros factores, por la escasa escorrentía superficial que caracteriza la parte occidental de la cuenca del Elqui.

El punto, perteneciente al nodo 1, ubicado en la quebrada Talca se encuentra en una zona caracterizada por la existencia de placeres auríferos originados por yacimientos de Au encajados en rocas intrusivas cretácicas (Emparán & Pineda, 2006) . Este punto en particular, se ubica inmediatamente río abajo de un depósito de gravas de la Formación Confluencia, el que puede estar funcionando como “trampa” para el Au y otros minerales densos.

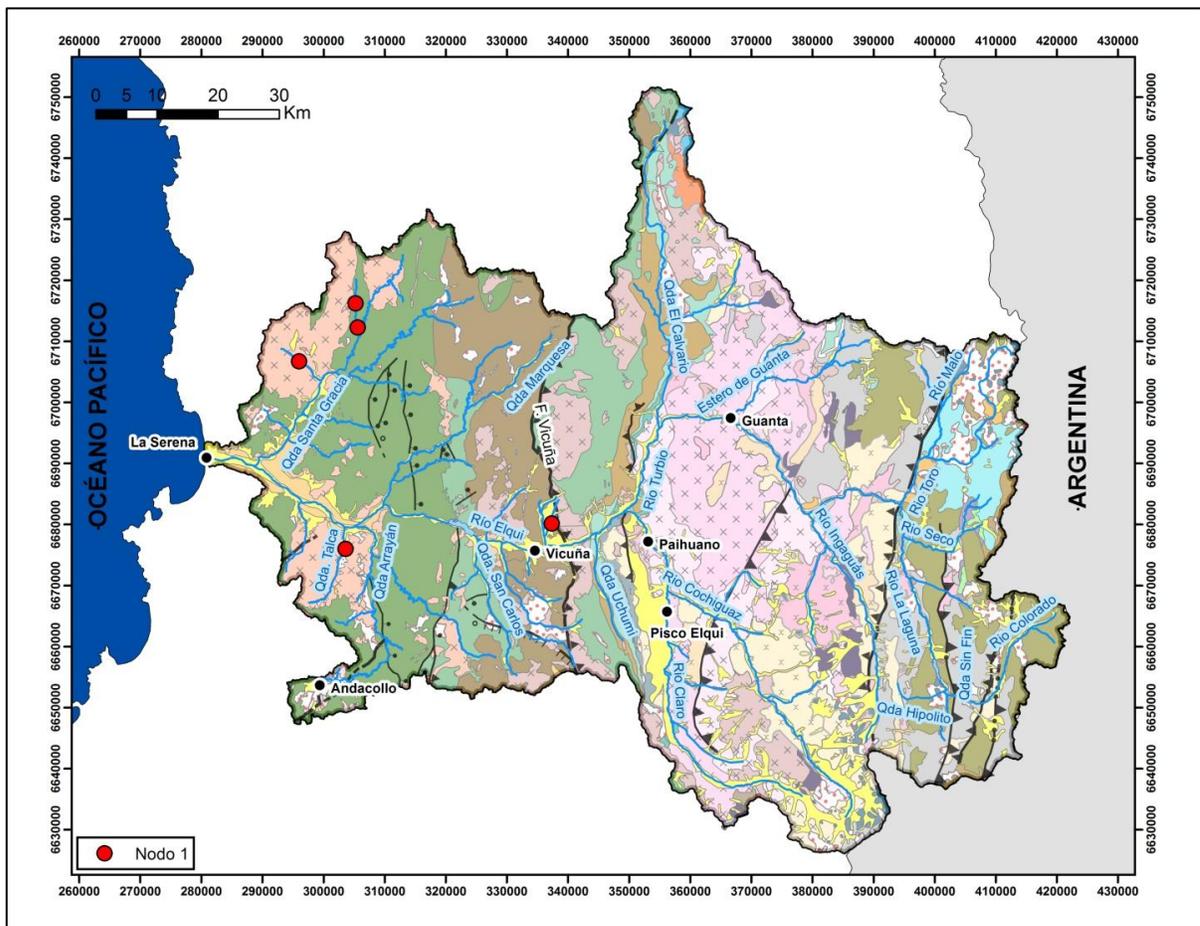


Figura 4. 44. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 1.

Nodo 3

Los puntos pertenecientes al nodo 3 se encuentran principalmente al oeste de la Falla Vicuña, salvo algunas excepciones, en relación espacial con los intrusivos cretácicos, el Grupo Bandurrias y las formaciones Cerrillos y Los Elquinos. Las excepciones corresponden a tres muestras ubicadas en la parte alta de la cuenca, asociadas a las formaciones Doña Ana y Pastos Blancos (Figura 4. 46).

Si bien cabría esperar una signatura rica en hierro y manganeso, dada la presencia de importantes yacimientos de estos metales en las quebradas de la parte baja de la cuenca del Elqui, se debe tener en cuenta que las redes neuronales artificiales representan asociaciones químicas multielementales de primer orden; es decir, la signatura química de cada nodo se interpreta como una composición global característica, que, en este caso, estaría relacionada más bien a la litología de la roca caja dominante, destacando sus diferencias con las litologías del resto de la cuenca. Por otro lado, la signatura geoquímica asignada a cada nodo varía según la signatura asignada a los demás nodos. En este caso el nodo 1 acapara las mayores concentraciones de Fe_2O_3 y MnO , que, como se sugiere, estarían relacionadas a entrapamientos de minerales densos.

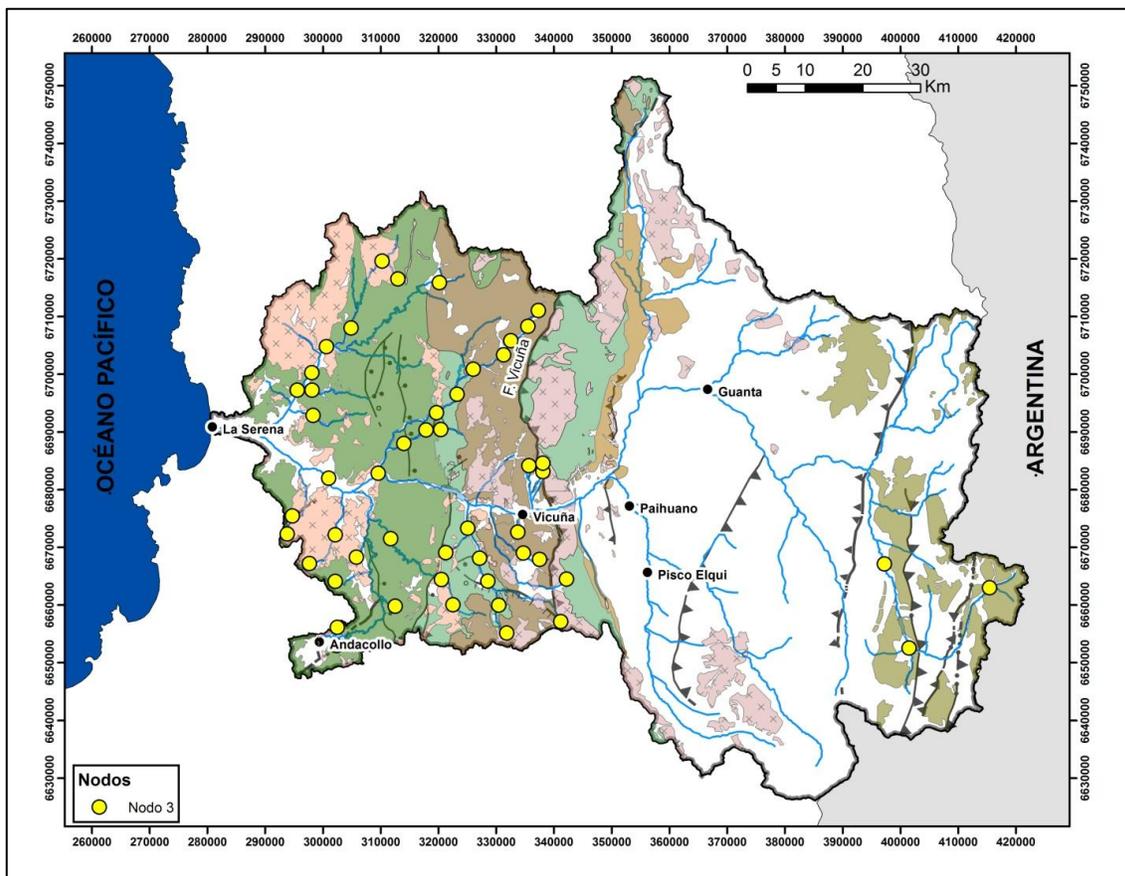


Figura 4. 46. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 3.

La signatura química del nodo 3 es abundante en Al_2O_3 , CaO y MgO , compuestos que se pueden asociar a aluminosilicatos, minerales ferromagnesianos y calcita, minerales muy presentes en las rocas volcano-sedimentarias caracterizadas por el nodo 3.

Nodo 4

Los puntos pertenecientes al nodo 4 se encuentran, principalmente, al este de la Falla Vicuña, asociados a los afluentes ríos Claro, Cochiguás, Ingaguás y La Laguna, y estero Guanta, que cortan a las unidades Paleozoicas de la cuenca (Batolito Elqui-Limarí, Complejo metamórfico El Cepo, formaciones Pastos Blancos, Matahuaico y Hurtado) (Figura 4. 47). En estos puntos se observan altos valores de LOI (Loss on Ignition), lo que, relacionado con la signatura geoquímica del nodo 4, alta en Ctotal, podría interpretarse como alta presencia de materia orgánica en las muestras. Lo que concuerda con la gran cantidad de zonas de cultivo que se encuentran en la parte baja de estos drenajes. En sus partes altas, a pesar de no haber cultivos, también se observó materia orgánica.

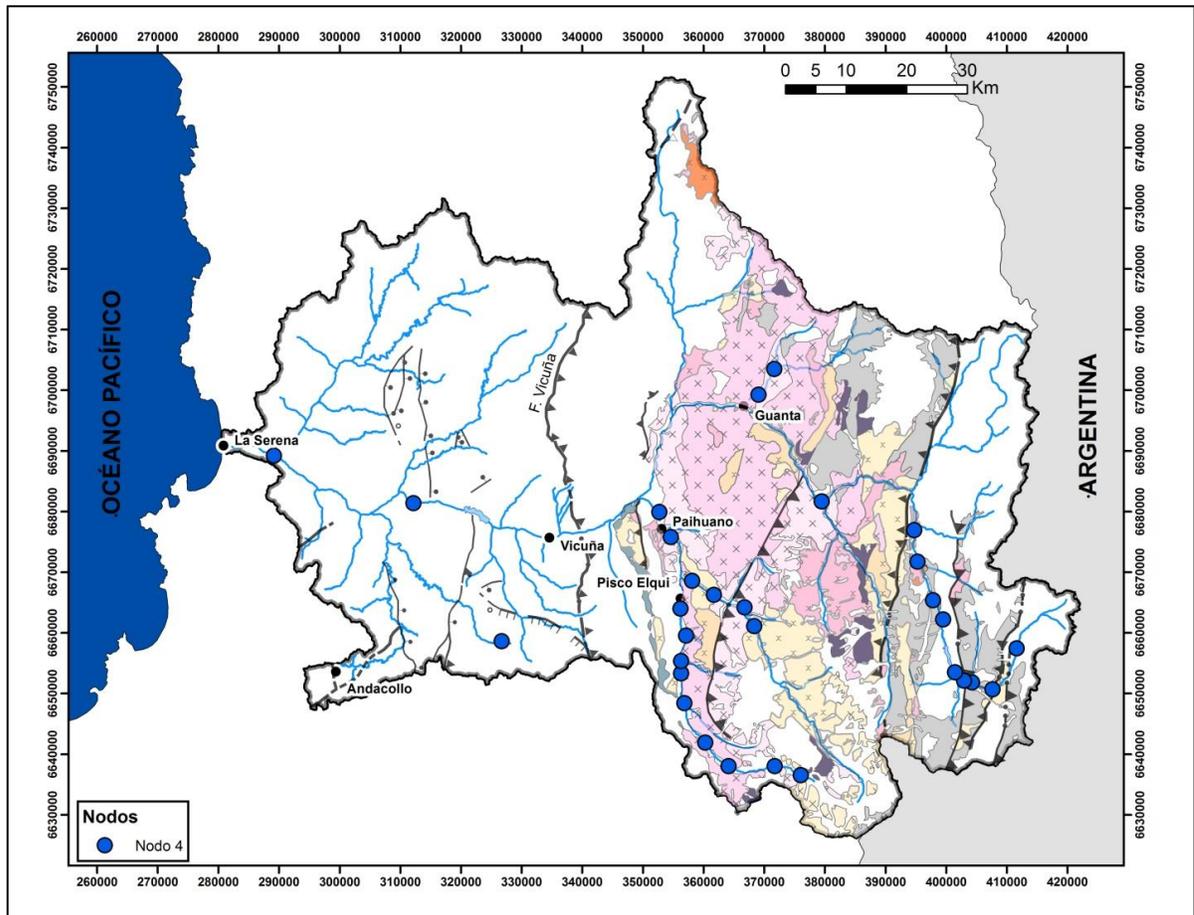


Figura 4. 47. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 4.

También en el nodo 4, se tiene altas concentraciones de SiO_2 , Na_2O , K_2O , Rb, REE que estarían asociados a la litología ígnea, principalmente félsica, del Batolito Elqui-Limarí.

Las altas concentraciones de Sn y Be en este nodo, podrían estar relacionadas a la mineralización de Sn sugerida anteriormente.

La presencia de Cd en esta signatura podría provenir de las zonas de alteración neógenas.

Los demás puntos del nodo 4 se encuentran en la parte baja del río Elqui, y podrían estar representando la signatura geoquímica global de la cuenca, cuya litología se compone, en gran parte, de rocas ígneas félsicas.

Nodo 5

Los puntos pertenecientes al nodo 5 se encuentran bien definidos en las quebradas Arrayán y Marquesa (Figura 4. 48). Este nodo presenta altas concentraciones de Ag, Au, Ba, Hg, MnO, Pb, Stotal y Cu, entre otros, que se pueden relacionar con la mineralización de estos elementos existente en los distritos mineros de ambas quebradas.

Las altas concentraciones de Hg provendrían de la mineralización de Hg en los distritos Andacollo y Arqueros, paralelamente a la utilización de mercurio metálico en la amalgamación de oro.

En la quebrada Marquesa están los distritos mineros de Las Cañas, Talcuna, Arqueros, El Sauce, La Corina y Condoriaco, donde se explota principalmente Cu, Fe, Mn, Pb-Zn, Ag, Au y baritina. Una vez más, el hierro no aparece como característico de este nodo, ya que sus mayores concentraciones pertenecen al nodo 1.

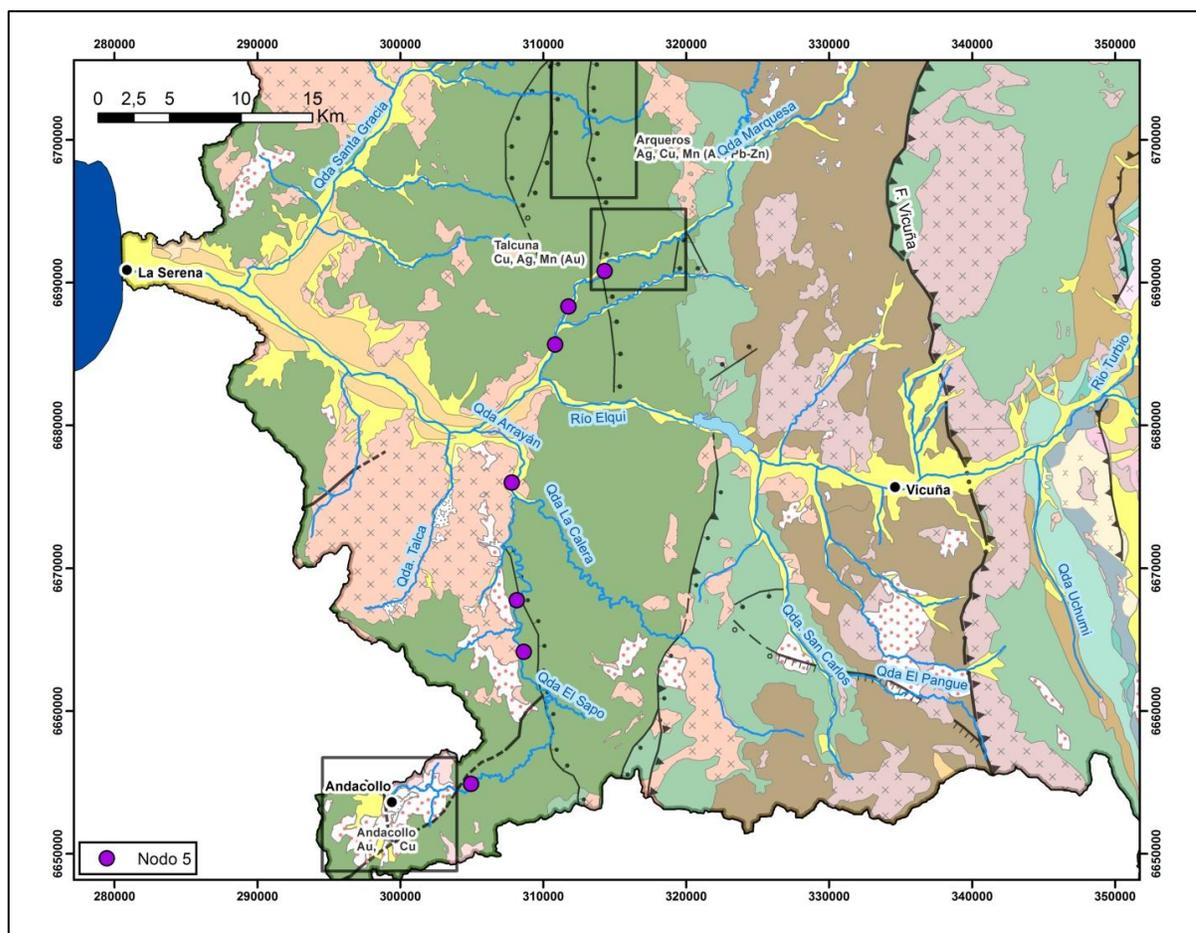


Figura 4. 48. Mapa de muestras pertenecientes al nodo 5.

4.6 Comparación de sedimentos fluviales actuales y de terrazas fluviales.

En este análisis se observa, en general (Figura 4. 49,

Figura 4. 50, Figura 4. 53,

Figura 4. 54,

Figura 4. 55, Figura 4. 56, Figura 4. 51 y Figura 4. 52), un aumento en las concentraciones actuales respecto a las de terrazas fluviales en los siguientes elementos: Zn, Cu, As y Stotal. Mientras se observa, en general, una disminución de: Hg, Au, Ag y Pb.

Para el caso de Zn, Cu, As y Stotal, el aumento de concentración observado corresponde a las muestras ubicadas en los ríos Toro, Seco y Turbio. Mientras que en el río La Laguna las concentraciones permanecen relativamente estables.

Esto podría estar indicando que la intensa actividad minera existente en los distritos El Indio-Tambo y Carmen de Río Seco ha aumentado la introducción de estos elementos en los sedimentos fluviales actuales. Sin embargo, esto también podría deberse a la erosión que afecta los depósitos lacustres del Holoceno colgados a lo largo del río Turbio, ricos en arsénico, yeso (que aportaría S) y arcillas (que reforzarían la coprecipitación de Cu y Zn).

Ya que los sedimentos de terraza fluvial muestreados no tienen dataciones absolutas ni relativas, no es posible determinar si el aumento en las concentraciones de Zn, Cu, As y S total en los sedimentos actuales es producto de la actividad minera o tiene causas naturales.

Para los demás elementos analizados, Hg, Au, Ag y Pb, se observa, en general, una disminución de sus concentraciones en los sedimentos actuales para los ríos Seco, Toro y Turbio. Así como las concentraciones permanecen relativamente estables en el río La Laguna, salvo para el Hg.

Estos elementos se verían diluidos por el aumento de las concentraciones de As, S, Cu y Zn. Además, al tener movilidad relativamente baja, son escasamente coprecipitados con arcillas.

S Total [wt%]

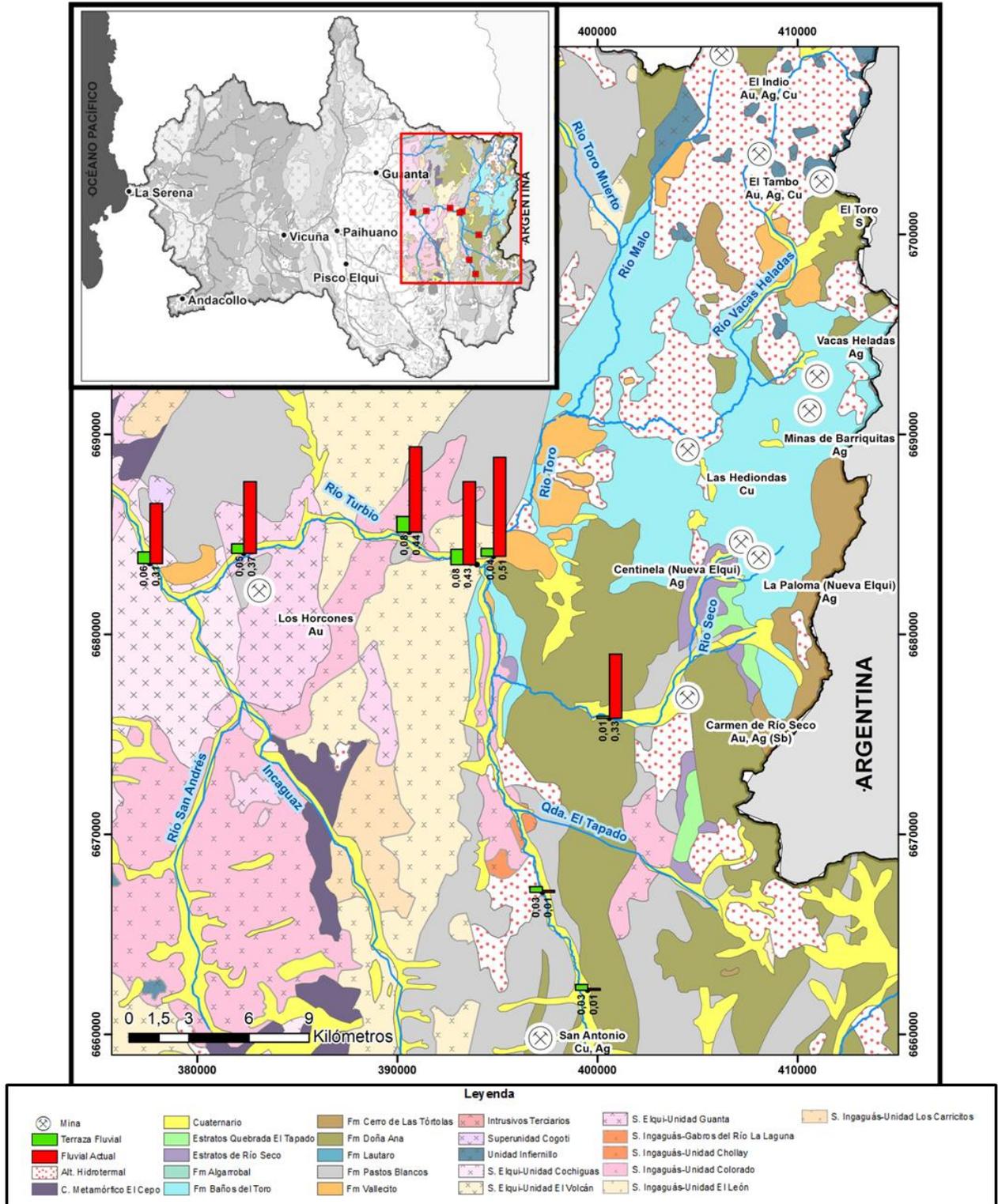


Figura 4. 49. Mapa de comparación de concentraciones de Stotal en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.

As [ppm]

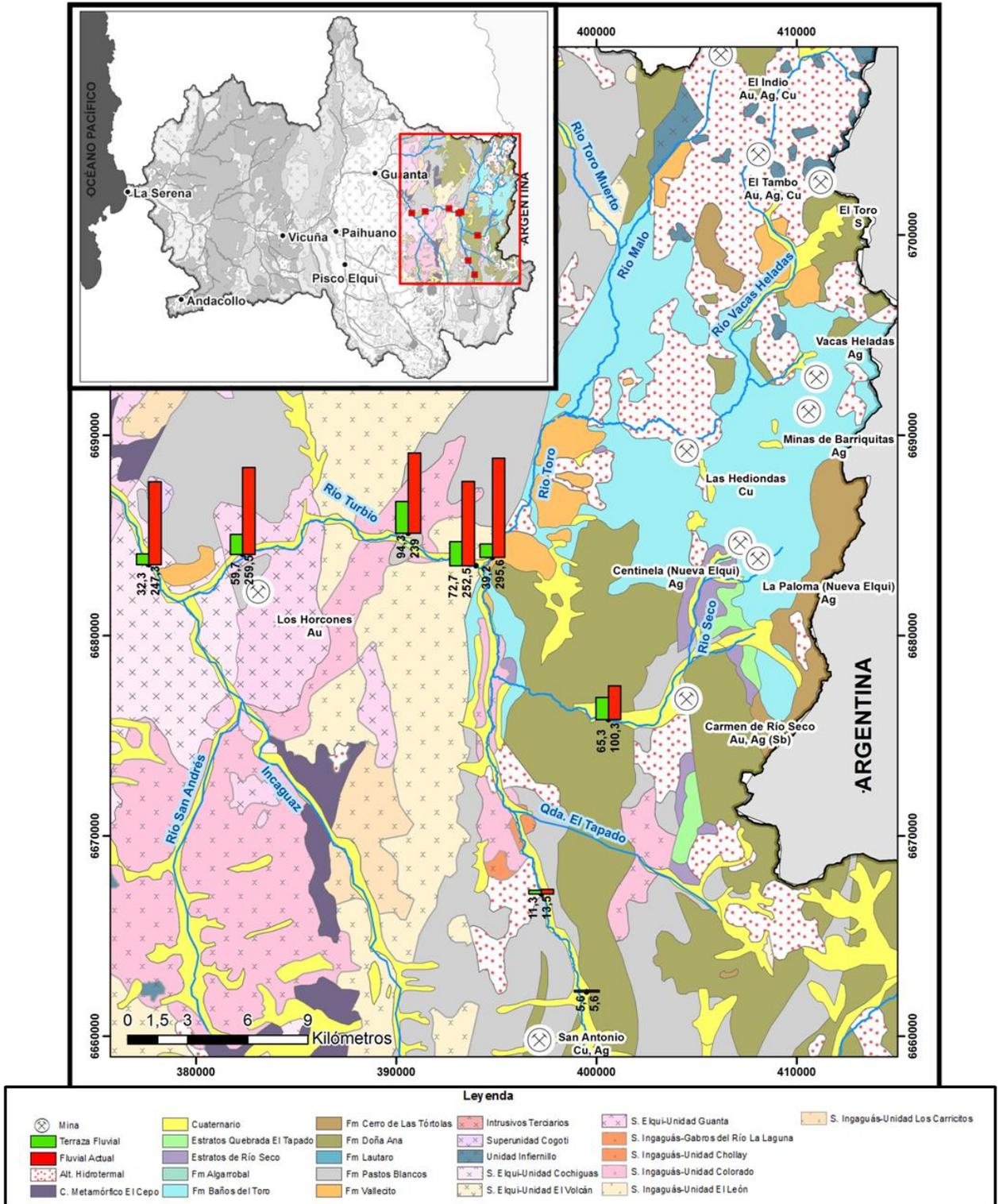


Figura 4. 50. Mapa de comparación de concentraciones de As en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.

