



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

**"GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA DE LOS SEDIMENTOS FLUVIALES
DE LA CUENCA DEL RÍO AYSÉN, XI REGION DE AYSÉN DEL
GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO, CHILE: INFLUENCIA DE
FACTORES ANTRÓPICOS Y NATURALES"**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

TANIA ROTH CHAPARRO

PROFESOR GUÍA:
Dr. JUAN PABLO LACASSIE REYES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Dra. KATJA DECKART
Dr. FRANCISCO HERVÉ ALLAMAND

SANTIAGO DE CHILE
2016

Resumen

La zona de estudio de este trabajo corresponde a la cuenca del río Aysén, ubicada en la XI región de Aysén, específicamente entre las latitudes 45°S y 46°S.

Este trabajo corresponde a un estudio geoquímico y mineralógico en los sedimentos de drenaje en la cuenca del río Aysén, y que por medio de su caracterización, permite determinar la influencia de los factores naturales y antrópicos en el lugar. Para esto, se elaboró una línea de base geoquímica y mineralógica para los sedimentos de la cuenca de estudio, junto con esto se identificaron zonas de la cuenca con concentraciones elementales superiores a los estándares ambientales internacionales y se determinó el posible origen de estas. También se evaluaron las correlaciones que puedan existir entre concentración química y la granulometría de la fracción de sedimento que se analiza.

En una primera etapa de este trabajo, se realizó el muestreo en terreno, donde se obtuvieron 234 muestras de sedimentos del río, que se recolectaron desde los principales cauces de la cuenca. Posteriormente, en laboratorio, se realizó la preparación de las muestras y posterior caracterización geoquímica y mineralógica de estas. La caracterización geoquímica se llevó a cabo mediante espectrometría de emisión para los óxidos mayores y mediante espectrometría de masas para los elementos traza. La mineralogía para un sub-set de muestras se obtuvo a partir de Difracción de Rayos X y fue complementada mediante el estudio de briquetas de sedimento.

Después de aplicar un programa de control de calidad de los datos, establecida por la Unidad de Geoquímica del Sernageomin, se estudiaron los datos geoquímicos obtenidos, mediante diferentes herramientas. Dentro de estas, se incluyen diagramas de clasificación TAS (*total alkali silica*), Índice de meteorización química (CIA), Índice de Basicidad, entre otras. Además se generaron diferentes representaciones de los datos obtenidos, como: Mapas geoquímicos Univariados, en los que se ilustran las concentraciones químicas obtenidas en cada muestra, utilizando rangos de concentración, Mapa Multivariable, donde las muestras se agrupan en 5 clusters conformados por muestras con características químicas similares, utilizando un algoritmo de agrupación conocido como k-means, Diagramas de variación geográfica estandarizados, que corresponden a gráficos con las concentraciones químicas normalizadas, para cada río de la cuenca. Además de lo anterior, se evaluó cada muestra según el parámetro de toxicidad PEC, definido por MacDonald *et al.*, 2000.

Se obtuvo que la zona oeste de la cuenca, está caracterizada por los elementos químicos Cr, Ni, Ga, MgO, Sc, CaO y Co. La mineralogía de esta zona incluye ferromagnesianos y minerales asociados a rocas ultramáficas. Por otro lado, la zona este se caracteriza por mayores contenidos de SiO₂, K₂O, Ba, Rb y por las concentraciones elevadas de algunos metales en el río Toqui, y en algunos lugares puntuales.

Los resultados de los análisis geoquímicos, mineralógicos y la información geológica para la cuenca muestran una relación consistente que permite dividir la cuenca del río Aysén en dos zonas. Una zona este, caracterizada por una litología predominante de unidades volcano-sedimentarias, y una zona oeste que se caracteriza por rocas intrusivas asociadas al batolito Norpatagónico. De la misma forma, los datos geoquímicos y mineralógicos obtenidos desde los sedimentos fluviales de la zona este se encontrarían asociados a composiciones químicas félsicas que además exhiben mayor meteorización química con respecto al resto de la cuenca, posiblemente por efecto de los glaciares en la zona, y a sedimentos con contenidos metálicos provenientes de zonas de alteración, y de la explotación de la mina El Toqui. Por otro lado, los sedimentos fluviales de la zona oeste se encontrarían asociados a composiciones químicas de carácter máfico de la fuente por donde drenan los ríos de esta zona.

En la cuenca se identificaron dos sectores con valores del parámetro PEC en la cuenca que sobrepasan los valores establecidos, y que indican una potencial toxicidad. Uno corresponde al río Pangal, al oeste de la cuenca, que podrían atribuirse a concentraciones naturales de ciertos elementos. El otro sector, está en las cercanías de El Toqui que estaría relacionado a la existencia y explotación del yacimiento del mismo nombre.

De las correlaciones entre química y granulometría se tiene que en general, al disminuir el tamaño del grano se observa un aumento en la concentración de ciertos elementos asociados a minerales pesados y a arcillas.

**Dedicado a mis papás y
a Cristian Uribe.**

Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a mis profesores, Pancho Hervé, por compartir su sabiduría conmigo, a Katja por su tan buena disposición siempre, y por supuesto a Jp, por sus oportunas y precisas sugerencias. Siempre dándole al clavo con sus comentarios. Agradezco su buena onda, su sencillez y sus ganas de ayudarme.

Quiero agradecer a mi familia, a mis papas que siempre me han apoyado, a mis hermanas y a mi abuelita.

A mis amigas del colegio, Chica, Belén y Cote, por tantos años de amistad. A mis profesores del colegio, Isa, Javito y Cristian. Al Jony por apañarme tanto los primeros años de la u.

A mis amigas de la vida, Lore y Pam que a pesar de que no las veo tanto, sé que siempre cuento con ellas. A mis amigas de plan común, Vale, Dani, Denise, Orne, Jude, Maca y Negrita. A José, por su amistad.

Como no, a mi querido LC-LCH, que me dará la lata de nombrar uno a uno jaja, Gonchi, Nico, Yayer, Andre, Paula, Paty, Vini, Martín, Loco es, Dieter, Pasta, Fabi, Jose, Juancho, Julito, Mariolocura, Marta, Nicoso, Jota....debo decir que gracias a ustedes, lo he pasado FINO en geo.

A todo el sexto piso del Sernageomin, astu, cata (que derramó de su sangre en los ríos de Aysén, para que esta memoria llegara a buen puerto), al queru (por todas sus macros), leo, pancha, y por su puesto al Jimmy por apañarme tanto en toda esta etapa. También agradezco a la Carola, a bolas tristes (Coloma) y al geógrafo estrella gustavito, me reí un montón con ustedes e hicieron que fuera muy agradable el día a día por esos lados.

A Laura Varas, le agradezco todas sus aclaraciones, fueron muy útiles para mí. A la gente del Laboratorio del Sernageomin, Eugenio, Nene, don Eduard, Carla Barra y la Sra. Eugenia, les agradezco sinceramente su ayuda y buena onda.

Agradezco a Barry Roser por la excepcional semana, llena de conocimiento en geoquímica, que nos brindó. Agradezco también sus sugerencias, que han sido muy útiles y oportunas para este trabajo.

A la gente del departamento de geología, don Carlos, Vero, Rosita y a la santísima Blanca, que hasta hoy le sigo prendiendo velitas. Agradezco a Julio del Taller de Cortes y a Roberto, por ayudarme a moler, o en realidad por moler mis muestras jaja.

Y por supuesto, un agradecimiento especial a Rodrigo, que en los momentos más difíciles de esta etapa, ha estado siempre ahí, acompañándome y animándome, gracias rodri!

Agradezco al Coronel Sergio Alarcón, Prefecto de Carabineros de la XI Región, por su apoyo durante el desarrollo de las campañas de terreno.

Por último, quiero agradecer a todo el equipo de Cartografía Geoquímica a cargo de la Unidad de Geoquímica del Servicio Nacional de Geología y Minería. Esta contribución fue patrocinada por la Subdirección Nacional de Geología en el marco del desarrollo del Plan Nacional de geología del SERNAGEOMIN.

GRACIAS TOTALES!

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1	Fundamentación del problema.....	10
1.2	Objetivos.....	11
1.2.1	Objetivo general.....	11
1.2.2	Objetivos específicos.....	11
1.3	Hipótesis de trabajo.....	11
1.4	Antecedentes de la zona.....	12
1.4.1	Ubicación y accesos.....	12
1.4.2	Hidrografía.....	14
1.4.3	Geomorfología.....	18
1.4.4	Climatología.....	19
1.4.5	Asentamientos humanos.....	20
1.4.6	Actividades económicas.....	20
2	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	23
2.1	Obtención de muestras.....	23
2.2	Laboratorio.....	26
2.2.1	Geoquímica.....	26
2.2.2	Mineralogía.....	28
2.3	Procesamiento de datos.....	29
2.3.1	Datos geoquímicos.....	30
2.3.2	Datos mineralógicos.....	36
2.3.3	Efecto de la granulometría sobre la composición química.....	36
3	MARCO GEOLÓGICO.....	38
3.1	Unidades Litoestratigráficas.....	38
3.2	Geología Económica.....	45
3.3	Estructuras Principales.....	47
4	RESULTADOS.....	51
4.1	Obtención y preparación de muestras.....	51
4.2	Datos geoquímicos.....	53
4.2.1	Control de calidad de datos.....	53
4.2.2	Mapas geoquímicos Univariantes.....	56
4.2.3	Mapas Multivariantes.....	60
4.2.4	Mapas PEC.....	61

4.2.5	Gráficos de variación geográfica.	62
4.3	Datos mineralógicos.....	62
4.3.1	Briquetas.	64
4.3.2	DRX.	65
4.3.3	Mineralogía de los sedimentos fluviales de la cuenca.	66
4.4	Efecto de la granulometría sobre la composición química.	68
5	DISCUSIONES.	72
5.1	Control de calidad de datos.....	72
5.2	Zona este.	73
5.2.1	Río Blanco este.	73
5.2.2	Río Oscuro- río Simpson- río Aysén.	76
5.2.3	Río Coyhaique.	80
5.2.4	Río Emperador Guillermo.	82
5.2.5	Río Ñirehuao.....	84
5.2.6	Río Toqui.	86
5.2.7	Río Picaflor - río Mañihuales.	89
5.3	Zona oeste.	90
5.3.1	Río Pangal - río Los Palos.	91
5.3.2	Río La Paloma- río Blanco.....	94
5.4	Análisis multivariable.....	97
5.5	PEC (<i>Probable Effect Concentration</i>).....	100
5.6	Efecto de la granulometría sobre la composición química.	102
6	CONCLUSIONES.	104
7	BIBLIOGRAFIA.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Red vial de la cuenca del río Aysén.	13
Figura 1.2. Hidrografía de la cuenca del río Aysén.	17
Figura 1.3. Diagrama climático para Coyhaique y Puerto Aysén..	20
Figura 2.1. Imágenes del procedimiento que se lleva a cabo en un punto de muestreo	24
Figura 2.2. Imágenes de muestreo de sedimento fluvial..	25
Figura 2.3. Resumen de la preparación de muestras.....	27
Figura 2.4. Ejemplo de un grafico de control para muestras gemelas.....	33
Figura 3.1. Mapa geológico de la cuenca del río Aysén.....	50
Figura 4.1. Ubicación geográfica de los puntos muestreados.....	52
Figura 4.2. Gráfico de control del vanadio para muestras gemelas.	53
Figura 4.3. Gráfico de control del vanadio para duplicados finos.....	54
Figura 4.4. Gráfico de control para el cobre..	56
Figura 4.5. Mapas Geoquímicos Univariables para cromo, níquel, y magnesio.....	58
Figura 4.6. Mapas Geoquímicos Univariables para zinc, plomo, y cadmio	60
Figura 4.7. Mapa PEC obtenido para la cuenca del río Aysén.....	62
Figura 4.9. Imagen de una briqueta observada a nicoles paralelos (NP) y nicoles cruzados (NX)	64
Figura 4.10. Distribución de las muestras que poseen información mineralógica.....	67
Figura 4.11. Razones Zr/Sc versus Th/Sc para las distintas granulometrías..	69
Figura 5.2. Índice de meteorización química (C.I.A).....	74
Figura 5.3. Concentración de SiO ₂ en las muestras del río Blanco este	75
Figura 5.4. Diagrama estandarizado para las muestras del río Simpson.	77
Figura 5.5. Diagrama TAS para las muestras del río Simpson y sus afluentes.....	78
Figura 5.6. Diagrama estandarizado para las muestras del río Aysén.	80
Figura 5.7. Diagrama spider normalizado al condrito para las muestras del río Coyhaique.	81
Figura 5.8. Diagrama estandarizado para las muestras del río Coyhaique.	82
Figura 5.9. Diagrama estandarizado para las muestras del río Emperador Guillermo. ...	83
Figura 5.10. Diagrama estandarizado para las muestras del río Ñirehuao.	85
Figura 5.11. Diagrama estandarizado para los metales Mo, Cu, Pb, Zn, As, Cd y Sb en las muestras del río Toqui.	87
Figura 5.12. Patrón de dilución asociado a una fuente puntual de anomalía..	87
Figura 5.13. Diagrama de variación geográfica en las muestras del río Toqui.....	88
Figura 5.14. Imagen en planta de la minera El Toqui.....	88
Figura 5.15. Diagrama spider normalizado al condrito para las muestras del río Picaflor	89
Figura 5.16. Diagrama estandarizado para las muestras del río Picaflor.	90
Figura 5.17. Diagrama estandarizado para las muestras del río Pangal.	91
Figura 5.18. Índice de Basicidad	93
Figura 5.19. Diagrama normalizado a la corteza continental superior.....	94
Figura 5.20. Diagrama estandarizado para las muestras del río La Paloma.	95
Figura 5.21. Diagrama estandarizado para las primeras muestras del río Blanco.	96
Figura 5.22. Diagrama estandarizado para las muestras del río Blanco.	97
Figura 5.23. Distribución de los nodos o grupos en la cuenca del río Aysén.	98
Figura 5.24. Mapa de toxicidad.	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores PEC para metales.	35
Tabla 4.1. Resumen del tipo y cantidad de muestras recolectadas.	51
Tabla 4.2. Resumen del total de muestras preparadas para cada análisis.	52
Tabla 4.3. Error relativo y Proporción de pares fallidos obtenidos de las muestras gemelas.....	53
Tabla 4.4. Error relativo y Proporción de pares fallidos obtenidos de las muestras de duplicados finos.....	55
Tabla 4.5. Valores obtenidos para evaluar la exactitud del análisis.	55
Tabla 4.6. Resumen de la cantidad de muestras asignadas para cada nodo.	60
Tabla 4.7. Caracterización química de los nodos o grupos.....	61
Tabla 4.9. Detalle de la selección de muestras para briquetas.	62
Tabla 4.10. Detalle de la selección de muestras para DRX..	63
Tabla 4.11. Resumen de la mineralogía obtenida mediante briquetas.....	64
Tabla 4.12. Resumen de la mineralogía obtenida mediante DRX.....	65
Tabla 4.13. Mineralogía final para la cuenca del río Aysén.....	66
Tabla 5.1. Promedios de concentración de algunos elementos químicos obtenidos en la cuenca y el Factor de Enriquecimiento obtenido a partir de las muestras extraídas del río Toqui.	86

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Fundamentación del problema

Los sedimentos fluviales corresponden a compósitos de las litologías presentes en una cuenca de drenaje. Sin embargo, la composición de estos sedimentos difiere de la composición de la roca madre debido a efectos combinados de múltiples factores que interactúan y operan entre la fuente y el sedimento. Dentro de estos factores se encuentran la meteorización, la selección hidrodinámica, la concentración de metales pesados (Ortiz & Roser, 2006), el contenido de materia orgánica del lugar, y el ambiente deposicional de los sedimentos (Parizanganeh, 2008). Por otra parte, las condiciones climáticas bajo las cuales ocurre la meteorización y erosión, las variaciones de las condición Eh y ph, que controlan la movilidad de muchos elementos, y el rol de la contaminación asociado a actividades humanas, especialmente en lugares industriales o con desarrollos urbanos, son igualmente importantes e influyentes (British Geological Survey, 2000).

A su vez, la composición química de los sedimentos fluviales se ve fuertemente influenciada por el tamaño de grano (Johnson, 1993). El estudio granulométrico, permite el reconocimiento de diferentes procesos geológicos y ayuda a interpretar de manera apropiada los resultados geoquímicos obtenidos en un área (Guagliardi *et al.*, 2012).

Diversos estudios muestran y discuten las variaciones en los resultados químicos obtenidos al considerar diferentes granulometrías de los sedimentos fluviales. Algunos de estos, investigan específicamente la partición de metales pesados en los distintos tamaños de sedimento (Parizanganeh, 2008; Beeson, 1995; Adiyiah *et al.*, 2014) mientras que otros estudian el fraccionamiento de distintos elementos químicos (Guagliardi *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 1999; Ranasinghe *et al.*, 2002; Ortiz & Roser, 2006).

De esta manera, se puede utilizar la composición química y mineralógica de los sedimentos de una red de drenaje, para evaluar la influencia de los factores naturales y el impacto de los factores antrópicos en un sistema fluvial.

Adicionalmente, la información obtenida al examinar lo anterior, puede ser utilizada en el sector económico, particularmente en exploración, donde representa un robusto método para la identificación de zonas con potencial mineral, cómo también en estudios de aspecto medio ambientales. Para este último, los sedimentos fluviales resultan atractivos para evaluar el impacto de la minería, industria y desarrollos urbanos en un ambiente fluvial, considerando la tendencia que poseen los metales pesados de fijarse a la fase sólida y la característica de los sedimentos de integrar información a largo plazo (Birch *et al.*, 2000).

Por razones como las anteriores, en el mundo, países de Europa y Norteamérica han confeccionado mapas geoquímicos de escala nacional con propósitos de evaluación

ambiental. El “*International Geochemical Mapping Project (IGCP 259)*” examinó las diferencias entre los mapas geoquímicos de los distintos países y estandarizó el método para generar una base de datos común y global de base de línea geoquímica, útil para exploración de recursos minerales y para la protección medioambiental (Ohta *et al.*, 2005).

En Chile los estudios geoquímicos de sedimentos fluviales comenzaron en 1960 y se han seguido desarrollando durante las siguientes décadas. Estos estudios se han llevado a cabo en distintos lugares; como por ejemplo en las cuencas Vitor y San José de Azapa (Espinoza, 2013), cuenca del río Elqui (Miralles, 2013), cuenca del río Limarí (Astudillo, 2011), del sistema fluvial del río Lluta (Baeza, 2010). Todos los ejemplos mencionados, se han desarrollado en el marco del Proyecto de cartografía geoquímica del Sernageomin.

En este estudio, se analiza la composición química y mineralógica de los sedimentos fluviales de la cuenca del Río Aysén, ubicada en la XI Región de Aysén, del General Carlos Ibáñez del Campo. Adicionalmente, se estudian las diferencias químicas asociadas a distintas granulometrías de los sedimentos fluviales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar la influencia de los factores antrópicos (urbanización, industria, minería) y naturales (geología, hidrodinámica, topografía) en la cuenca del río Aysén mediante un estudio geoquímico y mineralógico en los sedimentos de drenaje de esta cuenca.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Establecer una línea de base geoquímica y mineralógica para los sedimentos de la cuenca de estudio.
2. Evaluar la existencia de sectores en la cuenca con concentraciones químicas por sobre los estándares internacionales de toxicidad, identificando el posible origen de tales anomalías.
3. Evaluar la existencia de correlaciones entre las concentraciones químicas y la granulometría de la fracción analizada.

1.3 Hipótesis de trabajo

La composición química y mineralógica de los sedimentos de una cuenca fluvial refleja la influencia de los factores naturales de dicha cuenca y el impacto de los factores antrópicos. Los factores naturales se encuentran gobernados principalmente por la

litología del basamento, mientras que los antrópicos se vinculan a la urbanización, actividades mineras, actividades industriales, entre otras, en la cuenca de estudio.

1.4 Antecedentes de la zona

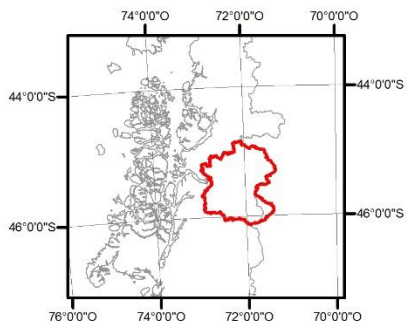
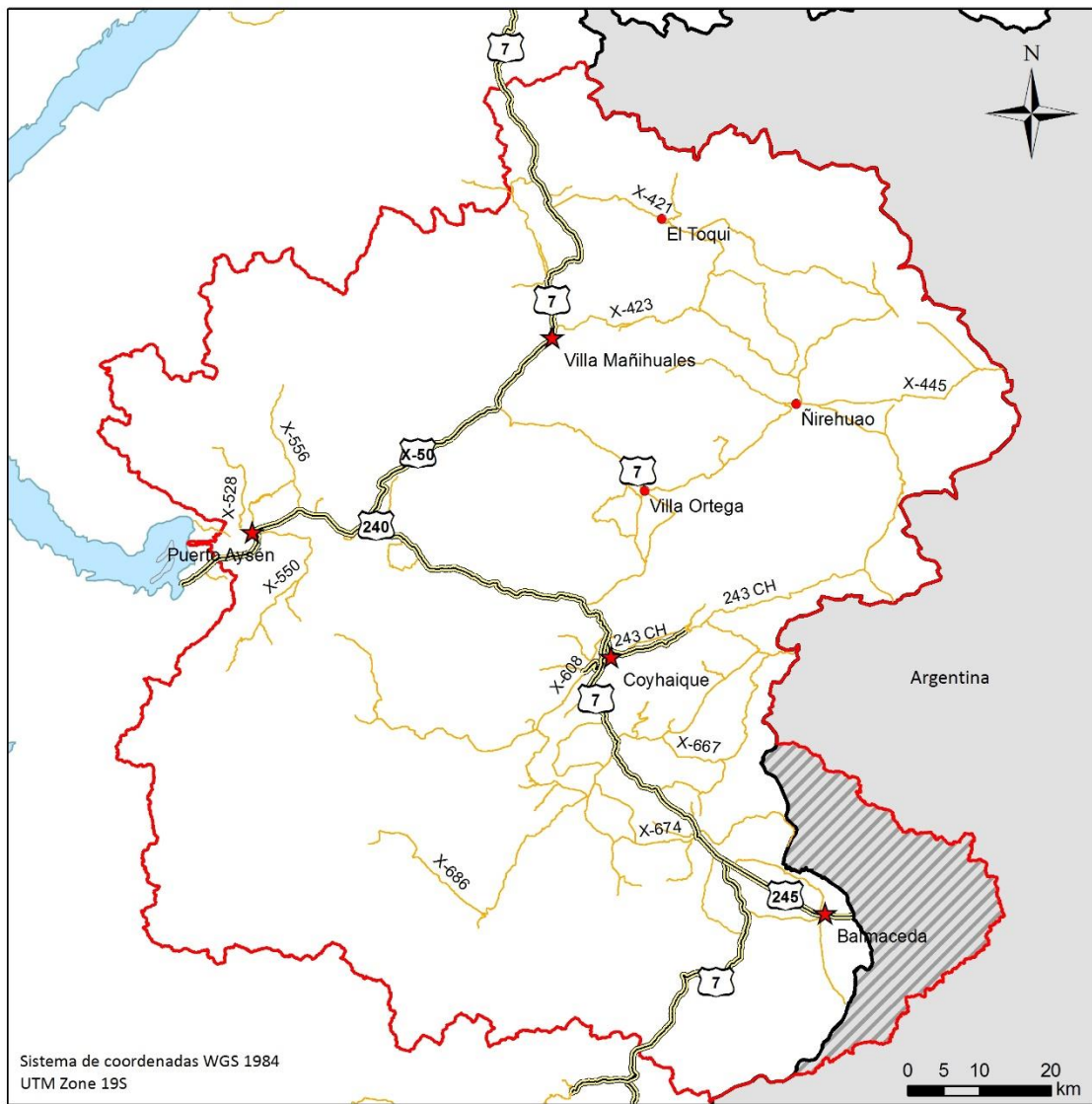
1.4.1 Ubicación y accesos

La cuenca hidrográfica del río Aysén se ubica en la XI región de Aysén del general Carlos Ibáñez del Campo. Se extiende entre los paralelos 45°00` y 46°16` latitud sur, y meridianos 71°20` y 73°00` longitud oeste, cubriendo parcialmente las provincias de Aysén, Coyhaique y comunas homónimas (DGA, 2004).

Una mínima parte situada al sudeste (las cabeceras de algunos arroyos secundarios) se origina al este de la frontera política Chile-Argentina. Limita al norte con la hoya del río Cisnes, con la hoya del lago Yulton y con las cuencas de los lagos La Plata y Fontana; al este, con nacientes de las cuencas argentino patagónicas de los ríos Senguerr y Deseado; al sur con los tributarios norte del lago General Carrera y con la cuenca independiente del río de los Huemules. Por último, limita al oeste con la pequeña cuenca del río Lagunillas (Niemeyer, 1982).

La ruta de acceso por vía terrestre más frecuente para llegar a la cuenca es la CH-7 (Carretera Austral). Esta ruta, que comienza en la ciudad de Puerto Montt y termina en Puerto Yungai, recorre gran parte de la cuenca y se conecta en Coyhaique con la ruta CH-240, que se inicia en el Paso Fronterizo Coyhaique, pasa por Puerto Aysén y finaliza en Puerto Chacabuco (principal puerto regional). Otra vía de importancia en la zona de estudio es la X-50 que se inicia en el sector de Mañihuales y finaliza al interceptar la ruta CH-240 ya mencionada. Estas vías se muestran en la Figura 1.1.

Red vial de la cuenca del río Aysén



Simbología

- ★ Ciudad
- Localidad
- ▭ Limite cuenca Aysén
- Limite Internacional
- Linea de costa
- Mar
- Argentina
- ▨ Área de cuenca en territorio argentino

Leyenda

- PAVIMENTO
- RIPIO

Figura 1.1. Red vial de la cuenca del río Aysén.

1.4.2 Hidrografía

En esta región existen importantes ríos, riachuelos y arroyos que nacen de la vertiente oriental de la cordillera andina, luego escurren por la cordillera cortándola en valles, para finalmente desembocar en los amplios fiordos del lugar. En general, los cursos son bastante caudalosos y poseen una alimentación pluvial, nival y glaciar. Además, estos caudales son interceptados y regulados por lagos y lagunas interpuestos en sus cursos y que sirven además como fuente de alimentación de los ríos (SERPLAC, 2005).

La cuenca del río Aysén cubre un área de 12.191 km², de los cuales el 95% se ubica en territorio chileno y el 5% restante en territorio argentino. Los principales cauces de la cuenca corresponden a los ríos: Aysén (con un caudal medio de 515 m³/seg), Simpson, Toqui, Ñirehuao, Emperador Guillermo, Pangal, Mañihuales y Blanco (SERPLAC, 2005).

Las subcuencas del río Aysén presentan un régimen pluvio-nival, sin embargo, se distinguen matices en sus comportamientos, por lo que resulta necesario realizar una diferenciación de 3 regímenes pluvio-nivales levemente distintos, que definen también los grupos en los que se separan los cauces (DGA, 2004).

- **Régimen mixto nivo-pluvial de cauces trasandinos:** En esta zona, el caudal aportado por los deshielos es considerablemente mayor al aportado por precipitaciones. Ejemplo de este régimen es Coyhaique en sector de Tejas Verdes, con una precipitación media anual de 700 mm aprox (DGA, 2004).
- **Régimen mixto nivo-pluvial:** En esta zona, la característica pluvial es más marcada que en la zona anterior, es decir, hay mayor cantidad de precipitaciones, donde la media anual corresponde a 3.500 mm, principalmente debido a factores orográficos. Ejemplo de este régimen es el río Ñirehuao, en villa Mañihuales (DGA, 2004).
- **Régimen nivo-pluvial regulado por lagos y glaciares:** El único cauce característico de esta zona es el río Blanco. Dentro de esta subcuenca existen 10 lagos, responsables de un aumento de caudal en épocas de estiaje y disminución en épocas de deshielos y mayores precipitaciones. Es importante mencionar además que hacia el sudoeste de la cuenca de Aysén, cercano a la cuenca El Blanco, se encuentra una parte del glaciar Huemules. (DGA, 2004).

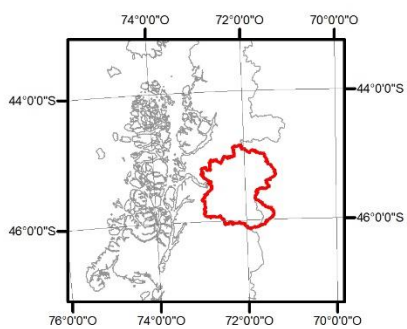
Dentro de la cuenca se distinguen cuatro sistemas hidrográficos. Hacia el norte de la cuenca se ubica el río Mañihuales que presenta, en su primer tramo, un escurrimiento norte-sur que posteriormente va virando hacia el poniente. Los principales afluentes que recibe son el río Ñirehuao y el río Emperador Guillermo. En la parte central de la cuenca se encuentra el río Coyhaique que escurre con dirección este-oeste entregando sus aguas al río Simpson que escurre desde la parte sur de la cuenca. En su nacimiento, el río Simpson recibe aguas de 3 afluentes, río Oscuro, río Blanco Chico y río Blanco Este. Luego, más al norte, recibe aguas del río Claro, que escurre con dirección oeste-este. Posteriormente el río Simpson converge con el río Mañihuales, dando lugar al

nacimiento del río Aysén que desemboca en el mar. El río Aysén recibe aguas del río Blanco Oeste, que escurre con dirección sur-norte y desagua en el lago Caro (**Figura 1.2**).

- **Subcuenca del río Mañihuales:** El río Mañihuales nace de la confluencia del río Picaflor, que baja desde el norte, y del río Ñirehuao que procede del oriente. A partir de esa junta se dirige hacia el suroeste, conservando ese rumbo hasta su junta con el río Simpson, después de un recorrido de 40 kilómetros. A 14 kilómetros de su origen recibe por su ribera este su principal tributario, río Emperador Guillermo. La hoya hidrográfica del Mañihuales compromete un área de 4.379 km² lo que equivale al 35% de la superficie total de la cuenca. El río Ñirehuao tiene su origen al norte, en la divisoria de aguas con la cuenca del lago Fontana. Corre hacia el sur y sureste paralelo a la frontera política interna durante 40 kilómetros, luego gira al SO por 18 kilómetros, posteriormente dirige su rumbo al NO durante 45 kilómetros y desde ese punto hasta su encuentro con el río Picaflor, mantiene una dirección al oeste durante 25 kilómetros. En todo su largo recorrido de 130 km, serpentea en múltiples meandros. El río Emperador Guillermo proviene desde el oriente con rumbo inicial NO durante 10 kilómetros y luego gira al ONO manteniendo ese rumbo hasta su junta con el río Mañihuales. La longitud total de este tributario es de 46 kilómetros (Niemeyer, 1982).
- **Subcuenca del río Simpson:** El río Simpson se origina en la reunión de varios cursos menores en la región subandina oriental, en la línea limítrofe Chile-Argentina que en este sector se sitúa al occidente de la línea divisoria de agua continental, de modo que la mayoría de los ríos formativos tienen sus cabeceras en Argentina. El río Simpson se desarrolla en dirección al noroeste, drenando una superficie de 3.992 km², lo que corresponde al 32% de la cuenca. Después de 65 kilómetros de recorrido desde su origen, está la confluencia con el río Coyhaique, a partir de esta confluencia el rumbo es más definido con dirección al ONO. Este tramo, previo a la junta con el río Mañihuales, tiene un desarrollo de 45 kilómetros. Sin embargo, si se considera el nacimiento del formativo más alejado, el río Oscuro, la longitud de esta arteria es de 145 kilómetros. En su curso superior, el río Simpson recibe aportes principalmente del río Blanco este y río Oscuro que drenan con una red muy ramificada al SE de la hoya. En su curso medio, 5 km aguas arriba de la ciudad de Coyhaique, recibe al río Pollux, que desagua una serie de 4 lagos mayores y varios menores. Luego, al pie de la ciudad de Coyhaique se le une el río Claro por la ribera izquierda, constituyendo un cause con rumbo al SE. A menos de 10 km de esa junta, cambia el rumbo al E, por un tramo de 10 kilómetros. Sin duda, el tributario más importante del Simpson es el río Coyhaique. Se le reúne aguas abajo de la ciudad de Coyhaique y tiene en sus orígenes una red ramificada dendrítica de drenaje con cabeceras al pie sur de la Meseta Boscosa, en la línea divisoria de aguas con las nacientes del río Emperador Guillermo. En su último tramo, entre Coyhaique y la junta con Mañihuales, el río Simpson recibe dos afluentes de cierta categoría por su ribera derecha, primero el río Baguales, y 10 kilómetros después, el río Correntoso con un desarrollo de 15 kilómetros (Niemeyer, 1982).

- **Subcuenca río Blanco:** La hoya del río Blanco comprende una superficie de 2.895 km², constituyendo por lo tanto el 23% de la cuenca. Esta hoya incorpora una cadena formada por los lagos más grandes de la cuenca. Dentro de ellos se encuentran: lago Elizalde, lago Caro, lago Zenteno, lago Portales, lago Riesco, entre otros. Este sistema se origina en el lago Azul cuyo emisario cae al extremo oriental del lago La Paloma, aquí se origina el río la Paloma, que lleva un curso dirigido al NO con una longitud de 20 kilómetros. Se junta con el emisario del lago Elizalde, el río Desagüe, que tiene un curso sinuoso de 5 a 6 kilómetros y cae en el extremo oriente del lago Caro, de cuyo extremo occidental sale el río Blanco. El río Blanco lleva hasta su desagüe en la ribera sur del río Aysén, una ruta general orientada al norte, aunque cambia el rumbo con una multitud de vueltas y meandros. En su curso medio, recibe por su ribera oriente, aguas provenientes de otra cadena de lagos entre los cuales destacan el Portales y Zenteno. Abajo de esa junta cae por la ribera izquierda el río Riesco, emisario del lago homónimo (Niemeyer, 1982).
- **Subcuenca río Los Palos:** Un tributario de primera magnitud que proviene del norte y desemboca en el río Aysén inmediatamente al norte de Puerto Aysén es el río Los Palos. Tiene 8 kilómetros de longitud y su dirección es prácticamente norte-sur. A lo largo de su curso recibe diversos afluentes, sin embargo el de mayor envergadura es el río Pangal, que tiene un desarrollo de 40 kilómetros. Este tributario nace en la divisoria de aguas con los tributarios del lago Pte Roosevelt y dirige el curso hacia el Sur y recibe arroyos tributarios, principalmente por su ribera derecha. La hoya que drena el río de los Palos, junto con otros tributarios pequeños que desembocan al río Aysén tiene una superficie de casi 923 km², constituyendo el 7% de la hoya de Aysén.

Hidrografía de la cuenca del río Aysén



Simbología

- ★ Ciudad
- Localidad
- ▬ Ríos y cuerpos de agua
- ▭ Limite cuenca Aysen
- ▭ Mar
- ▭ Argentina
- ▨ Área de cuenca en territorio argentino
- ▬ Limite Internacional
- ▬ Línea de costa

Leyenda

- ▭ Subcuenca río Blanco
- ▭ Subcuenca río Los Palos
- ▭ Subcuenca río Mañihuales
- ▭ Subcuenca río Simpson

Figura 1.2. Hidrografía de la cuenca del río Aysén.

1.4.3 Geomorfología

La región de Aysén está constituida por fiordos, islas, canales, cordilleras, volcanes, valles, pampas, y geoformas que albergan una infinidad de lagos y lagunas. En la región, es posible distinguir cinco grandes conjuntos de relieves, alineados en franjas de orientación NNE-SSO al norte del golfo de Penas y N-S a NNO-SSE al sur de dicho golfo (Niemeyer, 1982). Estos conjuntos orográficos corresponden a:

- **Sector insular y Archipiélagico:** Se presenta como una continuación de la cordillera de la costa, sumergida y desmembrada formando una red de fiordos y canales que termina en la Península de Taitao (SERPLAC, 2005). Corresponde a una unidad muy desmembrada producto de la erosión glacial, cuya superficie está compuesta casi totalmente por rocas pulidas por el hielo, y de depósitos sedimentarios pleistocénicos (Ferrando y Muñoz, 1979).
- **Depresión central:** Corresponde estructuralmente a la continuación de la depresión Intermedia de Chile Central, sin embargo acá se encuentra en su parte más profunda (SERPLAC, 2005).
- **Cordillera andina:** Definida como la unidad de mayor magnitud, formada por un cuerpo granítico asociado con rocas de distinto origen, metamorizadas. Esta zona presenta una topografía abrupta con desniveles de cientos de metros, con morfologías de gargantas estrechas, cascadas, y estrechos planos deposicionales intramontanos. Existen grandes sectores cubiertos por hielo que fluye en forma de glaciares hacia zonas más bajas. Las mayores alturas del lugar están asociadas a Campos de Hielo Norte y Campos de Hielo Sur. En el cordón andino se encuentra una cadena volcánica que ha sido responsable del relleno de los valles del lugar (SERPLAC, 2005).
- **Cordones subandinos orientales:** Estos cordones se desprenden desde el macizo andino al oriente, y debido al paso de los glaciares, se encuentran alternados con valles abiertos. A raíz de la unión de estos cordones con las pampas patagónicas, se forma una franja transitiva compuesta por secuencias de rocas volcánicas intercaladas con rocas sedimentarias marinas y continentales estratificadas, que son responsables del relieve de mesetas y amplios valles (SERPLAC, 2005).
- **Relieves planiformes orientales:** Se presentan como intrusiones desde el territorio argentino. Existen cuatro zonas principales, que están separadas por elevadas plataformas: Alto río Cisnes, Ñirehuao, Coyhaique Alto y Balmaceda. En depresiones ausentes de drenaje se generan lugares pantanosos conocidos como “mallines” (SERPLAC, 2005).

En particular la cuenca del río Aysén se ubica en la quinta zona geomorfológica de Chile, conocida como “Región patagónica y polar del inlandsis antártico”, zona sometida a una tectónica de hundimiento a escala geológica (DGA, 2004).

Esta tectónica de hundimiento es la responsable de las grandes formas del lugar, debido a esta, el mar ha penetrado en los valles inferiores de los ríos andinos y la cordillera de la costa, originando morfologías como golfos, canales, estuarios, fiordos etc (DGA, 2004).

La cuenca del río Aysén se describe como una zona de ríos y lagos de control tectónico ubicados sobre la Cordillera Andina descrita anteriormente. Los sistemas hidrográficos se orientan en dos sentidos, este-oeste y norte-sur. También predomina el drenaje de tipo rectangular, estableciendo el dominio de una morfología de erosión. Al sur del río Simpson hay numerosas y extensas depresiones lacustres y una red ortogonal de ríos cuya erosión nivofluvial activa es responsable de un relieve segmentado (DGA, 2004).

1.4.4 Climatología

La región de Aysén es afectada durante todo el año por el frente polar que se sitúa sobre ella, y provoca características marítimo lluviosas. Además, la accidentada geografía de la región es responsable de variados microclimas de poca extensión en la región (CONAF, 2002).

El clima característico de la cuenca de estudio es principalmente el frío oceánico con abundantes precipitaciones, fuertes vientos y bastante humedad. El relieve juega un rol importante ya que provoca diferencias climáticas del sector oriental con respecto al occidental (formado por islas y archipiélagos), donde los vientos oceánicos provenientes del oeste se ven interceptados por la cordillera andina provocando abundantes precipitaciones en la vertiente occidental de la cordillera (DGA, 2004).

De esta manera, según la clasificación climática de Köppen (Peel et al., 2007), la cuenca del río Aysén presenta dos tipos de clima, el templado lluvioso cálido con influencia mediterránea (Cfbs) y el templado lluvioso frío sin estación seca (Cfc).

El sector más costero de la cuenca, cercano a puerto Aysén, representa un ejemplo del tipo Cfbs. Esta zona se ve afectada directamente por el frío oceánico proveniente de las islas y archipiélagos. Hay abundantes precipitaciones, vientos provenientes del oeste y alta humedad. Los promedios de precipitaciones varían entre 3.000 a 4.000 mm/año, y las temperaturas promedio anuales son de 8 a 9 °C (DGA, 2004).

Por otro lado, el sector central-este de la cuenca posee un clima influenciado por la estepa fría que se presenta en la vertiente oriental de los Andes patagónicos. En esta zona existe un cordón montañoso cordillerano protector, que ayuda a disminuir las precipitaciones, comparado con la zona archipelágica. El sector oriental de la cuenca posee promedios anuales de precipitaciones de 1.385 mm en Coyhaique mientras que más cercano a la frontera, en Balmaceda, disminuye a 621 mm. Las temperaturas de la zona son generalmente bajas, las más altas se encuentran en enero, con una media de 12-13 °C y las más bajas en julio, con una media de 2-3°C (DGA, 2004). Esto se ilustra para los distintos meses del año en la Figura 1.3.

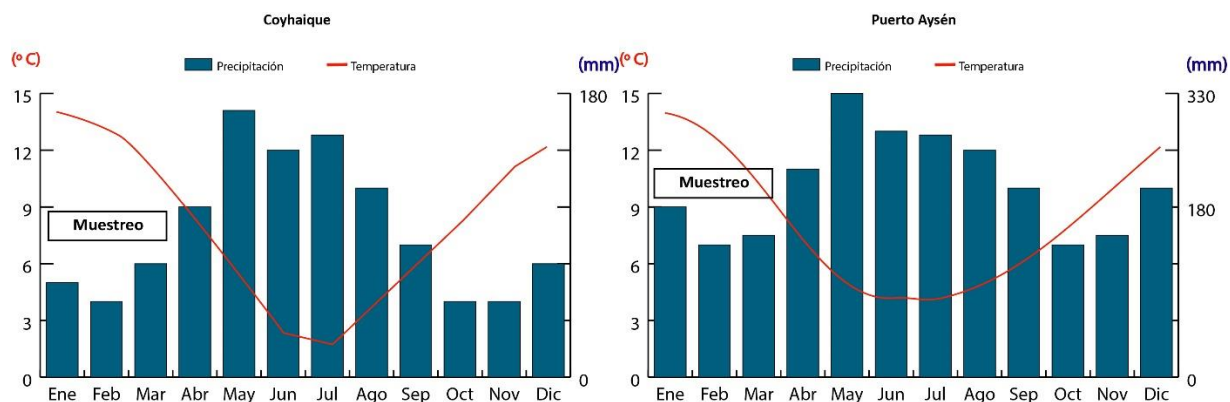


Figura 1.3. Diagrama climático para Coyhaique y Puerto Aysén. Se incluye meses en que se llevó a cabo el muestreo de este trabajo. Elaborado a partir de Rioseco y Tesser, 2016.

1.4.5 Asentamientos humanos

La región de Aysén posee un territorio de 108.500 km², sin embargo, la densidad poblacional obtenida del último censo es de 0,84 hab/km², siendo una de las más bajas de Chile. Esto último se puede explicar debido a la tardía urbanización de la región, donde recién en 1960 se alcanzó una población urbana sobre el 50% comparado con el resto del país que alcanzó este estado en 1940 (SERPLAC, 2005). Según el Censo 2002, existe una población total de 91.492 personas en la región, de las cuales 73.607 se ubican en zonas urbanas (80,5%) y 17.885 en zonas rurales (19,5%) (INE, 2008).

En particular, la cuenca del río Aysén abarca las comunas de Coyhaique y Puerto Aysén pertenecientes a las provincias con el mismo nombre. Existen 33 entidades pobladas, en donde 2 son ciudades, Coyhaique (Capital regional) y Puerto Aysén. Otras localidades importantes también son: Villa Mañihuales, Balmaceda, Villa Simpson, y El Blanco. Las demás localidades corresponden a asentamientos rurales (DGA, 2004).

Las ciudades con mayor población corresponden a Coyhaique, ubicada en el centro de la cuenca, en la ribera sur del río Coyhaique, y a puerto Aysén, que se ubica en el sector costero de la cuenca, en la desembocadura del río Aysén (DGA, 2004).

1.4.6 Actividades económicas

Las actividades económicas de la región se caracterizan por mostrar una evolución a lo largo del tiempo, donde en principio la economía regional estaba basada en la actividad silvoagropecuaria, mientras que ahora se apoya en la actividad pesquero-acuícola. En el último tiempo, otras actividades que han ido adquiriendo un importante protagonismo en la zona son las actividades de servicios, transporte y turismo (Tironi *et al.*, 2005).

Además se debe indicar que las ciudades de Coyhaique y Puerto Aysén, principales comunas de la región, muestran importantes diferencias en sus actividades económicas. Coyhaique, capital regional, presenta una base económica

mayoritariamente de servicios, en especial los asociados a la administración pública, además de agricultura y minería en menor proporción, mientras que Puerto Aysén, ubicado en el sector costero, posee una base económica asociada a la pesca y acuicultura además de los servicios asociados a estas actividades (Tironi *et al.*, 2005).