Cu [ppm]

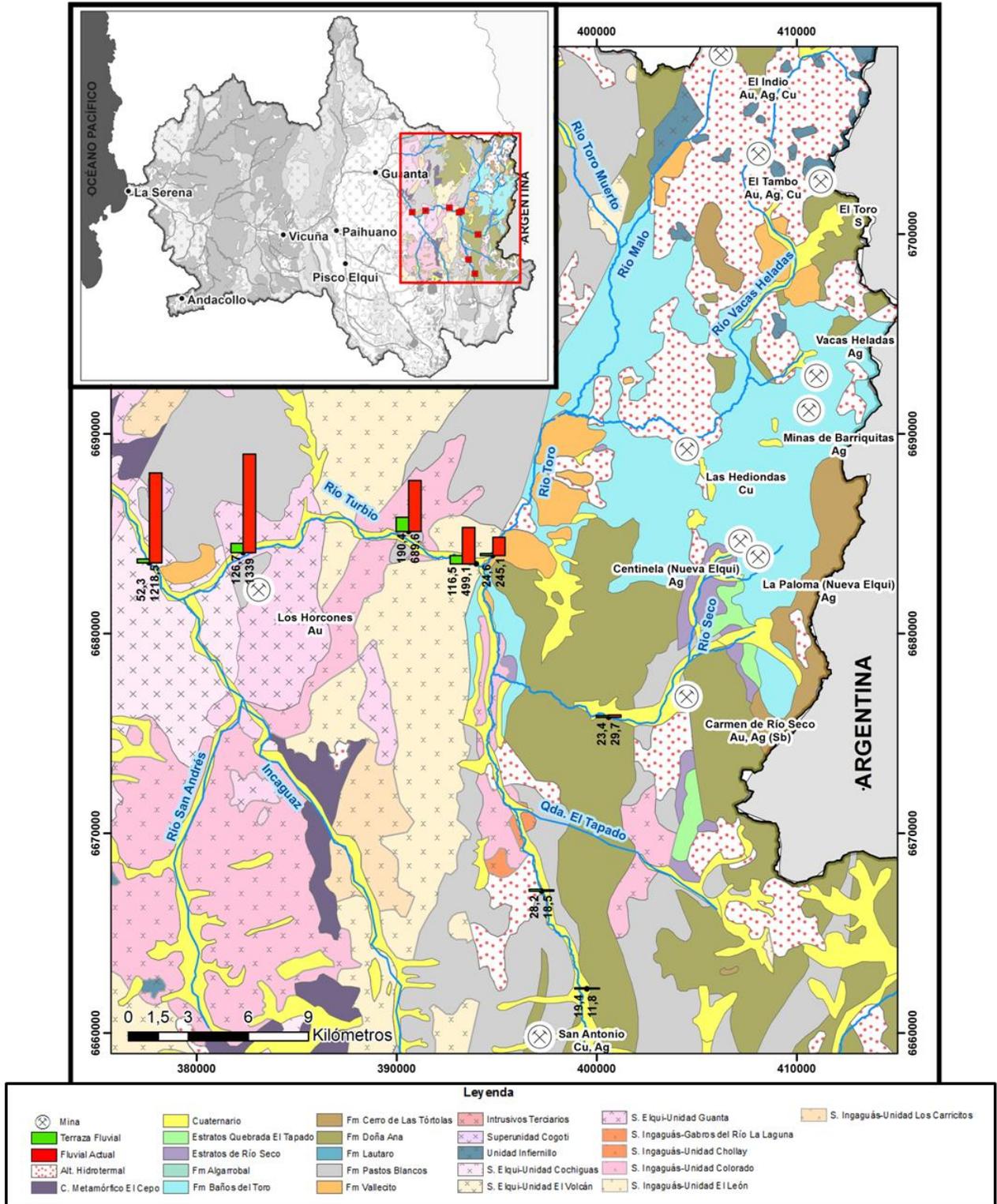


Figura 4. 51. Mapa de comparación de concentraciones de Cu en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.

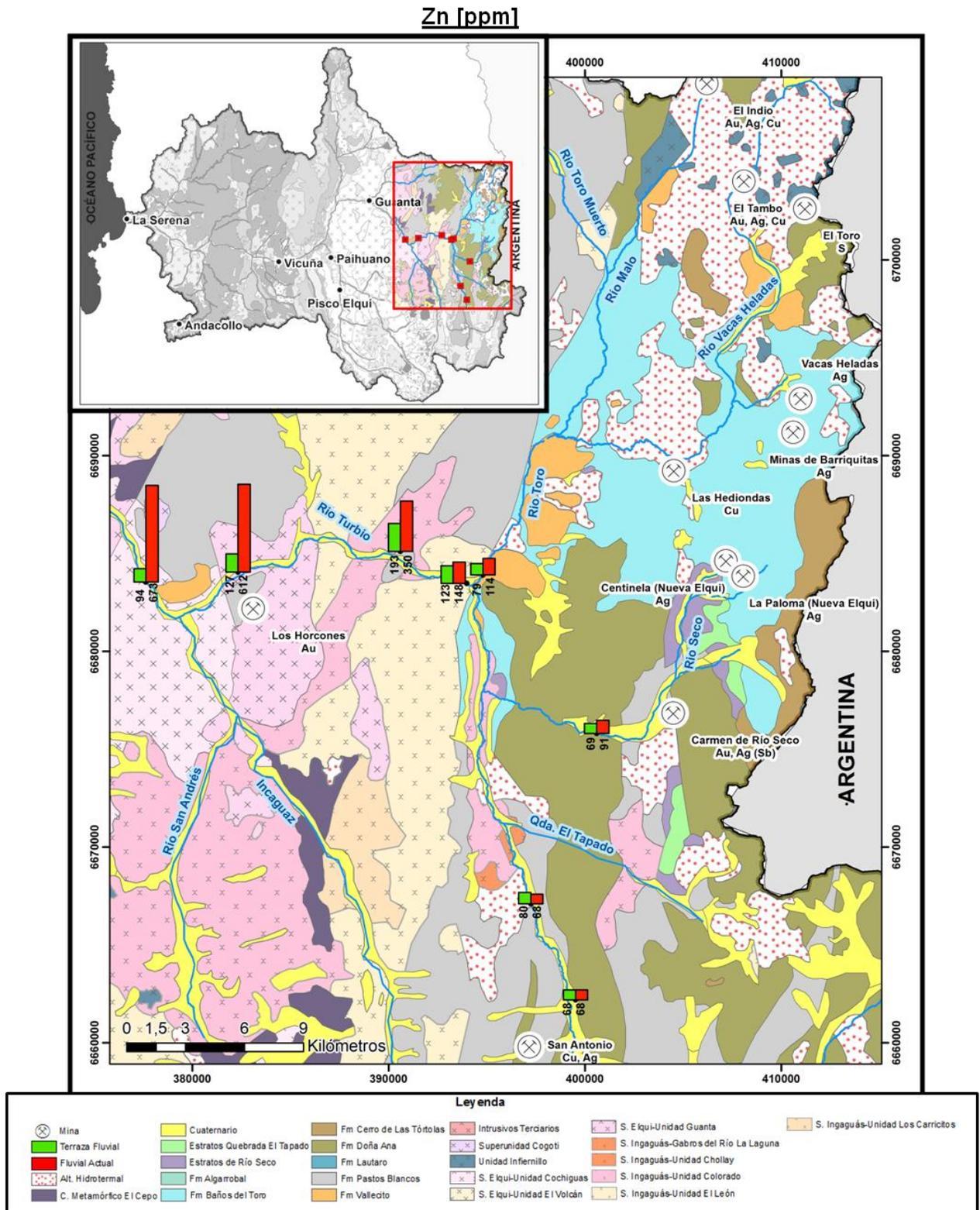


Figura 4. 52. Mapa de comparación de concentraciones de Zn en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.

Hg [ppm]

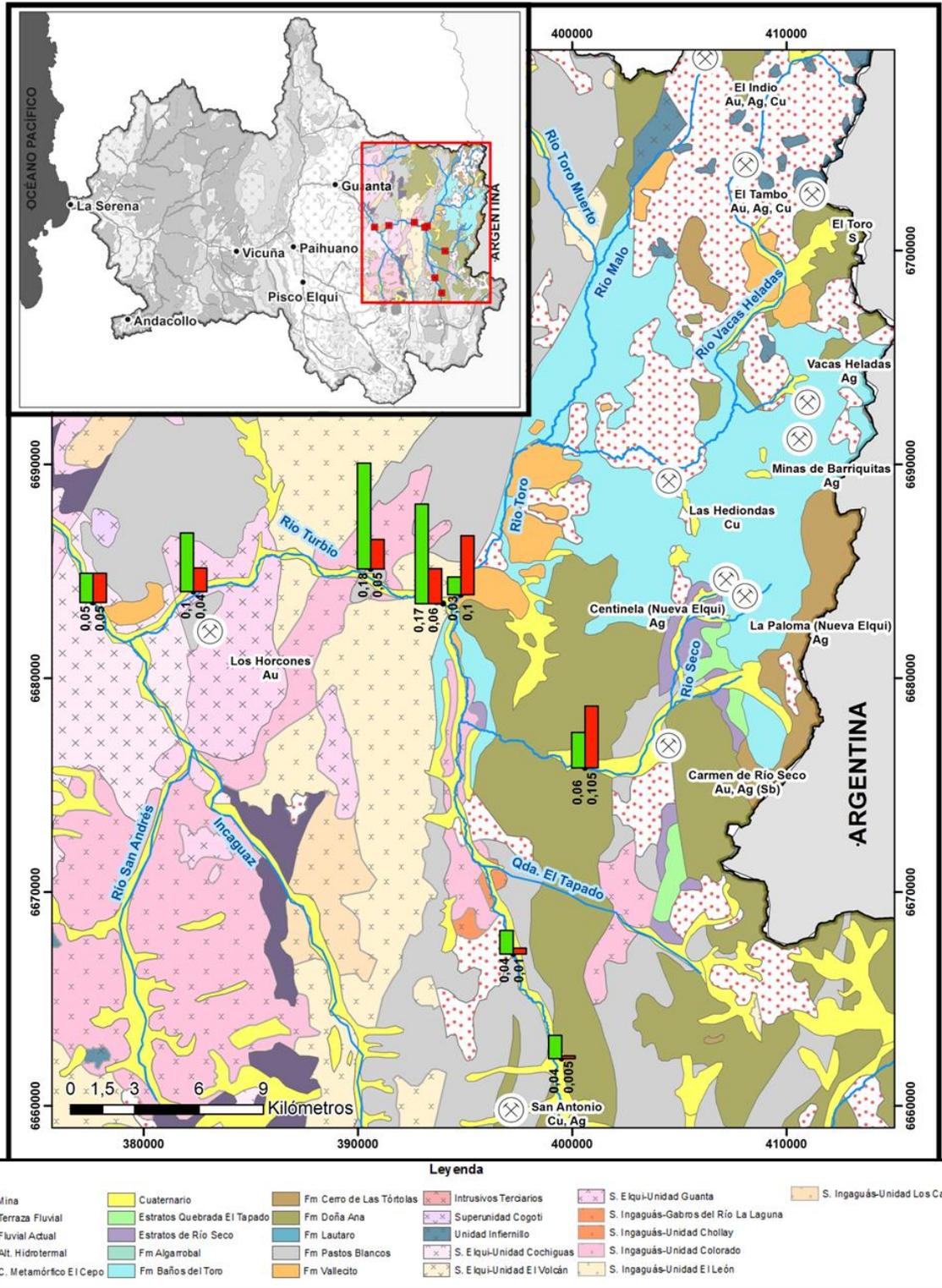


Figura 4. 53. Mapa de comparación de concentraciones de Hg en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.

Au [ppb]

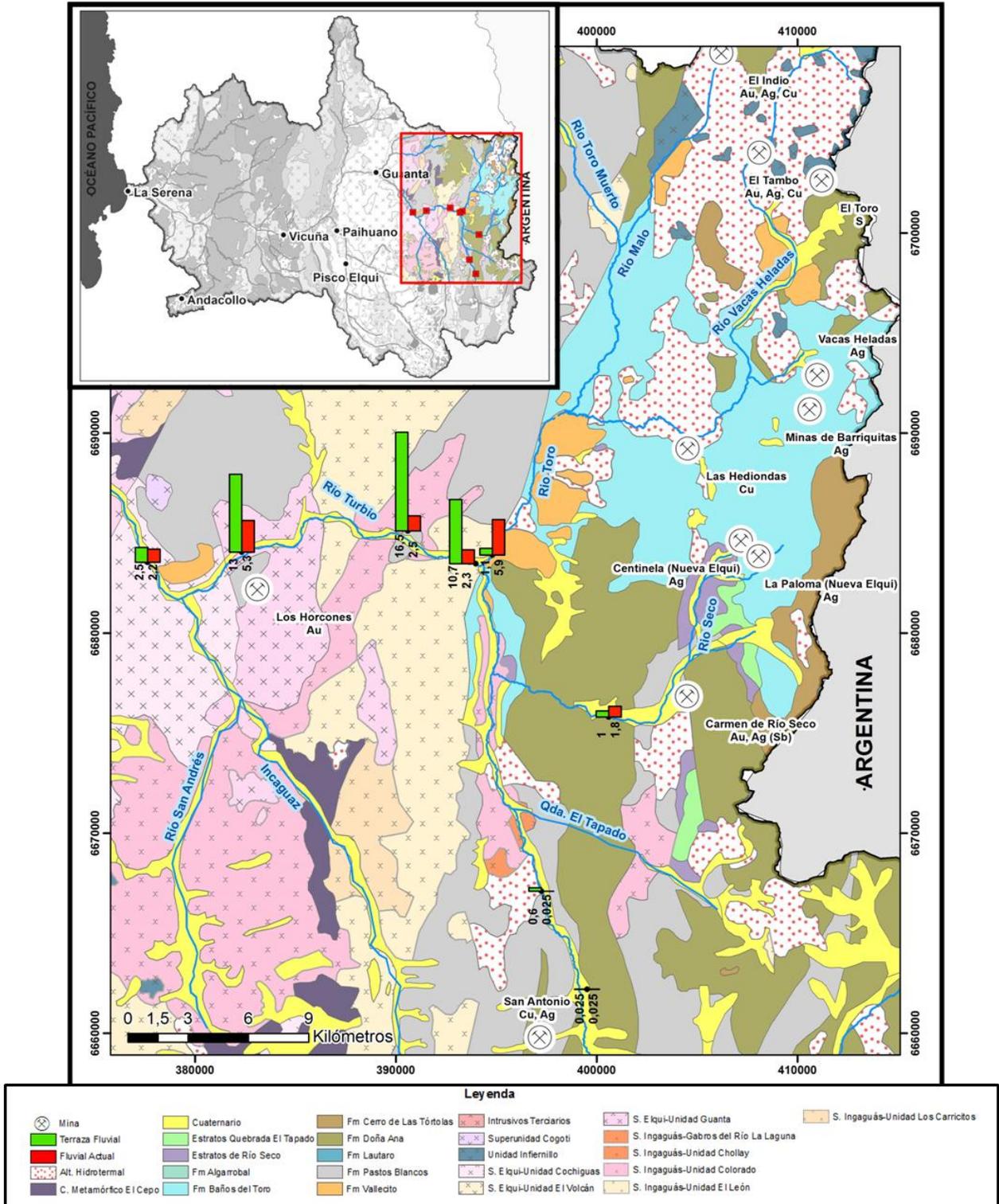


Figura 4. 54. Mapa de comparación de concentraciones de Au en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.

Pb [ppm]

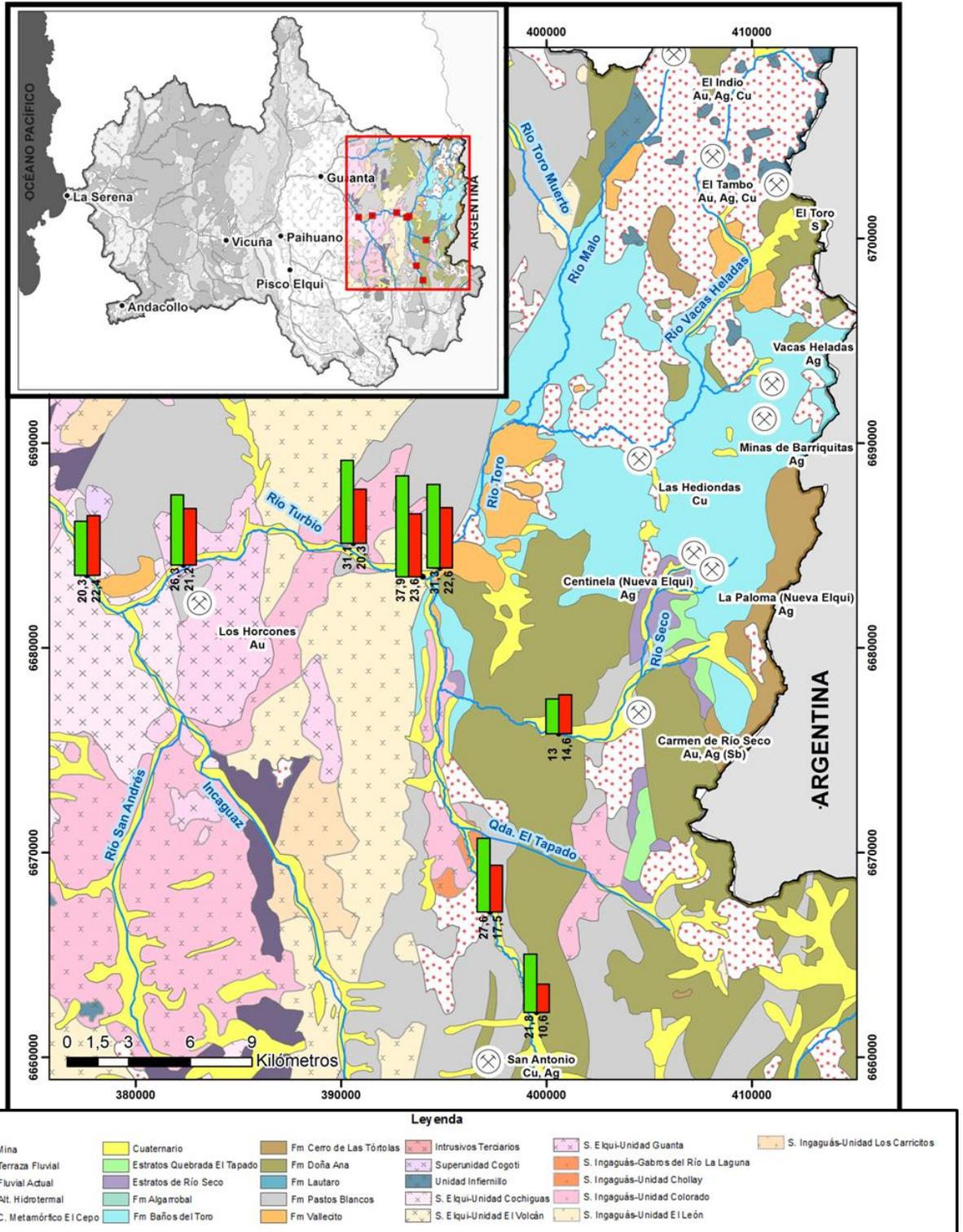


Figura 4. 55. Mapa de comparación de concentraciones de Pb en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.

Ag [ppm]

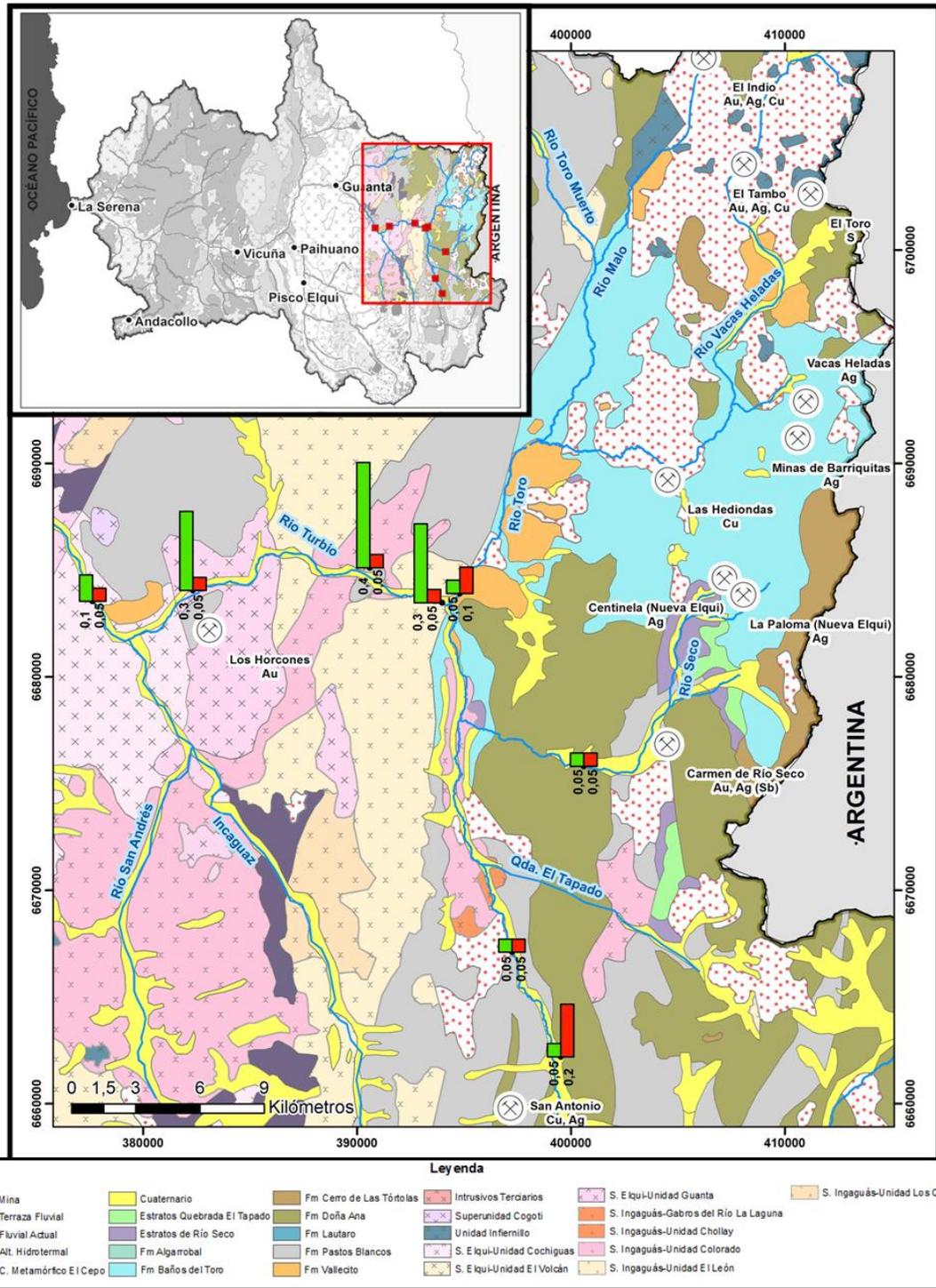


Figura 4. 56. Mapa de comparación de concentraciones de Ag en sedimento fluvial actual y de terrazas fluviales.

5. CONCLUSIONES

5.1 Zonas geoquímicas

A pesar de que la toma de muestras se realizó en diferentes estaciones o años, se logró sectorizar geoquímicamente la cuenca del Elqui de manera regional.

Se definen cinco zonas con firmas geoquímicas claramente distinguibles, definidas principalmente por los nodos obtenidos de la RNA, complementados con los resultados de los demás métodos

Estas zonas geoquímicas se pueden asociar geográficamente a los antecedentes naturales y antrópicos de la zona de estudio, determinándose así los principales factores de control de la distribución geográfica de concentraciones químicas en los sedimentos fluviales a escala regional en esta cuenca.

A continuación se describen las cinco zonas geoquímicas definidas en este trabajo, así como los factores de control preponderantes para cada una de ellas.

5.1.1 Rocas intrusivas y volcano-sedimentarias del Paleozoico

Corresponde íntegramente al nodo 4 de las redes neuronales artificiales (Figura 5. 1. Mapa de muestras asociadas a Zona 1: Ríos La Laguna, Ingaguás, Cochiguás, Claro y estero Guanta. Figura 5. 1).

Estas muestras presentan altas concentraciones de Ctotal, Cd, K₂O, SiO₂, Be, HREE, LREE, Rb, Sn (Na₂O, U, Zn).

Los principales factores de control de la geoquímica de sedimentos fluviales en esta zona son:

- La litología principalmente ítrusiva, correspondiente al Batolito Elqui-Limarí. Excepto para el caso del río La Laguna.
- Actividad agrícola en la parte baja de los ríos Claro, Cochiguás y el estero Guanta, podría aportar a la geoquímica de esta zona con materia orgánica y pesticidas ricos en Sn. Se sugiere que las altas concentraciones de Ctotal corresponderían al gran desarrollo de la actividad agrícola,
- Materia orgánica, acumulada en pozones en las partes altas de los ríos Cochiguás, Claro y La Laguna.
- Mineralización de Sn asociada al Batolito Elqui-Limarí o las unidades Paleozoicas.

Si bien la actividad agrícola podría ejercer algún control sobre la geoquímica de la parte baja de estos ríos, la firma geoquímica observada se mantiene desde las nacientes hasta los desagües.

Además, en el Batolito Elqui-Limarí no se registra actividad minera de importancia.

Por lo tanto, la geoquímica de la zona 1 estaría principalmente controlada por factores naturales, asociados a la litología de las unidades paleozoicas de la cuenca (Batolito

Elqui-Limarí, Complejo metamórfico El Cepo, formaciones Pastos Blancos, Matahuaico y Hurtado).

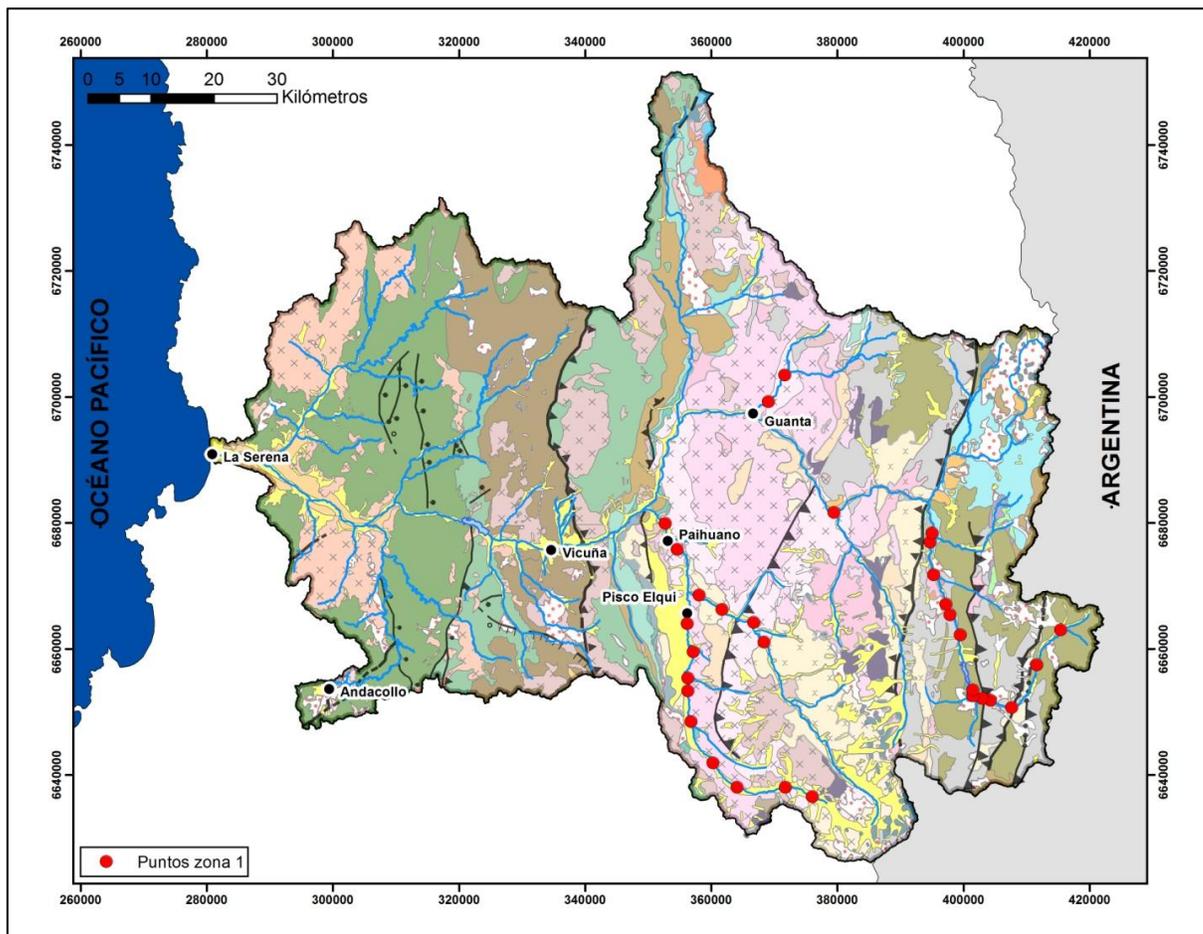


Figura 5. 1. Mapa de muestras asociadas a Zona 1: Ríos La Laguna, Ingaguás, Cochiguás, Claro y estero Guanta.

5.1.2 Ríos Seco, Toro, Turbio y Elqui al este del embalse Puclaro.

Corresponde al nodo 2 de las redes neuronales artificiales (Figura 5. 2).

Estas muestras presentan altas concentraciones de As, Cu, Stotal, Tl, Bi, Cs, Ni, Se, Sr, Zn (Al_2O_3 , Cd, Ga, Rb, SiO_2).

Los principales factores de control de la geoquímica de sedimentos fluviales en esta zona son:

- Alteración hidrotermal y/o actividad minera. La señal química de esta zona proviene claramente de los ríos Toro y Seco, que erosionan grandes zonas de alteración

neógenas. Es en estas zonas de alteración hidrotermal, además, donde se encuentra uno de los distritos mineros más importantes de la cuenca del Elqui: El Indio-Tambo, como también el distrito Carmen de Río Seco (ver figura zoom nodo 2).

- Depósitos lacustres del Holoceno colgados a lo largo del valle del río Turbio, cuyo alto contenido en arcillas, arsénico y yeso es integrado a los sedimentos fluviales.
- El cambio geomorfológico e hidrodinámico asociado a la Falla Vicuña produce un aumento, en algunos casos abrupto, en la concentración de Au, Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 , Mo, Cu, Pb, Ni, As, Cd, Ag, Hg y Tl, entre otros elementos. Esto se puede relacionar a la disminución en la energía de transporte debido al ensanchamiento del valle, por lo que se considera este factor como un control geomorfológico de acumulación gravitacional.
- El embalse Puclaro funciona como trampa de elementos asociados a minerales densos o de baja solubilidad.

Es interesante, por ejemplo, el caso del arsénico, que es adsorbido o coprecipitado por óxidos de Fe (en condiciones oxidantes), y que se ve “entrampado” en el embalse Puclaro junto con estos compuestos. Al analizar los sedimentos río abajo del embalse, se observa que, si bien existen altas concentraciones de Fe_2O_3 , el arsénico se mantiene bajo la media, lo que permite deducir que gran cantidad del As que se mueve como carga en suspensión es atrapado en los sedimentos del embalse.

En base a los datos disponibles, no se puede determinar de manera certera qué factor de control es más determinante para esta zona: la mineralización en áreas de alteración hidrotermal neógenas o la actividad minera desarrollada en ellas. Pero si se puede afirmar que ambos ejercen un control sobre esta zona.

Finalmente, se puede decir que la zona 2 estaría principalmente controlada por factores naturales, asociados a la mineralización presente en las zonas de alteración neógenas y a la erosión de depósitos lacustres ricos en As y S; y por factores antrópicos, dados por la intensa actividad minera desarrollada, principalmente, en el distrito El Indio.

El efecto de “entrampamiento” que ocurre en el embalse Puclaro no sería un factor de control de la signatura geoquímica de esta zona, sino más bien actuaría como contenedor de esta signatura, impidiendo su paso río abajo hacia la desembocadura del río Elqui en la ciudad de La Serena.

El control geomorfológico e hidrodinámico asociado a la Falla Vicuña, que se manifiesta en la composición química local de un par de muestras pertenecientes a esta zona, es más bien un factor de control que separa las zonas geoquímicas 1 y 2, como se verá en el siguiente subcapítulo.

explotan estos metales, es más bien transversal a todas las muestras pertenecientes a la zona 3. Se podría decir entonces que la actividad minera no es un factor de gran influencia en esta zona.

- Litología predominantemente volcano-sedimentaria manifiesta en la signatura geoquímica rica en Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 y MgO , compuestos que se pueden asociar a aluminosilicatos, minerales ferromagnesianos y calcita, muy presentes en las rocas de este sector.
- Geomorfología e hidrodinámica de la parte oeste de la Falla Vicuña, caracterizada por escasa o nula escorrentía superficial y pendientes suaves, permite la deposición de minerales cerca de sus fuente de origen. Además, favorece las condiciones para la depositación gravitacional de minerales densos en algunos puntos de este sector

La zona 3, entonces, estaría principalmente controlada por la litología principalmente volcano-sedimentaria, la mineralización de Fe-Mn y la geomorfología e hidrodinámica.

La Falla Vicuña, que separa la cuenca del Elqui en dos zonas geomorfológicamente diferentes, sería el límite entre las zonas 1 y 3.

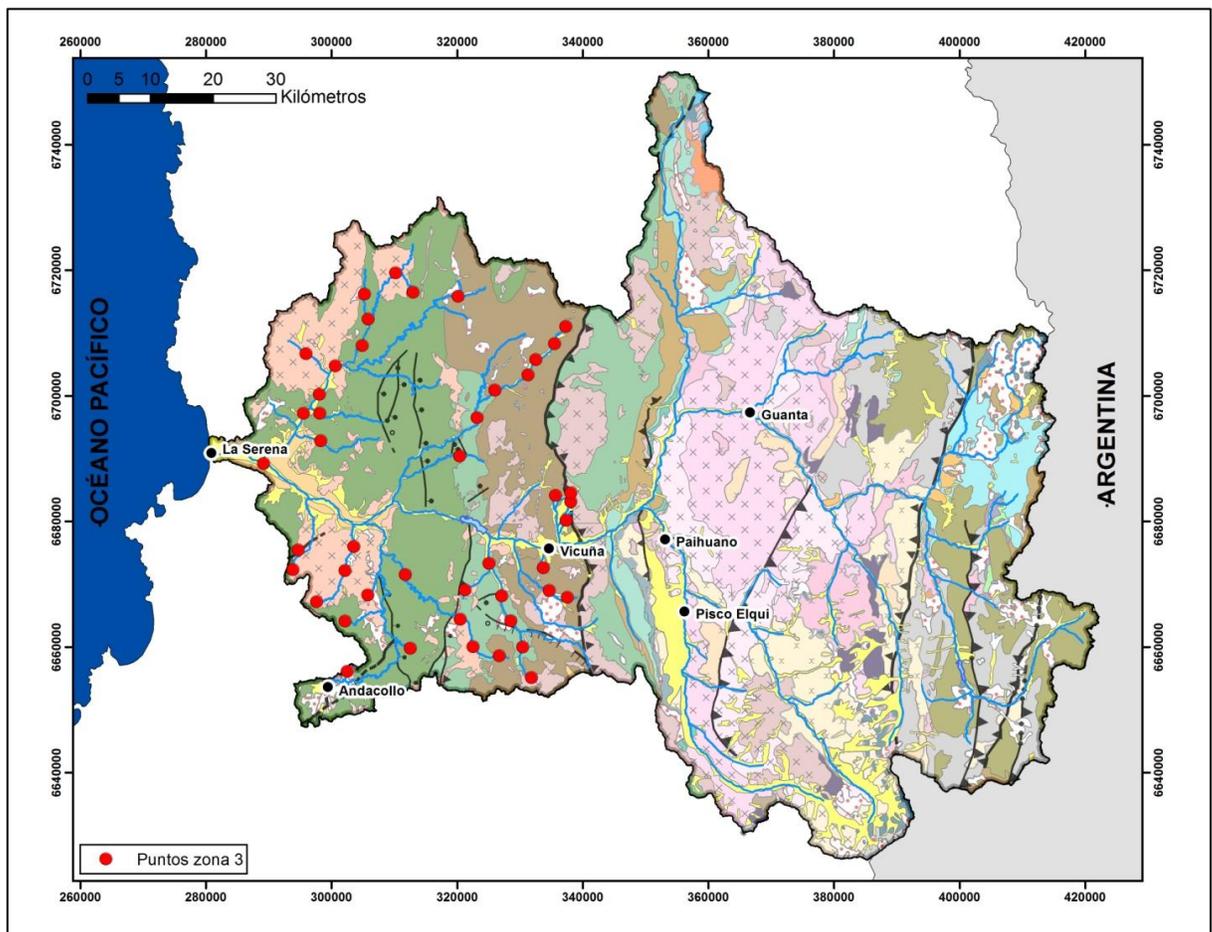


Figura 5. 3. Mapa de muestras asociadas a Zona 3: Rocas volcano-sedimentarias del Cretácico.

5.1.4 Quebrada Arrayán.

Corresponde a la parte sur del nodo 5, a las muestras ubicadas río abajo de la ciudad de Andacollo en la quebrada Arrayán (Figura 5. 4).

Estas muestras presentan altas concentraciones de Au, Hg, Stotal.

Los principales factores de control de la geoquímica de sedimentos fluviales en esta zona son:

- Mineralización aurífera y de mercurio en el distrito Andacollo y en placeres auríferos ubicados río abajo de este distrito a lo largo de la quebrada Arrayán.
- Actividad minera: El distrito Andacollo es el más antiguo de la cuenca del Elqui, ha sido explotado desde hace más de seis siglos y hasta la actualidad, utilizándose mercurio metálico en la amalgamación de Au, lo que podría estar provocando un reforzamiento de la señal de Hg a lo largo de la quebrada Arrayán.

La zona 4 estaría controlada principalmente por factores naturales, la mineralización presente en el distrito Andacollo y los depósitos de placeres en la quebrada Arrayán, y antrópicos, en la utilización de Hg para la extracción de Au.

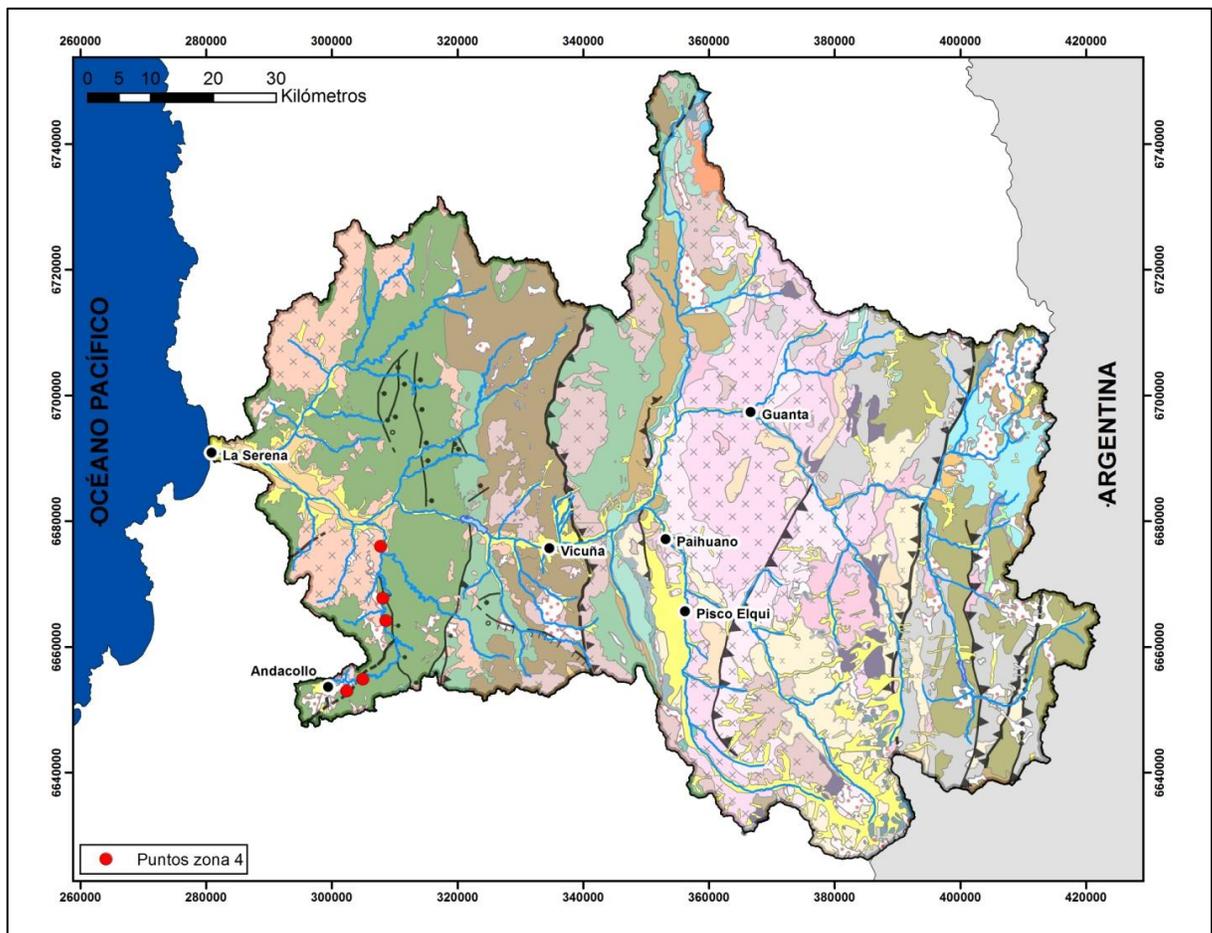


Figura 5. 4. Mapa de muestras asociadas a Zona 4: Quebrada Arrayán.

5.1.5 Quebrada Marquesa.

Corresponde a la parte norte del nodo 5, a las muestras ubicadas en la parte baja de la quebrada Marquesa (Figura 5. 5).

Estas muestras presentan las mayores concentraciones de Ag, Pb y Ba, y concentraciones medias de Hg.

Los principales factores de control de la geoquímica de sedimentos fluviales en esta zona son:

- Mineralización de los distritos Arqueros (Ag, Cu, Mn, Au, Pb, Zn) y Talcuna (Cu, Ag, Mn, Au), los que siguen en importancia a El Indio y Andacollo, dada su extensión y antigüedad. En estos distritos se encuentran vetas de baritina, además de una amalgama de plata y mercurio llamada Arquerita. Si bien no se puede estimar ciertamente si la actividad minera ha realzado su efecto, la mineralización argentífera y cuprífera encontrada en ellos se ve reflejada claramente en la geoquímica de los sedimentos de la parte baja de la quebrada Marquesa.

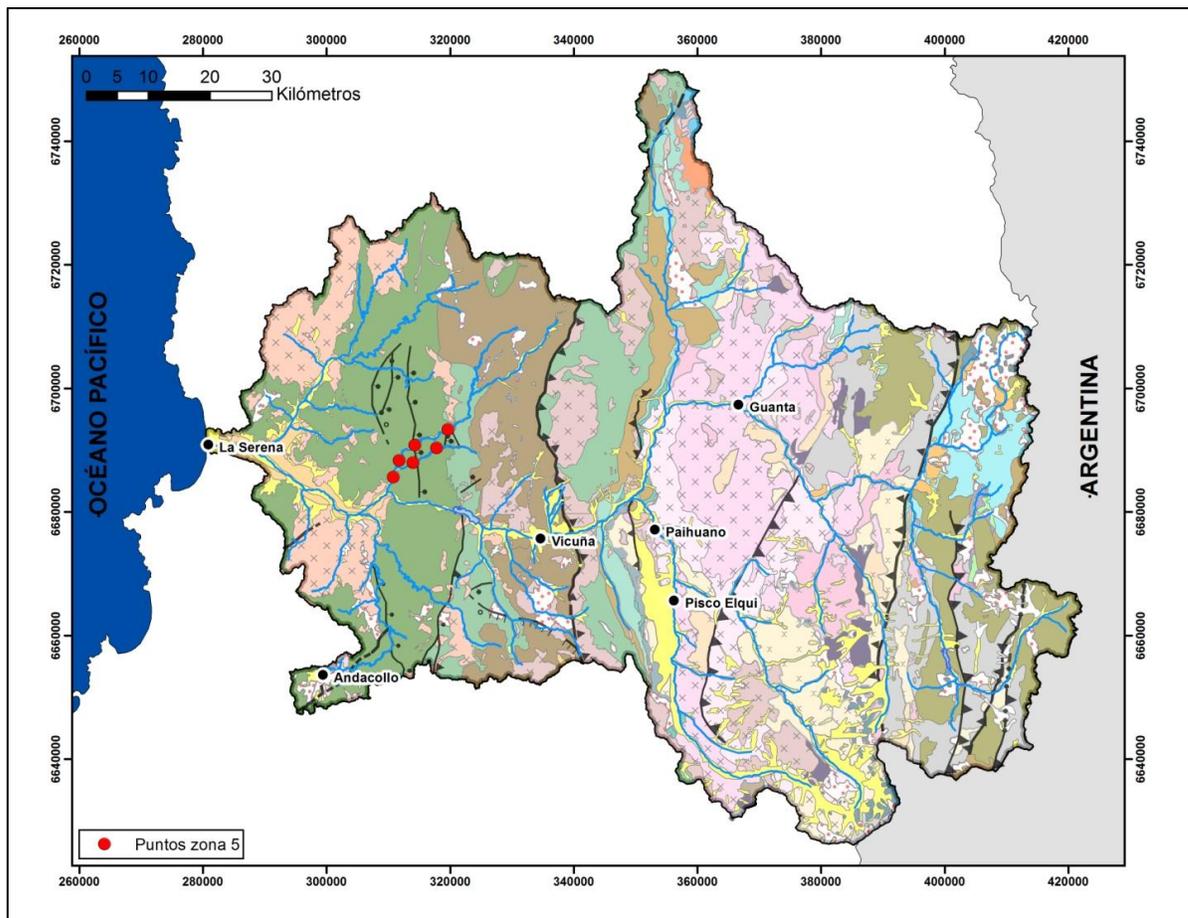


Figura 5. 5. Mapa de muestras asociadas a Zona 5: Quebrada Marquesa.

La zona 5 estaría controlada principalmente por factores naturales, la mineralización de los distritos Arqueros y Talcuna, y antrópicos, la explotación histórica y de gran envergadura llevada a cabo en ellos.

5.2 Comparación con estándar PEC.

Los sedimentos provenientes del río Toro, con concentraciones de As y Cu sobre el PEC, son calificados como tóxicos para los organismos que conviven con el sedimento. Sin embargo, para evaluar su toxicidad sobre el ecosistema de la cuenca del río Elqui, hace falta realizar un estudio detallado de la biota existente en estos sedimentos y en las aguas que escurren sobre ellos, así como la biodisponibilidad de estos metales y su capacidad de percolar y contaminar las aguas subterráneas.

Se sugiere, entonces, la realización de estudios biológicos, mineralógicos, hidrogeológicos y de especiación de compuestos químicos, particulares para la cuenca del Elqui.

5.3 Comparación de sedimentos fluviales actuales y de terrazas fluviales.

El aumento en los sedimentos actuales de las concentraciones de As, Stotal, Cu y Zn, podría estar relacionado a dos factores:

1. Introducción de sedimentos ricos en arsénico, yeso y arcillas provenientes de la erosión de los depósitos lacustres colgados del Holoceno, a lo largo del río Turbio.
2. Aumento de la erosión, aporte de detritos y formación de arcillas en las zonas de alteración neógenas producto de la intensa actividad minera llevada a cabo en los distritos mineros El Indio-Tambo y Carmen de Río Seco.

Para determinar si uno o ambos factores influyen en este cambio de concentraciones, se hace necesario realizar dataciones absolutas o relativas de las terrazas fluviales muestreadas.

5.4 Conclusiones generales

A pesar de que la toma de muestras se realiza en diferentes estaciones o años, se logra sectorizar geoquímicamente la cuenca del Elqui de manera regional.

Los principales factores de control de la distribución geográfica de las concentraciones químicas en los sedimentos fluviales de la cuenca del Elqui corresponden a:

1. Litología paleozoica, compuesta principalmente por el Batolito Elqui-Limarí, define la signatura geoquímica de las muestras tomadas en el bloque oriental de la cuenca del Elqui, al este de la Falla Vicuña, en los ríos Claro, Cochiguás, Ingaguás, La Laguna y estero Guanta.
2. Litología cretácica, compuesta principalmente por rocas volcano-sedimentarias, con intrusiones asociadas a la franja ferrífera chilena y mantos de manganeso. Define la signatura geoquímica observada en las muestras del bloque occidental de la cuenca del Elqui, al oeste de la Falla Vicuña, en las quebradas afluentes del río Elqui en general.
3. Zonas de alteración hidrotermal y/o actividad minera, relacionadas a los distritos mineros más importantes de la cuenca del Elqui, entre ellos El Indio-Tambo, Carmen de Río Seco, Andacollo, Talcuna y Arqueros. Definen la signatura geoquímica de los drenajes inmediatamente río abajo de ellos, modificando las concentraciones químicas inherentes a la litología general de la cuenca. No se puede determinar con certeza, en este estudio, si es más importante el factor natural o el antrópico.
4. Geomorfología e hidrodinámica, las pendientes suaves y la escasa escorrentía superficial observadas al oeste la Falla Vicuña, favorecen la formación de depósitos gravitacionales de minerales densos en algunos puntos del bloque occidental de la cuenca del Elqui.
5. Falla Vicuña, estructura de carácter regional que divide la cuenca en dos bloques con características litológicas, geomorfológicas e hidrodinámicas distintas, actúa también como límite para las características geoquímicas globales de la cuenca del Elqui.
6. Embalse Puclaro, actúa como trampa para la signatura geoquímica rica en elementos tóxicos como arsénico y azufre, que gobierna el río Elqui desde sus nacientes en el río Toro. Evita que los sedimentos de alta toxicidad alcancen la desembocadura del río Elqui y la ciudad de La Serena.

Referencias

Astudillo, F., 2011. Controles determinantes en la geoquímica y mineralogía de los sedimentos fluviales activos en la cuenca del Río Limarí, IV Región de Coquimbo, Chile. Tesis (Geología), Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2011. 156 h.

Boric, R., 1985. Geología y yacimientos metálicos del distrito Talcuna, IV Región de Coquimbo.. *Revista Geológica de Chile*, 25-26: 57-75.

Carrasco, F., 2013. METODOLOGÍA DE EXPLORACION MINERA MEDIANTE ESPECTROMETRÍA DE REFLECTANCIA EN SEDIMENTOS ACTIVOS FLUVIALES. CUENCA DEL RÍO LIMARÍ, IV REGIÓN, CHILE..

Cepeda, P. J., 2008. *Los sistemas naturales de la cuenca del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y cambio del clima. Ediciones Universidad de La Serena..* s.l.:s.n.

Edwards, R., 1991. Estudio de síntesis de catástros de usuarios de agua e infraestructuras de aprovechamiento. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas..

Edwards, R., 1991. *Estudio de síntesis de catastros de usuarios de agua e infraestructuras de aprovechamiento. Dirección general de aguas. Ministerio de obras públicas..* s.l.:s.n.

Emparán, C. & Pineda, G., 2006. *Hoja Andacollo - Puerto Aldea. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, N° 96..* s.l.:s.n.

Esri, 2013. *ArcGis Resources*. [Online]
Available at: <http://resources.arcgis.com>
[Accessed 2013].

Fritzke, B., 1993. Growing Cell Structures - A self-organizing network for unsupervised and supervised learning.. *International computer science institute..*

Gajardo, A. & López, M., 2004. Yacimientos de rocas y minerales industriales de la IV región de Coquimbo.. *Carta Geológica de Chile. Serie Recursos Minerales y Energéticos. Escala 1:500.000. No. 11..*

Galán, E. & Romero, A., 2008. *Contaminación de suelos por metales pesados..* s.l.:s.n.

Guevara, G. S., Oyarzún M., J. & Maturana C., H., 2006. Geoquímica de las aguas del río Elqui y de sus tributarios en el período 1975-1995: Factores naturales y efecto de las explotaciones mineras en sus contenidos de Fe, Cu y As.. *Agricultura Técnica*, 66(1): 57-69.

Hawkes, H. W. H., 1962. *Geochemistry in Mineral Exploration*. s.l.:s.n.

Helios, E. & Kyziol, J., 1990. Clays and clay minerals as the natural barriers for heavy metals in pollution mechanisms - illustrated by Polish rivers and soils.. *Themenband Umweltgeologie*. 83, 163-176.

- Higuera, P. et al., 2004. Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaque districts, northern Chile.. *Applied Geochemistry* 19, pp. 1855-1864.
- Jannas, R., Richard, B., Ahler, B. & Brosnahan, D., 1990. Gold and copper mineralization at the El Indio deposit, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 36, 233-266.
- Johnson, C., 2011. *Mapping the chemical environment of urban areas*. s.l.:s.n.
- Johnson, D., 1997. Meanings of Environmental Terms. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 26 No. 3, pp. 581-589.
- Jorquera, B. R. et al., 2011. Yacimientos metalíferos del área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. *Carta Geológica de Chile. Serie Recursos Minerales y Energéticos. N° 32.*
- Lacassie, e. a., 2004. Discovering geochemical patterns using self-organizing neural networks: a new perspective for sedimentary provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 165, 175-191.
- León, A., De la Fuente, A., Marchant, R. & Parra, E., 2005. ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO EN SECTOR SILVOAGROPECUARIO DEL ANTEPROYECTO DE NORMA DE CALIDAD DE AGUAS DEL RIO ELQUI. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Lillo, J., 2009. Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas..
- MacDonald, D., Ingersoll, C. & Berger, T., 2000. Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems.. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 39, 20-31, p. |.
- Magri Consultores Ltda, 2012. Muestreo y control de calidad para exploración y minería..
- Maksaev, V., 2001. Depósitos Epitermales. In: *GL54A Metalogénesis*. s.l.:s.n.
- Maksaev, V., 2001. Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina..
- Marquardt, J., 1980. Estudio de la alteración y mineralización del yacimiento cuprífero Andacollo, IV Región..
- Moscoso, R., Nasi, C. & Salinas, P., 1982. *Hoja Vallenar y parte norte de La Serena. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile, N° 55.* s.l.:s.n.
- Mpodozis, C. & Cornejo, P., 1988. *Hoja Pisco Elqui. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile, N° 68.* s.l.:s.n.
- Nasi, C., Moscoso D., R. & Maksaev, J., 1990. *Hoja Guanta. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile, N° 67.* s.l.:s.n.

Oyarzún, J., 2011. Geoquímica del drenaje en la tres cuencas áridas de la región agrícola-minera de Coquimbo (Chile): Balance de una década de estudios, 2000-2010. *Sécheresse*, pp. 22: 244-52.

Oyarzún, R. et al., 1998. Cu, Mn and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and ARqueros districts.. *Mineralium Deposita*, 33: 547-559.

Pineda, G. & Emparán, C., 2006. *Hoja Vicuña - Pichasca. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, N° 97.. s.l.:s.n.*

Ralph, J., 2013. *The mineral and locality database*. [Online]
Available at: <http://www.mindat.org/>

Reyes, M., 1991. The Andacollo Strata-Bound Gold Deposit, Chile, and Its Position in a Porphyry Copper-Gold System. *Economic Geology*, 86, pp. 1301-1316.

Sernageomin, U. d. r. m., 2012. Base de Datos de Yacimientos Minerales de Chile. Información inédita entregada por los autores..

Smith, M. J., 2013. *Geospatial Analysis - 4th Edition*. s.l.:s.n.

Stanley, C. R., 2005. Numerical transformation of geochemical data: 1. Maximizing geochemical contrast to facilitate information extraction and improve data presentation.. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, Vol. 5*, pp. 1-11.

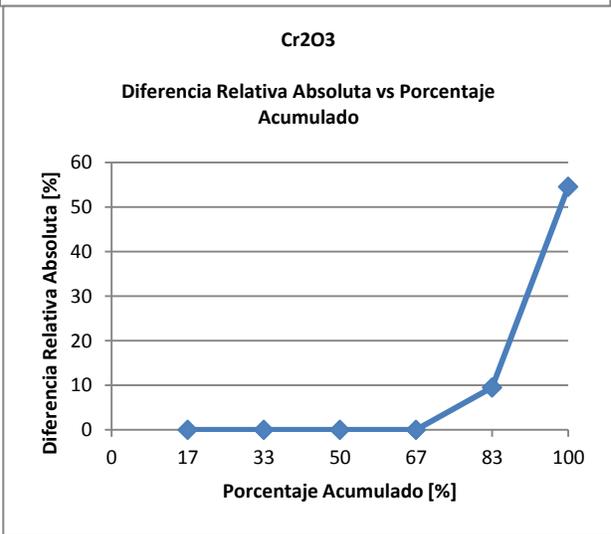
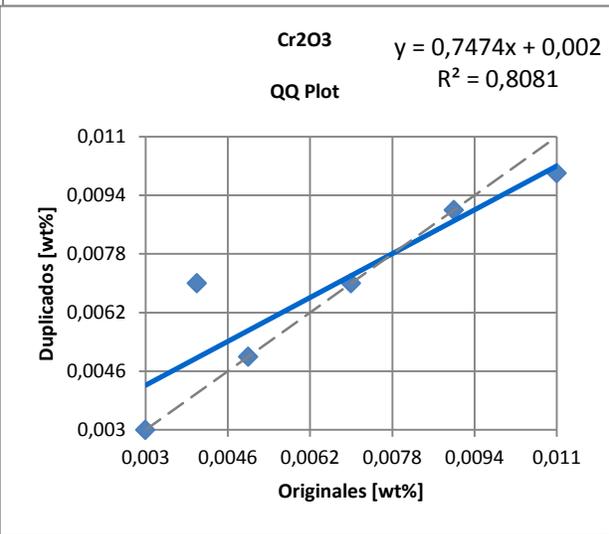
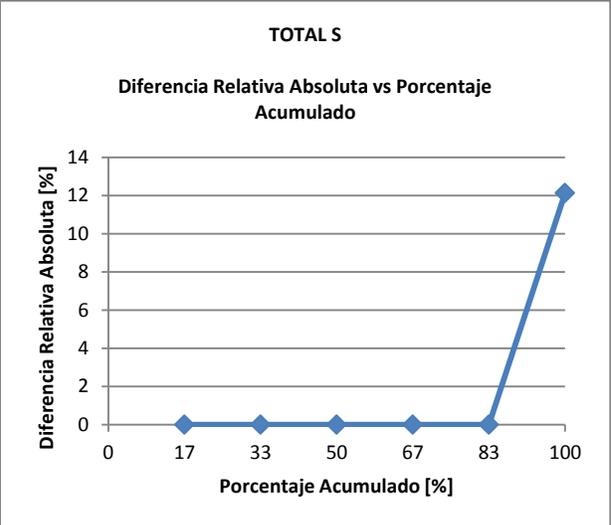
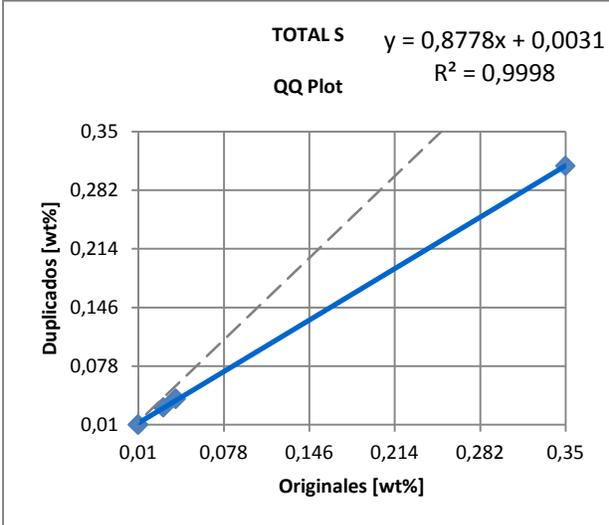
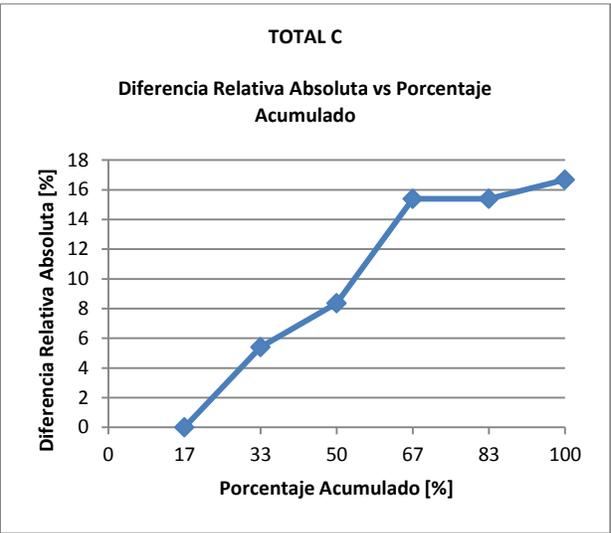
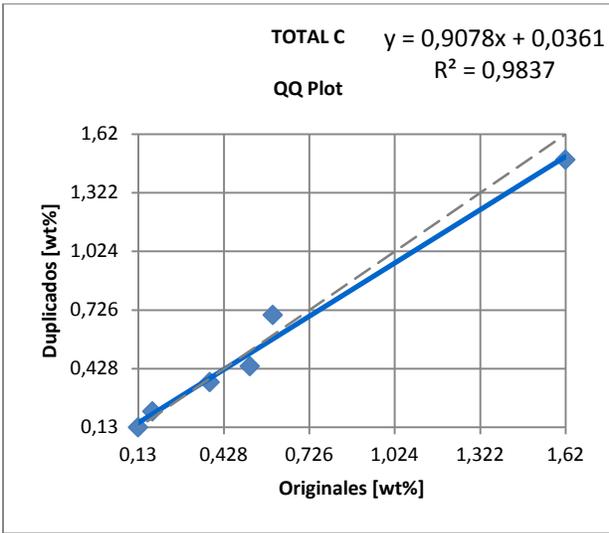
Unidad de sistemas de información geológica, S. n. d. g. y. m., Inédito.. Base de datos topográfica de Chile..