- **Pesca:** La región de Aysén presenta condiciones óptimas para la actividad pesquera-acuícola debido a que posee territorios marítimos con características favorables (en cuanto a temperatura, salinidad y capacidad de auto limpieza) para una producción de salmónidos considerable. Según estudios de Sernapesca, hasta mediados del 2014 existían 713 concesiones salmónidas en la región.
- **Minería:** La minería en la Región de Aysén está asociada a la explotación de recursos metálicos, como plata, oro, plomo y zinc, siendo este último el único que alcanza importancia a nivel país, representando el 100% de la producción nacional. Por otro lado, la minería no metálica no se encuentra tan desarrollada, solo existen algunas exploraciones de granito cercanas a puerto Chacabuco, exploraciones de caliza en la cuenca del Lago General Carrera (SERPLAC, 2005) y 19 zonas de extracción de áridos, ubicados mayoritariamente en la subcuenca del río Simpson. En la cuenca del río Aysén la explotación minera más importante es la “Sociedad Contractual Minera El Toqui”, ubicada en Alto Mañihuales, 120 km al noreste de Coyhaique y que pertenece a la corporación canadiense productora de zinc llamada “Breakwater Resources Ltd.”. Abarca un área de 1.800 km², que incluyen a las minas de zinc-oro Doña Rosa, Aserradero y Mina Profunda; la mina de zinc-plomo Rosa Oeste; las minas de zinc San Antonio East, Mallín Mónica, Mallín South, Porvenir y Estatuas además de la mina de zinc-plomo-plata Concordia (Tironi *et al.*, 2005). El año 2013, la minera El Toqui cerró con una producción en concentrados de 23.100 toneladas de zinc y 1.200 toneladas de plomo, que se suman a las 41.900 onzas de oro y a las 142.200 onzas de plata.
- **Turismo:** En los últimos años, el turismo regional ha presentado un desarrollo significativo, que queda de manifiesto en el crecimiento de un 7% a un 12% anual en la demanda turística (SERPLAC, 2005). En la cuenca, se pueden apreciar cuatro actividades turísticas predominantes: Turismo Cultural, Agroturismo, Ecoturismo y el Turismo Aventura donde las últimas dos representan las actividades de mayor interés (Tironi *et al.*, 2005).
- **Actividad forestal:** La región de Aysén posee aproximadamente el 37% de los bosques nativos del país, sin embargo, de estos no todos son explotables. Esto último debido a que pueden ser bosques protectores de agua y suelo, o porque algunas hectáreas se encuentran protegidas por el SNASPE. Las especies de árboles presentes en la región son Ciprés de las Guaitecas, Lengua, Coihue de Magallanes y Siempreverde, este último está conformado principalmente por Coihues, Tepas, Mañíos, Ciruelillos, Tepúes, Lumas y Tineos (SERPLAC, 2005). De las 4,8 millones de hectáreas de bosque nativo de la región, 1,4 millones corresponden a Lenguas y Coihues (Tironi *et al.*, 2005).

En particular, en la cuenca de estudio existen 1.535 km² de bosques de explotación, y en la producción industrial de madera aserrada, la provincia de Coyhaique es la de mayor producción, seguido por Puerto Aysén (Tironi, *et al.*, 2005).

- **Actividad agropecuaria:** Entre los años 1960-1997 se redujo la participación del sector agropecuario en el PIB de la región de un 32,1% a un 8,8 %, a diferencia de otras actividades como minería, industria y pesca que han mostrado un crecimiento sostenido (DGA, 2004).
Cerca del 40% de las explotaciones agropecuarias se concentra en la provincia de Coyhaique y son administradas principalmente por privados. (Serplac, 2005).
La ganadería regional se enfoca en la explotación de bovinos y ovinos, que abarca el 94% de la masa total de ganado (Tironi, *et al.*, 2005). Por otro lado, en Coyhaique y Puerto Aysén los principales cultivos son de cereales, chacras, hortalizas y plantas forrajeras (DGA, 2004).

Según Tironi (2005), las distintas actividades desarrolladas en la cuenca pueden generar diferentes tipos de impactos. Por un lado, el impacto ambiental de tipo puntual, podría estar asociado a la minería, pesca (pisciculturas, plantas de procesamiento, talleres de lavados de redes), e industria (vertederos, matadero, sitios de extracción de áridos); mientras que el impacto ambiental de tipo difuso en la cuenca podría estar asociado a la ganadería, agricultura y silvicultura.

Las tendencias en el desarrollo económico de la región pueden indicar potenciales impactos a la calidad del agua en el futuro. Gran parte del desarrollo regional está vinculado con la industria pesquera, que tiene su centro de operaciones en la vecindad de Puerto Aysén y Puerto Chacabuco (Tironi *et al.*, 2005).

2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo seguida en este estudio se divide en 3 etapas: Obtención de muestras, Laboratorio y Procesamiento de datos, descritos en detalle a continuación.

2.1 Obtención de muestras

Durante los meses de enero, febrero y marzo del 2015 se realizó la recolección de muestras en la cuenca del río Aysén. Este trabajo fue realizado por el equipo de profesionales de la Unidad de Geoquímica del Sernageomin.

Las muestras se recolectaron con un espaciado de 4 km aproximadamente, siempre que las características del lugar lo permitan, y siguiendo los principales cauces de la cuenca.

En cada punto de muestreo, además de obtener la muestra, se siguió una metodología estandarizada de terreno, utilizada por la Unidad de Geoquímica del Sernageomin. Esta metodología consiste básicamente en:

1. Registrar la coordenada geográfica del punto de muestreo.
2. Marcar la ubicación en la carta topográfica del lugar.
3. Tomar una fotografía general del sector, aguas arriba de la zona de muestreo y una fotografía particular del lugar específico de muestreo.
4. Realizar una breve descripción del lugar incluyendo aspectos generales, como petrografía, vegetación, geomorfología, entre otros y algunos aspectos más específicos, como el color del sedimento, presencia de materia orgánica en el lugar de muestreo, etc (Figura 2.1).



Figura 2.1. Imágenes del procedimiento que se lleva a cabo en un punto de muestreo. A) Recolección-almacenamiento del sedimento fluvial activo y anotación de las observaciones tanto generales como particulares del punto de muestreo. B) Rotulación de la muestra obtenida en cada punto C), D) Ejemplos de foto en detalle de la zona de muestreo. E), F) Ejemplos de foto general de la zona de muestreo.

Las muestras que se obtuvieron corresponden principalmente a muestras de sedimento fluvial activo, de terraza fluvial y de sedimento fluvial reciente.

Las muestras de sedimentos activos corresponden a compósitos de 3-5 kg que se recolectaron a lo largo de un canal activo, es decir, con un flujo constante de agua. Para adquirir este compósito, se recolectaron sub-muestras en un tramo de entre 20 a 50 metros a lo largo de la rivera, con el fin de lograr una mayor representatividad. Estas sub-muestras se obtuvieron a una profundidad promedio de 15 cm en el lecho y para ello se utilizó una pala de PVC. La recolección se realizó a ambos lados del canal, cuando las características del lugar lo permitían, y finalmente se guardó en una bolsa de polietileno transparente (Figura 2.2).

Las muestras de sedimento fluvial reciente son similares a las de sedimentos activos, diferenciándose en que las primeras son obtenidas de un canal donde ya no escurre agua.

Por último las muestras de sedimentos de terrazas fluviales corresponden a compósitos de 3-5 kg recolectados desde una terraza fluvial. Estas muestras se obtuvieron de los distintos niveles fluviales de la terraza y a lo largo de 20 a 50 metros a lo largo de la terraza, para lograr una mayor representatividad. Al igual que con los otros tipos de muestra, se utilizó una pala de PVC para la recolección y una bolsa de polietileno transparente para guardar la muestra (Figura 2.2). Se asume en este trabajo, que las terrazas representan una concentración pre-industrial (background) del lugar de donde se extrae.



Figura 2.2. Imágenes de muestreo de sedimento fluvial. A), B) Muestreo de sedimento de terrazas fluviales. C), D) Muestreo de sedimento fluvial activo.

2.2 Laboratorio.

El trabajo en laboratorio está dividido en dos aspectos mayores: Geoquímica y Mineralogía, que se detallan a continuación.

2.2.1 Geoquímica

Se preparó el total de las muestras obtenidas para análisis químicos, además, se preparó un sub-set de muestras para un estudio granulométrico.

- **Preparación de las muestras**

Esta etapa se llevó a cabo mayoritariamente en el Taller de molienda del Laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería, donde las muestras de sedimentos se secaron en un horno a 25°C-27°C. Luego se realizó el tamizaje en mallas de acero inoxidable (malla #80) con el fin de separar la fracción 180 µm. De esta fracción se recuperaron 40 gr aproximadamente, lo más homogéneos posible, que posteriormente fueron pulverizados con un mortero de ágata durante 2 minutos. Este material fino se almacenó en frascos transparentes estériles. Este procedimiento se repitió para cada muestra (Figura 2.3).



Figura 2.3. Resumen de la preparación de muestras que se lleva a cabo en el Taller de Molienda del Sernageomin. A) Muestra húmeda es distribuida en las bandejas, C) Horno utilizado para el secado de muestras a una temperatura de 25°C a 30 °C, E) Torre de tamices, B) Tamizadora ROTAP, que funciona mediante movimientos circulares horizontales y un golpeteo vertical, D) Cuarteador de muestras, utilizado para dividir la muestra de manera representativa, F) Olla de Anillos de ágata que forman parte del Molino Pulverizador Rocklabs donde el material es pulverizado, y se obtiene la granulometría requerida para los análisis G) resultado final, donde 40 gr del material obtenido por cada muestra se almacenan en frascos estériles y se rotulan.

De las muestras obtenidas se seleccionó un sub set de 8 muestras para llevar a cabo un estudio granulométrico. En ellas se realizó un proceso de tamizaje mediante las mallas #50 (297 μm) y la #120 (125 μm), separando así 2 fracciones de sedimento

distintas: <125µm y <297 µm para cada muestra, y posteriormente se siguió el mismo procedimiento descrito anteriormente con la malla #80 (180 µm), es decir, se pulverizaron 40 gramos lo más homogéneo posible del material en un mortero de ágata y se almacenó en envases estériles.

▪ **Análisis geoquímico**

Los envases con las muestras preparadas (tamizadas y pulverizadas en el mortero de ágata) se agruparon en lotes de muestras (Batch) y fueron enviados a AcmeLabs (laboratorio Canadiense con certificación internacional). En este laboratorio se determinó la abundancia total de óxidos mayores mediante espectrometría de emisión ICP-ES y la abundancia de elementos traza mediante espectrometría de masas ICP-MS.

Para los análisis por ICP-ES se tomaron muestras de 0,2 gramos, las que fueron sometidas a fusión con boratos de litio y luego digestión con ácido nítrico (AcmeLabs, 2015).

Para los análisis por ICP-MS se prepararon 2 tipos de muestras:

- Para análisis de tierras raras y algunos elementos traza: misma preparación que en el ICP-ES.
- Para análisis de metales preciosos y metales base: se tomaron muestras de 0,5 gramos que fueron digeridas en agua regia (AcmeLabs, 2015).
- S y C total, se requieren al menos 0,01 gramos para análisis de estos elementos mediante LECO.

Los 61 elementos químicos analizados en cada muestra corresponden a:

- 10 óxidos mayores (%): SiO₂, Na₂O, K₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, TiO₂, P₂O₅, MnO.
- 49 elementos traza (ppm): Ba, Be, Rb, Sr, Cs, Co, Cr, Ni, Ga, Hf, Nb, Sc, Th, U, V, W, Zr, Y, Sn, Ta, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Mo, Cu, Pb, Zn, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Au (ppb), Hg, Tl, Se, Te, B.
- C total (%), S total (%).

2.2.2 Mineralogía

En este trabajo, la mineralogía se obtuvo a partir de dos etapas. La primera, asociada al estudio de briquetas de sedimento, confeccionadas para 10 muestras, que se seleccionaron mediante los siguientes criterios:

- Muestras obtenidas de lugares que representen desagües de los ríos principales de la cuenca de estudio.
- Muestras ubicadas en lugares de interés, como lo son grandes ciudades, industria, mineras etc.

Luego, una segunda etapa del estudio mineralógico se desarrolló mediante Difracción de Rayos X (DRX) para 21 muestras. Los criterios para seleccionar estas 21 muestras fueron:

- Muestras que hubiesen sido incluidas en el estudio de briquetas (y por lo tanto presenta los requisitos ya especificados).
- Muestras que entregaron resultados químicos llamativos (altas concentraciones de algunos elementos en relación a las demás muestras de la cuenca).

- **Preparación de muestras para mineralogía**

Para la confección y posterior descripción petrográfica de briquetas de sedimento fluvial, se utilizaron las mallas #35 (500 μm), #50 (297 μm) y se obtuvo la fracción de 297-500 μm . Se almacenaron 50 gramos de esta fracción para la confección de briquetas transparentes de sedimentos. Estas briquetas se elaboraron en el Taller de Cortes del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Por otro lado, las 21 muestras seleccionadas para mineralogía mediante DRX (donde se incluyen las 10 que también poseen briqueta), previamente tamizadas con la malla #80 (180 μm), se trituraron y homogenizaron mediante un mortero de ágata hasta alcanzar un tamaño de grano $<20\mu\text{m}$ (método del polvo).

- **Análisis mineralógico**

Las muestras que se prepararon como briquetas transparentes de sedimento fueron estudiadas en el laboratorio de Petrografía Microscópica del Servicio Nacional de Geología y Minería, utilizando un Microscopio Polarizante, mediante luz transmitida (*Olympus BH-2*). Este estudio fue complementado con una lupa binocular ubicada en el mismo laboratorio.

Por otro lado, las muestras que se prepararon para DRX se analizaron en el Laboratorio del Sernageomin utilizando un equipo de Difracción de Rayos-X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO.

De esta manera, se obtiene la mineralogía para 21 muestras de la cuenca, mediante DRX, y además, para un subconjunto de 10 muestras, mineralogía a partir de briquetas.

2.3 Procesamiento de datos

Es importante mencionar que el procesamiento de datos está dividido en tres aspectos mayores. El primero asociado a los resultados geoquímicos obtenidos con la malla #80, donde se incluye un control de calidad de datos. El segundo asociado a la mineralogía obtenida mediante DRX en las muestras seleccionadas y que se complementa con un estudio de petrografía mediante briquetas de sedimento. Por último, el tercero asociado a los resultados obtenidos para el sub-set de las 8 muestras, donde se obtuvo la química asociada a diferentes granulometrías de sedimentos.

2.3.1 Datos geoquímicos

La base de datos geoquímica de los sedimentos fluviales de la cuenca del río Aysén fue estudiada utilizando diferentes herramientas que se detallan a continuación:

- Factor de Enriquecimiento (FE): Este factor se obtiene para un elemento químico dado, en una muestra i , mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Factor de Enriquecimiento (FE)}: \frac{\text{Concentración en muestra } i}{\text{Concentración promedio en la cuenca}}$$

Donde la concentración promedio en la cuenca se calcula a partir de las concentraciones químicas obtenidas en este estudio.

De esta manera se habla de una muestra enriquecida en cierto elemento, si el FE de esa muestra es >1 para ese elemento. Se generó una tabla donde se incluye el Factor de Enriquecimiento de los distintos elementos químicos, para cada muestra de sedimento activo, como se detalla en Anexo B.1.

- Diagramas de clasificación TAS (*Total Alkali Silica*): Corresponden a diagramas de clasificación de roca total basado en las concentraciones de SiO_2 y $\text{NaO}_2+\text{K}_2\text{O}$. Estos diagramas se utilizaron para las muestras de sedimento fluvial activo de cada río, como se detalla en Anexo B.2.
- Índice de Basicidad (BI): Este índice está definido como:

$$\text{Basicity Index (BI)} = \frac{\text{FeO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}$$

En esencia, refleja la relación de los componentes máficos versus los félsicos (Kumon & Kiminami, 1996). Este Índice se aplicó a todas las muestras de sedimento fluvial activo de la cuenca.

- Índice de Meteorización Química (C.I.A): Este índice se define como:

$$\text{C.I.A} = 100 \times \left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \right)$$

Corresponde a un índice utilizado para cuantificar la meteorización de la fuente de los sedimentos (Nesbitt & Young, 1982). Este, se aplicó a todas las muestras de sedimentos fluvial activo de la cuenca.

2.3.1.1 Control de calidad de datos

Con el fin de garantizar la calidad de la información que se entrega, es fundamental incluir un programa de control de calidad de datos en trabajos que comprenden ciclos de muestreo, preparación y análisis de muestras. Considerando que este estudio se enmarca en el trabajo de mapeo geoquímico de la Unidad de Geoquímica del Plan Nacional de Geología del Sernageomin, se utilizó el protocolo establecido por la Unidad

de Geoquímica del Sernageomin, que incluye un programa de control de calidad de datos específico.

Este programa se aplicó una vez obtenidos los resultados químicos y se siguió un procedimiento orientado a detectar problemas, cuantificar el error asociado a los problemas identificados y disminuir este error.

En particular para este trabajo, se evaluaron las etapas de muestreo y análisis mediante la inserción de muestras de control que se detallan a continuación:

- Muestras gemelas: Consisten en 2 muestras tomadas en un mismo lugar mediante la misma metodología con el fin de medir la precisión de muestreo. Se les llamará “original” y “duplicado” a cada una del par de muestras.
- Duplicados finos: Después de pulverizar la muestra, se divide en 2 partes iguales (previo el envío a AcmeLabs), con el fin de evaluar la precisión del análisis. Se les llamará “original” y “duplicado” a cada una del par de muestras.
- Estándar: Es un material de referencia con valores químicos conocidos y certificados por distintos laboratorios, se utilizan con el fin de evaluar la exactitud del análisis. En este caso se utiliza el material de referencia STSD-3 del CCRMP, Canadá.

Estas muestras de control se insertaron en cada Batch (lote de muestras), previo al envío de muestras al laboratorio, de manera que se generaron 13 Batch distintos, donde:

- 11 incluyen: 17 muestras, 2 muestras gemelas, 2 duplicados finos y un estándar, es decir, 22 muestras en total.
- 1 incluye: 10 muestras, 2 muestras gemelas, 2 duplicados finos y un estándar, es decir, 15 muestras en total.
- 1 incluye: 10 muestras, 4 muestras gemelas y 2 duplicados finos, es decir, 16 muestras en total.

Aplicando la metodología que se detalla a continuación, se evaluó la precisión del muestreo mediante 14 pares de muestras gemelas y del análisis mediante 13 pares de muestras de duplicados finos. Por otro lado, se evaluó la exactitud del análisis mediante 12 muestras estándar, que se insertaron uno en cada batch.

Precisión: Se define como una medida cualitativa que a través de la variabilidad se cuantifica. La variabilidad se mide mediante el error relativo, que se calcula:

$$ER = \frac{|V_0 - V_d|}{(V_0 + V_d)} \times 2 \quad (1)$$

ER=error relativo

V₀=valor original

V_d=valor duplicado

Para evaluar el error relativo, se elaboraron gráficos donde se proyectan las concentraciones de las muestras “original vs duplicado” para cada par de muestras gemelas y para cada muestra con duplicado fino. En cada gráfico se definieron líneas de aceptación, que se construyeron dependiendo del tipo de muestras:

- Muestras gemelas ER=30% reemplazando en (1), se obtienen:

$$Y=1.35 * X, \text{ ecuación recta límite superior}$$

$$Y=0.74 * X, \text{ ecuación recta límite inferior}$$

- Duplicado fino ER=10%, reemplazando en (1), se obtienen:

$$Y=1.1 * X, \text{ ecuación recta límite superior}$$

$$Y=0.9 * X, \text{ ecuación recta límite inferior}$$

De esta manera, se clasificó como par fallido si los puntos quedan fuera del área delimitada por las líneas de aceptación. Se utilizó como criterio de aceptación que la proporción de pares fallidos debe ser inferior o igual al 10%.

Exactitud: Medida cualitativa que se cuantifica mediante el sesgo.

$$\text{Sesgo(\%)} = \left[\left(\frac{\text{PR}}{\text{MV}} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (2)$$

PR=Promedio de las mediciones del estándar (entregadas por el lab. a controlar).

MV=Valor certificado del estándar.

Como se mencionó anteriormente, previo al envío de las muestras al laboratorio AcmeLabs, estas fueron agrupadas en distintos lotes llamados “Batch”. En cada uno de estos lotes se agregó una muestra conocida como estándar (STSD-3 del CCRMP, Canadá).

Posteriormente, se identificaron aquellos “batch” que se encuentran fuera de control. Para ello se confeccionó un gráfico de control para cada elemento, donde se graficaron rectas horizontales que corresponden a los valores: MV, PR, $PR \pm 2SD$, $PR \pm 3SD$, con SD=desviación estándar.

De esta manera, se dice que los datos de un batch están fuera de control si:

- Una muestra es $>3SD$
- Dos muestras consecutivas son $>2SD$

Si es que existen muestras fuera de control se debe determinar si corresponde a un error aleatorio (solo una muestra alterada) o error sistemático (todas las muestras alteradas), para ello se re analizó el estándar junto con sus muestras contiguas. En el caso de que se detecte que el error fue sistemático, se debe volver a analizar todo el batch.

Finalmente, para calcular la magnitud del sesgo, se sacaron las muestras fuera de control y se calculó el promedio sin estas, así, mediante la fórmula descrita en (2), se calculó el sesgo y se clasificó como:

- Bueno si: $|\text{Sesgo}| < 5\%$,
- Cuestionable si: $5\% < |\text{Sesgo}| < 10\%$
- Inaceptable si: $10\% < |\text{Sesgo}|$

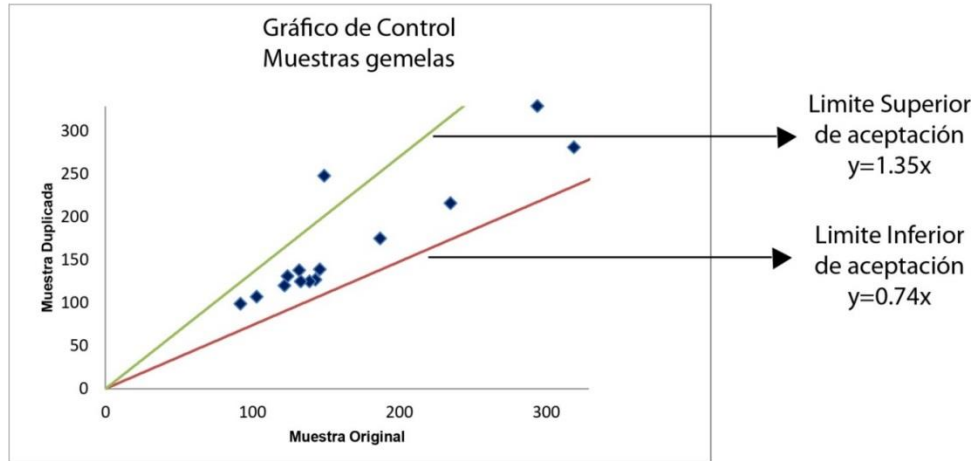


Figura 2.4. Ejemplo de un grafico de control para muestras gemelas.