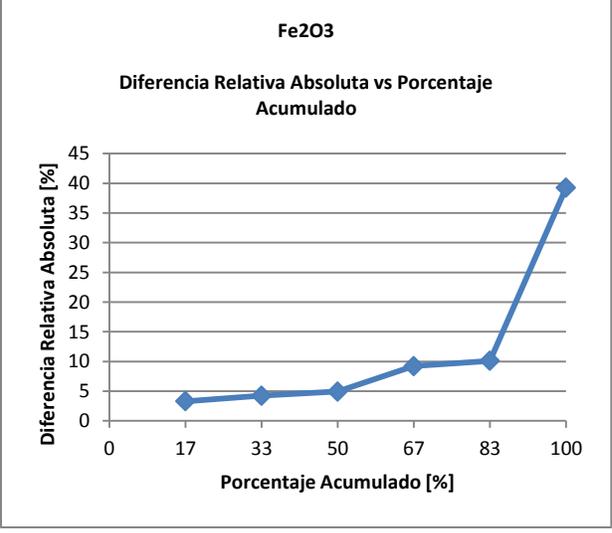
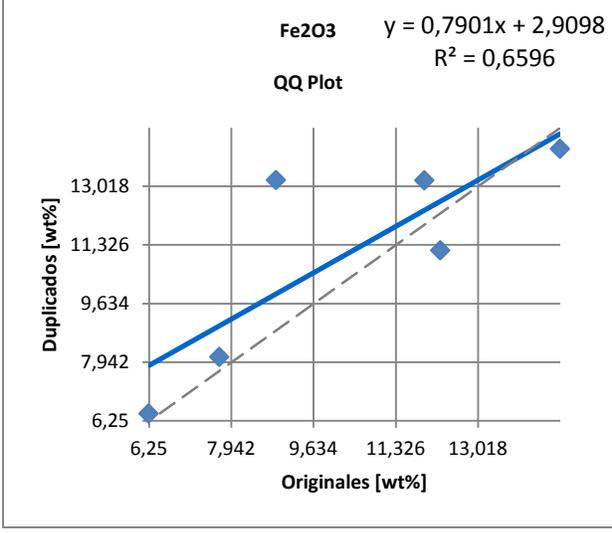
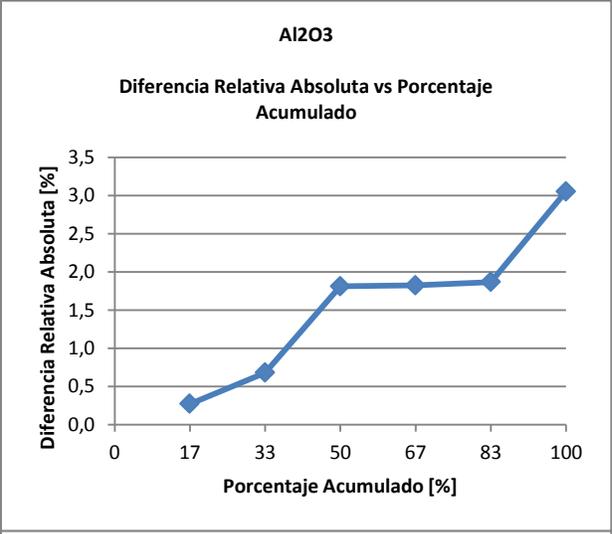
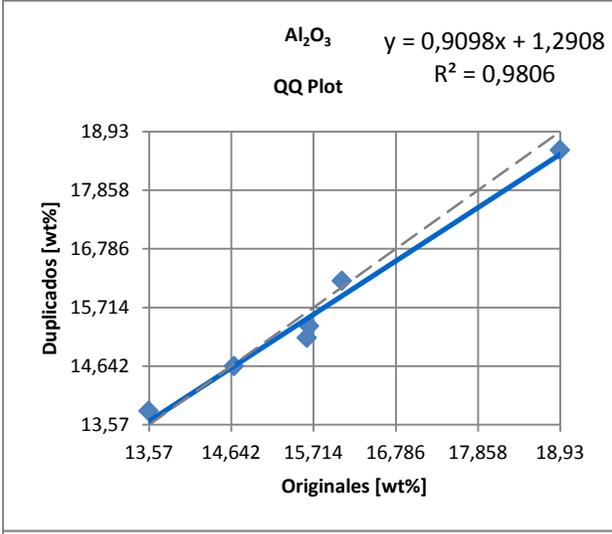
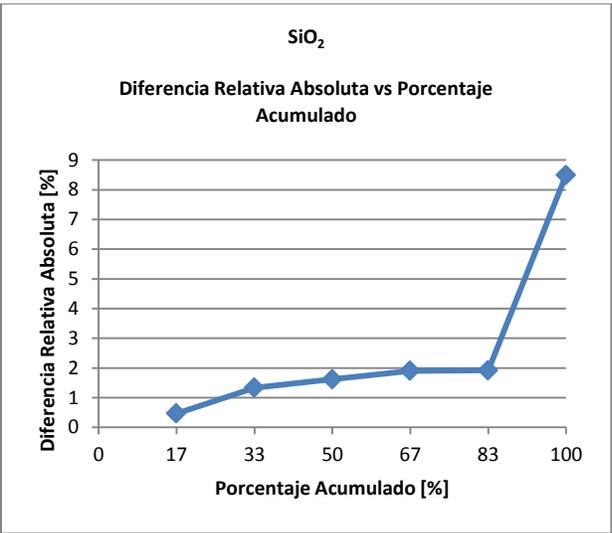
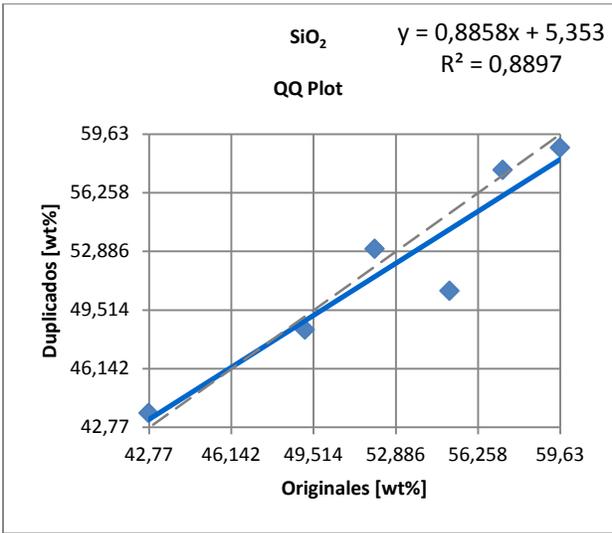
Vassallo, L., 2008. Yacimientos minerales metálicos, 4ta edición..

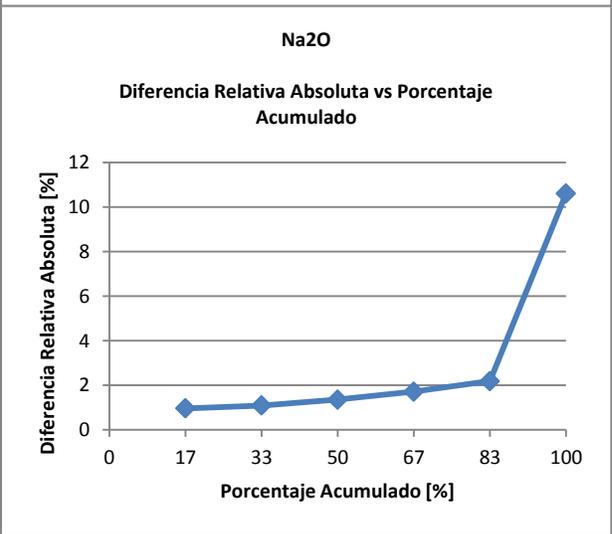
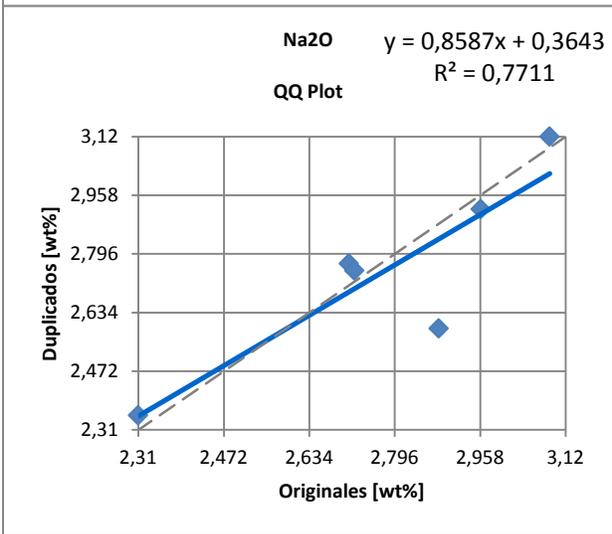
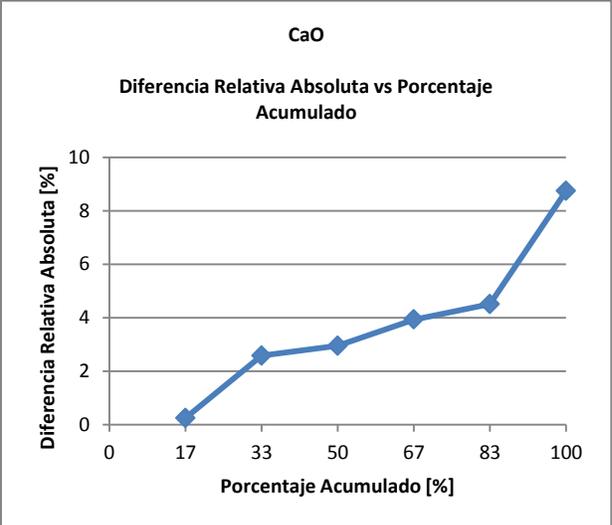
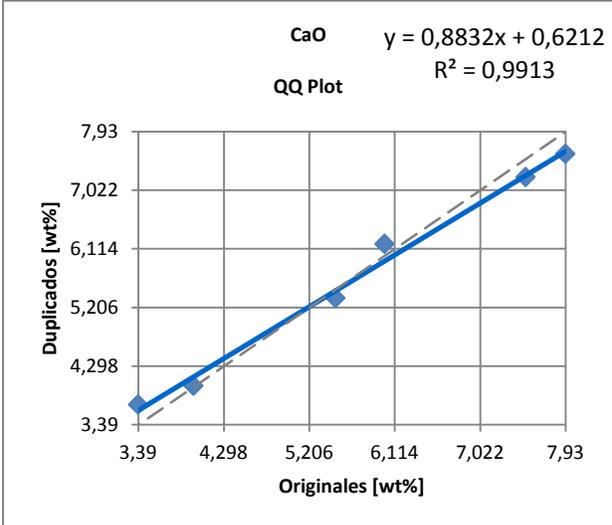
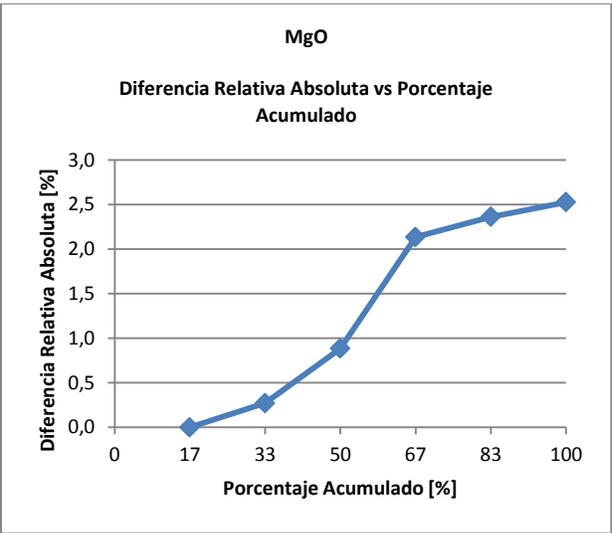
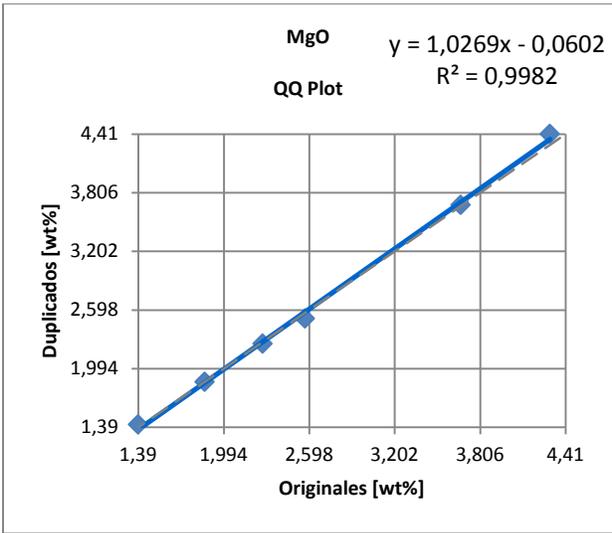
Walker, A., Cross, S. & Harrison, R., 1999. Visualisation of biomedical datasets by use of growing cell structure networks: a novel diagnostic classification technique.. *Lancet*, 354:1518-1521..

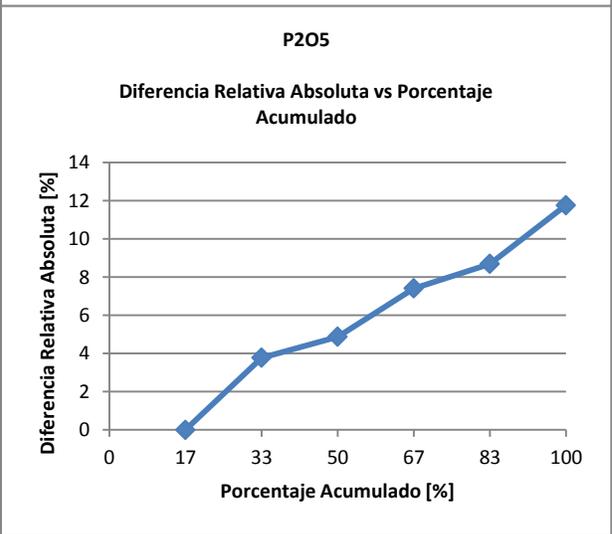
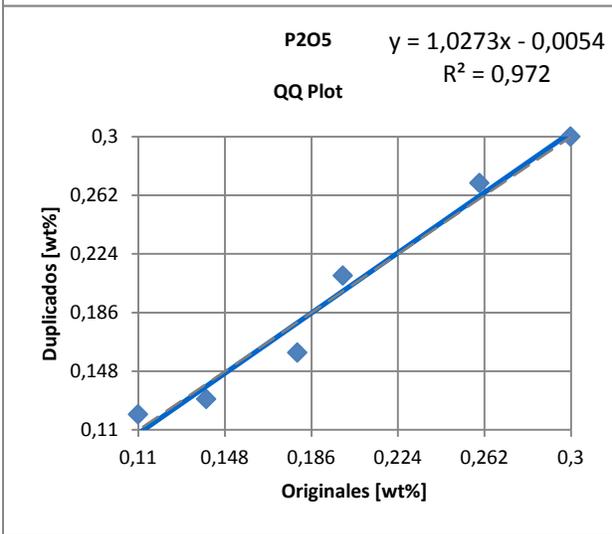
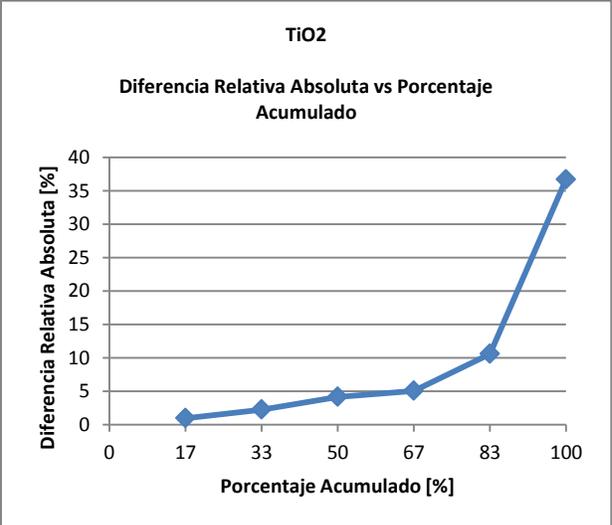
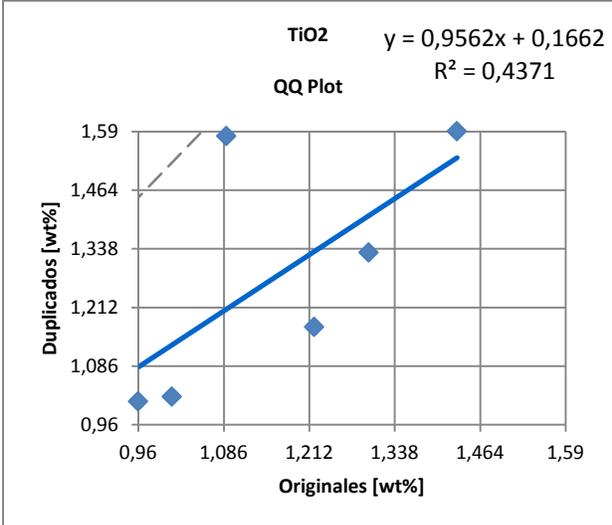
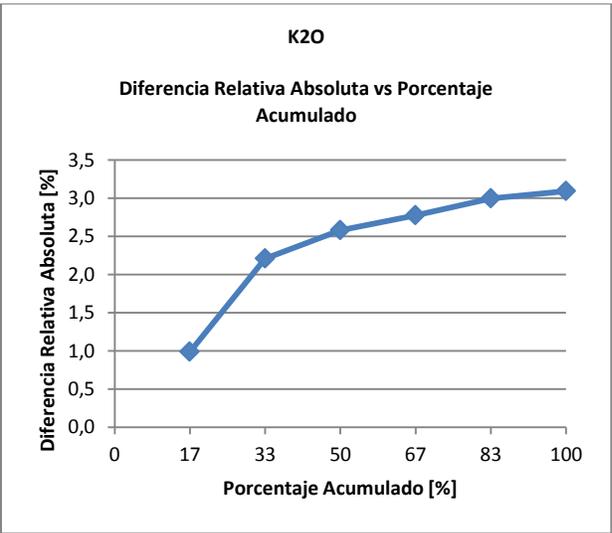
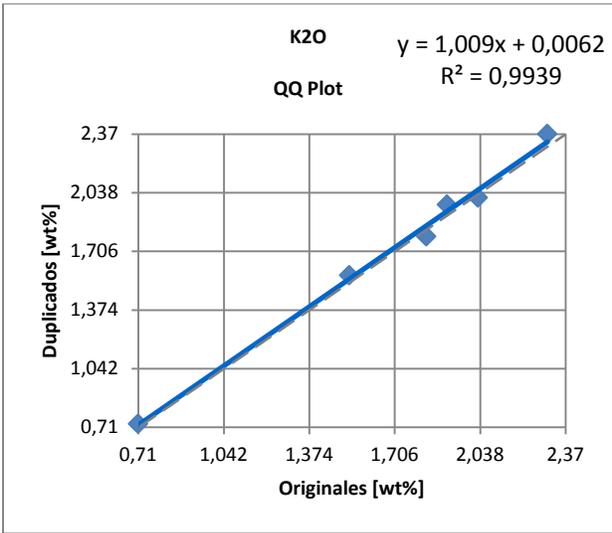
ANEXO A

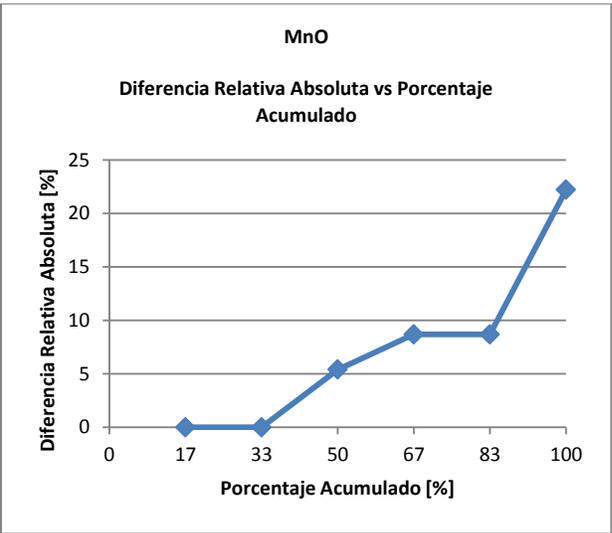
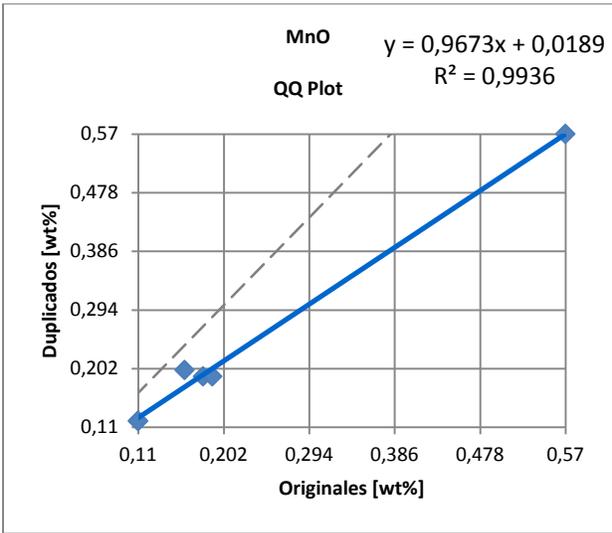
Gráficos de control de calidad





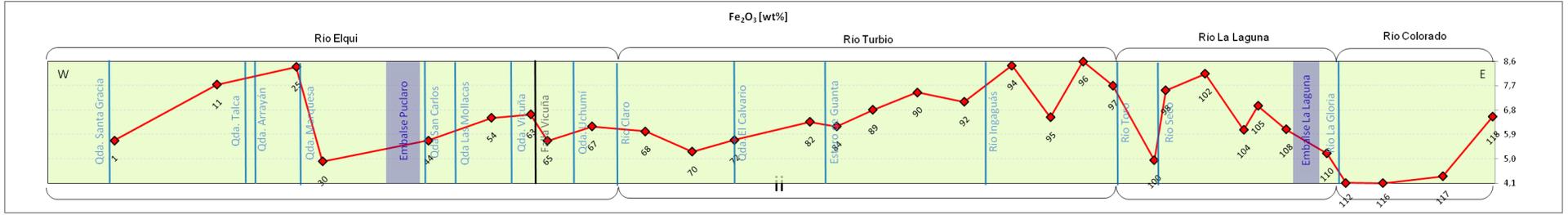
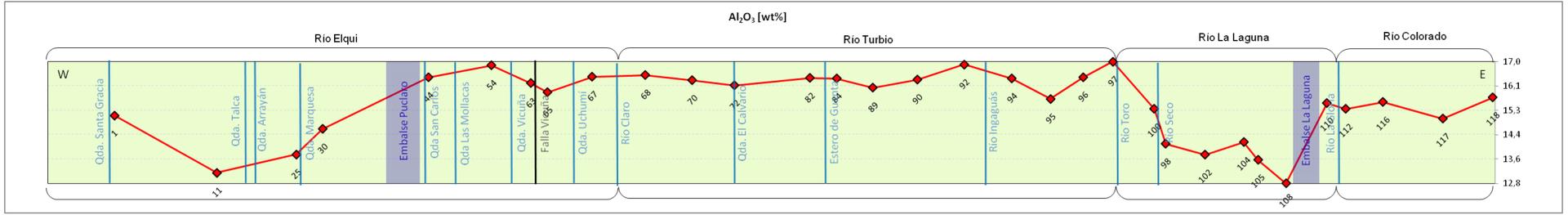
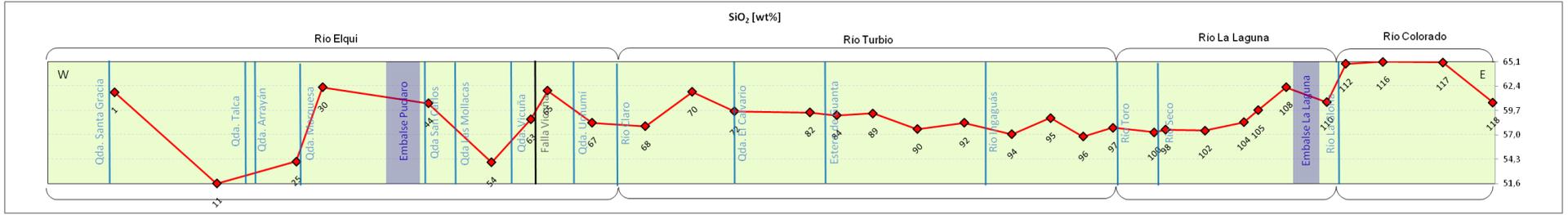
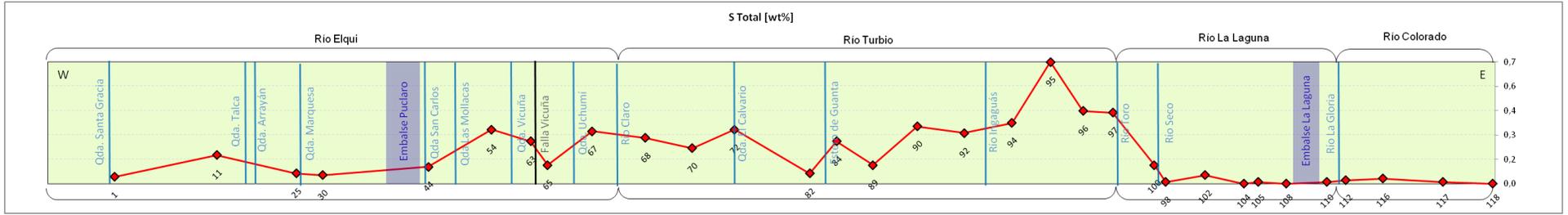
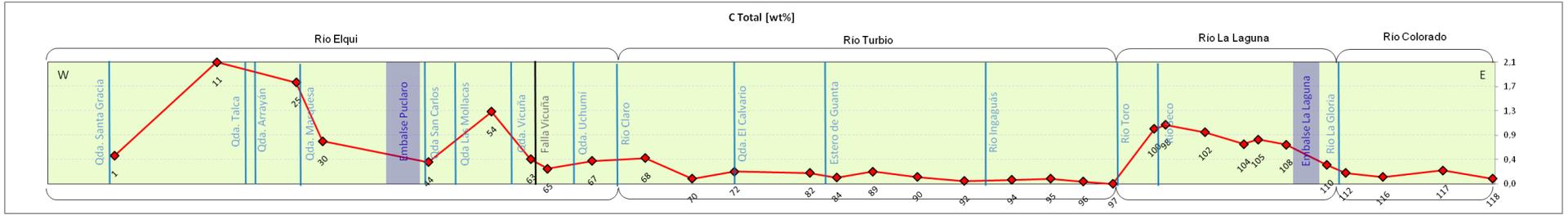


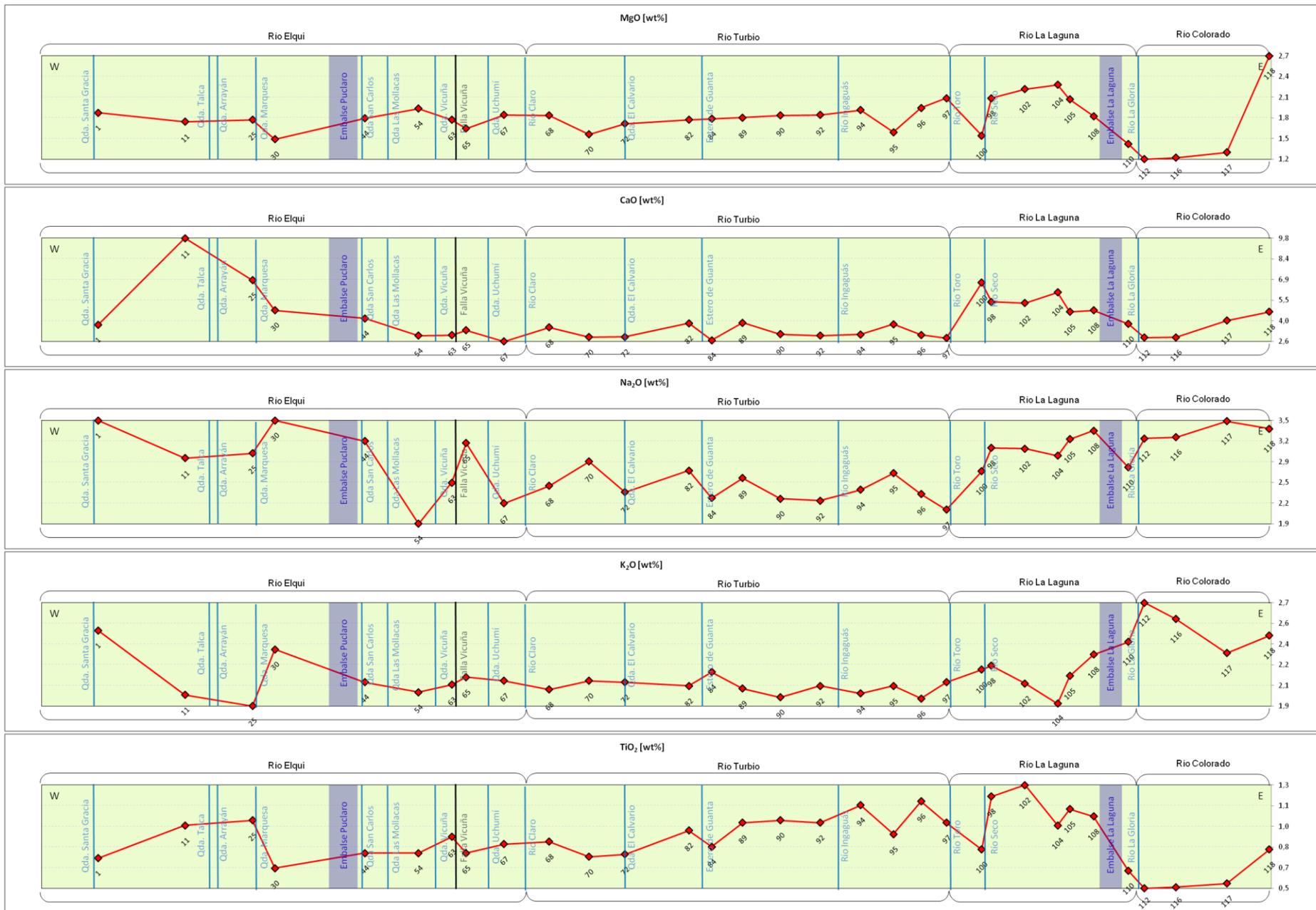


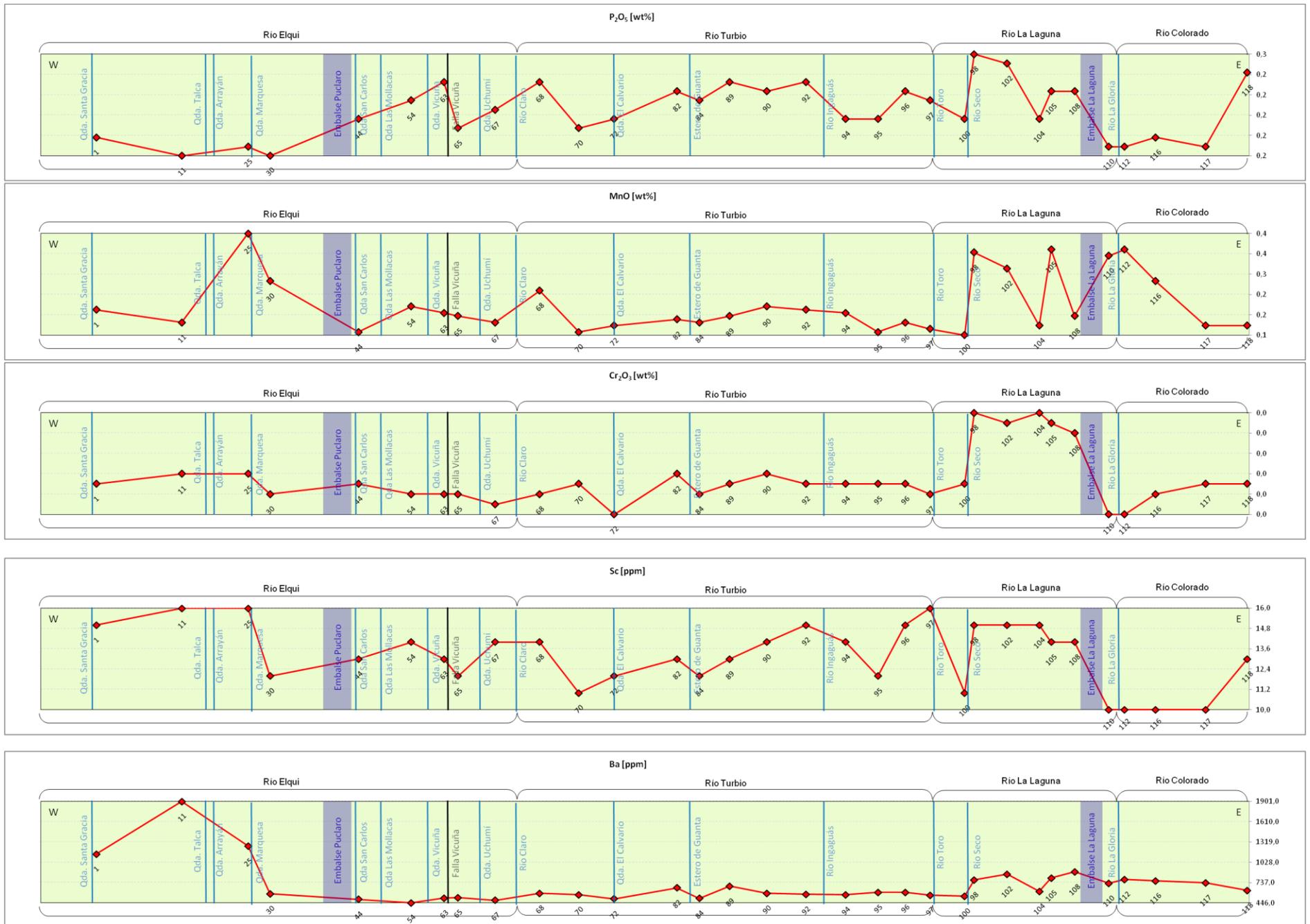


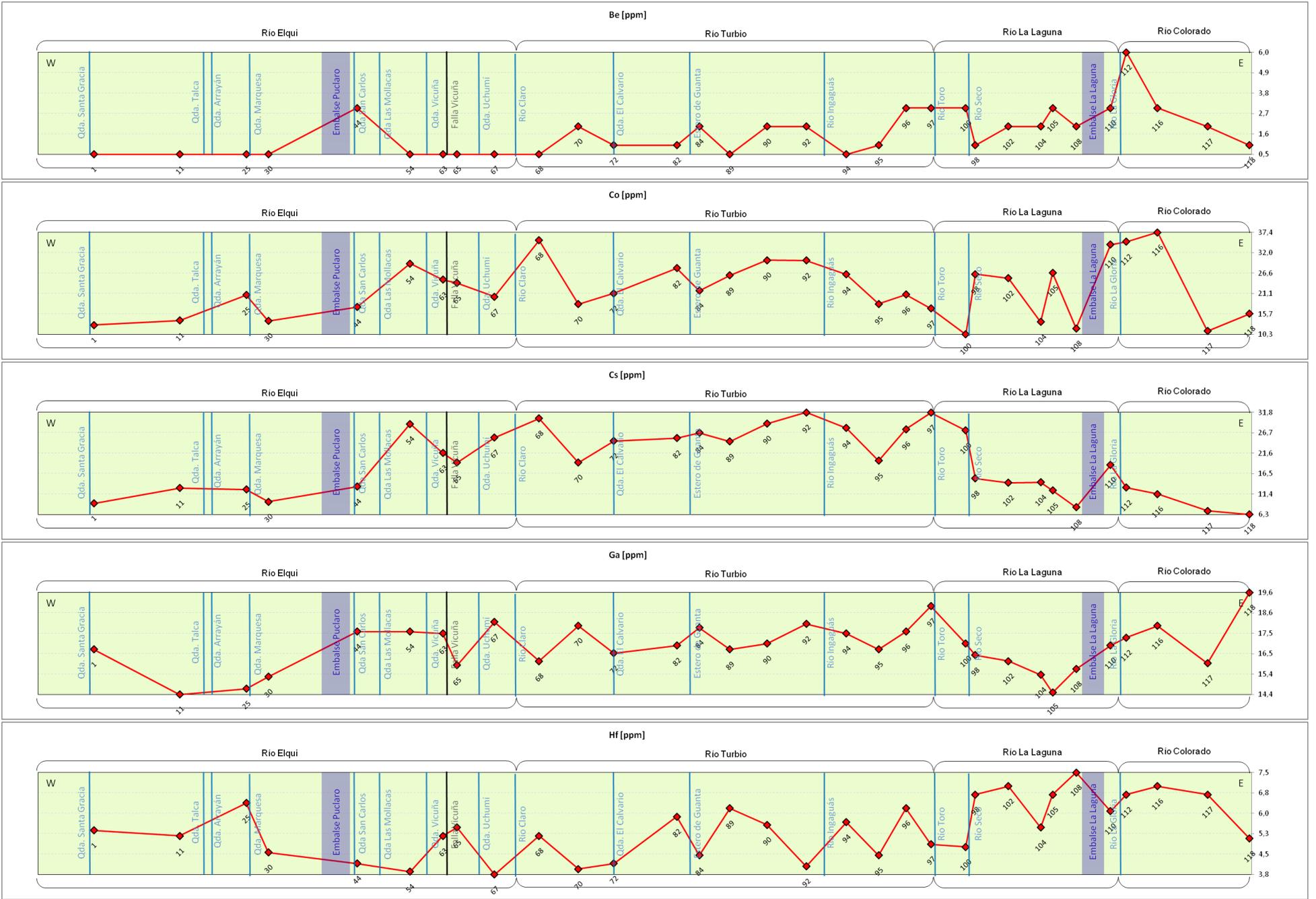
ANEXO B

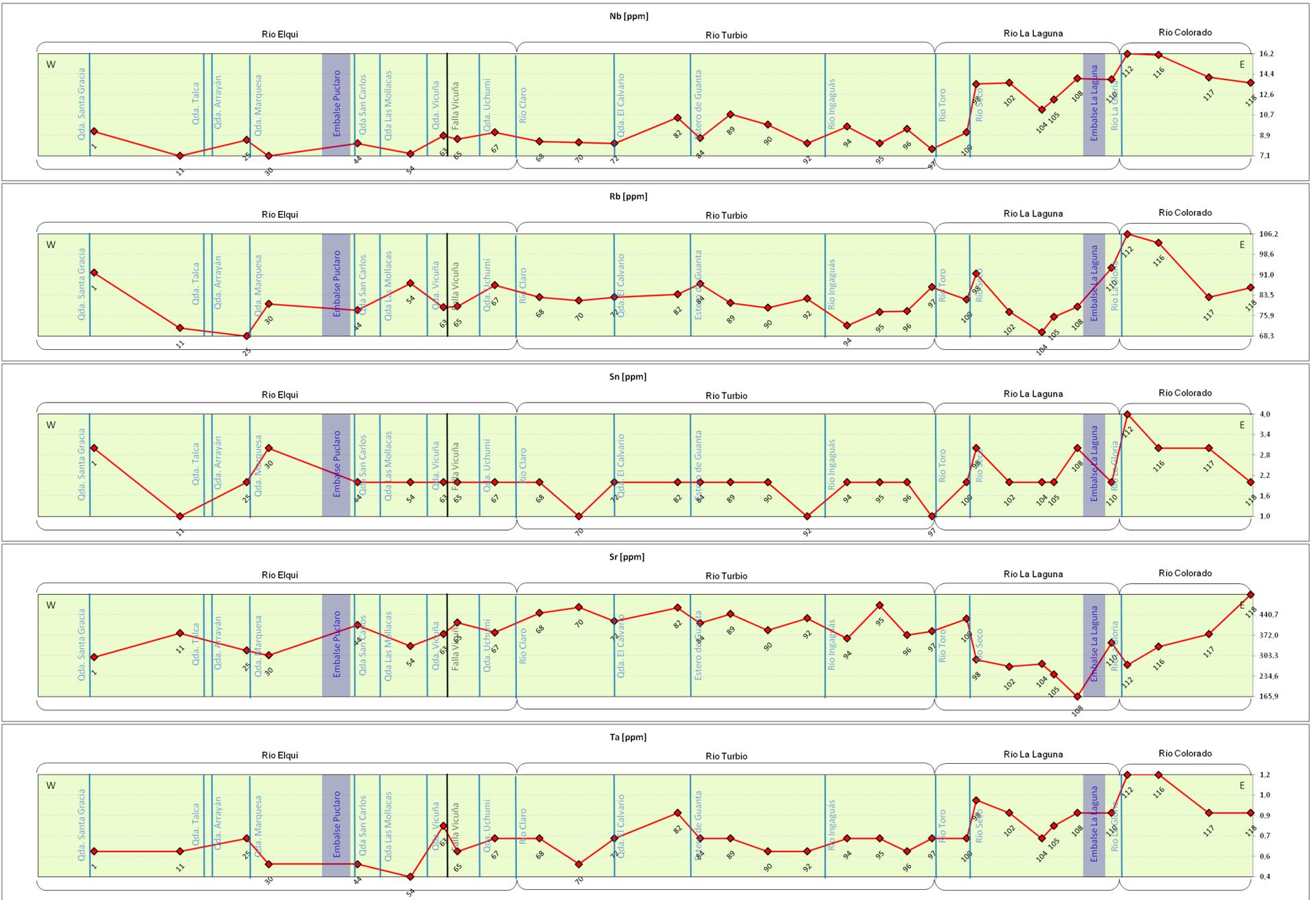
Gráficos de variación geográfica

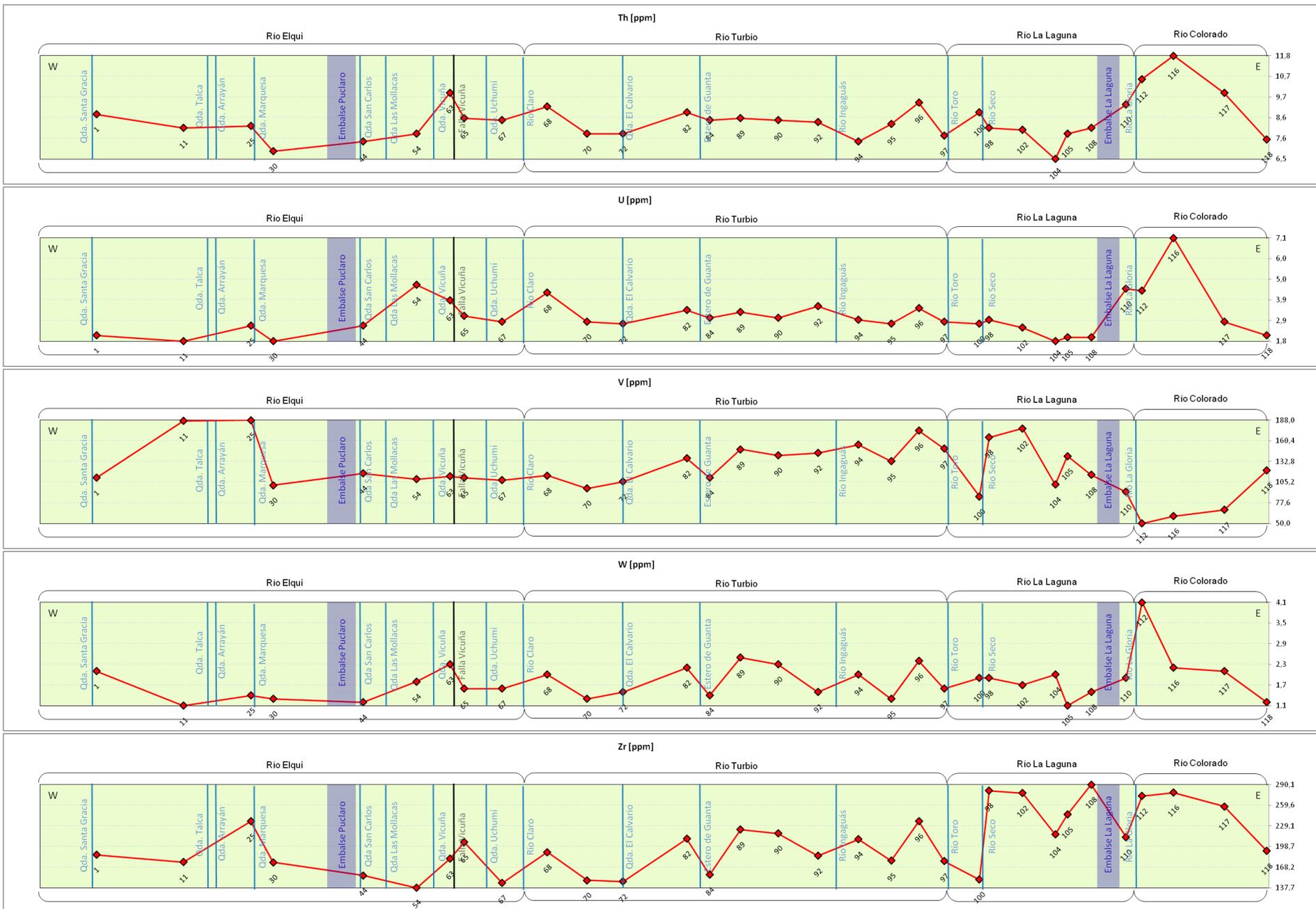


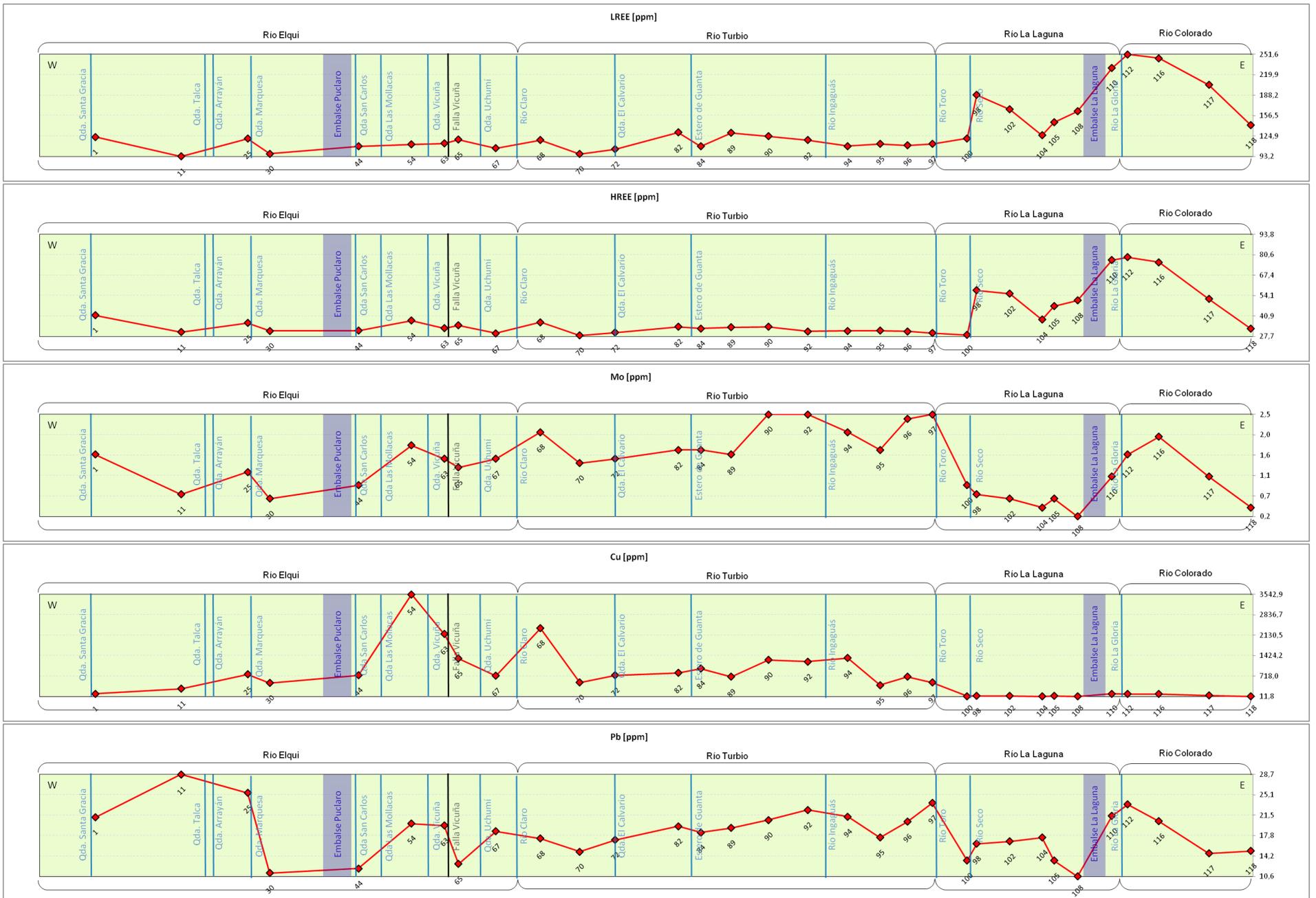


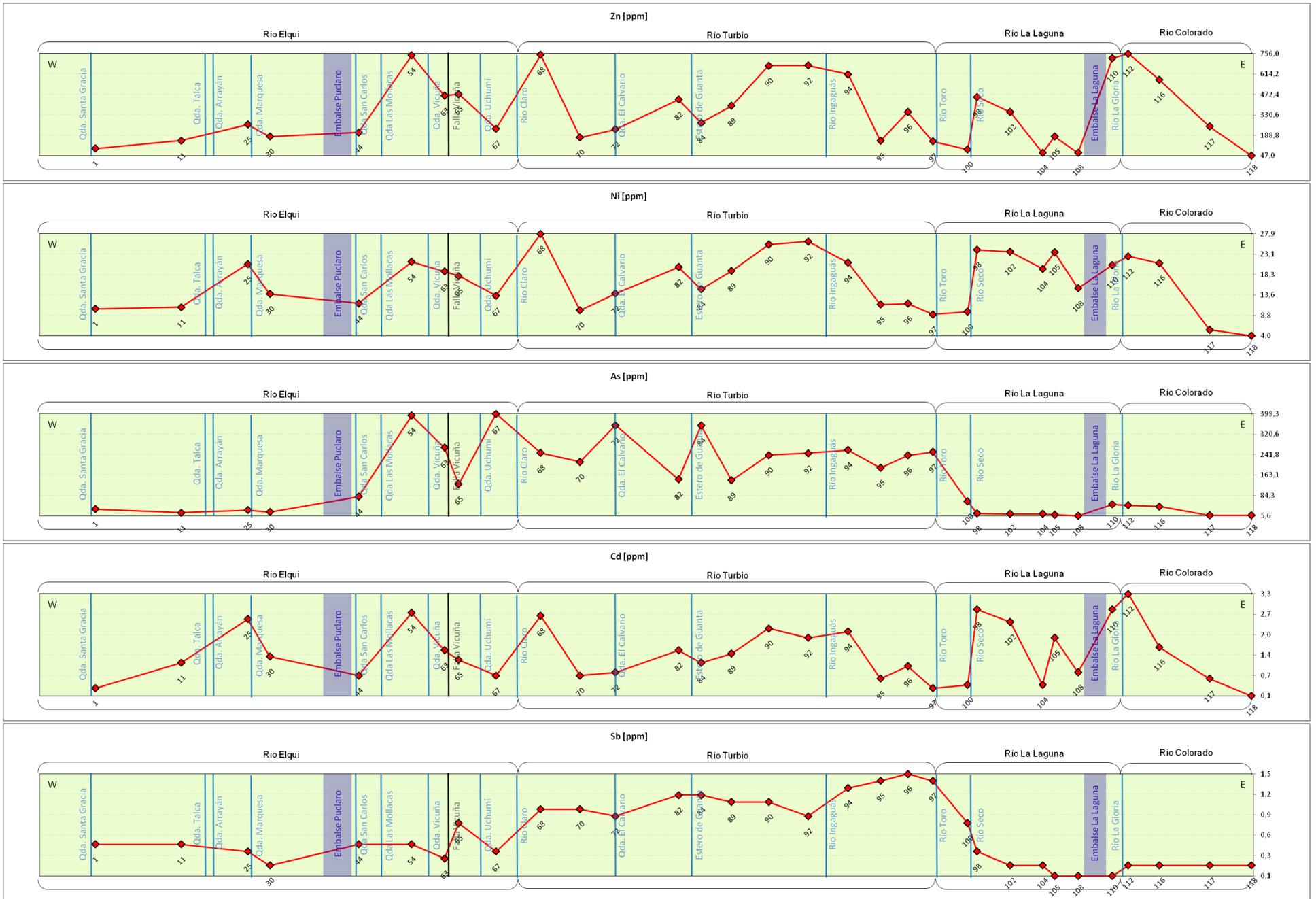


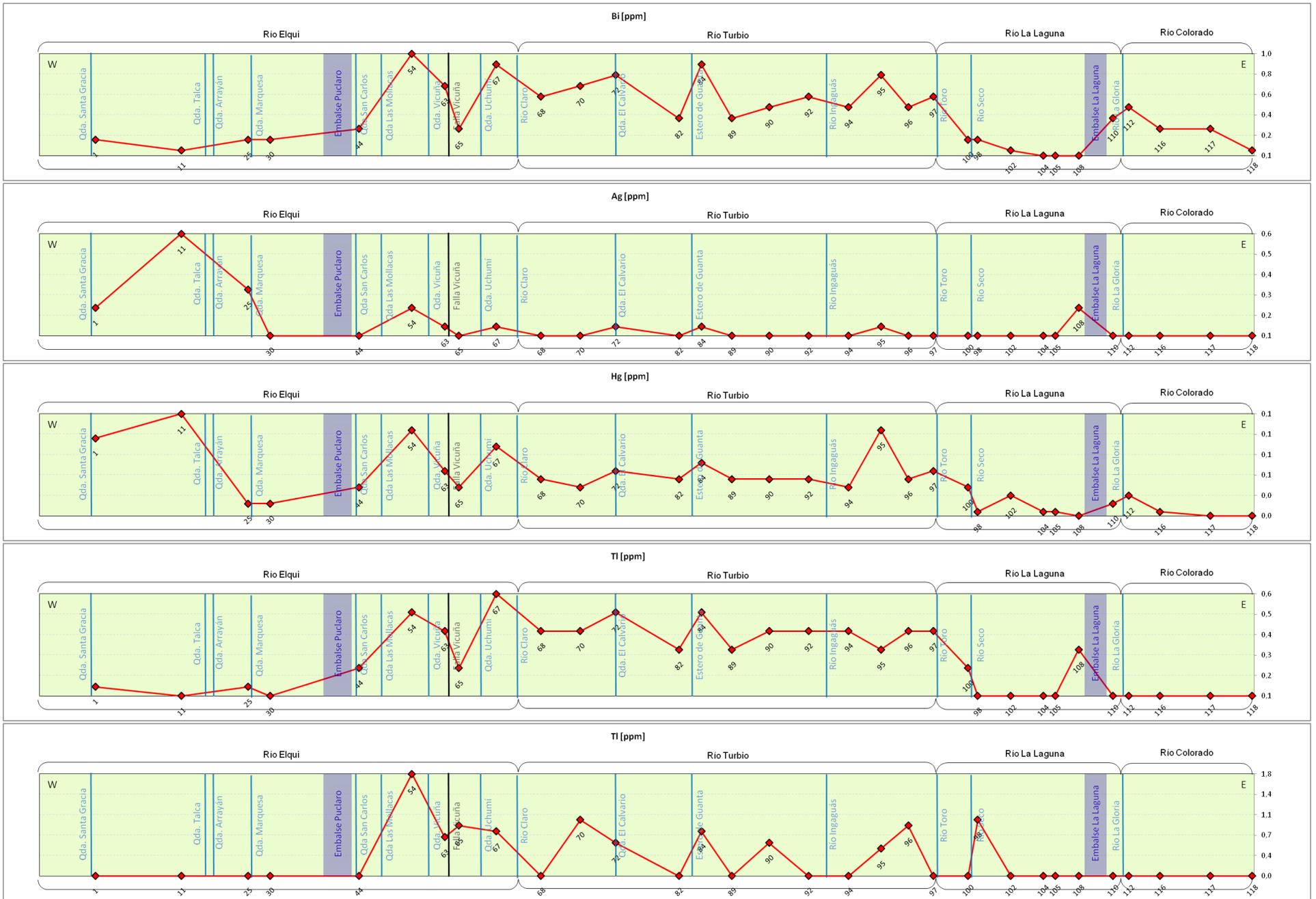


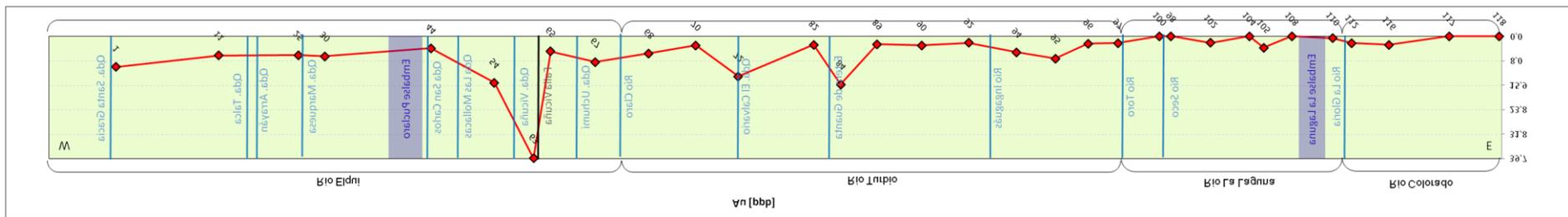








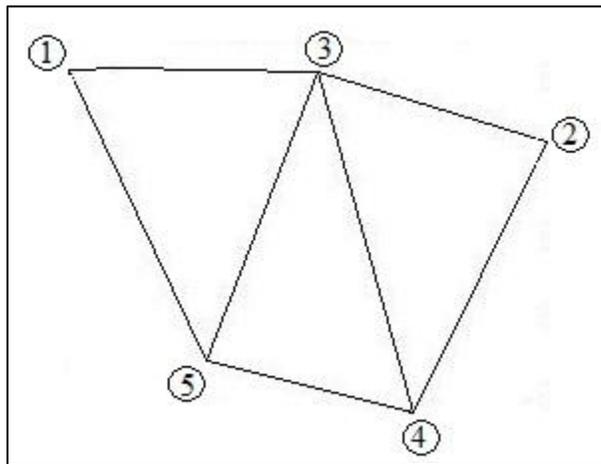




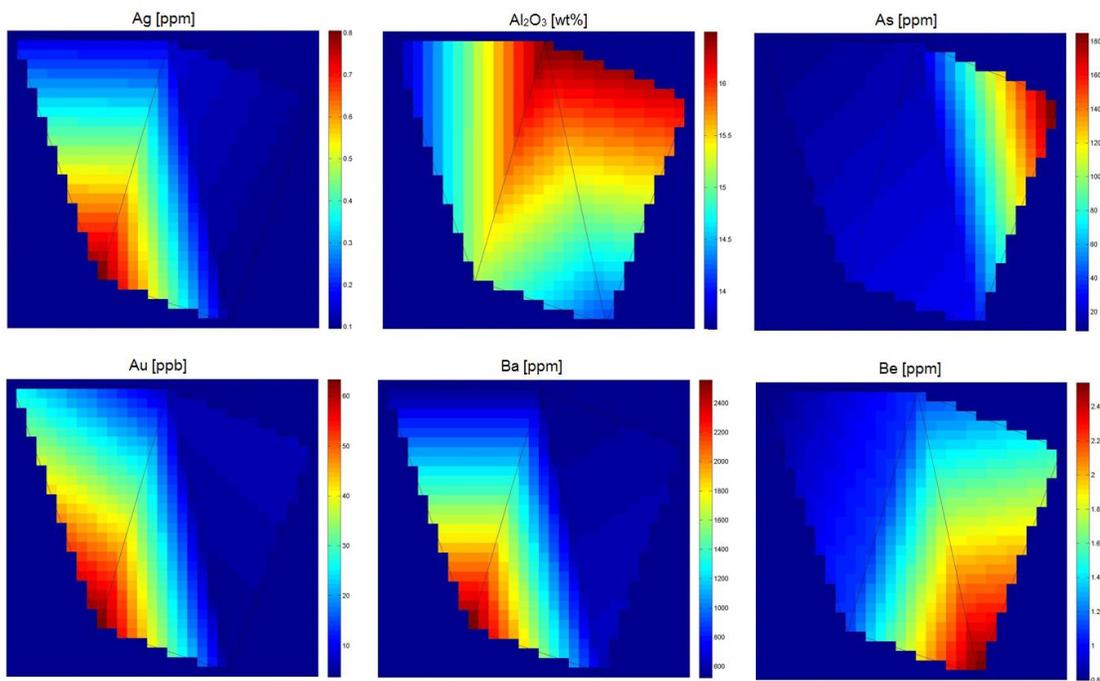
ANEXO C

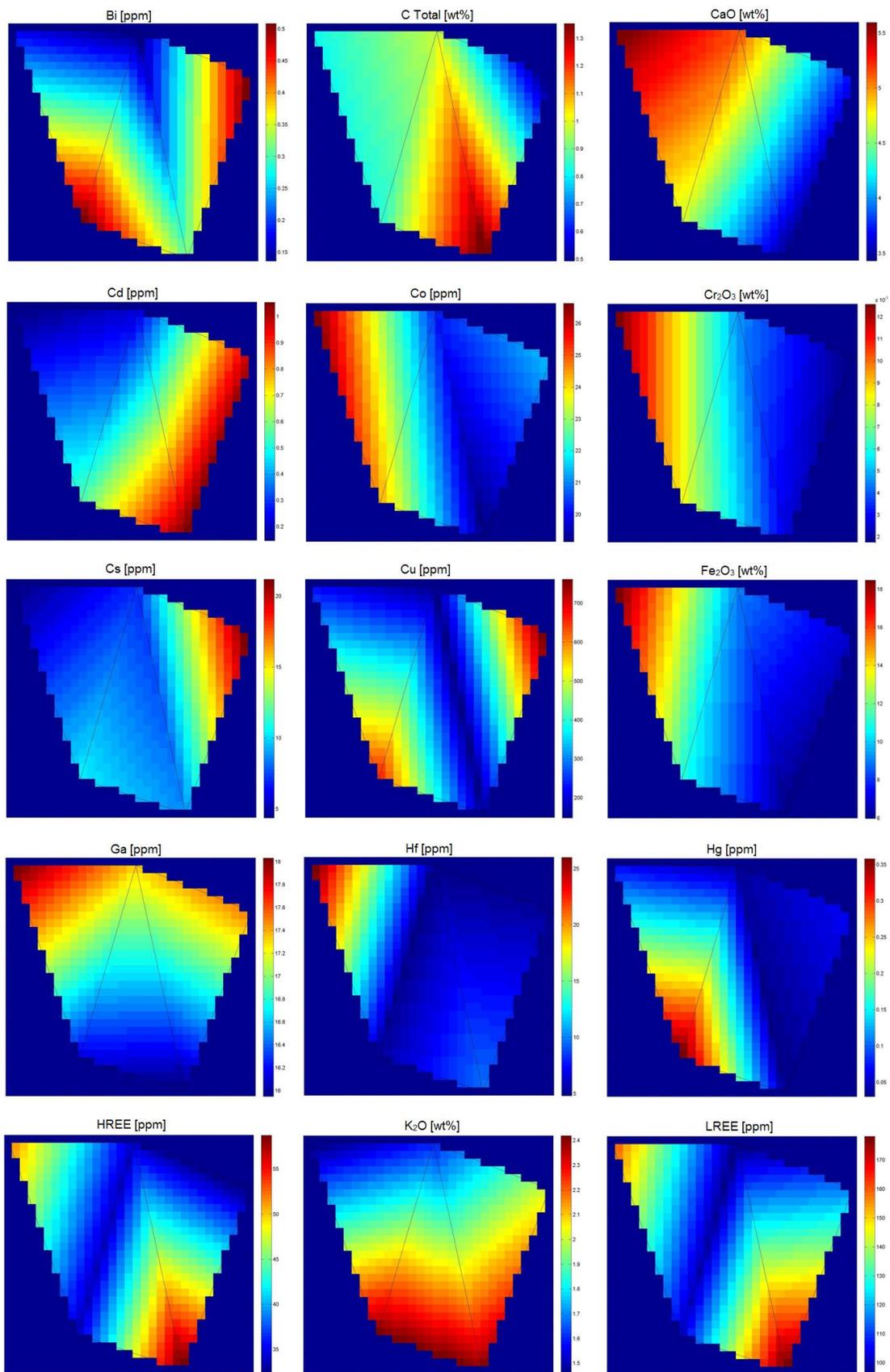
Redes neuronales artificiales

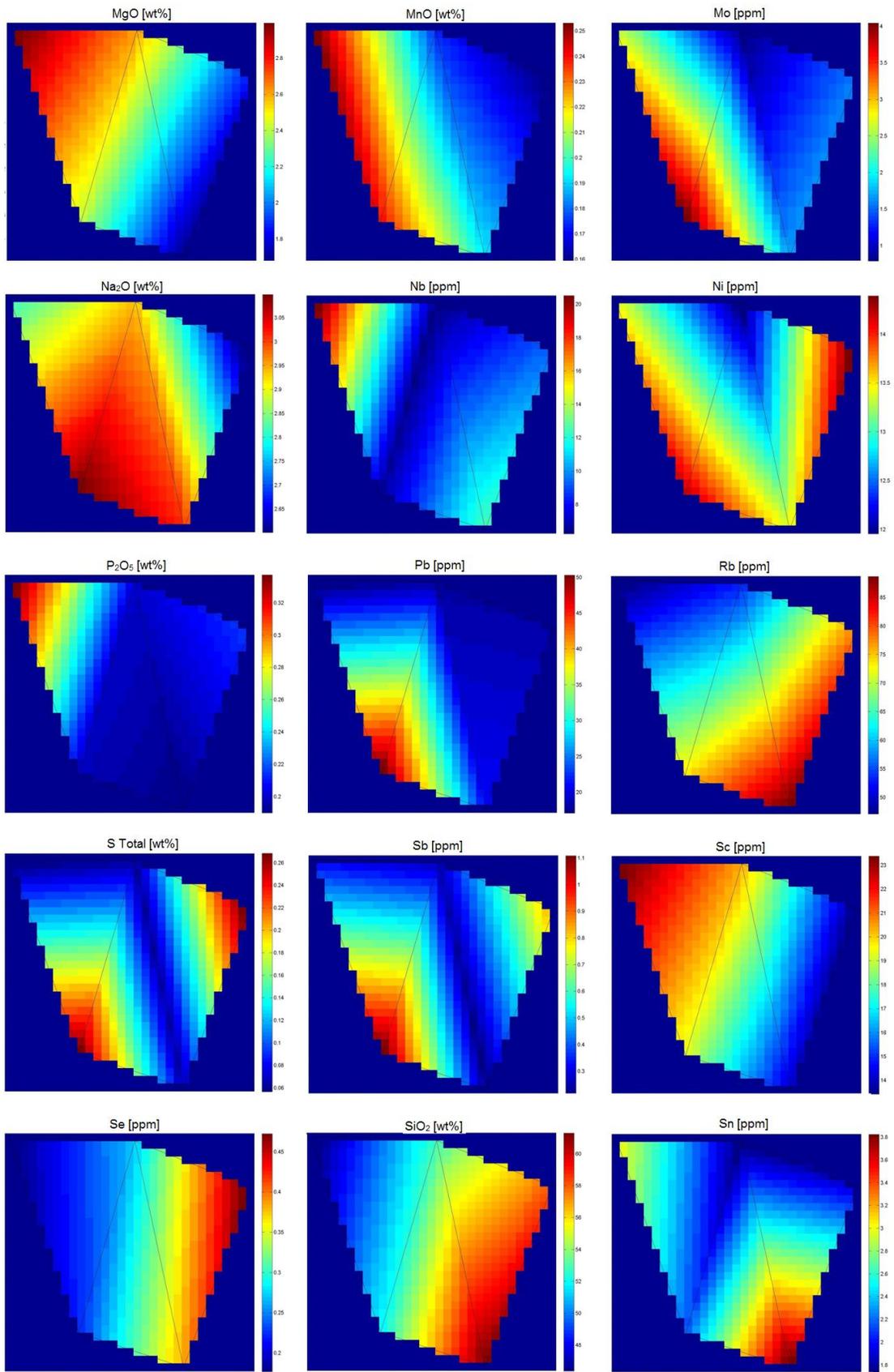
A continuación se presenta el mapa topológico resultante del análisis de redes neuronales, con sus nodos detallados y la distribución de concentraciones para cada elemento.

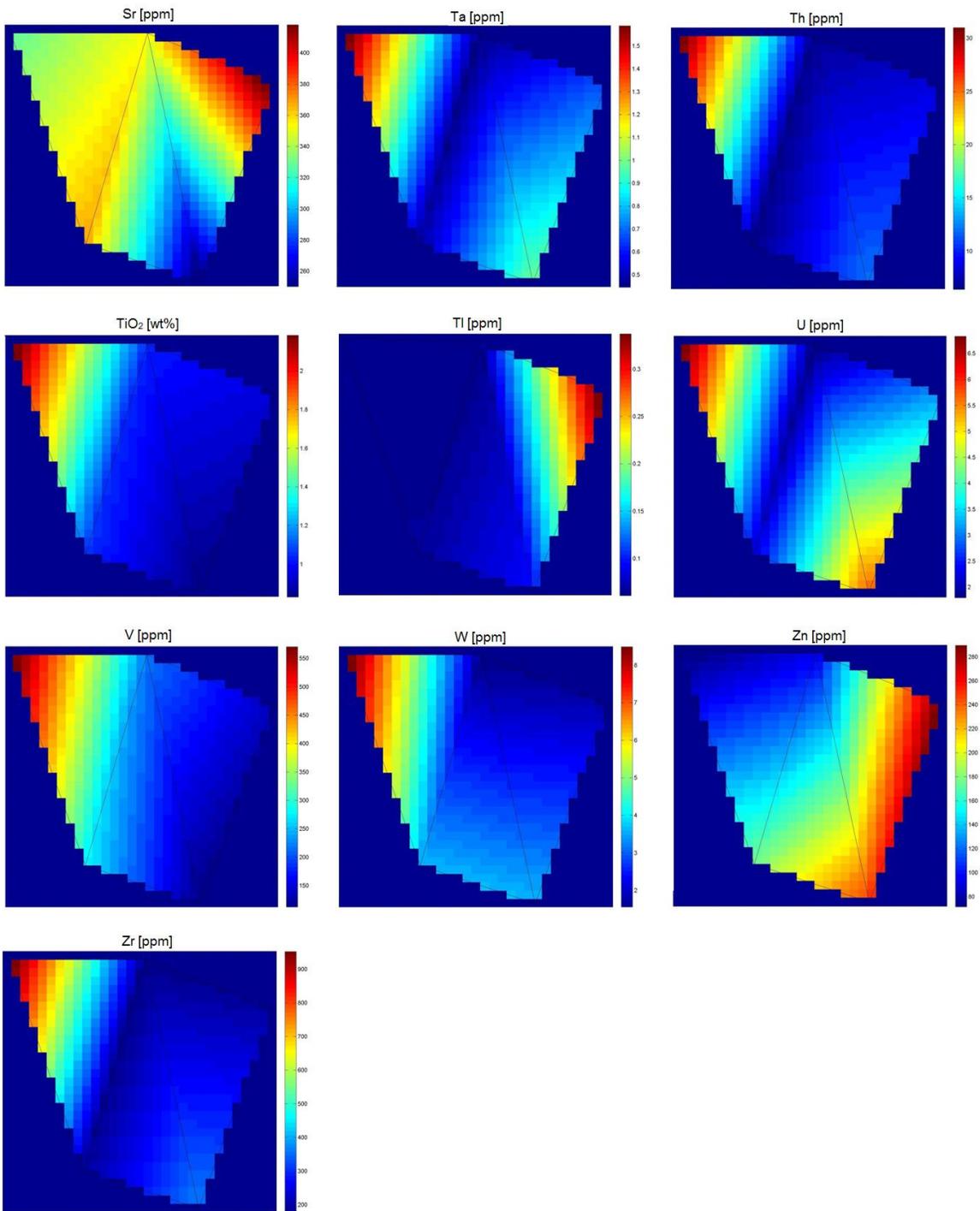


Ubicación de los nodos.









ANEXO D

Códigos y datos de muestras.

Código	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
UTM E	289185	293852	294722	295574	295985	297660	298117	298153	298311	300641
UTM N	6689200	6672325	6675435	6697234	6706707	6667185	6700274	6697236	6692849	6704791
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	61,7	46,8	52,6	53,1	52,5	47,2	52,3	49,8	49,2	52,9
Al ₂ O ₃	15,1	15,0	16,1	15,2	14,7	15,0	15,5	16,7	16,4	15,4
Fe ₂ O ₃	5,7	8,5	9,7	10,9	11,7	13,3	12,2	10,9	12,5	11,0
MgO	1,9	2,6	3,3	2,7	4,4	3,8	2,5	3,4	3,4	2,5
CaO	3,8	8,3	5,0	5,5	6,1	4,8	5,0	4,6	4,0	5,4
Na ₂ O	3,5	2,8	3,5	2,8	3,1	3,2	2,7	4,7	4,5	2,7
K ₂ O	2,5	2,6	1,9	1,6	1,8	2,2	1,6	2,0	1,9	1,6
TiO ₂	0,7	1,0	0,9	1,2	1,3	1,3	1,2	1,0	1,1	1,3
P ₂ O ₅	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2
MnO	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	0,5	2,8	1,8	0,6	0,5	2,6	0,6	0,6	0,9	0,7
S Total [wt%]	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sc	15,0	22,0	25,0	23,0	27,5	27,0	23,0	24,0	24,0	23,5
Ba	1147,0	492,0	526,0	425,0	402,5	577,0	423,0	657,0	1753,0	417,0
Be	0,5	1,0	0,5	2,0	0,5	0,5	0,5	2,0	1,0	0,8
Co	12,8	20,3	23,3	19,4	25,4	28,8	22,4	22,4	25,2	21,4
Cs	9,1	5,1	2,9	5,3	3,2	3,0	6,1	4,8	7,2	5,5
Ga	16,7	18,2	17,7	17,2	16,5	18,8	17,5	16,6	17,7	17,4
Hf	5,4	6,9	4,9	5,7	12,7	6,7	7,1	2,4	2,9	6,8
Nb	9,3	10,9	8,9	8,3	21,9	9,4	8,0	5,4	4,7	9,1
Rb	91,8	81,2	80,1	47,3	52,8	65,9	50,3	52,9	56,8	49,9
Sn	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0
Sr	298,0	300,7	352,7	321,6	383,1	381,1	316,5	338,5	371,1	326,6
Ta	0,6	0,8	0,7	0,6	2,0	0,6	0,5	0,3	0,3	0,7
Th	8,8	12,3	10,4	10,7	26,6	13,2	6,6	3,9	4,0	8,0
U	2,1	2,7	2,4	1,8	4,8	2,4	1,7	1,1	1,2	2,2
V	111,0	212,0	241,0	282,0	316,0	362,0	379,0	274,0	343,0	322,5
W	2,1	2,5	12,7	1,0	2,3	17,0	1,3	1,0	0,6	1,1
Zr	186,5	246,3	169,9	201,7	460,4	249,9	266,4	84,4	100,5	255,6
Y	28,3	32,9	25,6	24,7	38,3	30,5	23,9	18,9	18,7	23,0
La	25,0	28,2	23,2	19,1	40,8	23,2	19,1	14,7	18,2	20,0
Ce	54,0	62,0	50,2	42,0	85,1	53,2	39,7	33,3	37,3	41,0
Pr	6,7	8,5	6,9	5,6	11,5	7,4	5,0	4,2	4,7	5,3
Nd	25,9	38,7	28,7	25,6	50,4	32,8	21,4	18,6	21,6	22,6
Sm	5,4	7,7	6,0	5,7	10,0	7,3	4,6	3,9	4,3	4,8
Eu	1,3	1,5	1,3	1,4	2,0	1,4	1,2	1,2	1,2	1,2
Gd	5,1	7,2	5,3	5,1	8,8	6,5	4,6	3,9	3,8	4,4
Tb	0,9	1,0	0,8	0,7	1,1	1,0	0,7	0,5	0,6	0,7
Dy	4,8	6,1	4,6	4,4	7,1	5,2	3,9	3,3	3,2	4,0
Ho	1,0	1,1	0,9	0,9	1,2	1,1	0,9	0,6	0,7	0,8
Er	2,8	3,3	2,7	2,4	3,5	3,1	2,5	1,8	1,8	2,4
Tm	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4
Yb	2,9	3,2	2,7	2,7	3,9	2,9	2,4	1,7	1,9	2,4
Lu	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4
Mo	1,6	2,0	0,7	0,9	0,9	1,7	1,0	0,8	0,8	1,0
Cu	103,7	245,3	189,6	128,3	119,3	200,0	177,9	132,7	99,1	124,0
Pb	21,1	5,6	3,3	27,9	6,3	5,1	33,5	25,6	28,1	27,6
Zn	98,0	73,0	39,0	92,0	37,0	79,0	104,0	154,0	150,0	93,0
Ni	10,3	7,3	8,8	10,7	12,2	10,7	14,2	16,0	14,0	12,2
As	32,0	14,9	3,1	18,0	3,1	4,6	20,2	12,9	11,6	15,9