2.3.1.2 Mapas geoquímicos

- **Univariabes:** Para cada elemento químico se plotearon las concentraciones obtenidas en la cuenca. Para realizar esto se utilizó el software ArcGis, donde se definieron rangos de concentración, según los cortes naturales de Jenks (método basado en minimizar la variabilidad interna de cada clase (o rango), y maximizar las diferencias entre clases). Luego de que se definieron 5 rangos de concentración (distintos para cada elemento), se asignó una simbología para cada uno, variando el tamaño y color para cada rango. Para algunos elementos como Al_2O_3 , Be, Tl y Ta no se pudo agrupar las concentraciones en 5 rangos, debido a que se generaron rangos con un solo valor. Por esta razón, para estos elementos se utilizaron menos rangos (4, 4, 3 y 2 respectivamente). Es importante mencionar que para estos mapas, no se utilizaron las muestras obtenidas desde terrazas fluviales.
- **Multivariabes:** Se realizó un agrupamiento de muestras mediante un algoritmo conocido como K-MEANS, creado por MacQueen (1967). Mediante este algoritmo, cada muestra se asignó a un clúster (grupo o conjunto de datos similares entre ellos y diferentes de los que componen otros clúster) de los disponibles. El número de clúster se define previo a aplicar el algoritmo. Para realizar este agrupamiento se siguieron 4 pasos:

1. Se asignaron aleatoriamente en cada clúster el total de muestras a agrupar. Cada clúster posee un centroide, que corresponde a la media ponderada.
2. Los datos (muestras en este caso) se re asignaron a un clúster según la distancia euclideana al centroide de cada clúster. De esta manera se re asignaron a cada clúster las muestras que poseen menor distancia al centroide de cada clúster.
3. Se vuelven a calcular los centroides de cada clúster.
4. Se repite el paso 2 y 3 hasta que no hayan variaciones (o re asignaciones).

De esta manera, cada clúster representa la media o centroide de las muestras que lo conforman (Cambronero y Moreno, 2006).

Para llevar a cabo este algoritmo se utilizó el programa RapidMiner donde los datos se normalizaron y luego se agruparon en 6 clusters de acuerdo al algoritmo. Luego, para caracterizar cada cluster, se utilizaron los diagramas de caja y bigote generados para cada elemento. En estos gráficos se visualiza el conjunto de datos basado principalmente en sus cuartiles. Se incluye información sobre los valores mínimos, máximos, cuartiles (que incluyen la mediana), outliers (o valores atípicos) y la simetría de la distribución de los datos. Por esta razón resulta particularmente útil para obtener una visión general de la simetría de la distribución de los datos y también para encontrar valores atípicos. De esta manera utilizando principalmente el dato de la mediana de cada clúster, se definieron qué elementos caracterizan cada clúster (Debido a que se encuentran en mayores concentraciones, en relación a los demás clúster). Con el fin de complementar la información entregada por los diagramas de caja y bigotes, se agregó una segunda caracterización de cada cluster, de acuerdo a los factores de enriquecimiento de cada cluster.

- **PEC:** Con el fin de evaluar la calidad o toxicidad de los sedimentos químicos de la cuenca, se utilizó un parámetro de toxicidad conocido como PEC (*Probable Effect Concentration*). Este parámetro identifica concentraciones de contaminantes sobre las cuales se espera que ocurra un efecto adverso para los organismos (macro invertebrados bentónicos) que conviven con estos sedimentos (MacDonald *et al.*, 2000). Existen muchas guías que utilizan este parámetro para medir la calidad del sedimento de agua dulce en el mundo. Una de las más aceptadas (y la que se utiliza en este trabajo) corresponde a la publicada por MacDonald y otros en el año 2000. En ella se realiza una compilación de distintas guías de calidad de sedimentos de agua dulce existentes y se calcula un promedio geométrico entre los distintos PEC dados para 28 sustancias químicas (orgánicas e inorgánicas).

En base a los valores PEC entregados en MacDonald y otros (2000) para 8 elementos metálicos (Tabla 2.1), se evaluaron todas las muestras obtenidas en la cuenca y se plotearon en un mapa únicamente aquellas que superaban este parámetro para uno o más de los metales pesados en cuestión. De esta manera se generó un mapa geoquímico donde se plotean, mediante círculos de colores, las muestras que superan las concentraciones definidas por el parámetro PEC, es decir, se identifican zonas que podrían poseer un grado de toxicidad. En el caso de que una misma muestra supere el parámetro PEC para más de un

metal, el círculo se divide en partes iguales, según la cantidad de metales que corresponda.

Tabla 2.1. Valores PEC para metales. Fuente: MacDonald *et al.*, 2000

Metales	Consensus-Based PEC [ppm]
Arsénico (As)	33
Cadmio (Cd)	4,98
Cromo (Cr)	111
Cobre (Cu)	149
Plomo (Pb)	128
Mercurio (Hg)	1,06
Níquel (Ni)	48,6
Zinc (Zn)	459

Por otro lado, teniendo en cuenta que los sedimentos por lo general contienen una mezcla de contaminantes (MacDonald *et al.*, 2000), resulta necesario evaluar toxicidad considerando los distintos contaminantes y no solo uno. Así, se define en el trabajo de MacDonald (2000), un parámetro llamado PEC-Qm (mean PEC quotients), asociado al contenido ponderado de las distintas sustancias. Este factor se calcula como:

$$PEC-Qm = \sum \left(\frac{[concentracion]}{PEC} \right)$$

Es decir, para cada elemento se divide la concentración obtenida en la muestra por el parámetro PEC entregado para ese elemento. Este factor se obtiene para cada elemento y se suman, obteniendo un PEC-Qm para cada muestra.

En el trabajo de Department of Natural Resources, Wisconsin (2003) se lleva a cabo una interpolación del factor PEC-Qm transformándolo a un % de toxicidad, es decir, para cada muestra se obtiene un porcentaje de toxicidad considerando los distintos contaminantes presentes en ella.

2.3.1.3 Gráficos de variación geográfica

Para los distintos ríos de la cuenca se elaboraron gráficos de variación geográfica para cada elemento químico. Estos se construyeron a partir de la concentración química obtenida en las muestras considerando su ubicación geográfica. Para ello es necesario establecer un punto de partida dado (distancia = 0) para cada río, y medir con el programa ArcGis las distancias aguas abajo desde el punto 0 hasta cada muestra. De esta manera las distancias se incluyen en el eje x y la concentración química en el eje y de cada gráfico. La recta generada por los puntos (x,y) se definió a partir de las muestras activas, sin embargo, se incluyó en cada gráfico, las concentraciones de las terrazas fluviales (cuadrados verdes) y de los afluentes del río en cuestión (triángulos amarillos). Estos fueron elaborados para los principales ríos de la cuenca.

- río Toqui.
- río Ñirehuao.
- río Emperador Guillermo.
- río Coyhaique.
- río Blanco este.
- río Picaflor-Mañihuales.
- río Simpson-Aysén.
- río Pangal.
- río La Paloma-Blanco.

Para simplificar visualmente la información entregada por los diagramas de variación geográfica, se generaron diagramas estandarizados para los distintos ríos. En ellos se normalizaron las concentraciones elementales de cada río según:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

Con z_i el nuevo valor estandarizado, x_i la concentración original, \bar{x} el promedio de concentración en el río, y σ la desviación estándar. Este tipo de estandarización permitió que los nuevos valores tengan media cero y varianza 1, lo que posibilita comparar los distintos elementos. De esta manera fue más fácil visualizar aquellos elementos que se comportan de manera similar en un río, permitiendo asociar fases minerales que pueden estar controlando las concentraciones químicas en un río.

2.3.2 Datos mineralógicos

2.3.2.1 Briquetas

Se realizó una descripción mineralógica de cada una de las 10 briquetas de sedimento, identificando los distintos minerales presentes en cada muestra (estudio cualitativo, no cuantitativo). La información obtenida de las briquetas se utilizó como antecedente para la Difracción de Rayos X, es decir, posterior a la descripción para las 10 briquetas de sedimentos se realizó el análisis de DRX para esas 10 muestras.

2.3.2.2 Difracción de rayos x (DRX)

Con los antecedentes geológicos de la cuenca, las observaciones mineralógicas y litológicas de terreno y la descripción de las 10 briquetas, se llevó a cabo la interpretación mineralógica de los difractogramas. Luego, la información obtenida mediante DRX se correlacionó con los mapas: Geoquímicos Univariados y Geológico de la cuenca.

2.3.3 Efecto de la granulometría sobre la composición química

Previo a realizar el estudio granulométrico, se debe tener en cuenta la composición de la fuente de los sedimentos de cada muestra, con el fin de realizar una correcta interpretación de los resultados. Considerando que los sedimentos fluviales incluyen información de las distintas fuentes presentes en el lecho del río, se puede obtener una

aproximación de la composición de la fuente dominante mediante distintos métodos. Uno de ellos es mediante diagramas de clasificación que utilizan los ratios de elementos inmóviles. El carácter inmóvil permite que las concentraciones no se vean alteradas en gran medida por procesos de diagénesis, meteorización, dilución etc. Por lo general estos ratios incluyen un elemento compatible y uno incompatible, de esta manera se maximiza el contraste entre las rocas de composición félsica y máfica. Así, aunque los contenidos absolutos de la roca cambien por distintos procesos, los ratios debiesen reflejar la composición de la fuente (Barry Roser, Comunicación Personal 2015). De esta manera, para tener una composición aproximada de la fuente de cada muestra estudiada, se realizaron diagramas de concentración Zr/Sc versus Th/Sc, donde además se agregaron las razones características de cada fuente (basaltos, andesitas, riolitas) según lo publicado por Taylor (1965).

Como se mencionó anteriormente, se prepararon 8 muestras para el estudio granulométrico. Cada una de estas muestras posee una química asociada a distintas granulometrías: <125 μm , <180 μm y <297 μm . Para estudiar las diferencias químicas que ocurren para una misma muestra al variar el tamaño de grano, se confeccionaron diagramas comparativos. Para ello, se normalizaron los datos a la fracción <297 μm , y se plotearon las fracciones <125 μm y <180 μm para cada elemento químico. De esta manera se obtuvo un diagrama para cada muestra donde en el eje x se presentan los distintos elementos químicos a estudiar y en el eje y las concentraciones normalizadas a la fracción <297 μm .

Luego, obteniendo una posible composición química de la fuente de cada muestra, se interpretaron los resultados obtenidos al variar el tamaño de grano para elementos mayores y menores, lo cual se muestra en forma detallada en el Anexo D.

3 MARCO GEOLÓGICO*

3.1 Unidades Litoestratigráficas.

JURÁSICO SUPERIOR-CRETÁCICO INFERIOR BAJO.

Jk1m (Formación Ibáñez). (Niemeyer, 1975; emend. Suárez et al., 1996): Esta unidad está constituida por rocas volcánicas y volcanoclásticas, que incluyen, en algunos sectores, intercalaciones sedimentarias marinas. Subyace en concordancia a calizas de la Formación Toquí y a lutitas de la Formación Katterfeld. Además, subyace en discordancia angular y por erosión a volcanitas de la Formación Divisadero. No presenta base expuesta en la zona de estudio y tiene una potencia mínima de 500 m.

Esta Formación está constituida predominantemente por rocas piroclásticas de composición riolítica y dacítica, usualmente silicificadas y argilizadas. Incluye además, lavas andesíticas, andesítico-basálticas, dacíticas y subordinadamente basálticas, de tendencia calcoalcalina (Suarez et al., 1999; Quiroz, 2000; Bruce, 2001). Incluye también domos riodacíticos, brechas matriz soportadas, tobas de caída, brechas monolitológicas e intercalaciones esporádicas sedimentarias clásticas y fosilíferas de origen marino.

La edad asignada para esta formación comprende entre el Jurásico Superior y el Hauteriviano temprano¹.

Se reconocen asociaciones de facies específicas, por lo que la Formación Ibáñez ha sido subdividida en 7 unidades:

- **Volcanitas El Zorro** *Jurásico Superior - ¿Berrisiano temprano?* (De la Cruz et al., 2003): Corresponde a una sucesión piroclástica ignimbrítica, con lavas andesítico - basálticas, expuestas en las nacientes del río Coyhaique¹.
- **Complejo Volcánico Cerro Trinchera** *Jurásico Superior- Berrisiano temprano* (Suárez et al., 2007): Complejo volcánico formado principalmente por rocas lávicas (dacitas – andesitas – basaltos) y piroclásticas, con ignimbritas y tobas de caída. Además, incluye depósitos de flujos de detritos y tufitas. Aflora cercano a las nacientes del río Ñirehuao¹.
- **Domos Lago Diunco** *Jurásico Superior- Berrisiano temprano* (Suárez et al., 1996): Unidad constituida por domos riolíticos, dacíticos y subordinadamente andesíticos. Las ignimbritas riolíticas expuestas al sur del lago Misterioso alcanzan más de 30 m de espesor y presentan alteración hidrotermal interpretada como sin volcánica, de tipo sílico-argílica, con vetillas de cuarzo y localmente mineralización metálica. Aflora en el extremo nororiental del área de estudio y alcanza una potencia expuesta de hasta 400 m¹.
- **Complejo Volcánico Lago Norte** *¿Jurásico Superior? – Valanginiano tardío/Hauteriviano temprano; 140 – 136 Ma* (De la Cruz et al., 1994, emend. en Suárez et al., 2007): Complejo constituido por rocas volcánicas, piroclásticas y lávicas, además de algunos cuerpos hipabisales e intercalaciones discontinuas

calcáreo-piroclásticas, coquinoideas y fosilíferas en los niveles inferiores. Se expone al norte y sur de los lagos Norte y Misterioso, y al norte y sur de la confluencia del río Ñirehuao con el estero El Gato. Las intercalaciones marinas afloran en los alrededores del lago Norte y sur de la confluencia Ñirehuao-El Gato¹.

- **Complejo Volcánico Foitzick Berriasiano; 138 Ma** (De la Cruz *et al.*, 2003): Se define como una sucesión piroclástica y lávica, que incluye filones manto, de composición dacítica, con intercalaciones andesíticas, expuestas 6 km al sur de Coyhaique. Está constituido por lavas andesíticas, ignimbritas dacíticas, brechas dacíticas, de filones manto y diques asociados².
- **Complejo Volcánico Elizalde** (De la Cruz *et al.*, 2003): Secuencia compuesta por lavas andesíticas, alteradas (muy cloritizadas y epidotizadas), con intercalaciones de rocas piroclásticas, principalmente ignimbritas. Aflora en el sector oriental del lago Elizalde y no presenta base expuesta².
- **Ignimbritas de la Cordillera Castillo** (De la Cruz *et al.*, 2003): Unidad de 900 mt aproximadamente de potencia constituida principalmente de ignimbritas. Aflora al sur del lago La Paloma, como “roof pendant” del Segmento Oriental del Batolito Patagónico².

CRETACICO INFERIOR

Ki2m (Grupo Coyhaique) Berriasiano – Aptiano inferior (Haller y Lapido, 1980; emend. en Suárez *et al.*, 2007): El Grupo Coyhaique incluye rocas sedimentarias silicococlásticas marinas con contenidos variables de material piroclástico, y rocas volcánicas asociadas, representadas estratigráficamente, de abajo hacia arriba, por las formaciones Toqui (calcárea, arenosa y piroclástica), Katterfeld (lutítica), Apeleg (arenosa) y el Complejo Volcánico Baño Nuevo, formado por rocas piroclásticas, lavas y cuellos. Este grupo sobreyace concordantemente y, en algunos sectores, engrana parcialmente con la Formación Ibáñez. Subyace, en paraconcordancia o discordancia angular y de erosión, a la Formación Divisadero¹.

* La descripción del marco geológico de este estudio se basa principalmente en:

¹ Carta geológica de Chile escala 1:100000: Geología del área Ñirehuao-Baño nuevo (2007).

² Carta geológica de Chile escala 1:100000: Área Coyhaique-Balmaceda (2003).

³ Mapa de recursos minerales del área fronteriza Argentino-Chilena entre los 34° y 56°S, (1999).

⁴ Carta geológica de Chile escala 1:100000: Geología del área Puerto Ingeniero Ibáñez-Villa Cerro Castillo (2010).

Por otro lado, la elaboración del mapa geológico expuesto está basado en:

⁵ Mapa geológico de Chile escala 1:1000000 (2002).

Sin embargo posee algunas modificaciones debido a información más reciente publicada en Suárez *et al.*, 2007 y De la Cruz *et al.*, 2003.

- **Formación Toqui** *Berriasiano-Valanginiano* (Suarez y De la Cruz, 1994): Unidad marina litoral, definida en la zona norte del área de estudio, en los valles del río Toqui y sus afluentes. Está compuesta principalmente por calizas, areniscas, lutitas y tobas, con fósiles marinos. Comprende tres asociaciones de facies: calcárea, arenoso-calcárea y piroclástico-carbonatada de carácter marino. La asociación calcárea está constituida principalmente por calizas, coquinas de “ostreas” y areniscas calcáreas fosilíferas. Por otro lado, la asociación arenosa-calcárea incluye areniscas calcáreas, areniscas guijarrosas, conglomerados volcanoclásticos con matriz calcárea y lutitas y limolitas fosilíferas. Por último, la asociación piroclástica-carbonatada incluye tobas submarinas, depósitos de flujo piroclástico y de caída, calizas fosilíferas, areniscas calcáreas volcánicas, areniscas tobaceas y lutitas tobaceas ¹.

- **Formación Katterfeld** *Valanginiano-Hauteriviano* (Ramos, 1976): Conformada por lutitas negras fosilíferas. Se expone en afloramientos restringidos, principalmente en el Distrito Toqui, (sector norte de la zona de estudio), en la Ciudad de Coyhaique y en otras localidades aisladas. La unidad está constituida por lutitas y limolitas de color negro con fósiles marinos. Presentan diseminación de pirita y calcopirita y se encuentran comúnmente cortados por diques andesíticos y dacíticos, asociados al magmatismo que probablemente dio origen al Complejo “Baño Nuevo” y/o a la Formación Divisadero ¹.

- **Formación Apeleg** *Hauteriviano-Aptiano inferior* (Ploszkiewicz y Ramos, 1977): Corresponde a una secuencia marina fosilífera formada por areniscas de grano medio y fino, bien seleccionadas, con láminas pelíticas muy delgadas e intercalaciones de lutitas negras y gris oscuras en la base. Se expone en afloramientos aislados, principalmente en el sector centro, sur y nororiente de la cuenca. Esta formación incluye asociaciones de areniscas y lutitas heterolíticas, areniscas con estratificación cruzada, areniscas macizas, lutitas y brechas sinsedimentarias con fragmentos pelíticos y niveles delgados calcáreos. Las areniscas son líticas y muy bioturbadas, incluyen cuarzo (volcánico y metamórfico), plagioclasa, líticos (andesitas y rocas metasedimentarias), glauconita y muscovita ocasional. La diagénesis se interpreta como asociada a un entierro relativamente profundo con baja porosidad ¹.

- **Complejo Volcánico Baño Nuevo** *Aptiano inferior, 122-120 Ma* (Suárez *et al.*, 2007): Corresponde a una unidad volcánica, formada principalmente por tobas, brechas volcánicas, lavas andesítico-basálticas, y cuerpos macizos de brechas y basaltos. Aflora en la zona centro-oriental del área de estudio. Está formada por 50 cerros aislados en la pampa, algunos con diámetros de 1 km y alturas mayores a 100 m formados por material piroclástico, resultado de sucesivas explosiones. Las rocas corresponden a tobas y brechas basáltico-andesíticas, en capas de 5 a 200 cm de espesor, con altos manteos que conforman un semicono cerrado que se dispone sobre bancos de areniscas de la Formación Apeleg ¹.

CRETACICO INFERIOR ALTO

Kig

- **Batolito Norpatagónico Cretácico Inferior:** El borde oriental del Batolito Norpatagónico se encuentra asociado al Cretácico Inferior e incluye una litología que varía desde granitos, granodioritas hasta tonalitas de anfíbol y biotita⁵. En De la Cruz *et al.*, (2003) se han descrito además, monzogranitos, y monzonitas cuarcíferas de anfíbola pertenecientes a esta unidad.
- **Granito Lago Largo Cretácico Inferior alto, 119 Ma** (Suárez *et al.*, 2007): Corresponde a un granito rosado emplazado en la Formación Ibáñez, específicamente en el Complejo volcánico Lago Norte, al sur del río Ñirehuao. Se incluyen abundantes xenolitos en el margen del intrusivo y una intensa silicificación en las zonas de contacto de la roca caja. Se expone al sur del río Ñirehuao y norte del Lago Largo. Este plutón corresponde a un sienogranito con feldespatos alterados a smectita, que contiene biotita y hornblenda cloritizadas. Presenta alteración a epidota y clorita e intensa piritización¹.

Ki3ai (Formación Divisadero) Aptiano, ca. 116 Ma (Heim, 1940): Sucesión de rocas volcánicas y piroclásticas, subaéreas, de composición riolítica, dacítica y andesítica. Existen cuerpos hipabisales y algunos niveles sedimentarios continentales. Aflora como una franja norte sur, desde el centro hacia el oriente de la cuenca y el espesor mínimo varía entre 800-1000 m. Sobreyace con suave discordancia angular y de erosión a la Formación Apeleg y a la Formación Katterfeld. Subyace con leve discordancia angular a la Formación El Toro en algunos sectores del área de estudio. Esta Formación está intruída por el Granito Lago Largo y los Hipabisales Machi Aserradero; los Domos Casa de Piedra entre otros. Se reconocen en la zona, niveles de conglomerados, afloramientos de ignimbritas (de composición dacítica y riolítica), lavas andesíticas y dacíticas, tobas y tufitas bien estratificadas y domos de composición dacítica con niveles de obsidiana¹.

Kih

- **Hipabisales riolíticos San Antonio Cretácico Inferior alto; ca. 108-100 Ma** (Suárez *et al.*, 2007): En esta unidad se agrupan rocas hipabisales expuestas en las cercanías del Distrito de la mina Toqui. Se emplazan en las formaciones Ibáñez, Toqui y Katterfeld y al parecer son las responsables de la mineralización de Pb-Zn, tipo skarn existente en la zona. Al este del río San Antonio destaca un pórfido de cuarzo-feldespato compuesto por fenocristales de feldespato-K y albita en una matriz de cuarzo, albita y feldespato-K con escasa sericita¹.
- **Hipabisales Machi Aserradero Cretácico Inferior alto** (Suárez *et al.*, 2007): En esta unidad se incluyen pórfidos riolíticos y dioríticos expuestos en el Distrito El Toqui. Se emplazan en las formaciones Ibáñez, Toqui, Katterfeld y Divisadero. Las rocas son porfídicas, con pocos fenocristales de plagioclasa, relictos de anfíbol y cuarzo. Presentan mineralización de pirita y pirrotina diseminada y en vetillas además de una intensa silicificación y alteración argílica. Esta unidad incluye un cuerpo granodiorítico que aflora 1 km al este de la Laguna Machi y

una diorita, que se expone al NO del cordón De Las Estatuas, localmente cuarcífera, que grada a pórfido diorítico, en ocasiones cuarcífero, y que presenta silicificación intensa y leve epidotización¹.

Kiag (Complejo plutónico Elizalde) Cretácico Inferior alto-Superior bajo; 104-92 Ma (De la Cruz et al., 2003): Este complejo presenta una gran diversidad composicional, que varía desde granitos hasta gabros. Se expone en el lago Elizalde, prolongándose hacia el sur a lo largo del estero Boca de León. Incluye dos afloramientos aislados al este y suroeste del lago Atravesado y un tercero, al norte del lago La Paloma. Se emplaza en las formaciones Ibáñez, Apeleg y Divisadero.