Cd	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3
Sb	0,5	1,4	0,2	0,5	0,2	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4
Bi	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
Ag	0,2	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1	0,6	0,1	0,2	0,6
Au [ppb]	10,0	19,6	2,7	7,1	4,8	6,4	8,3	29,6	1,2	5,0
Hg	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
Tl	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Se	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,5	0,0	0,0	0,6

Código	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
UTM E	301003	302170	302170	302404	302503	303593	304890	304957	305240	305635
UTM N	6681993	6664105	6672181	6652981	6656132	6675987	6708022	6654888	6716223	6712257
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	51,6	45,1	51,3	54,8	60,9	34,1	46,9	54,5	47,9	41,1
Al ₂ O ₃	13,1	17,8	14,4	17,2	17,2	9,6	18,7	15,9	13,8	12,3
Fe ₂ O ₃	7,7	11,2	8,7	8,5	5,5	38,1	10,1	8,1	12,2	23,6
MgO	1,8	3,7	4,6	2,1	1,6	2,9	2,9	1,8	3,2	2,9
CaO	9,8	3,5	6,9	2,6	3,7	5,2	4,9	3,1	7,7	4,6
Na ₂ O	2,9	4,0	3,0	6,1	5,3	2,2	1,9	3,6	3,4	2,6
K ₂ O	2,0	1,7	2,1	0,6	0,6	1,1	1,3	2,9	1,4	1,2
TiO ₂	1,0	1,0	1,2	1,0	0,7	3,8	1,1	0,8	1,8	3,2
P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,4
MnO	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	2,1	3,0	0,8	0,7	0,3	0,6	1,1	0,5	1,4	1,3
S Total [wt%]	0,2	0,1	0,4	0,1	0,0	0,0	0,1	0,7	0,0	0,1
Sc	16,0	28,0	28,0	21,0	14,0	26,0	26,0	18,0	22,0	24,0
Ba	1901,0	513,0	382,0	230,0	247,0	337,0	313,0	957,0	381,0	264,0
Be	0,5	2,0	2,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5
Co	14,0	29,3	24,8	28,0	19,8	43,2	23,1	27,7	25,9	25,4
Cs	12,9	11,5	4,1	1,0	1,0	1,6	4,2	2,3	3,5	3,0
Ga	14,4	17,9	17,8	17,1	17,9	19,7	20,4	15,5	18,0	18,4
Hf	5,2	2,0	5,3	3,2	4,6	49,6	4,9	3,5	23,6	30,2
Nb	7,1	2,9	11,0	4,1	4,6	34,9	7,5	5,5	23,8	35,4
Rb	71,3	66,1	56,8	13,6	15,3	29,0	35,3	64,3	57,2	41,5
Sn	1,0	1,0	3,0	2,0	1,0	4,0	2,0	2,0	3,0	5,0
Sr	379,7	402,5	372,1	269,8	423,6	285,1	324,3	279,1	398,7	231,9
Ta	0,6	0,2	0,7	0,3	0,4	2,6	0,5	0,4	1,8	2,4
Th	8,1	2,8	5,6	4,0	5,1	27,1	5,4	5,7	38,7	28,7
U	1,8	0,7	1,9	1,5	1,6	7,5	1,4	1,7	10,1	8,1
V	187,0	300,0	156,0	261,0	200,0	1371,0	291,0	189,0	410,0	722,0
W	1,1	0,0	1,7	2,6	1,8	50,0	1,0	5,7	2,5	2,9
Zr	175,9	68,9	183,2	107,1	170,1	1808,7	174,5	120,0	877,0	1114,9
Y	20,7	17,2	39,6	16,1	18,0	46,1	21,9	19,4	39,1	36,8
La	18,3	13,5	23,7	20,1	20,7	30,6	19,4	19,1	42,9	37,0
Ce	38,9	30,8	60,4	43,3	44,1	73,3	41,2	39,7	91,4	79,8
Pr	4,9	4,1	8,7	5,5	5,9	10,1	5,4	5,2	11,9	10,2
Nd	22,0	17,4	38,6	22,4	25,2	42,9	24,9	23,5	48,9	40,9
Sm	4,1	3,9	9,3	4,6	4,8	9,6	4,8	4,4	9,7	8,5
Eu	1,0	1,3	1,6	1,4	1,3	1,5	1,2	1,3	1,4	1,3
Gd	4,0	4,1	8,6	4,1	4,0	8,9	4,4	4,3	8,0	7,5
Tb	0,6	0,5	1,2	0,5	0,6	1,3	0,7	0,6	1,2	0,9
Dy	3,6	3,1	7,3	3,0	3,2	7,7	3,9	3,9	6,4	6,2
Ho	0,7	0,6	1,3	0,6	0,6	1,7	0,8	0,7	1,3	1,2
Er	2,2	1,7	3,8	1,6	1,9	5,1	2,2	1,9	4,1	3,7
Tm	0,3	0,3	0,6	0,3	0,3	0,8	0,3	0,3	0,6	0,6
Yb	2,0	1,6	3,6	1,7	1,9	5,1	2,2	1,9	4,1	3,9
Lu	0,3	0,3	0,6	0,2	0,3	0,9	0,3	0,3	0,7	0,7
Mo	0,7	0,3	1,7	1,1	0,9	5,1	0,7	8,6	3,0	3,9
Cu	276,5	102,4	259,4	147,5	230,7	263,2	197,9	1041,0	278,3	307,0
Pb	28,7	7,8	7,3	3,3	2,3	27,1	44,2	13,1	9,2	14,2
Zn	152,0	141,0	81,0	26,0	8,0	57,0	85,0	97,0	61,0	62,0
Ni	10,7	11,6	8,4	15,1	6,3	13,5	14,0	10,9	12,1	16,5
As	17,8	3,4	2,6	5,2	3,8	10,9	8,3	10,1	4,5	5,5
Cd	1,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1
Sb	0,5	0,1	0,1	0,5	0,3	0,7	0,1	1,5	0,2	0,2
Bi	0,1	0,1	0,1	0,6	0,2	0,5	0,4	0,8	0,1	0,1
Ag	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1
Au [ppb]	6,3	15,1	9,0	26,3	6,0	129,9	7,9	81,9	3,9	6,1
Hg	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,6	0,0	0,0
Tl	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Se	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,7	0,0	0,0	0,0