Se distinguen cuatro facies petrográficas: dioritas de anfíbola, biotita y piroxeno, miarolíticas, con enclaves o bandas de granodiorita de anfíbola; monzodioritas cuarcíferas de anfíbola, piroxeno y biotita, que varía a monzonita cuarcífera porfídica de biotita y anfíbola (oxidadas); sienos y monzogranitos, con diques dacíticos, y gabros de olivino y dioritas de anfíbola y biotita².

CRETACICO SUPERIOR

Ksh

- **Hipabisales y filones Cretácico Superior Bajo, 96-81 Ma:** Corresponde a cuerpos hipabisales expuestos en el sector noreste de la cuenca de estudio. Se emplazan en las formaciones Ibáñez, Toqui, Katterfeld, Apeleg y Divisadero. Se distinguen cuerpos dacíticos silicificados y sericitizados, con fenocristales de oligoclasa, anfíbola y, localmente, biotita. Los cuerpos más abundantes corresponden a hipabisales andesíticos y basálticos, localmente dioríticos a tonalíticos, y diques, expuestos en el Distrito Toqui. También se incluyen hipabisales dioríticos y cuerpos intrusivos que corresponden a ocoítas y micromonzogranitos que intruyen tobas y tufitas de la Formación Divisadero¹.
- **Domos Casa de Piedra Cretácico Superior, 84-71 Ma** (Suarez y De la Cruz, 1994): Domos dacíticos y riolíticos, emplazados en las formaciones Ibáñez, Apeleg y Divisadero, y el Complejo Volcánico Baño Nuevo. Se distinguen riolitas, dacitas y riodacitas de biotita, dacitas de hornblenda y dacitas afaníticas de composición calcoalcalina (Demant et al., 2007)¹.
- **Pórfidos ácidos Cretácico Superior alto; 63 Ma min:** Corresponde a una Unidad subvolcánica conformada por stocks de pórfidos dacíticos y subordinadamente riolíticos y riodacíticos y un conjunto de filones manto dacíticos que afloran al este del lago Elizalde y cercano al lago Monreal. Se expone en los alrededores de Coyhaique. Los pórfidos y filones dacíticos contienen hornblenda, piroxeno y argilización de incipiente a leve².
- **Hipabisales básicos Cretácico inferior – Cretácico superior:** Se ubican en el sur de la cuenca y corresponde a un grupo de cuerpos subvolcánicos de composición básica que intruyen principalmente a rocas de la Formación Divisadero⁴.

- **Basaltos Cerro Teta** *Mioceno medio – superior (Bruce, 2001)*: Ubicado en el sur de la cuenca, cercano al límite con Argentina. Corresponde a lavas basálticas y andesítico-basálticas del tipo pahoehoe de 1 a 5 mts de espesor ⁴.

Ks3i (Formación El Toro) *Campaniano, 77-76 Ma (De la Cruz et al., 2003)*: Está definida como una asociación volcánica subaérea compuesta por lavas basálticas, andesíticas y dacíticas. Se expone en el sector centro-oriente del área de estudio.

Los basaltos y andesitas están compuestos por fenocristales de plagioclasa, olivino, clino y ortopiroxeno y masa fundamental vítrea, con débil alteración. El ortopiroxeno se presenta como fenocristal o como anillos de reacción alrededor de pseudomorfos de olivino (Demant et al., 2007). Al norte del río Coyhaique se expone un complejo de lavas e intrusivos hipabisales, compuestos por andesitas y basaltos porfídicos de hornblenda, doleritas, microdioritas porfídicas y, en algunos lugares, dioritas. La petroquímica indica un volcanismo de características calcoalcalinas asociado a subducción (Demant et al., 2007) ¹.

Ks3b (Basaltos Morro Negro) *Campaniano – Maastrichtiano, ca. 77-69 Ma (Suárez et al., 2007)*: Corresponde a lavas basálticas de olivino expuestas en el cerro Morro Negro (en el extremo este de la cuenca) y que alcanzan un espesor mínimo de 100-150 m. Representan los remanentes occidentales de un campo basáltico que comprende una sucesión de aproximadamente 17 flujos de lava (Butler et al., 1991).

Generalmente son de color anaranjado (hematita) y exhiben débil alteración del olivino a iddingsita. Son basaltos subalcalinos (y andesitas basálticas) con características geoquímicas intermedias entre magmas asociados a subducción y volcanismo de intraplaca (Baker et al., 1981, Demant et al., 2007) ¹.

Ksg

- **Complejo Intrusivo Castor** *Cretácico Superior alto; 79 Ma*: Incluye un conjunto de pequeños cuerpos intrusivos y subvolcánicos dioríticos y granodioríticos, expuestos alrededor del lago Castor. Se incluyen pórfidos dioríticos y microdioríticos de anfíbola y piroxeno, pórfidos granodioríticos de piroxeno, anfíbola y biotita (localmente silicificados y cataclásticos) y monzodioritas cuarcíferas de anfíbola y piroxeno, propilitizadas y con venillas de cuarzo ².
- **Filones básicos e intermedios** *¿Cretácico Superior alto?; 61 Ma min*: Unidad conformada por filones manto y diques, holocristalinos y porfídicos, basálticos, andesíticos y subordinadamente dioríticos, microdioríticos y doleríticos que intruyen a las formaciones Katterfeld, Apeleg y Divisadero. Las andesitas y basaltos son de piroxeno y anfíbola ².
- **Granitoides y microgranitoides** *Cretácico Inferior – Cretácico Superior*: Se ubican en el sur de la cuenca y corresponde a granitoides leucocráticos. Por lo general, estos intrusivos han generado un metamorfismo termal leve en las rocas cercanas a estos. Se han encontrado pequeñas venas epitermales de cuarzo, Pb-Zn-Cu (galena, calcopirita y blenda) y brechas mineralizadas dentro de las aureolas de contacto ⁴.

PALEOGENO

PE3b (Basaltos Balmaceda) *Paleoceno Superior – Eoceno Medio; 59-46 Ma (Suárez et al., 1996)*: Esta unidad corresponde a una sucesión de basaltos subhorizontales de 150 m de espesor máximo. Se expone al noroeste y suroeste de Balmaceda. Se incluyen en esta unidad: Lavas basálticas de olivino, brechas basálticas de lapilli, basaltos almohadillados, rocas hialoclásticas, basaltos alcalinos con xenolitos peridotíticos de lherzholita y cuellos basálticos².

Og

- **Cuerpos Hipabisales básicos e intermedios.** *¿Oligoceno?* (De la Cruz et al., 2003): Incluye cuerpos subvolcánicos, filones manto y diques holocristalinos y porfídicos. Se distinguen principalmente dioritas, microdioritas, doleritas, basaltos subordinados y andesitas².
- **Gabro Bandurrias.** *Oligoceno; ca. 27 Ma.* (De la Cruz et al., 2003): Corresponde a un stock de 8 km², ubicado 10 km al noreste de Coyhaique. Está conformado principalmente por gabros homogéneos con piroxeno, olivino y biotita. Hacia el noroeste gradúa a dioritas, microdioritas y doleritas y hacia al sur varía a basaltos de piroxeno y/o anfíbola. La mineralogía está caracterizada por olivino, clinopiroxeno, feldespato, anfíbola, biotita y analcima, típica de gabros con afinidad alcalina².

MIOCENO

Mg (Batolito Norpatagónico) *Mioceno*: La franja central del Batolito Norpatagónico se encuentra asociada al mioceno y presenta una variada litología que incluye principalmente: granodioritas, dioritas y tonalitas⁵.

M2c (Formación Oscuro) *¿Mioceno Inferior alto?* (Ray, 1996): Corresponde a una sucesión de tobas y rocas epiclásticas que se expone al suroeste de Balmaceda. Sobreyace a los Basaltos Balmaceda. Consiste en tobas riódacíticas de caída, vítreas y de cristales, tufitas y depósitos de flujos piroclásticos².

M1c (Formación Galera) *Mioceno medio – superior (Espinosa y Fuenzalida 1971; emend. De la Cruz et al., 2003)*: Unidad sedimentaria fluvial compuesta por conglomerados alternados con limolitas y areniscas. Los clastos son polimícticos, principalmente volcánicos (andesitas, dacitas) y ocasionalmente plutónicos y de cuarzo de origen metamórfico. Se expone en el extremo oriente de la cuenca, principalmente en 3 afloramientos aislados, al sur, centro y norte de la zona¹.

PLIOCENO-HOLOCENO

PPI1g (Gravas de la meseta boscosa) *¿Plioceno - Pleistoceno?* (Suárez et al., 2007): Corresponde a depósitos clásticos mal seleccionados, que constituyen una cubierta de gravas en la parte alta de cerros. Está compuesto por gravas, arena y limo, y se

reconoce en distintos sectores ubicados en la parte noreste de la cuenca. Se interpreta tentativamente como un depósito periglacial ¹.

Q1 Pleistoceno-Holoceno: Se incluyen en esta unidad depósitos de: remoción en masa, fluviales, de abanicos aluviales, coluviales y deltaicos ^{1,2}.

Q1g Pleistoceno-Holoceno: Se incluyen en esta unidad depósitos: morrénicos, fluvioglaciales, glaciales, glaciolacustres, glaciales de fondo ^{1,2}.

Q3i Holoceno: Esta unidad corresponde a estratovolcanes y complejos volcánicos. En la zona de estudio la unidad representa al volcán tipo caldera, Hudson, ubicado en la parte suroeste de la cuenca. Su actividad durante el Holoceno ha estado marcada por erupciones explosivas. En términos composicionales, los magmas varían desde basaltos a dacitas, donde la mezcla de magmas juega un rol fundamental en la dinámica eruptiva

TERRITORIO ARGENTINO ³

A raíz de que la cuenca de estudio incluye un sector perteneciente a territorio argentino, Existen Unidades Litoestratigráficas en la cuenca, que pertenecen a territorio argentino y que se correlacionan con unidades ya descritas arriba, de la siguiente manera:

- **Tpv Paleoceno-Eoceno medio:** Lavas basálticas de “Plateau”. Corresponde a la unidad “Basaltos Balmaceda” en el sector chileno y “Basaltos Posadas” en el sector argentino de la cuenca.
- **Tms Oligoceno Superior-Mioceno:** Conglomerados, areniscas y pelitas de ambiente continental y marino indiferenciado. Incluye localmente facies piroclásticas. Corresponde a las formaciones Oscuro y Galeras en el sector chileno de la cuenca mientras que en argentina corresponde a las formaciones Ñirihua, Collón Curá, Pedregoso, Río Mayo, Santa Cruz y Magallanes.
- **TQ Plioceno Superior- Pleistoceno:** Representan sedimentos glaciarios y depósitos sedimentarios no consolidados del dominio fluvio-glacial.

3.2 Geología Económica

- **Yacimientos Metálicos**

En el mapa geológico de la Figura 3.1, se exponen los yacimientos descritos como minas, manifestaciones o zonas de interés, en base a Suárez y otros (2007) y De la Cruz y otros (2003).

En la zona norte de la cuenca se reconocen básicamente 2 prospectos mineros de diversa importancia: Toqui (círculos del 0 al 9 en la Figura 3.1) y Katterfeld (círculo 10 en la Figura 3.1), en rocas de las formaciones Ibáñez y Toqui. El único yacimiento en explotación actual corresponde a la mina Toqui, de donde se extrae principalmente Zn y

Au y en menores cantidades Cu, Pb, Ag, con reservas totales estimadas, pasadas y presentes de 10 millones de toneladas (con una ley media de 8% Zn, 0,6% Cu, 1,5% Pb, 1,5 ppm Au, 50 ppm Ag; Townley, 1996; Palacios *et al.*, 1996). Es interpretado como un depósito estratoligado hospedado en calizas de la Formación Toqui y subordinadamente en vetas emplazadas en dacitas; representando un skarn asociado al emplazamiento de hipabisales dacíticos del Cretácico inferior alto. Además, existen zonas de alteración hidrotermal con brechas en este distrito¹. En los yacimientos de la mina el toqui, la mena constituye cuerpos estratiformes alojados en calizas coquinoideas neocomianas que presentan reemplazo por piroxeno-granate-epidota. Los minerales de mena, que corresponden a esfalerita, galena, pirita, calcopirita, pirrotina, arsenopirita, tetraedrita, oro y bismuto nativo, reemplazan a los fósiles marinos y se alojan en la matriz de las calizas, formando cuerpos mineralizados de incluso 20 m de espesor. En el distrito se observa una alteración propilítica que se caracteriza por clorita-calcita-cuarzo, que va incrementando la intensidad a medida que se acerca a los cuerpos estratiformes de mena. Dataciones radiométricas de rocas intrusivas félsicas, afectadas en parte por alteración sericitica y relacionadas con los cuerpos mineralizados, indican edades comprendidas entre 106 y 100 Ma (Townley, 1996)³.

El Distrito Katterfeld o Ñirehuao corresponde a un prospecto actualmente abandonado. Se interpreta como un depósito polimetálico (Cu, Zn, As, Cd, Bi, Au) en galena, calcopirita, enargita, pirita, calcosina, oro, plata, hematita) epitermal de alta sulfidación, ubicado en zona de brecha (Townley, 1996). La roca caja corresponde a tobas de la Formación Ibáñez además de diques y pórfidos andesíticos brechizados. Se sugiere una edad del Cretácico Tardío para la mineralización y alteración, en un sistema formado cerca de la superficie, en condiciones de baja temperatura y salinidad¹.

Se han identificado varias “manifestaciones” de mineralización en la zona, donde se distinguen:

Las Vetas Lago Diunco (círculo 14 en la Figura 3.1), principalmente de cuarzo con pirita, galena y blenda inmersas en lavas andesíticas. Las Vetas Lago Misterioso Norte (círculo 15 en la Figura 3.1), esencialmente de cuarzo con menores cantidades de blenda, galena y calcopirita. La manifestación Lago Haro (círculo 13 en la Figura 3.1), de pirita, esfalerita, galena con mena de plomo, zinc, y algo de oro y plata. Prospecto del lago Póllux (círculo 11 en la Figura 3.1), que corresponde a un sistema epitermal de baja sulfidación, con vetas auríferas, brechas y stockwork, de cuarzo-adularia, que se hospeda en rocas volcánicas de la Formación Divisadero y, en parte, en las proximidades de stocks dioríticos y pórfidos granodioríticos. Por otro lado, un km al noreste del lago Atravesado se ha reconocido 2 vetas de 5 a 30 cm con diseminación de pirita y subordinadamente, galena, calcopirita y magnetita. Otros depósitos minerales identificados en la cuenca corresponden a: “Vetas del río Malito” (círculo 24 en la Figura 3.1), que corresponde a un depósito de Zn-Pb-Cu-Ag alojadas en andesitas, y ubicado en las cercanías de Villa Mañihuales, “río Correntoso” (círculo 25 en la Figura 3.1) y “Lago la Paloma” (círculo 26 en la Figura 3.1), que corresponde a vetas con Cu-Mo, hospedadas en rocas graníticas, además de granodioríticas para el caso de las últimas³.

Además, existen algunas zonas de alteración o “anomalías de color”, por ejemplo las alteraciones “Estero Los Mallines NO” (círculo 22 en la Figura 3.1) y Lago Misterioso Sur” (círculo 23 en la Figura 3.1), que consisten en un sistema hidrotermal con vetillas y “stockwork” de cuarzo, pirita, calcopirita, esfalerita, galena, oro y plata, en rocas piroclásticas y lavas riolíticas de la Fm Ibáñez¹.

- **Yacimientos no-metálicos**

Arena Silíceea

Los yacimientos de arena silíceea se relacionan con depósitos fluviolacustres y fluviales pertenecientes a los Depósitos Cuaternarios Indiferenciados. Debido a que no existe ninguna actividad industrial o artesanal que las utilice, no se realiza extracción alguna de este tipo de arenas en la región (Sernageomin, 2004).

Granito

Los yacimientos de granito están ampliamente distribuidos en la región. Están genéticamente relacionados con el Batolito Patagónico (Suárez, 1977) y consisten en sectores de afloramiento de rocas graníticas que presentan características favorables para una eventual explotación. A excepción de una explotación esporádica destinada a obtener bloques de dimensiones inferiores a 0,5 m³, no existe explotación de granitos en la región (Sernageomin, 2004).

Caliza

Un yacimiento de calizas actualmente abandonado (Mina Prosperidad) se ubica al noreste de la ciudad de Coyhaique, en lutitas negras neocomianas de la Formación Katterfeld. Consiste en un banco grueso de Carbonato de Calcio, pulverulento (Díaz y Díaz, 1982; Ruiz, 1946)¹. Existen además, bancos de caliza estratiforme, con el nombre de “estero Pedregoso” y pertenecientes a la Fm Toqui².

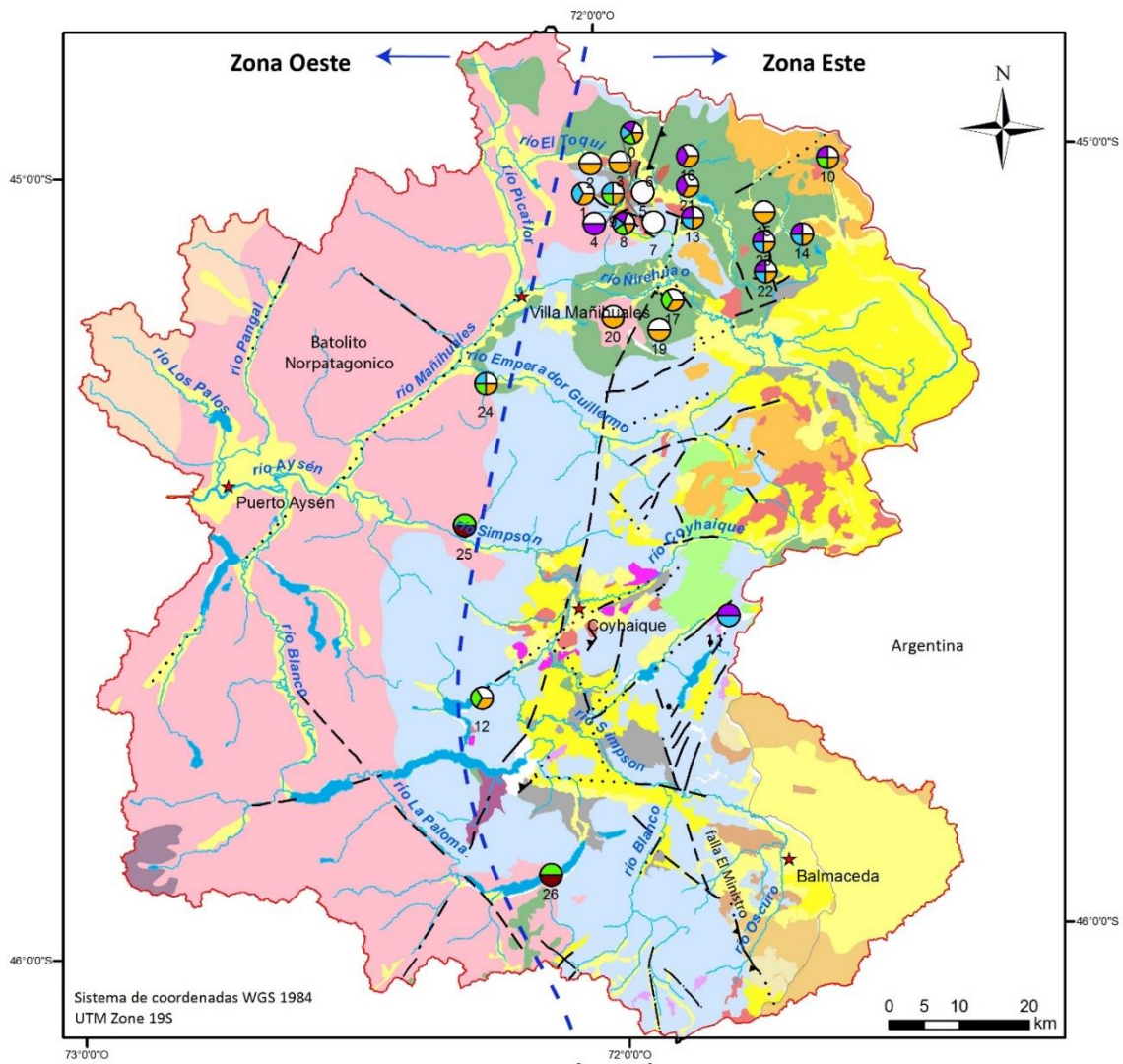
3.3 Estructuras Principales

La región de estudio ha experimentado poco acortamiento cortical. Esta zona se caracteriza por presentar rocas mesozoicas-cenozoicas subhorizontales o suavemente plegadas, cortadas por fallas de orientaciones principales, NNW-SSE y NE-SW. Localmente se reconocen fallas con movimiento vertical limitado. Si bien se han reconocido fallas inversas (por ejemplo Falla El Ministro), el débil plegamiento que muestran las rocas en la zona de estudio, sugiere poco acortamiento, y el alto manteo que tendrían las fallas mayores, plantea la posibilidad de que muchas sean fallas normales o de rumbo².

Un control estructural mayor está dado por un sistema de fallas NE, que se prolonga desde el río Coyhaique, hasta las nacientes del río Ñirehuao. Donde aflora, corresponde a una falla inversa vergente al este¹.

En el extremo sur de la cuenca, se expone la Falla El Ministro (Figura 3.1), inversa con vergencia al este y rumbo NNW-SSE, que pone en contacto rocas de la Fm Divisadero con rocas de la Fm Oscuro. Al norte de la falla anterior, se reconocen múltiples fallas

con rumbo NNW-SSE. La Falla Foitzick presenta movimientos relativos diferentes, que probablemente están relacionados con la caída de bloques de fallas del sistema Falla Póllux, de rumbo NE-SW. En el sector suroeste de la cuenca, se reconoce un sistema de fallas con rumbo NE-SW, que controla la existencia de lagos, cerros y gran parte del curso del río Coyhaique. Presentan trazas rectas, que indican un alto ángulo del plano de falla. Están limitadas al oeste por las fallas Cordón La Galera y Foitzick, de rumbo NNW-SSE. Las fallas de orientación NE, que incluyen la Falla Castor, tienen una variación sistemática en su rumbo, definiendo una forma de abanico abierto hacia las fallas Cordón La Galera y Foitzick, similar a un sistema de tipo cola de caballo, característico de fallas de rumbo. 13 km al este de la ciudad de Coyhaique se expone la falla Coyhaique, de rumbo dextral, y orientación NNW que corta al Gabro Bandurrias². En el valle del río Ñirehuao, se reconocen dos sistemas de fallas NE-SO, interpretados como inversos con vergencia al NO que elevan rocas de la Fm Ibáñez sobre areniscas de la Fm Apeleg. Al norte del lago Largo, se reconoce una rama de la falla principal, que presenta orientación general ENE, que se curva al oeste a ONO y se interpreta como inversa. Esta rama presenta variaciones en el rumbo, lo que sugiere una forma de abanico, que reflejan movimiento de rumbo. En el cerro Los Huemules las rocas de la Formación Divisadero se presentan plegadas en un suave sinclinal; mientras que en las nacientes del río Emperador Guillermo, capas de la Fm Divisadero están plegadas en un apretado sinclinal con eje de rumbo NS. En el distrito el Toqui se han descrito fallas de dirección NE/NNE, NNO/NO, EO/ENE, interpretadas como normales, con desplazamientos verticales de 40-500 m (Ruiz, 1993). En el extremo NE del área de estudio ("Distrito Minero Katterfeld") se han descrito numerosas fallas de alto manteo, la mayoría normales, de rumbo N50° a 60°E y N70 a 80°W. (Grez, 1977)¹.