Código	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
UTM E	305811	307806	308152	308643	309598	310253	310843	311755	311765	312177
UTM N	6668298	6675992	6667755	6664141	6682839	6719615	6685651	6671506	6688324	6681394
Elementos mayores [wt%]										
SiO2	55,5	53,5	52,6	41,3	54,1	50,1	49,7	52,0	49,5	62,3
Al2O3	17,4	15,2	14,9	12,0	13,8	18,2	15,9	14,8	16,3	14,6
Fe2O3	8,8	11,1	13,7	25,7	8,4	7,3	9,6	10,3	7,6	4,9
MgO	2,0	2,4	2,3	2,2	1,8	2,8	2,9	2,9	3,0	1,5
CaO	2,2	4,5	2,9	4,3	6,9	5,5	5,6	6,8	6,4	4,8
Na2O	4,9	3,4	3,3	2,7	3,0	2,1	3,5	3,2	2,6	3,5
K2O	1,2	2,3	3,1	2,4	1,9	1,1	3,3	1,5	2,1	2,4
TiO2	0,8	1,0	1,1	1,7	1,0	0,9	1,0	1,1	0,9	0,7
P2O5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
MnO	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3
Cr2O3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	0,7	0,8	0,5	0,6	1,8	0,8	0,8	0,8	1,1	0,8
S Total [wt%]	0,0	0,1	0,3	0,7	0,1	0,1	0,3	0,0	0,2	0,1
Sc	20,0	18,0	21,0	20,0	16,0	22,0	21,0	19,0	20,0	12,0
Ba	403,0	892,0	1411,0	2258,0	1260,0	265,0	9756,0	481,0	4516,0	579,0
Be	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	0,5
Co	25,9	26,2	27,3	37,4	20,8	17,6	21,4	18,7	18,8	13,9
Cs	2,1	6,5	5,5	5,5	12,5	4,4	27,5	6,1	16,7	9,5
Ga	17,9	16,3	14,8	17,7	14,7	17,3	15,5	13,9	16,5	15,3
Hf	3,1	4,4	4,4	5,8	6,4	2,8	3,6	4,1	3,0	4,6
Nb	3,9	5,6	5,5	6,9	8,5	4,0	4,5	5,2	4,7	7,1
Rb	35,7	60,4	77,3	58,7	68,3	25,6	126,0	38,4	70,3	80,3
Sn	2,0	2,0	2,0	4,0	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0	3,0
Sr	346,7	404,7	277,5	298,3	321,1	305,4	643,1	406,2	400,4	304,6
Ta	0,3	0,4	0,4	0,4	0,7	0,2	0,3	0,4	0,3	0,5
Th	4,4	4,5	5,5	5,0	8,2	2,8	3,9	3,5	3,2	6,9
U	1,2	1,7	1,9	2,3	2,6	0,7	1,1	1,3	0,9	1,8
V	223,0	287,0	308,0	753,0	188,0	161,0	243,0	247,0	155,0	101,0
W	1,9	3,7	7,6	7,0	1,4	0,0	0,6	0,0	0,9	1,3
Zr	103,7	160,8	146,5	225,2	236,0	94,6	112,4	117,1	103,7	175,3
Y	18,8	20,2	23,4	19,5	24,2	17,7	18,8	18,7	17,6	20,9
La	17,3	18,0	20,8	20,7	25,3	11,0	15,1	14,9	12,1	19,9
Ce	37,5	38,4	43,8	42,2	52,4	25,9	31,4	32,2	27,2	42,0
Pr	4,9	5,1	5,8	5,3	6,6	3,7	4,1	4,5	3,7	5,1
Nd	20,5	20,6	24,0	22,5	26,0	16,9	16,5	19,7	15,8	21,1
Sm	4,3	4,5	5,0	4,6	4,9	3,8	4,0	4,2	3,7	4,2
Eu	1,2	1,3	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	1,3	1,0	1,0
Gd	3,8	4,1	4,8	4,4	4,6	3,9	3,9	4,0	3,7	3,9
Tb	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6
Dy	3,2	3,6	4,0	3,7	4,4	3,2	3,4	3,8	3,3	3,8
Ho	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7
Er	1,9	2,2	2,0	2,0	2,7	1,9	1,9	2,0	1,9	2,1
Tm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
Yb	2,0	2,2	2,1	2,0	2,6	1,7	1,8	2,3	1,8	2,4
Lu	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Mo	0,7	3,8	13,8	6,7	1,2	0,6	1,0	0,8	1,1	0,6
Cu	185,0	430,8	1070,8	917,3	773,6	141,6	683,2	53,4	1266,8	476,1
Pb	5,3	22,2	34,2	36,2	25,4	56,8	161,5	13,1	106,5	11,2
Zn	42,0	138,0	174,0	192,0	264,0	78,0	297,0	101,0	207,0	180,0
Ni	7,0	13,6	13,4	16,5	20,8	12,3	13,4	15,0	18,8	13,8
As	5,1	14,2	16,5	16,7	28,1	8,0	32,9	14,4	44,1	20,1
Cd	0,1	0,3	0,4	0,5	2,5	0,1	1,0	0,1	0,8	1,3
Sb	0,1	1,0	1,8	1,9	0,4	0,2	1,2	0,4	1,7	0,2
Bi	0,5	1,0	1,5	1,0	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,2
Ag	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	2,1	0,1	3,3	0,1
Au [ppb]	16,0	182,3	110,7	228,5	6,2	5,2	4,1	0,9	3,2	6,5
Hg	0,0	0,3	1,0	1,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0
Tl	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Se	0,6	0,8	0,6	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0

Código	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
UTM E	312547	313006	314032	314303	317861	319688	320174	320438	320537	321279
UTM N	6659783	6716515	6687980	6690804	6690338	6693328	6715861	6690410	6664408	6669069
Elementos mayores [wt%]										
SiO2	43,2	50,3	56,1	51,3	52,2	51,9	52,3	50,2	54,5	57,4
Al2O3	13,7	14,8	16,1	15,9	16,4	15,7	16,7	16,1	16,0	15,5
Fe2O3	14,4	7,3	8,6	7,8	8,3	9,3	7,6	8,8	8,6	7,9
MgO	3,7	3,8	2,6	2,8	3,2	2,8	2,5	3,3	2,5	1,9
CaO	7,4	7,3	4,5	6,5	4,5	6,2	5,8	6,8	5,2	4,0
Na2O	2,7	1,9	3,5	2,9	3,7	2,8	2,0	2,8	3,0	2,3
K2O	2,3	2,0	1,9	2,4	2,4	1,6	2,0	1,4	1,6	2,0
TiO2	1,2	0,8	1,0	0,9	0,8	1,1	1,0	1,2	0,9	1,0
P2O5	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
MnO	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Cr2O3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	1,6	1,3	0,4	0,9	0,7	0,9	1,0	1,1	0,5	0,4
S Total [wt%]	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Sc	22,0	23,0	20,0	20,0	20,0	21,0	25,0	25,0	14,0	18,0
Ba	1674,5	474,0	645,0	4885,0	1272,0	1690,0	374,0	463,0	413,0	511,0
Be	0,5	0,5	2,0	1,0	2,0	2,0	0,5	0,5	0,5	0,8
Co	28,2	21,6	16,1	19,4	19,0	20,8	19,3	23,2	16,0	21,5
Cs	17,4	3,4	12,8	20,3	23,1	8,8	6,4	20,1	8,1	6,7
Ga	16,1	17,4	16,1	15,4	16,2	15,5	16,3	16,4	16,2	17,3
Hf	4,1	3,9	4,5	2,8	2,9	3,7	3,9	3,9	3,9	4,3
Nb	3,9	5,9	5,6	4,8	4,1	5,5	3,8	6,0	5,7	7,5
Rb	79,1	65,7	53,7	88,7	74,1	52,3	65,4	48,8	45,3	60,8
Sn	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,5	1,5
Sr	405,3	281,4	330,0	472,2	321,9	389,9	276,4	383,7	429,0	447,1
Ta	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5
Th	3,7	5,9	10,1	3,9	3,9	5,0	4,0	4,0	4,5	7,6
U	1,2	1,5	1,6	1,0	1,0	1,2	1,1	1,1	1,3	2,0
V	409,0	198,0	190,0	181,0	179,0	233,0	178,0	219,0	194,0	233,5
W	0,6	0,6	0,7	0,8	1,1	1,7	0,8	0,5	0,9	0,5
Zr	153,0	137,3	142,4	105,1	96,4	144,9	132,0	133,7	138,3	160,0
Y	17,9	17,9	20,5	19,2	19,5	23,7	25,3	25,2	18,4	23,9
La	20,4	14,5	14,8	14,3	15,2	17,2	17,3	16,2	16,6	17,9
Ce	43,5	31,1	32,6	31,2	32,1	36,8	38,5	37,3	33,9	37,5
Pr	5,1	4,4	4,3	4,2	4,2	4,9	5,4	4,8	4,6	4,8
Nd	22,3	19,1	18,9	18,8	18,9	20,4	23,2	22,0	20,4	20,7
Sm	4,5	3,8	4,0	4,1	4,2	4,7	5,4	5,1	4,2	4,5
Eu	1,2	1,0	1,1	1,2	1,2	1,4	1,5	1,4	1,2	1,3
Gd	3,8	3,4	4,1	4,1	4,1	5,0	5,4	5,3	3,9	4,6
Tb	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,5	0,7
Dy	3,2	3,1	4,1	3,8	3,8	4,5	4,6	4,9	3,5	4,4
Ho	0,5	0,6	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	1,0	0,6	0,8
Er	1,6	1,8	2,2	2,0	1,9	2,1	2,5	2,8	1,9	2,3
Tm	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3
Yb	1,7	1,7	2,2	1,9	2,0	2,2	2,5	2,8	2,0	2,3
Lu	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3
Mo	1,0	0,3	1,1	0,9	1,3	0,9	0,6	1,1	0,7	0,5
Cu	113,3	101,7	170,9	662,1	613,7	592,4	88,0	143,5	43,4	48,1
Pb	26,4	19,7	31,7	91,8	77,0	59,8	11,3	13,3	12,7	9,6
Zn	176,5	180,0	91,0	214,0	142,0	113,0	75,0	80,0	74,0	128,5
Ni	17,3	15,1	12,0	16,8	12,1	18,9	7,3	17,6	13,6	13,7
As	21,1	3,5	17,5	34,2	21,6	24,6	14,1	20,9	13,4	17,6
Cd	0,2	0,2	0,2	0,7	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1
Sb	0,5	0,1	0,3	1,3	0,4	0,9	0,1	0,2	0,4	0,2
Bi	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ag	0,1	0,1	0,2	1,8	0,9	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Au [ppb]	1,9	9,1	1,4	3,0	6,1	2,6	3,7	2,2	1,1	2,2
Hg	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Tl	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Se	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Código	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
UTM E	322545	323229	325089	325628	326062	326715	327155	328582	330446	331321
UTM N	6660027	6696545	6673309	6677386	6700876	6658609	6668117	6664145	6659989	6703355
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	57,4	45,2	56,1	60,5	51,0	71,9	57,3	58,8	57,3	51,9
Al ₂ O ₃	16,2	14,2	16,3	16,4	17,3	12,7	16,0	17,0	17,8	17,1
Fe ₂ O ₃	6,8	14,0	7,4	5,7	7,8	4,1	8,6	7,4	7,1	8,0
MgO	1,5	3,8	2,0	1,8	2,4	0,6	1,9	2,0	2,2	2,5
CaO	4,6	7,6	4,6	4,2	5,9	1,2	4,5	4,1	4,8	5,7
Na ₂ O	2,5	2,9	2,8	3,2	2,2	2,0	2,9	3,0	2,7	2,3
K ₂ O	1,9	1,4	1,7	2,1	1,5	3,6	1,7	1,6	1,3	1,3
TiO ₂	0,7	1,5	0,8	0,8	0,9	0,6	0,9	0,9	0,9	1,0
P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
MnO	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	0,9	1,2	0,9	0,4	1,0	0,1	0,4	0,2	0,5	0,9
S Total [wt%]	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sc	11,0	23,0	17,0	13,0	21,0	6,0	17,0	17,0	18,0	22,0
Ba	422,0	574,0	362,0	500,0	360,0	646,0	373,0	361,0	301,0	341,0
Be	1,0	1,0	0,5	3,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0
Co	13,7	26,6	15,7	17,6	19,4	6,5	15,0	16,8	15,6	18,3
Cs	6,4	8,0	8,3	13,3	10,5	4,6	7,5	6,4	7,1	8,3
Ga	14,5	17,6	16,3	17,6	17,0	11,5	14,5	16,4	16,3	17,1
Hf	3,7	4,0	4,6	4,2	2,8	7,0	4,8	4,4	3,2	4,2
Nb	3,6	9,1	3,9	8,2	3,6	7,4	4,8	3,8	3,6	4,5
Rb	58,8	41,8	55,5	77,9	44,9	118,9	52,4	48,4	38,1	41,6
Sn	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0
Sr	322,2	328,9	334,7	406,3	299,7	115,5	305,1	326,7	334,6	332,7
Ta	0,3	0,6	0,4	0,5	0,3	0,7	0,4	0,3	0,3	0,3
Th	5,6	4,4	5,3	7,4	3,3	14,8	11,4	4,9	3,1	3,8
U	1,3	1,5	2,4	2,6	0,9	2,8	2,9	1,2	0,8	0,9
V	119,0	356,0	146,0	117,0	178,0	61,0	172,0	154,0	148,0	162,0
W	0,9	0,9	0,9	1,2	0,8	1,5	0,6	0,6	0,7	0,5
Zr	117,0	148,9	177,2	156,0	100,3	260,6	177,3	165,2	109,1	136,6
Y	18,4	21,1	22,1	21,5	19,1	16,5	21,3	22,8	18,2	25,6
La	14,2	17,9	15,3	23,1	11,3	16,1	15,6	16,8	11,5	15,7
Ce	29,7	39,6	33,6	47,8	26,6	32,6	33,0	34,1	25,5	36,9
Pr	3,8	5,0	4,3	6,0	3,6	4,0	4,4	4,7	3,7	4,9
Nd	15,3	21,0	17,6	22,0	13,4	15,5	21,3	18,2	15,9	21,6
Sm	3,4	4,8	4,2	4,5	3,9	3,1	4,2	4,4	3,6	5,1
Eu	1,0	1,4	1,1	1,2	1,1	0,6	1,2	1,2	1,1	1,4
Gd	3,7	4,6	4,3	4,3	3,8	2,8	4,3	4,4	3,4	5,2
Tb	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7
Dy	3,1	4,2	4,0	3,7	3,5	2,8	3,8	4,5	3,5	4,9
Ho	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8
Er	1,7	2,1	2,4	2,2	2,0	1,7	2,3	2,0	1,8	2,4
Tm	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3
Yb	2,0	2,0	2,7	2,0	2,1	2,2	2,2	2,2	2,1	2,3
Lu	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
Mo	0,7	1,9	0,8	0,9	0,8	1,0	0,9	0,6	0,5	0,7
Cu	43,8	121,8	53,2	744,7	99,8	17,8	48,4	49,9	59,7	90,8
Pb	14,7	18,9	9,3	12,0	18,9	10,2	9,7	8,8	8,5	18,5
Zn	78,0	94,0	61,0	209,0	75,0	30,0	57,0	53,0	57,0	85,0
Ni	3,8	46,7	7,2	11,6	10,0	1,8	7,0	7,3	6,2	14,5
As	17,0	17,8	13,3	79,3	26,6	5,5	13,4	12,1	11,1	17,7
Cd	0,1	0,2	0,1	0,7	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Sb	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2
Bi	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ag	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Au [ppb]	1,2	8,9	0,6	4,0	36,4	0,0	0,7	1,1	8,8	1,2
Hg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
Tl	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Se	0,0	0,0	0,6	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Código	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
UTM E	331857	332556	333758	334079	334712	335513	335683	337340	337349	337548
UTM N	6655135	6705792	6672625	6675538	6669005	6708316	6684144	6711053	6680152	6667887
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	56,7	51,3	53,3	54,0	52,3	50,8	48,8	53,3	39,5	56,6
Al ₂ O ₃	17,7	16,6	16,9	16,8	16,0	17,7	18,8	17,4	11,4	16,6
Fe ₂ O ₃	9,0	10,4	9,1	6,5	11,5	9,0	12,6	9,1	31,2	8,0
MgO	2,4	2,2	1,8	2,0	3,0	2,0	2,3	1,8	2,4	2,4
CaO	5,7	5,6	4,7	3,0	5,7	4,9	7,8	4,0	5,3	4,8
Na ₂ O	3,4	2,6	2,5	1,9	2,7	2,8	2,9	2,7	2,2	2,7
K ₂ O	1,0	1,2	1,3	2,0	1,3	1,4	0,7	1,5	0,9	1,4
TiO ₂	0,9	1,3	1,1	0,8	1,3	1,4	1,5	1,4	3,9	0,9
P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2
MnO	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	0,3	0,8	0,5	1,3	0,3	1,0	0,1	1,0	0,1	0,3
S Total [wt%]	0,0	0,0	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Sc	15,0	22,0	18,0	14,0	22,0	22,0	14,5	22,0	25,0	18,0
Ba	293,0	311,0	326,0	446,0	273,0	394,0	213,5	449,0	181,0	323,0
Be	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	2,0	1,0	0,5	1,0	0,5
Co	17,5	18,0	18,4	29,1	20,5	20,2	21,8	19,4	26,9	17,2
Cs	2,1	3,9	5,4	28,9	2,7	8,8	0,9	9,5	1,7	3,5
Ga	17,0	17,0	18,4	17,6	18,5	19,1	20,0	18,0	20,8	17,2
Hf	3,6	4,3	3,5	3,9	14,6	4,6	3,5	5,2	71,6	4,9
Nb	3,5	5,0	4,8	7,3	6,6	7,7	3,1	7,8	23,0	5,1
Rb	23,7	34,0	43,2	87,9	43,2	43,9	17,3	46,6	27,8	48,3
Sn	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	4,0	2,0
Sr	428,9	370,0	330,6	335,7	380,0	299,4	430,4	271,7	261,0	372,2
Ta	0,2	0,3	0,2	0,4	0,4	0,5	0,2	0,5	2,1	0,3
Th	2,1	3,3	3,0	7,8	30,0	3,8	3,8	4,2	98,7	6,4
U	0,6	0,9	0,9	4,7	4,3	1,0	1,0	1,1	17,1	1,6
V	213,0	218,0	134,0	109,0	311,0	191,0	394,5	177,0	948,0	185,0
W	0,0	0,5	1,0	1,8	0,8	0,8	0,3	0,6	3,1	0,8
Zr	122,5	149,6	142,6	137,7	563,1	180,7	130,9	194,6	2624,0	192,4
Y	16,6	25,3	24,6	26,2	29,6	24,1	15,4	29,4	43,4	21,2
La	12,0	15,6	15,1	21,9	17,8	17,8	8,9	22,3	28,1	16,3
Ce	25,6	37,3	37,6	47,2	44,6	43,2	20,0	53,5	64,7	37,6
Pr	3,6	4,9	4,8	6,0	5,7	5,7	2,7	6,9	8,4	4,8
Nd	12,8	20,9	21,3	25,2	23,8	22,7	11,2	30,2	34,9	19,2
Sm	3,3	4,9	5,0	5,2	5,5	5,5	2,8	6,7	7,7	4,2
Eu	1,0	1,5	1,4	1,3	1,1	1,4	0,9	1,7	1,3	1,1
Gd	3,5	5,1	4,6	4,9	5,1	5,1	2,8	6,6	7,6	4,1
Tb	0,5	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0,8	1,1	0,7
Dy	3,3	4,7	4,4	4,4	4,8	4,3	2,7	5,5	7,6	4,1
Ho	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9	0,5	0,9	1,4	0,8
Er	1,6	2,4	2,7	2,6	2,9	2,4	1,5	2,5	4,4	2,3
Tm	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,7	0,4
Yb	1,7	2,3	2,4	2,3	3,2	2,5	1,6	2,5	5,1	2,3
Lu	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,8	0,3
Mo	0,5	0,5	0,9	1,8	0,6	0,6	0,9	0,5	3,0	0,9
Cu	55,6	79,9	49,4	3542,9	71,8	91,8	57,3	100,6	61,9	59,5
Pb	6,7	12,2	8,8	20,0	7,7	23,1	6,7	30,7	7,2	9,9
Zn	40,0	83,0	70,0	743,0	76,0	81,0	96,5	94,0	51,0	67,0
Ni	5,4	14,2	8,7	21,3	9,7	18,0	10,9	20,6	14,9	9,3
As	4,8	7,6	17,8	392,7	4,4	12,9	5,1	17,8	4,9	12,1
Cd	0,1	0,2	0,1	2,7	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1
Sb	0,4	0,1	0,4	0,5	0,1	0,4	0,1	0,6	0,1	0,2
Bi	0,1	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ag	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Au [ppb]	3,0	3,3	2,8	15,2	0,0	0,9	1,4	1,3	2,3	1,5
Hg	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tl	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Se	0,0	0,0	1,2	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5

Código	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
UTM E	338111	338121	339242	341212	341483	342209	346715	351535	352739	352974
UTM N	6683129	6684568	6676522	6657111	6676960	6664498	6679985	6685093	6679920	6691019
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	53,7	54,6	58,7	53,3	61,9	50,6	58,4	58,0	62,4	61,8
Al ₂ O ₃	15,7	18,1	16,2	16,7	15,9	16,6	16,5	16,5	13,8	16,3
Fe ₂ O ₃	10,2	6,7	6,6	9,2	5,6	11,1	6,2	6,0	7,7	5,2
MgO	3,1	3,0	1,8	2,4	1,7	3,7	1,9	1,9	1,5	1,6
CaO	6,0	4,9	3,0	4,5	3,4	6,1	2,6	3,6	2,8	2,9
Na ₂ O	3,3	2,9	2,5	2,5	3,2	3,0	2,2	2,5	3,5	2,9
K ₂ O	1,4	1,6	2,1	1,5	2,1	1,4	2,1	2,0	2,5	2,1
TiO ₂	1,2	0,9	0,9	1,0	0,8	1,1	0,8	0,9	1,0	0,7
P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
MnO	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	0,5	0,6	0,5	1,1	0,3	1,7	0,4	0,5	0,9	0,1
S Total [wt%]	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	0,3	0,3	0,1	0,2
Sc	24,0	25,0	13,0	18,0	12,0	28,0	14,0	14,0	15,0	11,0
Ba	257,0	322,0	519,0	350,0	526,0	266,0	486,0	587,0	563,0	566,0
Be	2,0	0,5	0,5	0,5	0,5	2,0	0,5	0,5	1,0	2,0
Co	19,1	19,8	24,8	18,7	23,9	27,3	20,3	35,3	12,4	18,3
Cs	2,7	6,1	21,7	3,2	19,3	2,8	25,5	30,3	5,6	19,3
Ga	16,8	18,2	17,5	16,7	15,9	16,7	18,1	16,1	16,9	17,9
Hf	11,8	3,4	5,2	8,6	5,5	3,5	3,8	5,2	17,8	4,0
Nb	6,5	3,5	8,9	5,5	8,6	3,8	9,2	8,4	18,0	8,3
Rb	44,9	67,2	79,0	47,2	79,3	56,5	87,2	82,8	86,3	81,5
Sn	2,0	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	2,0	4,0	1,0
Sr	287,7	330,6	377,0	411,7	415,2	381,9	381,6	446,9	226,3	466,3
Ta	0,5	0,3	0,8	0,4	0,6	0,3	0,7	0,7	1,4	0,5
Th	20,3	9,1	9,9	5,2	8,6	3,1	8,5	9,2	15,9	7,8
U	4,9	1,8	3,9	1,7	3,1	1,0	2,8	4,3	4,4	2,8
V	232,0	125,0	113,0	217,0	111,0	253,0	108,0	114,0	146,0	97,0
W	0,8	1,0	2,3	0,7	1,6	1,0	1,6	2,0	1,3	1,3
Zr	405,2	129,8	180,7	322,5	205,3	114,0	145,0	190,5	679,8	148,8
Y	35,8	29,0	22,2	24,6	23,6	26,0	20,0	25,6	53,5	19,5
La	20,9	15,4	22,6	16,6	25,4	14,2	21,0	23,8	42,0	20,3
Ce	49,1	35,3	48,1	38,9	52,8	31,0	47,1	50,6	90,8	42,3
Pr	7,0	5,0	6,0	4,9	6,2	4,2	5,4	6,5	12,2	5,3
Nd	27,5	20,4	26,1	22,8	24,0	19,1	22,5	25,3	46,9	20,3
Sm	6,8	5,0	4,9	4,7	4,8	4,3	4,6	5,4	10,3	4,0
Eu	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3	1,3	1,2	1,4	1,7	1,1
Gd	7,0	5,3	4,5	4,7	4,6	4,3	4,4	5,3	9,4	3,6
Tb	1,0	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	1,5	0,6
Dy	6,5	5,2	4,3	4,4	4,2	4,7	3,6	4,5	9,5	3,1
Ho	1,2	1,0	0,8	0,9	0,9	1,0	0,7	0,8	1,7	0,7
Er	3,6	3,0	2,2	2,8	2,5	3,0	2,1	2,4	5,0	2,0
Tm	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,8	0,3
Yb	3,7	2,9	2,2	2,6	2,4	3,0	2,1	2,1	4,9	2,0
Lu	0,6	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,8	0,3
Mo	0,2	0,3	1,5	0,3	1,3	0,4	1,5	2,1	0,5	1,4
Cu	63,1	109,7	2169,5	54,1	1323,8	114,0	726,3	2376,6	43,0	491,9
Pb	4,8	7,5	19,6	6,3	12,8	7,2	18,6	17,3	45,0	15,0
Zn	38,0	58,0	465,0	54,0	476,0	59,0	236,0	748,0	175,0	175,0
Ni	8,6	11,1	19,1	7,3	18,0	12,5	13,4	27,9	8,8	10,0
As	4,0	5,5	269,0	6,1	128,2	4,8	399,3	248,8	10,5	213,8
Cd	0,1	0,1	1,5	0,1	1,2	0,1	0,7	2,6	0,3	0,7
Sb	0,1	0,1	0,3	0,1	0,8	0,1	0,4	1,0	0,2	1,0
Bi	0,1	0,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,9	0,6	0,1	0,7
Ag	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Au [ppb]	0,8	1,6	39,7	0,0	5,0	1,2	8,5	5,6	2,5	3,0
Hg	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
Tl	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	0,1	0,6	0,4	0,1	0,4
Se	0,0	0,0	0,7	0,0	0,9	0,0	0,8	0,0	0,0	1,0

Código	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
UTM E	354608	355100	356197	356303	356312	356835	357148	358119	360294	361729
UTM N	6675797	6695858	6664001	6655349	6653307	6648432	6659538	6668562	6641907	6666271
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	61,0	59,6	53,4	58,9	63,2	62,8	58,3	61,5	64,5	66,7
Al ₂ O ₃	14,8	16,2	13,3	14,3	14,1	14,1	14,1	14,7	13,5	14,4
Fe ₂ O ₃	5,9	5,7	6,9	6,6	6,5	6,4	5,7	5,7	5,4	3,8
MgO	1,9	1,7	2,0	1,7	1,7	2,0	1,6	1,7	2,1	1,7
CaO	2,9	2,9	3,3	3,5	3,6	4,4	3,2	3,2	3,5	2,6
Na ₂ O	3,6	2,4	2,8	3,2	3,2	2,7	3,3	3,8	2,8	3,8
K ₂ O	2,4	2,1	2,2	2,3	2,5	2,0	2,2	2,1	2,2	2,9
TiO ₂	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,8	1,0	0,8
P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
MnO	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	1,5	0,2	5,2	2,5	0,8	1,0	3,3	1,3	0,9	0,5
S Total [wt%]	0,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2
Sc	15,0	12,0	21,0	18,0	18,0	19,0	16,0	10,0	18,0	10,0
Ba	573,0	506,0	584,0	455,0	406,0	353,0	511,0	483,0	379,0	618,0
Be	1,0	1,0	5,0	1,0	2,0	4,0	2,0	3,0	3,0	4,0
Co	21,0	21,2	13,6	10,8	9,9	11,7	10,8	23,2	10,9	8,5
Cs	7,5	24,7	4,9	4,2	3,7	3,9	3,3	5,8	4,2	4,2
Ga	17,5	16,5	16,4	15,8	14,8	14,5	17,1	16,3	15,0	15,1
Hf	10,1	4,2	14,1	17,3	15,5	14,8	13,7	12,3	17,0	8,5
Nb	12,3	8,2	14,5	13,4	15,5	10,2	13,5	10,4	13,6	8,8
Rb	89,5	82,8	85,9	92,5	91,8	79,4	84,7	72,7	82,4	94,4
Sn	3,0	2,0	4,0	3,0	3,0	3,0	4,0	3,0	5,0	3,0
Sr	246,1	419,8	221,0	237,7	215,9	243,6	237,5	272,3	223,8	233,7
Ta	1,0	0,7	1,1	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0	1,3	0,9
Th	10,1	7,8	12,5	17,9	16,0	20,0	10,4	13,0	17,2	16,1
U	4,4	2,7	9,2	8,5	4,6	7,5	6,1	6,1	7,4	5,4
V	95,0	106,0	127,0	119,0	116,0	136,0	112,0	94,0	103,0	65,0
W	1,4	1,5	2,0	1,5	1,5	2,0	1,4	1,6	4,4	1,9
Zr	362,9	146,9	572,5	651,0	565,0	517,5	550,5	439,1	622,3	320,5
Y	46,8	20,6	51,0	38,5	42,1	36,9	37,7	44,8	36,9	26,3
La	38,3	21,4	39,1	30,8	30,7	27,4	29,6	39,4	33,8	39,3
Ce	80,0	46,1	79,9	66,0	67,9	61,1	65,3	85,7	71,3	79,5
Pr	10,0	5,6	10,9	8,1	8,8	8,0	8,5	11,1	8,9	9,8
Nd	40,5	21,9	45,5	33,9	34,5	32,9	35,2	43,6	32,3	39,3
Sm	8,9	4,4	9,5	7,0	7,4	6,7	7,5	9,5	7,2	7,0
Eu	1,7	1,1	1,7	1,4	1,2	1,2	1,5	1,6	1,1	1,2
Gd	8,7	4,1	9,6	6,7	7,3	6,9	7,2	9,6	6,5	6,0
Tb	1,6	0,6	1,5	1,2	1,1	1,1	1,1	1,4	1,1	0,7
Dy	8,0	4,0	9,6	6,7	7,1	6,3	6,4	8,2	6,9	4,9
Ho	1,7	0,7	1,8	1,5	1,4	1,2	1,3	1,5	1,2	0,8
Er	4,9	1,8	5,6	4,3	4,0	3,7	3,9	4,4	3,5	2,3
Tm	0,7	0,3	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,3
Yb	4,8	2,1	5,1	4,5	4,4	3,9	3,8	4,2	4,1	2,4
Lu	0,7	0,3	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
Mo	0,8	1,5	0,8	0,8	0,9	0,8	0,7	1,2	0,9	1,3
Cu	78,6	741,9	28,6	23,5	26,4	26,0	47,5	94,6	23,1	32,6
Pb	14,9	17,1	26,1	10,8	7,7	7,3	15,7	9,7	9,5	19,6
Zn	333,0	230,0	140,0	68,0	52,0	41,0	82,0	329,0	58,0	110,0
Ni	14,0	13,9	8,1	5,9	5,4	4,3	6,7	21,4	6,8	12,3
As	23,2	354,6	5,1	4,4	3,9	4,8	4,4	46,3	6,0	8,9
Cd	0,5	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,6	0,1	0,2
Sb	0,1	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Bi	0,2	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Ag	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Au [ppb]	0,0	13,1	0,6	0,6	0,0	0,0	2,0	0,0	0,5	0,0
Hg	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tl	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Se	0,0	0,6	0,5	0,6	0,0	0,0	0,5	0,0	0,6	0,0

Código	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
UTM E	364130	364506	366752	367795	368370	369073	371676	371756	371799	374811
UTM N	6638039	6697361	6664211	6696309	6661094	6699259	6703507	6638037	6693582	6689088
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	63,3	59,5	55,7	59,2	58,4	62,8	66,7	67,7	59,4	57,7
Al ₂ O ₃	13,6	16,4	14,9	16,4	14,8	15,2	14,1	12,5	16,1	16,4
Fe ₂ O ₃	4,4	6,3	5,9	6,2	4,7	4,9	4,4	3,2	6,8	7,5
MgO	1,5	1,8	1,1	1,8	1,3	2,4	2,3	1,1	1,8	1,9
CaO	2,9	3,9	2,6	2,7	2,6	2,7	1,9	2,4	3,9	3,1
Na ₂ O	3,2	2,7	3,1	2,3	3,2	2,7	2,3	2,8	2,6	2,3
K ₂ O	2,4	2,1	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,9	2,1	2,0
TiO ₂	0,8	1,0	0,7	0,8	0,5	0,8	0,7	0,7	1,0	1,0
P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2
MnO	0,1	0,2	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	2,8	0,2	3,4	0,1	3,0	0,6	0,2	2,0	0,2	0,2
S Total [wt%]	0,0	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,4
Sc	13,0	13,0	9,0	12,0	10,0	13,0	13,0	10,0	13,0	14,0
Ba	341,0	664,0	431,0	513,0	402,0	457,0	428,0	372,0	687,0	584,0
Be	4,0	1,0	5,0	2,0	4,0	2,0	1,0	2,0	0,5	2,0
Co	9,1	27,9	52,7	21,9	55,5	9,9	6,5	6,1	26,0	30,0
Cs	2,9	25,4	9,1	26,7	8,5	4,2	3,7	4,0	24,5	29,0
Ga	14,8	16,9	17,0	17,8	15,2	16,0	14,5	12,9	16,7	17,0
Hf	11,2	5,9	13,3	4,5	9,0	3,9	4,4	14,5	6,2	5,6
Nb	14,7	10,5	13,6	8,7	10,0	8,4	7,5	14,2	10,8	9,9
Rb	83,1	83,8	81,3	87,8	89,8	97,5	105,2	105,9	80,6	78,8
Sn	3,0	2,0	4,0	2,0	5,0	3,0	4,0	4,0	2,0	2,0
Sr	206,3	464,3	221,7	412,7	200,6	288,0	195,3	180,3	443,4	389,0
Ta	0,9	0,9	1,1	0,7	1,1	0,7	0,8	1,5	0,7	0,6
Th	11,3	8,9	19,7	8,5	14,6	10,0	10,6	13,4	8,6	8,5
U	14,0	3,4	15,5	3,0	13,2	2,7	3,3	19,0	3,3	3,0
V	64,0	137,0	83,0	111,0	58,0	112,0	112,0	55,0	149,0	141,0
W	4,2	2,2	6,1	1,4	2,2	2,5	3,8	2,8	2,5	2,3
Zr	349,1	210,3	468,0	157,0	311,8	153,3	151,3	522,2	223,7	218,2
Y	31,8	23,5	91,7	23,0	76,0	20,1	21,8	42,8	23,3	23,0
La	31,2	28,2	79,6	22,6	64,4	24,6	27,6	35,6	29,3	26,1
Ce	62,5	56,1	168,6	48,2	127,2	47,7	55,3	77,3	56,2	53,9
Pr	7,5	7,0	21,4	5,8	15,9	5,6	6,2	9,7	6,9	6,7
Nd	33,7	27,5	88,1	22,1	62,4	20,7	21,9	34,9	25,7	26,3
Sm	6,1	5,6	19,8	4,6	14,7	4,2	4,1	7,8	5,4	5,3
Eu	1,0	1,4	3,0	1,2	2,4	1,0	1,0	0,9	1,4	1,3
Gd	6,2	4,9	20,1	4,3	15,4	3,8	4,0	7,3	4,8	5,0
Tb	0,8	0,7	2,8	0,6	2,5	0,6	0,6	1,2	0,7	0,7
Dy	6,0	4,3	16,6	4,0	12,8	3,3	3,5	7,5	4,2	4,2
Ho	1,2	0,7	3,0	0,7	2,7	0,7	0,8	1,4	0,7	0,8
Er	3,2	2,0	8,1	2,0	7,2	2,2	2,2	4,3	2,2	2,2
Tm	0,5	0,3	1,1	0,3	1,0	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3
Yb	3,2	2,2	7,1	1,8	6,1	2,1	2,2	5,0	2,0	2,5
Lu	0,6	0,3	1,0	0,3	0,9	0,3	0,3	0,7	0,3	0,4
Mo	2,5	1,7	2,9	1,7	3,5	3,3	6,4	1,3	1,6	2,5
Cu	12,8	830,4	329,6	982,1	329,0	197,1	454,1	10,9	693,1	1271,3
Pb	8,5	19,5	11,8	18,4	15,5	33,7	37,8	7,2	19,2	20,6
Zn	52,0	437,0	702,0	276,0	581,0	236,0	424,0	42,0	394,0	672,0
Ni	5,4	20,1	37,9	14,9	27,2	17,0	14,6	5,0	19,2	25,4
As	13,1	146,6	163,3	354,3	152,2	17,9	25,9	13,5	142,4	240,0
Cd	0,2	1,5	1,3	1,1	1,4	1,4	1,3	0,1	1,4	2,2
Sb	0,1	1,2	0,1	1,2	0,1	0,2	0,3	0,1	1,1	1,1
Bi	0,4	0,4	0,3	0,9	0,7	0,3	0,3	0,1	0,4	0,5
Ag	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Au [ppb]	2,9	2,9	1,5	15,7	0,0	14,2	14,6	0,0	2,6	3,0
Hg	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Tl	0,2	0,3	0,1	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4
Se	0,5	0,0	0,0	0,8	1,7	0,9	0,9	0,0	0,0	0,6

Código	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
UTM E	376067	377633	379503	382321	386492	390591	393969	394750	394797	395045
UTM N	6636549	6683545	6681680	6684056	6685789	6685122	6683482	6676920	6683917	6678398
Elementos mayores [wt%]										
SiO2	72,8	58,4	56,9	57,1	58,9	56,8	57,8	57,6	55,8	57,3
Al2O3	11,2	16,9	14,8	16,4	15,7	16,4	17,0	14,1	16,8	15,3
Fe2O3	2,4	7,1	6,1	8,5	6,5	8,6	7,7	7,5	8,8	4,9
MgO	0,7	1,9	1,3	1,9	1,6	2,0	2,1	2,1	2,2	1,6
CaO	1,7	3,0	2,3	3,1	3,8	3,1	2,8	5,4	2,9	6,7
Na2O	2,4	2,3	2,1	2,4	2,7	2,4	2,1	3,1	2,3	2,7
K2O	3,4	2,1	2,4	2,0	2,1	2,0	2,1	2,2	2,0	2,2
TiO2	0,6	1,0	0,6	1,2	0,9	1,2	1,0	1,2	1,1	0,8
P2O5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
MnO	0,1	0,2	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	0,1	0,1
Cr2O3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	1,3	0,1	2,0	0,1	0,1	0,1	0,0	1,0	0,0	1,0
S Total [wt%]	0,0	0,3	0,1	0,4	0,7	0,4	0,4	0,0	0,5	0,1
Sc	9,0	15,0	14,5	14,0	12,0	15,0	16,0	15,0	16,0	11,0
Ba	325,0	572,0	942,5	566,0	597,0	598,0	560,0	777,0	590,0	545,0
Be	0,5	2,0	1,3	0,5	1,0	3,0	3,0	1,0	3,0	3,0
Co	3,4	29,9	125,1	26,2	18,4	20,9	17,2	26,3	18,1	10,3
Cs	3,6	31,8	8,7	27,9	19,7	27,6	31,7	15,3	32,9	27,3
Ga	11,2	18,0	13,7	17,5	16,7	17,6	18,9	16,4	19,7	17,0
Hf	12,8	4,1	10,1	5,7	4,5	6,2	4,9	6,7	5,3	4,8
Nb	10,6	8,2	11,3	9,7	8,2	9,5	7,7	13,5	22,3	9,2
Rb	119,5	82,2	107,4	72,2	77,3	77,6	86,5	91,5	84,6	81,9
Sn	4,0	1,0	8,5	2,0	2,0	2,0	1,0	3,0	3,0	2,0
Sr	123,7	429,8	165,4	361,2	473,0	372,7	386,3	290,3	364,5	427,4
Ta	1,2	0,6	1,4	0,7	0,7	0,6	0,7	1,0	0,6	0,7
Th	13,5	8,4	22,9	7,4	8,3	9,4	7,7	8,1	8,4	8,9
U	12,6	3,6	12,5	2,9	2,7	3,5	2,8	2,9	2,6	2,7
V	37,0	144,0	68,0	155,0	133,0	174,0	150,0	165,0	187,0	86,0
W	2,0	1,5	26,4	2,0	1,3	2,4	1,6	1,9	2,1	1,9
Zr	451,5	184,8	311,7	209,5	177,9	236,1	177,1	281,1	208,9	150,1
Y	48,8	21,1	89,8	21,5	21,7	21,1	19,2	39,4	20,2	19,4
La	36,6	25,4	58,3	22,7	23,7	22,4	23,6	38,0	21,9	25,3
Ce	81,1	50,7	131,3	47,6	50,6	49,2	48,7	81,9	47,4	53,0
Pr	10,4	6,4	16,8	5,8	6,0	5,9	5,9	9,9	5,9	6,5
Nd	39,8	25,9	69,5	22,8	22,1	22,5	24,4	40,2	22,1	25,9
Sm	8,4	4,7	15,5	4,7	4,5	4,7	4,5	8,4	4,5	4,9
Eu	0,8	1,2	3,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,9	1,1	1,3
Gd	7,9	4,4	16,7	4,4	4,2	4,3	4,4	8,1	4,0	4,4
Tb	1,4	0,7	2,5	0,6	0,6	0,6	0,6	1,4	0,6	0,6
Dy	8,6	3,9	15,3	3,9	3,8	3,8	4,5	6,8	3,5	3,8
Ho	1,7	0,8	2,8	0,7	0,7	0,7	0,7	1,4	0,7	0,6
Er	4,9	1,9	8,4	2,0	2,1	2,1	2,0	4,0	1,9	1,8
Tm	0,8	0,3	1,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,3	0,3
Yb	4,9	2,0	7,5	2,0	2,0	2,0	2,0	3,6	1,8	1,9
Lu	0,7	0,3	1,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,3
Mo	0,8	2,5	4,4	2,1	1,7	2,4	2,5	0,7	2,6	0,9
Cu	6,5	1218,5	1352,2	1339,0	404,4	689,6	499,1	30,2	245,1	19,4
Pb	8,3	22,4	50,2	21,2	17,5	20,3	23,6	16,4	22,6	13,4
Zn	35,0	673,0	1168,5	612,0	151,0	350,0	148,0	456,0	114,0	91,0
Ni	3,2	26,1	64,6	21,1	11,3	11,5	9,0	24,1	8,2	9,6
As	10,6	247,3	52,8	259,5	191,2	239,0	252,5	14,6	295,6	61,3
Cd	0,1	1,9	4,6	2,1	0,6	1,0	0,3	2,8	0,3	0,4
Sb	0,1	0,9	0,2	1,3	1,4	1,5	1,4	0,4	1,7	0,8
Bi	0,1	0,6	0,9	0,5	0,8	0,5	0,6	0,2	0,6	0,2
Ag	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Au [ppb]	1,0	2,2	0,8	5,3	7,3	2,5	2,3	0,0	5,9	0,0
Hg	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
Tl	0,1	0,4	0,2	0,4	0,3	0,4	0,4	0,1	0,5	0,2
Se	0,6	0,0	0,5	0,0	0,5	0,9	0,0	1,0	0,6	0,0

Código	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
UTM E	395258	395297	396856	397234	397857	398523	398628	399510	400591	401490
UTM N	6677833	6671751	6688115	6667106	6665385	6691034	6691103	6662204	6675817	6653498
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	55,6	57,5	56,7	58,4	59,7	57,9	53,7	62,3	59,2	60,6
Al ₂ O ₃	15,8	13,8	16,5	14,2	13,6	15,8	17,9	12,8	16,1	15,5
Fe ₂ O ₃	7,0	8,2	8,1	6,0	6,9	7,6	8,0	6,1	6,4	5,2
MgO	1,6	2,2	2,0	2,3	2,1	2,0	2,4	1,9	1,4	1,5
CaO	6,0	5,3	3,6	6,0	4,7	3,8	5,0	4,8	3,5	3,8
Na ₂ O	2,9	3,1	2,4	3,0	3,2	2,4	2,7	3,4	2,7	2,8
K ₂ O	2,1	2,1	2,0	1,9	2,2	1,9	1,7	2,3	1,9	2,4
TiO ₂	1,1	1,3	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	0,6
P ₂ O ₅	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2
MnO	0,1	0,3	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	1,1	0,9	0,2	0,7	0,8	0,3	0,1	0,7	0,2	0,4
S Total [wt%]	0,2	0,1	0,3	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,0
Sc	11,0	15,0	14,0	15,0	14,0	14,0	15,0	14,0	9,5	10,0
Ba	752,0	860,0	532,0	614,0	804,0	522,0	386,0	891,0	876,5	727,0
Be	1,8	2,0	2,0	2,0	3,0	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0
Co	14,6	25,2	19,5	13,6	26,6	20,0	18,6	11,9	17,1	34,1
Cs	30,5	14,2	21,7	14,3	12,3	23,2	31,9	8,1	17,9	18,7
Ga	17,6	16,1	17,9	15,4	14,5	18,0	19,6	15,7	19,0	16,9
Hf	5,9	7,0	6,5	5,5	6,7	5,4	3,8	7,5	6,9	6,1
Nb	10,4	13,6	9,6	11,2	12,1	8,7	6,8	14,0	11,3	13,9
Rb	78,9	77,3	73,2	69,8	75,4	76,1	69,7	79,2	75,0	93,6
Sn	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	3,0	1,5	2,0
Sr	551,5	266,9	427,2	276,1	241,2	390,8	528,0	165,9	602,9	347,5
Ta	0,8	0,9	0,7	0,7	0,8	0,7	0,5	0,9	0,8	0,9
Th	9,4	8,0	8,2	6,5	7,8	7,5	6,1	8,1	9,3	9,3
U	3,1	2,5	2,3	1,8	2,0	2,2	1,9	2,0	3,4	4,5
V	149,0	177,0	170,0	102,0	140,0	155,0	158,0	115,0	135,5	92,0
W	1,6	1,7	1,2	2,0	1,1	1,5	1,4	1,5	1,8	1,9
Zr	222,7	277,3	235,7	216,5	245,8	198,1	143,9	290,1	265,8	212,6
Y	15,7	37,4	22,2	26,2	31,9	20,8	18,7	34,7	15,5	53,8
La	25,7	32,6	25,7	25,1	30,4	25,5	18,0	33,2	27,8	45,7
Ce	53,9	69,9	55,6	52,5	63,1	52,0	40,5	70,6	55,8	92,8
Pr	6,2	9,1	6,5	6,9	8,0	6,2	5,0	8,8	6,4	13,1
Nd	25,9	36,3	24,7	28,5	30,1	25,5	19,7	34,8	23,4	52,1
Sm	4,9	8,4	4,8	6,0	6,9	4,6	4,0	7,4	4,5	11,8
Eu	1,3	1,9	1,2	1,5	1,6	1,3	1,2	1,7	1,2	2,6
Gd	3,6	7,9	4,2	5,4	5,9	4,3	3,8	6,9	3,7	12,3
Tb	0,6	1,3	0,6	0,7	1,0	0,6	0,5	1,0	0,5	1,9
Dy	3,1	7,3	3,7	4,9	6,0	3,9	3,3	6,5	3,0	9,3
Ho	0,6	1,3	0,7	0,9	1,1	0,7	0,6	1,1	0,5	1,8
Er	1,7	3,6	2,0	2,6	3,3	2,1	1,8	3,3	1,5	4,8
Tm	0,3	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3	0,3	0,5	0,2	0,7
Yb	1,8	3,5	2,1	2,5	3,1	1,9	1,7	3,3	1,5	4,3
Lu	0,3	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3	0,3	0,5	0,2	0,6
Mo	1,2	0,6	1,7	0,4	0,6	1,7	1,6	0,2	1,1	1,1
Cu	27,7	32,7	261,8	18,5	26,0	47,6	298,7	11,8	29,7	103,0
Pb	37,6	16,8	20,7	17,5	13,4	18,3	15,8	10,6	14,6	21,3
Zn	82,5	351,0	128,0	68,0	181,0	139,0	96,0	68,0	91,0	723,0
Ni	8,8	23,7	10,4	19,7	23,6	9,8	7,2	15,1	10,3	20,6
As	116,6	13,3	225,5	13,5	10,2	214,5	238,8	5,6	100,3	50,4
Cd	0,3	2,4	0,4	0,4	1,9	0,4	0,3	0,8	0,5	2,8
Sb	2,2	0,2	1,3	0,2	0,1	1,4	0,9	0,1	0,9	0,1
Bi	0,4	0,1	0,8	0,1	0,1	0,7	0,7	0,1	0,4	0,4
Ag	1,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Au [ppb]	17,6	2,2	3,6	0,0	3,8	1,1	2,4	0,0	1,8	0,7
Hg	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
Tl	0,3	0,1	0,4	0,1	0,1	0,4	0,2	0,3	0,4	0,1
Se	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,8	0,6	0,0	0,0	0,0

Código	111	112	113	114	115	116	117	118	t-1	t-2
UTM E	401510	402977	403535	404278	404972	407646	411638	415442	377633	382321
UTM N	6652539	6652109	6676946	6651823	6680528	6650678	6657431	6662999	6683545	6684056
Elementos mayores [wt%]										
SiO ₂	59,3	64,9	61,8	64,2	56,2	65,1	65,0	60,6	64,0	58,9
Al ₂ O ₃	15,3	15,3	16,0	12,1	17,1	15,6	15,0	15,7	14,1	15,1
Fe ₂ O ₃	6,9	4,1	4,9	6,9	7,3	4,1	4,3	6,6	6,8	7,5
MgO	1,8	1,2	1,3	0,5	1,7	1,3	1,3	2,7	1,6	2,0
CaO	3,5	2,9	2,6	0,9	5,3	2,9	4,1	4,7	2,9	3,9
Na ₂ O	2,7	3,2	2,5	2,0	3,1	3,3	3,5	3,4	3,2	3,0
K ₂ O	1,9	2,7	2,0	2,8	1,9	2,6	2,3	2,5	2,8	2,7
TiO ₂	0,9	0,5	0,8	0,3	1,2	0,5	0,5	0,8	1,1	1,1
P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
MnO	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]										
C Total [wt%]	1,2	0,2	0,1	2,6	0,4	0,2	0,3	0,1	0,2	0,4
S Total [wt%]	0,1	0,0	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Sc	10,0	10,0	9,0	9,0	11,0	10,0	10,0	13,0	14,0	16,0
Ba	612,0	785,0	554,0	543,0	696,0	763,0	735,0	627,0	710,0	734,0
Be	2,0	6,0	3,0	9,0	1,0	3,0	2,0	1,0	5,0	2,0
Co	13,7	34,9	14,6	5,9	17,9	37,4	11,2	15,8	13,0	16,0
Cs	14,2	13,0	17,4	21,2	12,0	11,4	7,2	6,3	10,0	15,0
Ga	15,8	17,3	16,7	18,6	18,8	17,9	16,0	19,6	16,1	19,9
Hf	4,3	6,7	4,7	8,6	5,8	7,0	6,7	5,1	8,4	7,7
Nb	8,7	16,2	10,4	19,3	11,1	16,1	14,1	13,6	12,4	14,9
Rb	61,3	106,2	73,4	109,0	69,4	102,9	82,7	86,3	105,2	115,9
Sn	2,0	4,0	1,0	14,0	2,0	3,0	3,0	2,0	4,0	4,0
Sr	359,6	273,2	523,6	76,4	617,0	333,6	376,2	509,4	248,9	250,2
Ta	0,7	1,2	0,8	1,3	0,8	1,2	0,9	0,9	0,9	1,0
Th	5,6	10,6	9,5	17,1	10,6	11,8	9,9	7,5	11,5	10,3
U	2,5	4,4	3,0	6,8	3,5	7,1	2,8	2,1	2,9	2,6
V	147,0	50,0	105,0	40,0	178,0	60,0	68,0	121,0	146,0	146,0
W	1,0	4,1	1,5	20,7	1,7	2,2	2,1	1,2	2,5	2,7
Zr	159,6	273,2	174,5	324,6	247,0	278,2	257,8	192,1	289,6	316,4
Y	19,9	55,5	14,2	63,4	17,4	51,5	35,1	21,9	30,9	35,8
La	22,3	51,3	26,4	79,5	26,9	51,0	44,4	31,1	36,0	37,0
Ce	49,5	104,0	50,0	145,7	52,3	108,5	92,7	64,7	73,8	80,8
Pr	5,8	14,1	6,3	19,7	6,4	12,5	10,5	7,2	9,2	9,9
Nd	21,6	56,7	23,7	76,5	26,4	50,2	39,9	27,2	37,5	40,7
Sm	4,6	11,7	4,4	17,3	4,6	10,6	8,1	5,4	6,9	7,9
Eu	1,3	2,4	1,2	2,5	1,3	2,3	1,7	1,3	1,5	1,8
Gd	4,4	11,4	3,5	17,6	3,9	10,6	7,2	4,5	6,5	7,3
Tb	0,7	1,7	0,5	2,7	0,5	1,8	1,2	0,8	0,9	1,0
Dy	3,4	9,4	2,5	12,1	3,1	9,1	6,2	3,9	5,6	6,2
Ho	0,7	1,8	0,5	2,4	0,5	1,9	1,3	0,8	1,1	1,1
Er	1,7	4,9	1,2	6,1	1,5	5,4	3,6	2,2	3,5	3,5
Tm	0,3	0,7	0,2	0,9	0,3	0,8	0,6	0,4	0,5	0,5
Yb	2,0	4,5	1,4	5,5	1,5	4,7	3,5	2,3	3,0	3,4
Lu	0,3	0,6	0,2	0,9	0,2	0,7	0,6	0,3	0,5	0,5
Mo	0,9	1,6	1,1	8,2	1,3	2,0	1,1	0,4	1,0	1,3
Cu	210,1	97,0	34,8	296,5	26,5	99,1	43,4	13,8	52,3	126,7
Pb	23,5	23,4	15,3	59,6	8,6	20,4	14,7	15,1	20,3	26,3
Zn	128,0	756,0	97,0	497,0	61,0	573,0	251,0	47,0	94,0	127,0
Ni	8,0	22,6	11,5	2,7	7,8	21,0	5,4	4,0	17,2	16,3
As	20,0	47,0	101,7	88,4	85,7	41,8	7,1	7,1	32,3	59,7
Cd	0,4	3,3	0,4	3,3	0,4	1,6	0,6	0,1	0,2	0,3
Sb	0,1	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,7	1,5
Bi	0,2	0,5	0,2	2,4	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	0,6
Ag	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
Au [ppb]	2,0	2,3	2,0	3,4	0,0	2,8	0,0	0,0	2,5	13,0
Hg	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Tl	0,1	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Se	0,7	0,0	0,5	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Código	t-3	t-4	t-5	t-6	t-7	t-8
UTM E	390591	393969	394797	397234	399510	400591
UTM N	6685122	6683482	6683917	6667106	6662204	6675817
Elementos mayores [wt%]						
SiO ₂	60,2	59,5	61,3	59,5	60,3	55,8
Al ₂ O ₃	15,2	15,1	13,9	14,3	13,8	15,5
Fe ₂ O ₃	6,5	5,9	5,9	6,2	5,7	6,8
MgO	1,8	1,9	1,4	1,8	1,7	2,1
CaO	3,5	4,0	4,3	4,7	5,1	5,9
Na ₂ O	3,0	2,8	3,2	2,9	3,1	2,6
K ₂ O	2,9	2,9	3,0	2,8	2,8	2,0
TiO ₂	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0
P ₂ O ₅	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
MnO	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Cr ₂ O ₃	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elementos Traza [ppm]						
C Total [wt%]	0,4	0,7	0,6	0,7	0,9	0,8
S Total [wt%]	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Sc	14,0	18,0	15,0	17,0	17,0	13,0
Ba	641,0	1190,0	1978,0	929,0	1329,0	637,0
Be	1,0	3,0	3,0	9,0	5,0	1,0
Co	13,4	14,7	11,1	12,6	10,3	15,8
Cs	18,3	23,5	14,5	17,3	13,6	64,4
Ga	17,4	20,3	19,2	19,4	19,2	16,3
Hf	6,5	8,7	10,0	8,0	8,0	6,7
Nb	11,8	13,7	16,6	16,5	16,8	9,4
Rb	104,4	133,0	122,9	120,0	112,3	99,6
Sn	3,0	5,0	4,0	4,0	3,0	2,0
Sr	228,9	231,7	190,8	234,6	143,8	492,4
Ta	0,9	1,1	1,1	0,9	1,2	0,7
Th	10,3	12,9	11,3	11,3	11,8	8,7
U	2,5	3,1	3,1	2,7	2,9	2,2
V	103,0	100,0	99,0	111,0	84,0	146,0
W	2,2	2,0	2,4	2,6	3,5	1,8
Zr	234,2	294,4	386,5	326,4	306,2	232,1
Y	30,5	40,5	41,8	39,2	44,6	21,9
La	33,8	46,6	45,1	44,1	50,8	27,3
Ce	74,8	95,8	100,0	89,6	108,2	53,5
Pr	8,9	11,8	12,2	11,3	13,3	6,8
Nd	34,8	44,3	48,2	45,0	50,0	25,0
Sm	7,0	9,3	9,4	8,8	10,4	5,2
Eu	1,7	2,1	2,2	2,1	2,6	1,4
Gd	6,7	8,6	8,7	8,5	9,7	4,7
Tb	0,9	1,3	1,3	1,2	1,3	0,7
Dy	5,6	7,2	7,2	7,5	8,1	4,0
Ho	1,0	1,5	1,4	1,4	1,5	0,7
Er	2,9	4,1	4,1	3,9	4,3	2,2
Tm	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
Yb	2,8	4,4	4,4	4,1	4,0	2,1
Lu	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
Mo	1,6	2,1	1,5	1,2	1,2	0,7
Cu	190,4	116,5	24,6	28,2	19,4	23,4
Pb	31,1	37,9	31,3	27,6	21,8	13,0
Zn	193,0	123,0	79,0	80,0	68,0	69,0
Ni	13,8	15,2	8,7	12,3	8,2	10,9
As	94,3	72,7	39,2	11,3	5,6	65,3
Cd	0,7	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3
Sb	2,1	1,0	0,4	0,2	0,1	0,6
Bi	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,3
Ag	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
Au [ppb]	16,5	10,7	1,1	0,6	0,0	1,0
Hg	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1
Tl	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
Se	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