SIMBOLOGÍA

Estructuras

- Falla, Cubierto,
- Ⓜ..... Falla, Cubierto, dextral
- ▲.....▲ Falla, Cubierto, inverso
- ↑.....↑ Falla, Cubierto, normal
- - - Falla, Inferido,
- Ⓜ- - - Falla, Inferido, dextral
- ▲- - -▲ Falla, Inferido, inverso
- ↑- - -↑ Falla, Inferido, normal
- Falla, Inferido, sinistral
- Falla, Observado,
- Ⓜ—— Falla, Observado, dextral
- ▲——▲ Falla, Observado, inverso
- ▲——▲ Falla, Observado, inverso de bajo
- ↑——↑ Falla, Observado, normal
- Fotolineamiento, Fotointerpretacion

Recursos minerales

- Zinc
- Oro
- Plata
- Cobre
- Plomo
- Molibdeno

LEYENDA

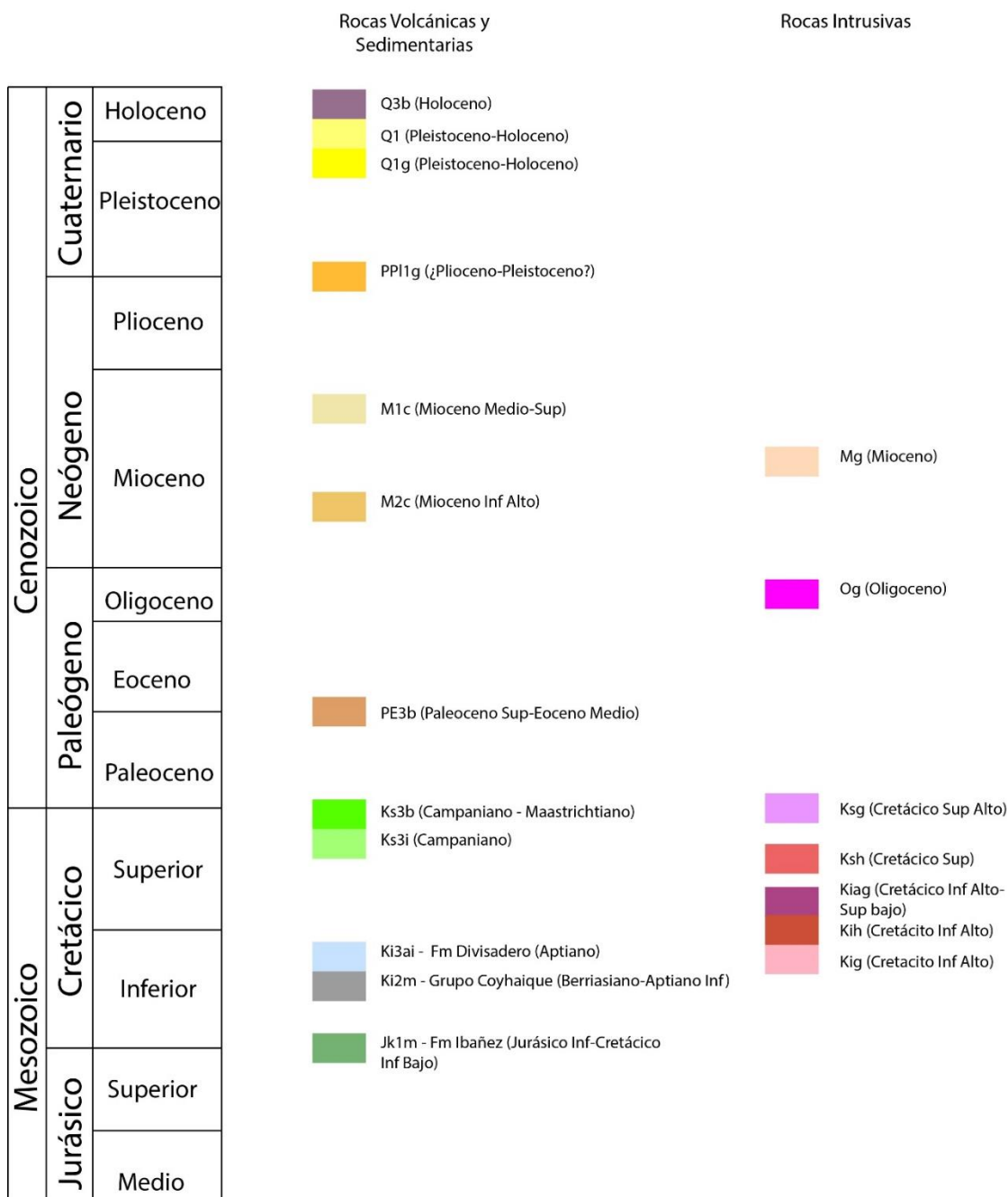


Figura 3.1. Mapa geológico de la cuenca del río Aysén. Elaborado principalmente a partir de Suarez et al., 2007 y De la Cruz et al., 2003. Línea punteada azul separa zona este de la oeste (para este trabajo).

En particular para este trabajo se hablará de “Zona oeste” haciendo referencia a la franja formada por el Batolito Norpatagónico y de “Zona este” al referirnos a la franja que incluye las unidades volcano-sedimentarias, ubicadas al este del batolito. En la Figura 3.1 se marca con una línea azul punteada el límite aproximado entre ambas zonas.

4 RESULTADOS

4.1 Obtención y preparación de muestras

Se recolectaron 234 muestras en total, de las cuales la mayoría corresponde a sedimentos fluviales de canales activos, y en menor cantidad a sedimentos procedentes de terrazas fluviales aledañas a los puntos de muestreo de sedimentos activos. Además un número menor de muestras corresponde a sedimentos fluviales recientes (Tabla 4.1, Figura 4.1).

Tabla 4.1. Resumen del tipo y cantidad de muestras recolectadas.

Tipo de muestra	Subtotal
Compósito de sedimento Fluvial Activo	223
Compósito de sedimento Fluvial Reciente	2
Compósito de sedimento de Terraza Fluvial	9
Total	234

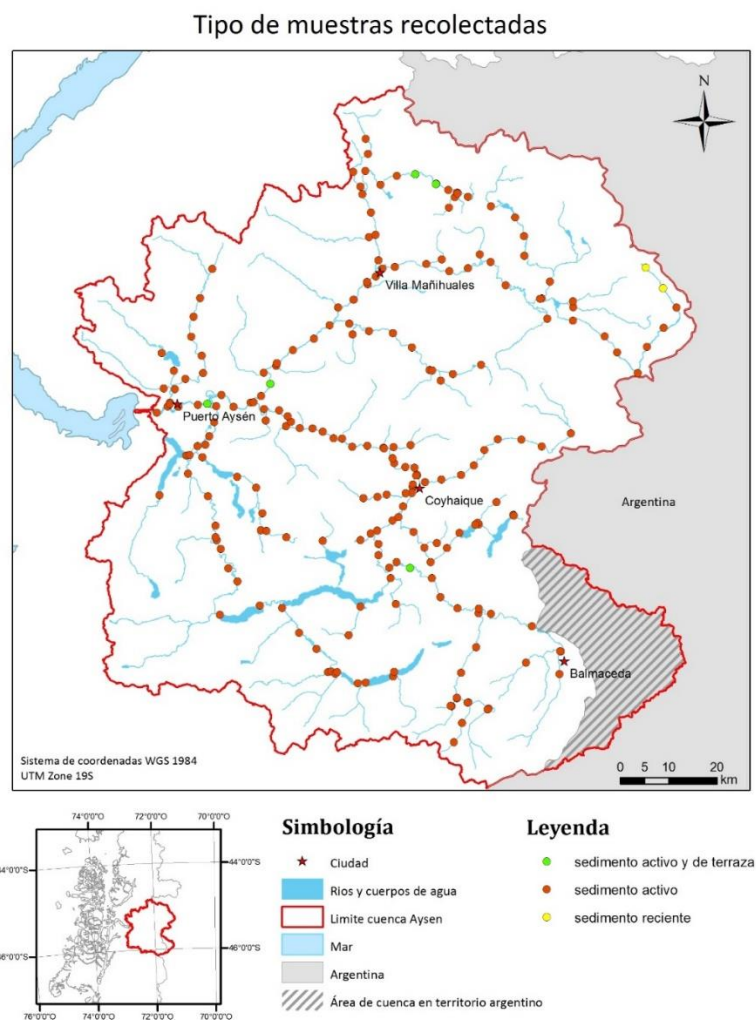


Figura 4.1. Ubicación geográfica de los puntos muestreados durante las campañas de terreno.

Las 234 muestras obtenidas de terreno, se prepararon para análisis químicos y/o mineralógicos, según se especifica en la Tabla 4.2. Es importante mencionar que, ocasionalmente, a partir de una misma muestra se prepararon distintas, dependiendo el análisis. Esto explica que en base a 234 muestras obtenidas, se hayan preparado 281 muestras, para los diferentes análisis como se detalla en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Resumen del total de muestras preparadas para cada análisis.

Tipo Muestra	Muestras para Química			Muestras para Mineralogía	
	#80	#50	#120	#80 (DRX)	#50 - #35 (Briquetas)
Nº de malla	#80	#50	#120	#80 (DRX)	#50 - #35 (Briquetas)
Cantidad Muestras	234	8	8	21	10
Total	250			31	

4.2 Datos geoquímicos

4.2.1 Control de calidad de datos

- **Precisión de muestreo:** De acuerdo al gráfico de control mostrado en metodologías, se evaluó el total de 14 pares de muestras gemelas, obteniendo que la proporción de pares fallidos supera el 20% para los elementos C total, S total, Be, Sn, Ta, W, Cu, Cd, Bi, Au, Hg, Tl, B (Tabla 4.3).

A modo de ejemplo se muestra el gráfico de control para muestras gemelas, para el caso del vanadio (Figura 4.2), donde se observa que solo un par de muestras se ubica fuera de los límites (rectas) de aceptación, representando un 7,143 % del total, por lo que se clasifica como aceptable según el criterio de aceptación descrito en metodologías.

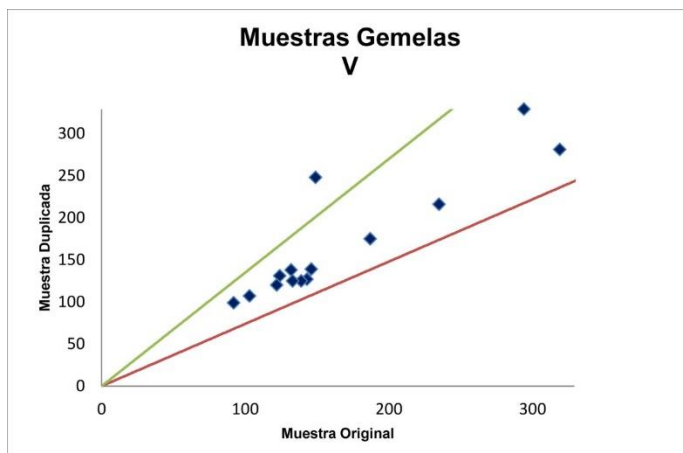


Figura 4.2. Gráfico de control del Vanadio (V) para muestras gemelas.

Tabla 4.3. Error relativo y Proporción de pares fallidos obtenidos de las muestras gemelas para los distintos elementos químicos. En rojo aquellos elementos en que la proporción de pares fallidos obtenido supere lo recomendado, según lo descrito en Metodologías.

Elemento	Error Relativo	Pares fallidos	Proporción de pares fallidos	Elemento	Error Relativo	Pares fallidos	Proporción de pares fallidos
C Total	13.55	3.00	21.43	Y	6.03	0.00	0.00
S Total	36.54	6.00	42.86	La	6.00	0.00	0.00
SiO2	1.32	0.00	0.00	Ce	4.31	0.00	0.00
Al2O3	1.45	0.00	0.00	Pr	4.75	0.00	0.00
Fe2O3	9.42	1.00	7.14	Nd	5.52	0.00	0.00
MgO	3.43	0.00	0.00	Sm	6.05	0.00	0.00
CaO	1.20	0.00	0.00	Eu	3.54	0.00	0.00
Na2O	1.85	0.00	0.00	Gd	4.20	0.00	0.00
K2O	2.44	0.00	0.00	Tb	3.46	0.00	0.00
TiO2	8.56	1.00	7.14	Dy	4.18	0.00	0.00
P2O5	3.78	0.00	0.00	Ho	5.25	0.00	0.00

MnO	7.54	0.00	0.00	Er	5.48	0.00	0.00
Cr2O3	12.08	2.00	14.29	Tm	6.04	0.00	0.00
Sc	3.67	0.00	0.00	Yb	5.57	0.00	0.00
Ba	3.60	0.00	0.00	Lu	6.22	0.00	0.00
Be	47.28	7.00	50.00	Mo	18.62	2.00	14.29
Co	6.13	0.00	0.00	Cu	16.03	3.00	21.43
Cs	4.76	0.00	0.00	Pb	12.63	1.00	7.14
Ga	3.52	0.00	0.00	Zn	7.09	0.00	0.00
Hf	6.91	0.00	0.00	Ni	6.28	0.00	0.00
Nb	9.29	0.00	0.00	As	7.82	1.00	7.14
Rb	2.77	0.00	0.00	Cd	20.93	4.00	28.57
Sn	34.74	6.00	42.86	Sb	14.69	2.00	14.29
Sr	3.81	0.00	0.00	Bi	20.09	3.00	21.43
Ta	23.30	7.00	50.00	Ag	12.60	1.00	7.14
Th	8.54	1.00	7.14	Au	37.45	6.00	42.86
U	9.35	0.00	0.00	Hg	43.35	8.00	57.14
V	10.90	1.00	7.14	Tl	25.20	4.00	28.57
W	31.01	5.00	35.71	Se	0.00	0.00	0.00
Zr	6.62	0.00	0.00	B	18.14	3.00	21.43

- **Precisión del análisis:** Del total de 13 pares de duplicados finos evaluados se obtuvo que la proporción de pares fallidos supera el 20% para los elementos Cr, Be, Co, Hf, Sn, Ta, Th, U, W, Zr, Gd, Tm, Mo, Cd, Sb, Bi, Au, Hg, Tl, B (Tabla 4.4).

Al igual que para las muestras gemelas, se presenta el gráfico de control para el caso del vanadio en duplicados finos (Figura 4.3). Se observa que no hay muestras fuera de los límites de aceptación, es decir, la proporción de pares fallidos es 0% por lo que se cataloga como aceptable. Los gráficos de control, tanto para muestras gemelas como duplicados finos, para los 61 elementos químicos analizados, se entregan en Anexo B.3.

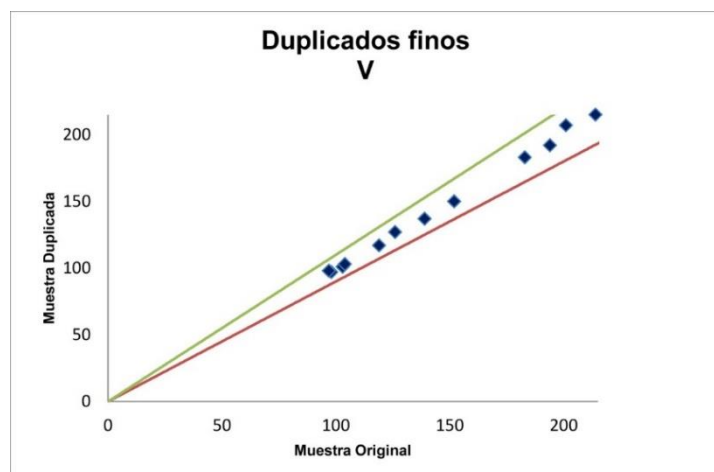


Figura 4.3. Gráfico de control del Vanadio (V) para duplicados finos.

Tabla 4.4. Error relativo y Proporción de pares fallidos obtenidos de las muestras de duplicados finos, para los distintos elementos químicos. En rojo aquellos elementos en que la proporción de pares fallidos obtenido supere lo recomendado, según lo descrito en Metodologías.

Elemento	Error Relativo	Pares Fallidos	Proporción de pares fallidos	Elemento	Error Relativo	Pares Fallidos	Proporción de pares fallidos
C Total	3.69	1.00	7.69	Y	3.76	1.00	7.69
S Total	18.52	2.00	15.38	La	4.43	2.00	15.38
SiO2	0.34	0.00	0.00	Ce	4.39	1.00	7.69
Al2O3	0.78	0.00	0.00	Pr	3.74	1.00	7.69
Fe2O3	0.65	0.00	0.00	Nd	3.59	0.00	0.00
MgO	0.87	0.00	0.00	Sm	4.82	2.00	15.38
CaO	0.68	0.00	0.00	Eu	5.89	2.00	15.38
Na2O	1.04	0.00	0.00	Gd	4.86	3.00	23.08
K2O	0.61	0.00	0.00	Tb	4.95	2.00	15.38
TiO2	1.66	0.00	0.00	Dy	4.58	1.00	7.69
P2O5	4.55	2.00	15.38	Ho	5.40	2.00	15.38
MnO	2.32	0.00	0.00	Er	4.36	2.00	15.38
Cr2O3	10.15	6.00	46.15	Tm	5.73	3.00	23.08
Sc	2.34	0.00	0.00	Yb	3.69	1.00	7.69
Ba	3.80	1.00	7.69	Lu	5.80	2.00	15.38
Be	74.16	9.00	69.23	Mo	17.51	8.00	61.54
Co	6.15	3.00	23.08	Cu	4.69	2.00	15.38
Cs	4.66	2.00	15.38	Pb	4.29	2.00	15.38
Ga	5.88	2.00	15.38	Zn	3.80	1.00	7.69
Hf	7.64	7.00	53.85	Ni	3.15	1.00	7.69
Nb	4.97	2.00	15.38	As	5.76	2.00	15.38
Rb	2.64	0.00	0.00	Cd	18.73	4.00	28.57
Sn	26.41	6.00	46.15	Sb	15.86	3.00	23.08
Sr	4.12	2.00	15.38	Bi	22.85	4.00	30.77
Ta	13.46	8.00	61.54	Ag	4.36	1.00	7.69
Th	8.93	4.00	30.77	Au	47.28	9.00	69.23
U	10.96	7.00	53.85	Hg	40.14	8.00	61.54
V	0.99	0.00	0.00	Tl	22.65	3.00	23.08
W	21.87	9.00	69.23	Se	0.00	0.00	0.00
Zr	7.22	5.00	38.46	B	30.63	9.00	69.23

- **Exactitud del análisis:** Utilizando las concentraciones de cobre (Cu) obtenidas de las muestras estándar, insertadas en cada “batch”, se calculó un valor de Promedio PR igual a 39,02. Por otro lado, la concentración del estándar utilizado (STSD-3 del CCRMP, Canadá) es Estándar (MV) igual a 38. Estos valores se detallan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Valores obtenidos para evaluar la exactitud del análisis.

Promedio (PR)	39,02 ppm
---------------	-----------

Estándar (MV)	38,00 ppm
Desviación Estándar (SD)	2,46

Utilizando estos valores se construyó el gráfico de control de la Figura 4.4.

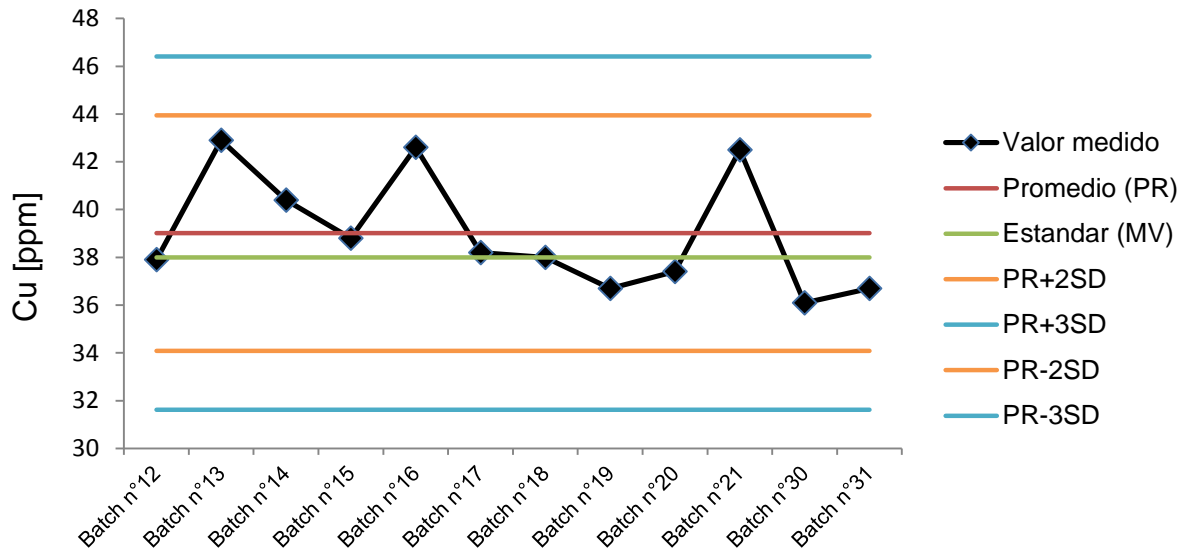


Figura 4.4. Gráfico de control para el Cobre (Cu). SD = Desviación Estándar.

De este gráfico se desprende que ni un Batch presenta datos fuera de control. Además se calculó la magnitud del sesgo obteniendo un porcentaje de 2,68%. Este sesgo es clasificado como bueno, según los criterios descritos en Metodología de trabajo.

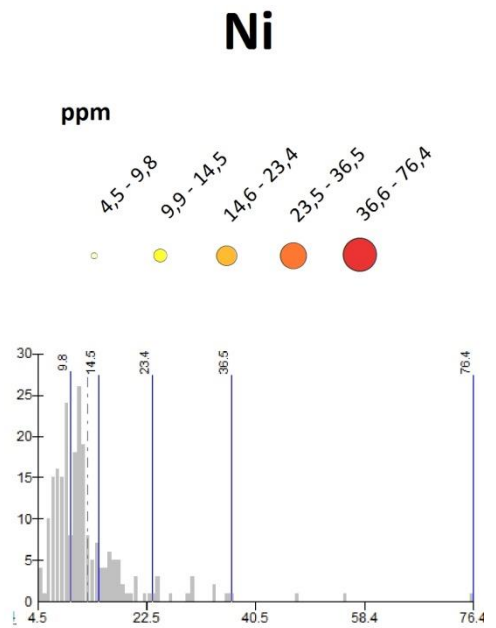
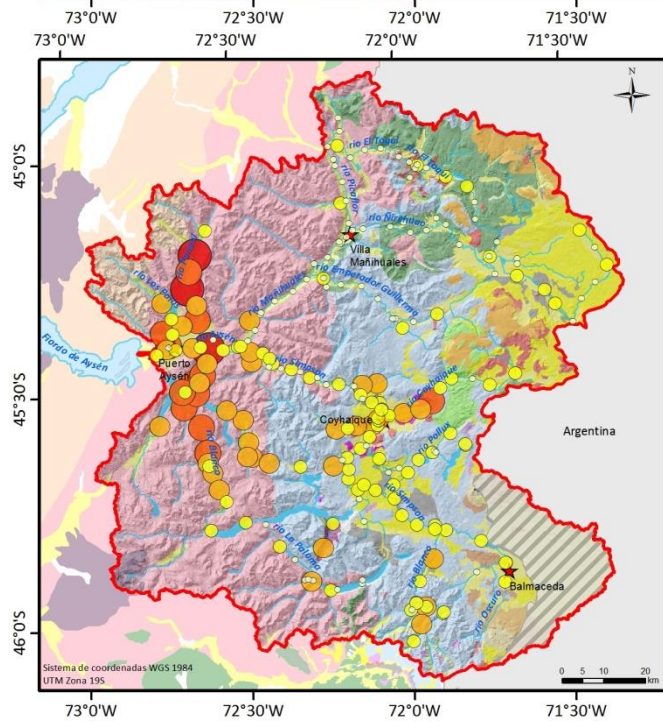
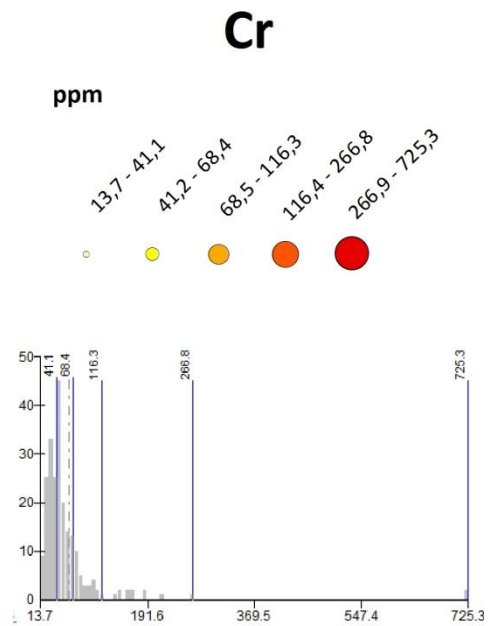
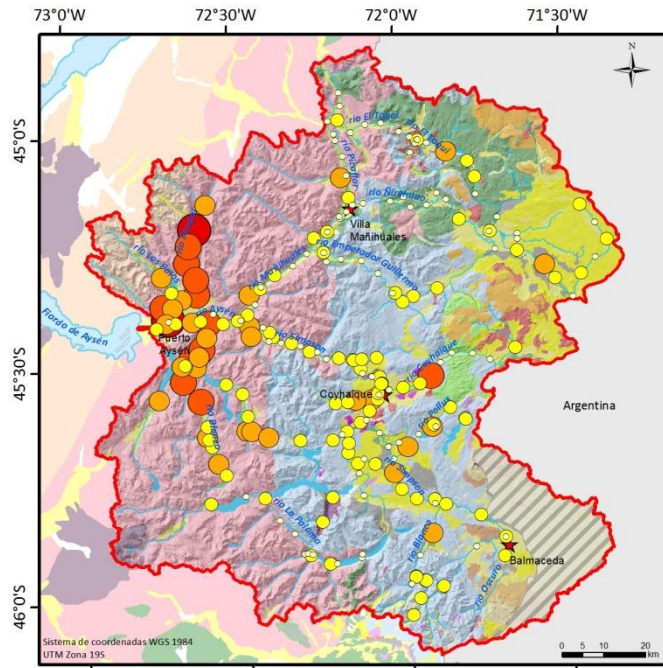
4.2.2 Mapas geoquímicos Univariados

Como se mencionó en la sección metodologías, se dividirá la cuenca en dos zonas.

- **Zona oeste**

Al analizar los Mapas Geoquímicos Univariados se desprende que esta zona presenta las mayores concentraciones en Cr, Ni, Ga, MgO, Sc, Fe₂O₃, CaO, Co, principalmente en los ríos Pangal y Blanco (la parte norte de este último). De estos elementos, los únicos que además presentan enriquecimiento en la parte sur del río Blanco son Ga y CaO. A modo de ejemplo se muestran los mapas de Cr, Ni y MgO en la Figura 4.5, los demás se presentan en Anexo B.4.

Por otro lado existe un enriquecimiento de V, TiO₂, Zr en esta zona en algunas muestras que se distribuyen de manera irregular dentro de esta zona.



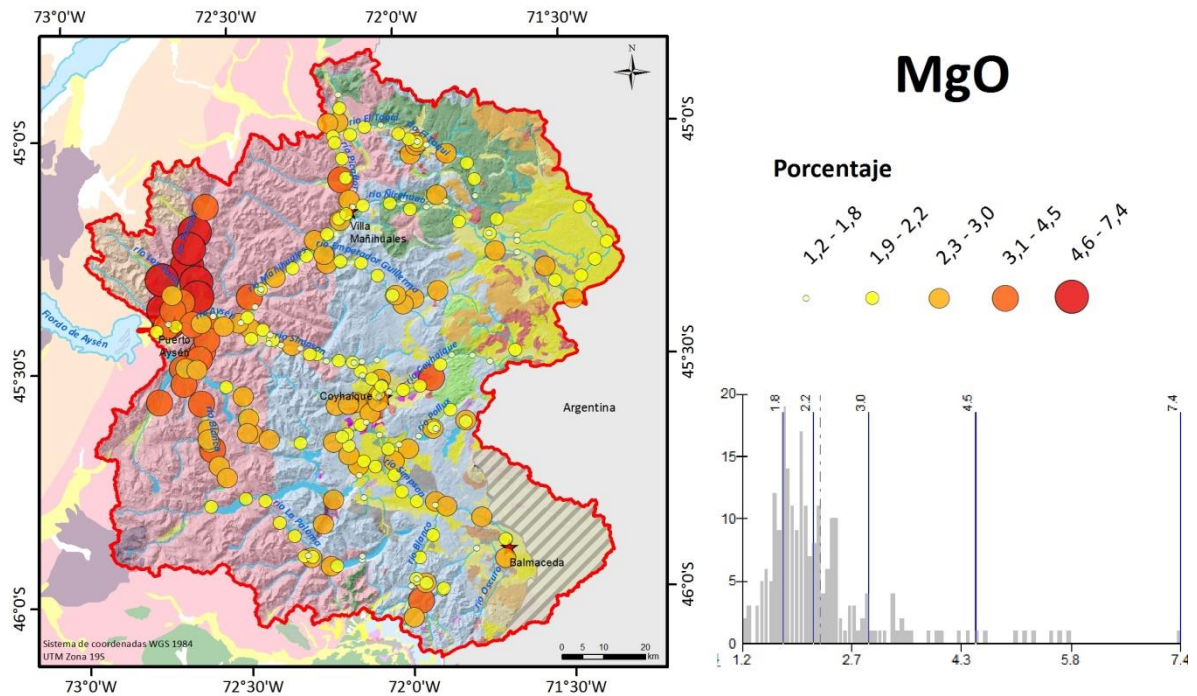


Figura 4.5. Mapas Geoquímicos Univariables para cromo (Cr), níquel (Ni) y magnesio (Mg).

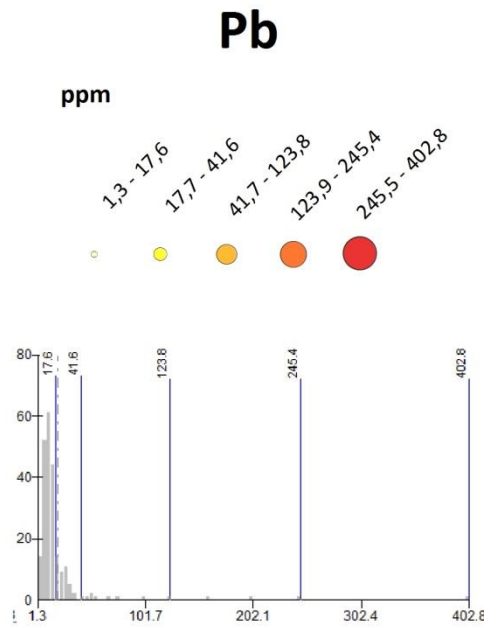
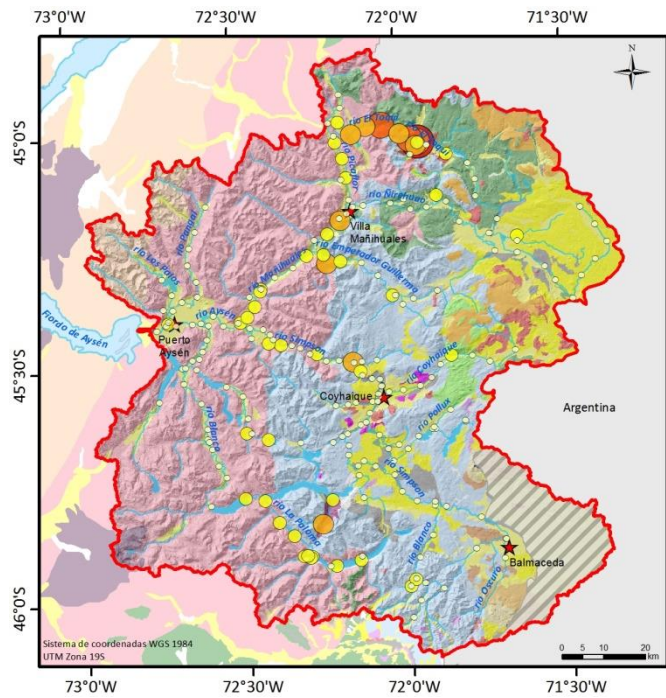
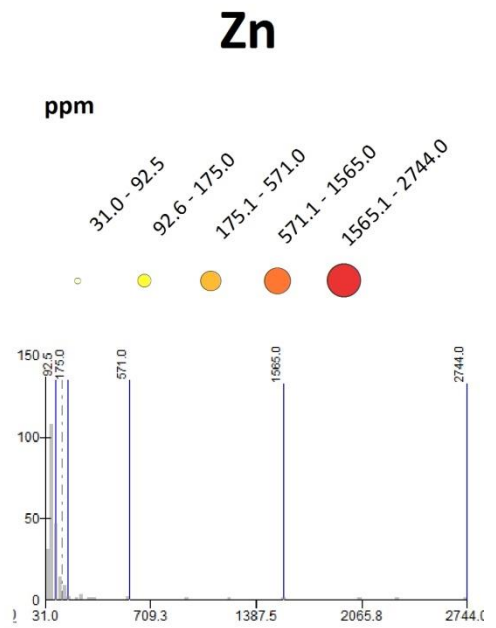
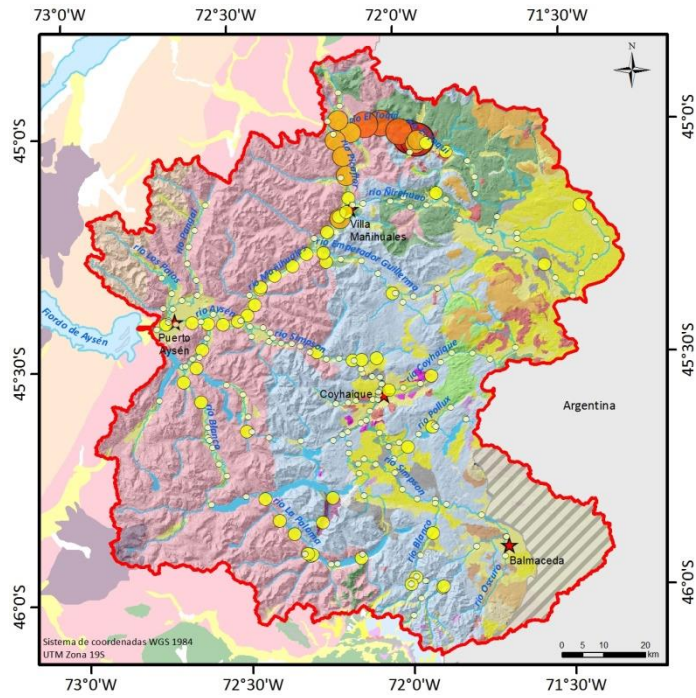
- **Zona este**

Dentro de esta zona se puede distinguir un enriquecimiento de algunos elementos en muestras obtenidas del río Toqui, con altas concentraciones de Zn, Au, Bi, As, Sb, Ag, Pb, Cu, Cd, Co, B, S total, Se. Estos 3 últimos también se encuentran en altas concentraciones en las cercanías de la ciudad de Coyhaique.

Los elementos Ba, Cs y Rb presentan sus mayores concentraciones en el río Blanco Este, a lo largo del río Simpson y en el río Emperador Guillermo.

Al sacar las muestras del río Toqui, que pueden representar outliers (valores atípicos), se observó un enriquecimiento de Sb, As, y Ag en el río Emperador Guillermo, en cercanías de la ciudad de Coyhaique y el río Blanco Este (Anexo B.4).

A modo de ejemplo se muestran los Mapas Geoquímicos Univariables de Pb, Zn y Cd en la Figura 4.6.



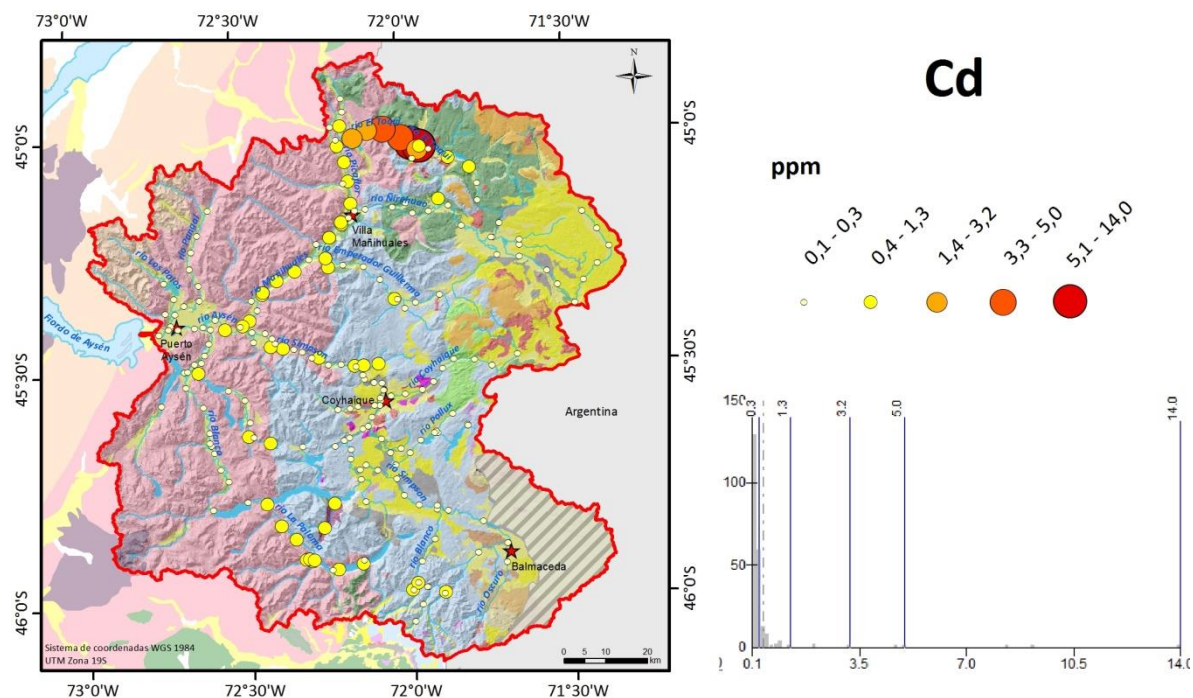


Figura 4.6. Mapas Geoquímicos Univariables para zinc (Zn), plomo (Pb) y cadmio (Cd).

4.2.3 Mapas Multivariables

Al utilizar el algoritmo k-means descrito en metodologías, las muestras activas fueron divididas en 6 grupos, obteniendo:

Tabla 4.6. Resumen de la cantidad de muestras asignadas para cada nodo.

Cantidad de muestras	
Grupo 1	121
Grupo 2	53
Grupo 3	3
Grupo 4	24
Grupo 5	23
Grupo 6	1

Considerando que el Grupo 6 posee 1 muestra y que tiene las mismas características químicas que el Grupo 4 (se caracteriza por altas concentraciones en los mismos elementos), se agruparan ambos en uno solo (Grupo 4). Se destaca que el Grupo 6 posee más MnO y Co.

En la Tabla 4.7, se muestran los elementos químicos que caracterizan cada grupo, debido a que las muestras que conforman cada grupo (o clúster) poseen altas concentraciones en ellos (relativos a los otros grupos). Se muestra en rosado los elementos en que son muy enriquecidos (la mediana más alta de todos los grupos) y color celeste, para los que son relativamente enriquecidos (la segunda mediana más

alta de todos los grupos). Como se mencionó en Metodología de trabajo, esta información se obtuvo de los diagramas de caja y Bigotes (Anexo B.5).

Tabla 4.7. Caracterización química de los nodos o grupos. Los rectángulos rosados oscuro indican alta concentración de ese elemento en ese clúster (mediana más alta) y los rosados claro indican una relativamente alta concentración de ese elemento en ese clúster (segunda mediana más alta).

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
SiO ₂	Ba	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO
K ₂ O	Rb	Na ₂ O	MgO	TOT S
Rb	Hg	P ₂ O ₅	CaO	Co
Na ₂ O	Cs	TOT C	TiO ₂	Mo
Ba	TOT S	Sr	Ni	Cu
Sr	SiO ₂	W	Cr	Pb
	Al ₂ O ₃	CaO	Sc	Zn
	K ₂ O	Ni	Ga	As
	P ₂ O ₅	Cr	Hf	Cd
	Cu	Ga	Nb	Sb
	Pb	LREE	Th	Bi
	Zn	HREE	U	Ag
	As	MgO	V	Au
	Cd	Sc	Zr	Hg
	Sb	Nb	LREE	Se
	Bi	Sn	HREE	Te
	Ag	Mo	MnO	B
	Au		Co	C total
	Se		Mo	CaO
	B			Cs
				Fe ₂ O ₃

4.2.4 Mapas PEC

Al evaluar todas las muestras de sedimento fluvial activo con el parámetro PEC, considerando las concentraciones de 8 metales se obtiene la Figura 4.7.

En esta se desprende que existen principalmente 2 zonas en la cuenca que superan el parámetro PEC para algunos metales.

Por un lado en el sector norte de la cuenca, específicamente en el río Toqui, el parámetro se ve sobrepasado para los elementos As, Zn, Cd, Pb y Cu. Por otro lado en el sector oeste de la cuenca, en los ríos Pangal y parte del río Blanco, el parámetro se ve sobrepasado para los elementos Cr y Ni.

Además de estas 2 zonas se identifica una muestra en las cercanías de Coyhaique, que supera la concentración establecida por el parámetro para el Cr y dos muestras en el sur de la cuenca, específicamente en el río Blanco este que superan el parámetro establecido para As.

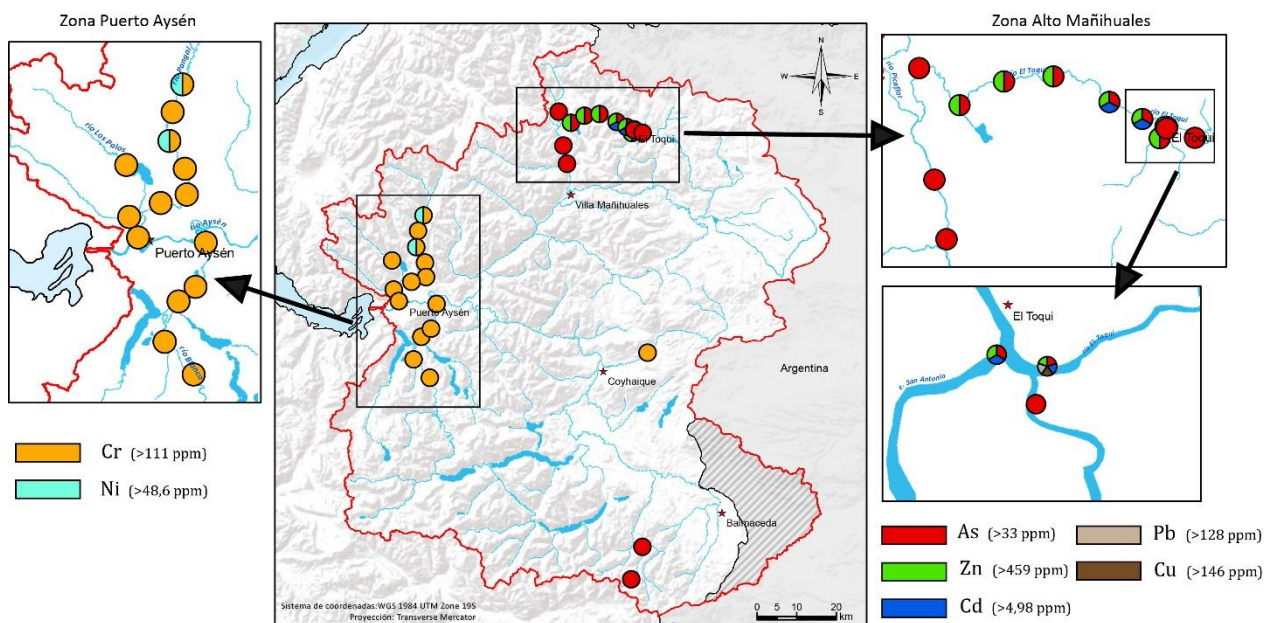


Figura 4.7. Mapa PEC obtenido para la cuenca del río Aysén. Elaborado a partir de MacDonald *et al.*, 2000.

4.2.5 Gráficos de variación geográfica

En Anexo B.6 se presentan los gráficos de variación geográfica para cada río, los estandarizados se exponen en la sección Discusiones.

4.3 Datos mineralógicos

Utilizando los criterios especificados en Metodología de trabajo, se seleccionaron 10 muestras para briquetas, como se detalla en la Tabla 4.8 y 21 muestras para DRX, como se detalla en la Tabla 4.9.

Tabla 4.8. Detalle de la selección de muestras para briquetas.

Muestra	Motivo de la Selección
37	Desagüe del río Blanco
45	Aguas arriba de la ciudad Coyhaique / Desagüe del río Coyhaique
200	Aguas arriba de la mina El Toqui
9	Desagüe del río Emperador Guillermo
73	Desagüe del río Ñirehuao
180	Desagüe del río Mañihuales
194	Aguas debajo de la mina El Toqui
225	Desagüe de la cuenca / Aguas debajo de la ciudad de Puerto Aysén
155	Aguas arriba de la ciudad de Coyhaique
208	Aguas abajo de la ciudad de Coyhaique

Tabla 4.9. Detalle de la selección de muestras para DRX. Se especifican las muestras que además, poseen briqueta.

Motivo general de la selección	Muestra	Motivo específico
Explicar altos contenidos de S total obtenidos en las cercanías de Coyhaique	43	Muestra aguas arriba de la ciudad de Coyhaique con baja concentración de S total.
	45	Muestra aguas abajo de la ciudad de Coyhaique, cercana a la muestra 45 pero con alta concentración de azufre / presenta briqueta.
	155	Muestra obtenida en el río Simpson aguas arriba de la ciudad de Coyhaique / presenta briqueta.
	208	Muestra obtenida en el río Simpson, aguas abajo de la confluencia con el río Coyhaique / presenta briqueta.
Explicar altas concentraciones de metales en las cercanías de un relave y de faenas de la minera El Toqui	197	Muestra obtenida aguas abajo de un relave.
	200	Muestra obtenida aguas arriba de un relave / presenta briqueta.
	194	Muestra obtenida aguas debajo de un relave / presenta briqueta.
	124	Muestra obtenida aguas arriba de las faenas de la minera El Toqui.
	123	Muestra obtenida aguas abajo de las faenas de la minera El Toqui.
	195	Muestra de terraza fluvial, obtenida aguas abajo de un relave.
Explicar altas concentraciones de Cr-Ni en sector oeste de la cuenca	226	Muestra obtenida en el río Aysén, con valores muy altos de Cr y Ni.
	215	Muestra obtenida en el río Pangal, con valores muy altos de Cr y Ni.
	214	Muestra obtenida en el río Pangal, con valores muy altos de Cr y Ni.
	101	Muestra obtenida en el río Blanco, con valores altos de Cr y Ni.
	37	Muestra obtenida en el río Blanco, con valores altos de Cr y Ni / presenta briqueta.
	97	Muestra obtenida en el río blanco, cerca de la muestra 37 pero con baja concentración de Cr y Ni.
Otros	74	Muestra obtenida en el desagüe del río Ñire huao / presenta briqueta.
	12	Muestra obtenida en el desagüe del río Emperador Guillermo.
	180	Muestra obtenida en el desagüe del río Mañihuales / presenta briqueta.
	110	Muestra del río Blanco este con concentraciones altas de As y Sb.
	112	Muestra del río Blanco este con concentraciones altas de Ag y Sb.

4.3.1 Briquetas

Se ilustra en la Figura 4.8, un ejemplo de lo que se obtuvo para cada briqueta. Las demás imágenes se presentan en Anexo C.

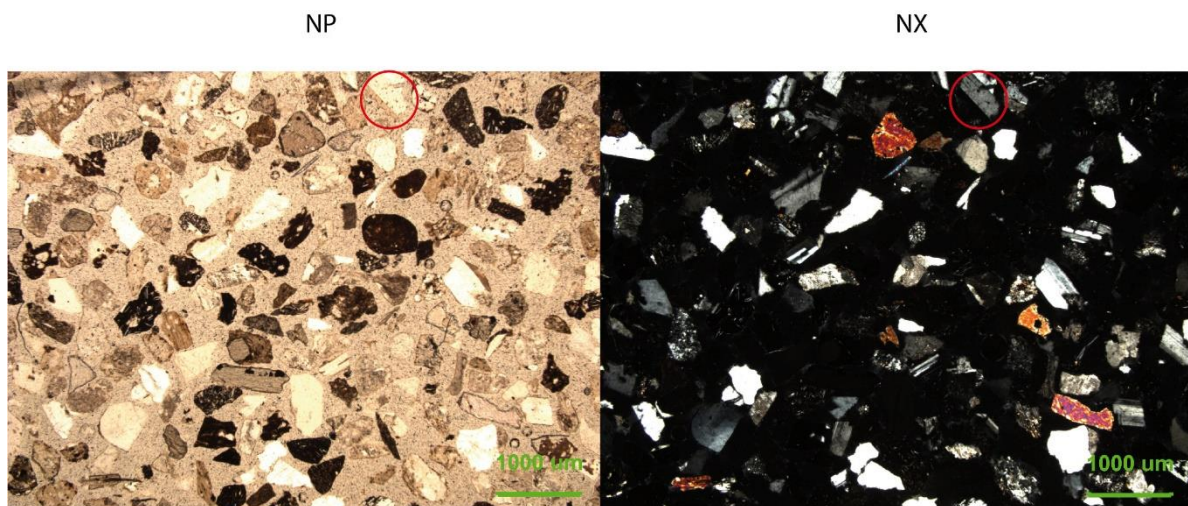


Figura 4.8. Imagen de una briqueta observada a nicoles paralelos (NP) y nicoles cruzados (NX). Se distinguen plagioclasas, cuarzo, feldespatos alcalinos y piroxenas principalmente. Encerrada en un círculo rojo se destaca un cristal de plagioclase con macla Carlsbad.

Luego, en la Tabla 4.10 se ilustra el resultado cualitativo obtenido de las briquetas estudiadas. En él, cada cuadrado negro marca la presencia del mineral en las distintas briquetas, incluyendo además, información del río de donde se obtuvo la muestra.

Tabla 4.10. Resumen de la mineralogía obtenida mediante briquetas.

ríos	río Simpson		río Coyhaique	río Marihuales	río Emperador Guillermo	río Ñirehuao	río Toqui		río Blanco	río Los Palos
	155	208	45	180	12	74	200	194	37	226
cuarzo										
plagioclase										
feldespatos										
zeolita										
biotita										
micas blancas										
piroxenos										
anfíboles										
epidota										
olivino										
zircón										
clorita										
arcillas										
apatito										
óxidos de hierro										
rutilo										

4.3.2 DRX

Al igual que para las briquetas, en la Tabla 4.11, se entrega la información obtenida del estudio mediante Difracción de Rayos X.

Tabla 4.11. Resumen de la mineralogía obtenida mediante DRX.

ríos			río Simpson		río Coyhaique		río Manihuales río Emperador Guillermo		río Ñirehuao	río Toqui					río Blanco			río Blanco este	río Los Palos		río Pangal			
Strunz*	Grupo minerales	Minerales / N° Muestra	155	208	45	43	180	12	74	200	194	197	195	124	123	37	97	101	112	110	226	214	215	
		Cuarzo																						
		Cristobalita																						
	Feldespatos																							
		Albita																						
		Microclina																						
		Ortoclasa																						
	Ceolitas																							
		Laumontita																						
	Biotita																							
		Hidrobiotita																						
		Flogopita																						
		Fluorlogopita																						
	Micas Blancas																							
		Moscovita																						
	Clorita																							
		Clinocloro																						
		Niimita																						
	Arcillas																							
		Montmorillonita																						
		Caolinita																						
		Dickita																						
		Illita																						
		Talco																						
		Vermiculita																						
		Nontronita																						
	Clinopiroxenos																							
		Diópsido																						
		Augita																						
	Ortopiroxenos																							
		Enstatita																						
	Anfiboles																							
		Edenita																						
		Fluoroedenita																						
		Pargasita																						
		Hornblenda																						
		Actinolita																						
		Ferroactinolita																						
		Richerita																						
		Epidota																						
		Olivino																						
		Zircón																						
		Apatito																						
		Titanita																						
		Cordierita																						
		Hematita																						
		Magnetita																						
		Titanomagnetita																						
		Rutilo																						
		Ilmenita																						
		Cromita																						
Carbonatos		Ankerita																						
		Dolomita																						
Fosfatos		Beryllonita																						
		Shannonita																						

4.3.3 Mineralogía de los sedimentos fluviales de la cuenca

La mineralogía de la cuenca se obtiene al integrar la información adquirida de las briquetas con la de Difracción de Rayos X, como se ilustra en la Tabla 4.12. En ella se marca con un cuadrado negro la presencia de un mineral obtenida mediante DRX y con un cuadrado rojo cuando el mineral no se encontró en DRX pero si fue observado en las Briquetas.

Tabla 4.12. Mineralogía final para la cuenca del río Aysén. Cuadrados negros indican información obtenida mediante DRX, y los rojos indican información obtenida mediante Briquetas.

rios			rio Simpson	rio Coyhaique	rio Matihuales	rio Emperador Guillermo	rio Nirehuao	rio Toqui					rio Blanco			rio Blanco este	rio Los Palos	rio Pangal						
Strunz*	Grupo de minerales	Minerales / N° Muestra	155	208	45	43	180	12	74	200	194	197	195	124	123	37	97	101	112	110	226	214	215	
Silicatos		Cuarzo																						
		Cristobalita																						
	Feldespatos	Albita																						
		Microclina																						
		Ortoclasa																						
	Ceolitas	Laumontita																						
		Biotita																						
		Hidrobiotita																						
		Flogopita																						
		Fluorflgopita																						
	Micas Blancas	Moscovita																						
		Clorita																						
		Clinocloro																						
		Niimita																						
	Arcillas	Montmorillonita																						
		Caolinita																						
		Dickita																						
		Illita																						
		Talco																						
		Vermiculita																						
		Nontronita																						
	Clinopiroxenos	Diópsido																						
		Augita																						
	Ortopiroxenos	Enstatita																						
	Anfiboles	Edenita																						
		Fluoroedenita																						
		Pargasita																						
		Hornblenda																						
		Actinolita																						
		Ferroactinolita																						
		Richterita																						
		Epidota																						
		Olivino																						
		Zircón																						
		Apatito																						
		Titanita																						
		Cordierita																						
		Hematita																						
		Magnetita																						
		Titanomagnetita																						
	Rutilo																							
	Ilmenita																							
	Cromita																							
Carbonatos	Ankerita																							
	Dolomita																							
Fosfatos	Beryllonita																							
	Shannonita																							

Finalmente, al unir la información entregada en la Tabla 4.12, con la ubicación geográfica de las muestras y la geología del lugar, se obtiene la Figura 4.9.

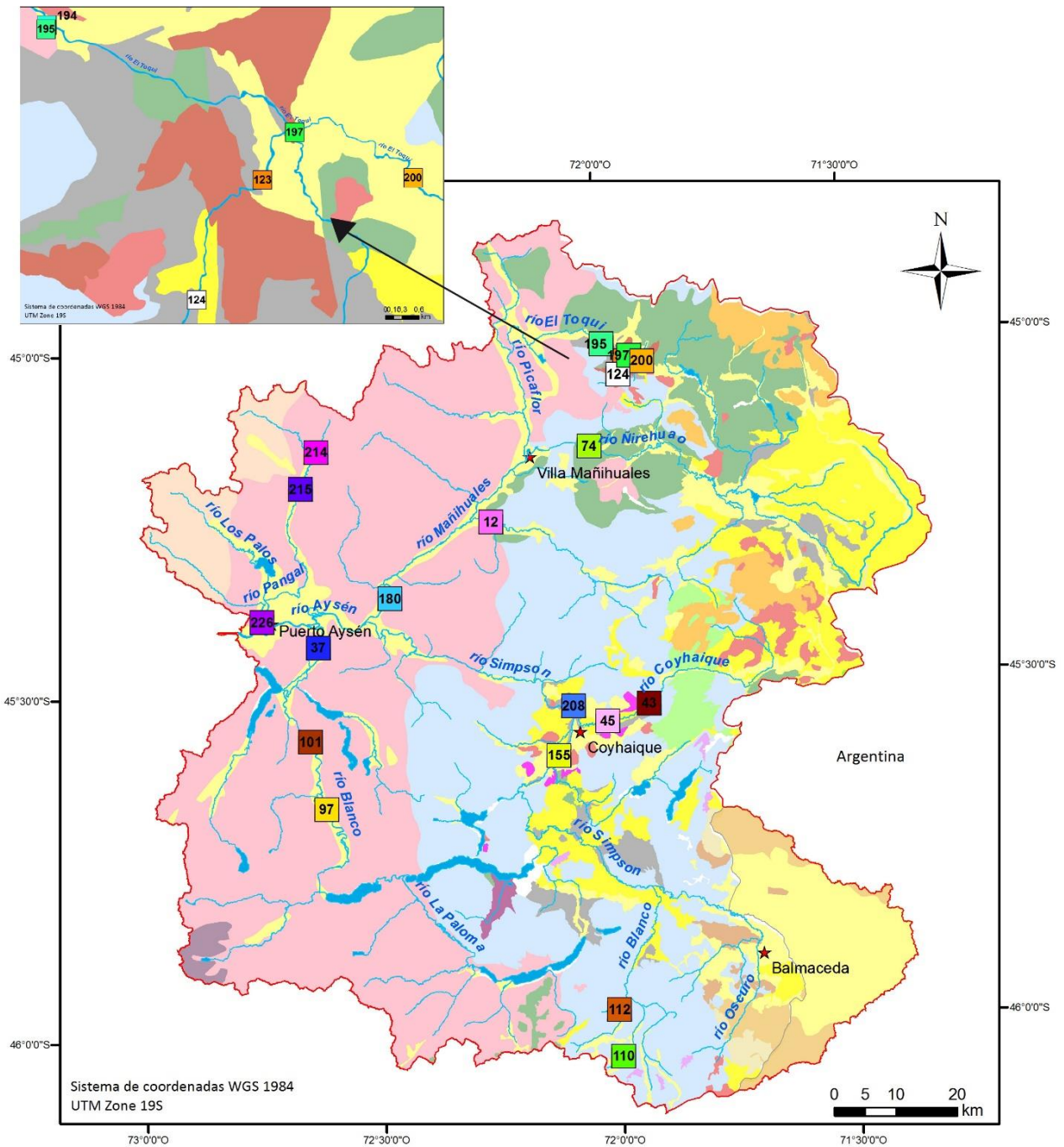


Figura 4.9. Distribución de las muestras que poseen información mineralógica en la cuenca.

▪ **Zona oeste**

Se desprende de la Figura 4.9, que en todas las muestras obtenidas del río Pangal - Los Palos hay presencia de minerales máficos como ortopiroxenos y distintos anfíboles, que varían según la muestra, entre edenita, hornblenda, ferroactinolita y richterita.

Además en una muestra se encontró cromita, mineral asociado a rocas ultramáficas. También se encontraron minerales pesados como ilmenita y magnetita. Por otro lado en las muestras del río Blanco se observan diferencias a medida que el río avanza de sur a norte. En un principio la mineralogía se caracteriza por la presencia de talco y edenita, que hacia el norte desaparecen y aparecen nuevos minerales como micas (hidrobiotita y moscovita) y otras arcillas como montmorillonita e illita. También aparece dolomita, un carbonato de Ca y Mg. Luego, en la parte norte de este río, previo a confluir con el río Aysén, la mineralogía se asemeja un poco a la del río Pangal – Los Palos ya que aparecen piroxenos, y anfíbolos. Además de edenita, se encontró una anfíbola que no se registra en otra parte de la cuenca: fluoroedenita, que corresponde a un anfíbola de flúor. Otro mineral que aparece y que se describe únicamente en esta muestra es la niimita, que corresponde a una clorita con níquel asociada a alteración de rocas ultramáficas (De waal, 1970).

▪ Zona este

El río Coyhaique presenta una mineralogía que va mostrando pequeños cambios a medida que se acerca a la ciudad de Coyhaique y posterior a ella. En un principio posee cuarzo, ortoclasa, arcillas, piroxenos y cordierita, al acercarse a Coyhaique, aparece olivino, epidota y albita. Posterior a Coyhaique, cuando cambia de nombre a río Simpson, aparece fluorflogopita, mineral del grupo de la clorita, análogo a la flogopita con flúor.

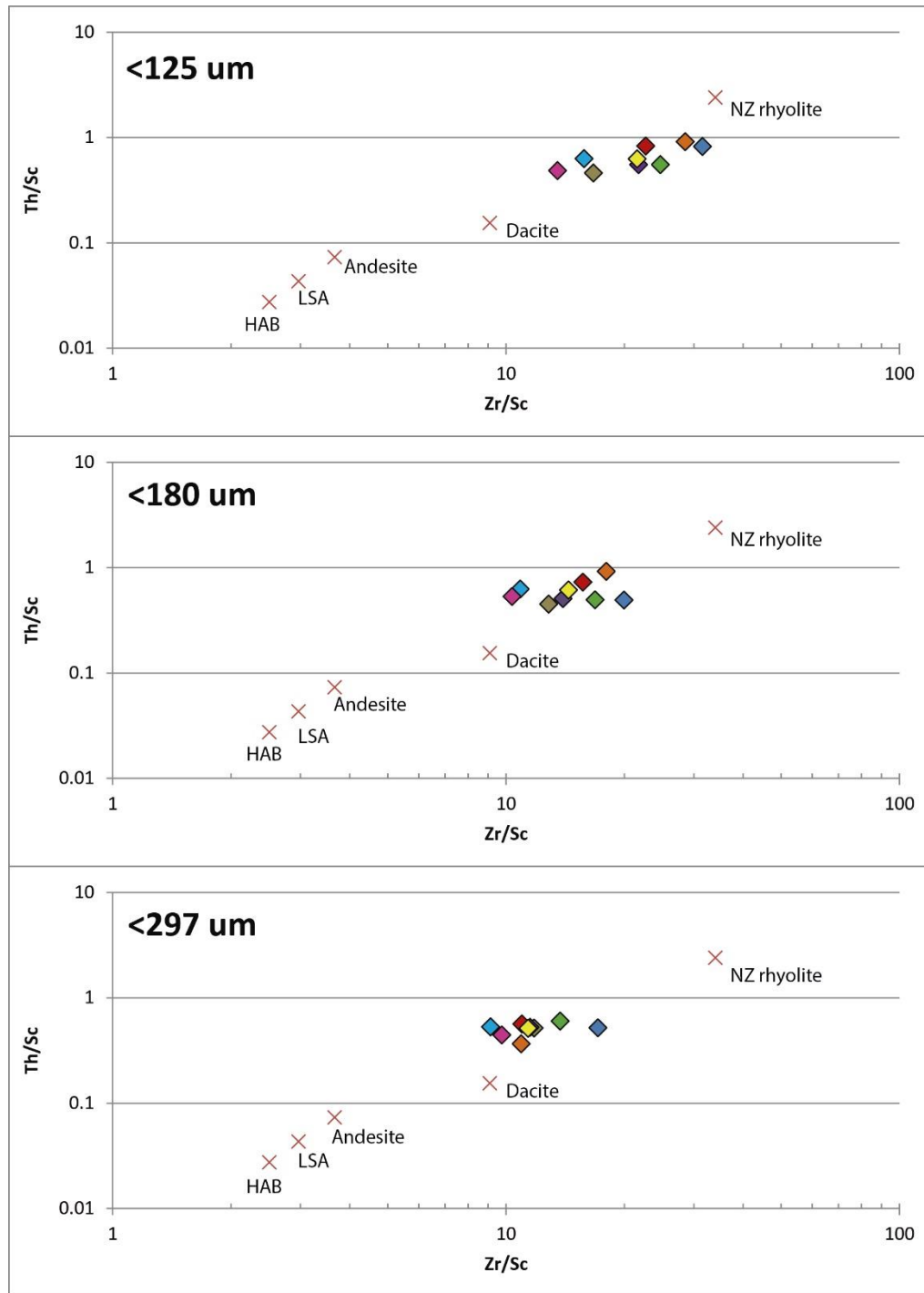
El río Blanco este, presenta pequeñas diferencias en la mineralogía al estudiarlo de sur a norte. En un principio los feldespatos del río corresponden a albitas, presenta ortopiroxenos que luego hacia el norte desaparecen y aparecen clinopiroxenos y ortoclasa. Posterior a confluir con el río Oscuro, recibe el nombre de río Simpson, donde se registran algunas diferencias en la mineralogía, como por ejemplo, la aparición de clinocloro, caolinita (en el río Blanco este las arcillas correspondían a montmorillonita en ambas muestras), hornblenda y epidota.

La mineralogía del río Ñirehuao y Emperador Guillermo es similar, ambos presentan cuarzo, feldespatos, biotita, micas blancas, clinocloro, arcillas, ortopiroxenos y epidota. Se diferencian en que en el río Ñirehuao se encontró actinolita versus en el Emperador, donde no hay registro de anfíbolos.

Por último, en el sector del río Toqui, se encontraron minerales que llaman la atención, ya que solo se encontraron en esta parte de la cuenca. Dentro de estos están las arcillas vermiculita y nontronita, la pargasita, los óxidos apatito y titanita, la Beryllonita (un fosfato de sodio y berilio) y la Shannonita. Este último corresponde a un carbonato de plomo, que se puede formar de manera natural bajo condiciones muy oxidantes pero que también se forma (de manera antrópica) por calentamiento de cerusita (típico en métodos de extracción usados en minería).

4.4 Efecto de la granulometría sobre la composición química

Al plotear las razones Zr/Sc y Th/Sc para cada muestra se obtuvieron los diagramas mostrados en la Figura 4.10.



◆ TR-51
 ◆ CR-10
 ◆ FA-19
 ◆ TR-57
 ◆ TR-36
 ◆ JB-04
 ◆ TR-10
 ◆ TR-66
 ◆ TR-84

Figura 4.10. Razones Zr/Sc versus Th/Sc para las distintas granulometrías en las muestras de la cuenca. Valores de HAB (High Al Basalt), LSA (Low Silica Andesite), Andesite, Dacite, NZ rhyolite obtenidos de Taylor (1965).

Se desprende que todas las muestras clasifican entre dacitas y riolitas para las distintas granulometrías. En general, al ir aumentando el tamaño de grano, las muestras van acercándose a una signatura levemente más básica. La única muestra que presenta

cambios considerables (en relación a las demás muestras) es la FA-19 que en los tamaños de grano más finos entrega la signatura más félsica de todas las muestras, y en tamaños de grano más grueso, muestra más cercanía con una signatura química intermedia, siendo una de las más alejadas a una signatura félsica.

Por otro lado, al observar los diagramas de comparación granulométrica obtenidos (Anexo D) se desprende que:

- **TR-51:** Al aumentar el tamaño de grano, aumentan las concentraciones de MgO, Na₂O, K₂O, Sr y disminuyen las de Fe₂O₃, MnO, P₂O₅, Nb, Pb, Zr, As, Zn, Cu, S, Mo, Hf. Algunos elementos presentaron mayor enriquecimiento en la fracción media (<180 μm), como por ejemplo, Cr, Ga, Sc, V, Y, Cs, Th, U. Destacan en esta muestra las altas concentraciones (relativas a la fracción <297 μm) de As y S total, que se obtienen en la fracción <125 μm y en menor medida 180 μm. Los demás elementos no presentaron notorias diferencias entre las distintas granulometrías o no presentaron un patrón claro.
- **FA-19:** Al aumentar el tamaño de grano, aumentan las concentraciones de Mg, Ni, y levemente Sr y disminuyen las de Pb, Zr, Mo, Hf y U. Algunos elementos presentaron mayor enriquecimiento en la fracción media (<180 μm), como por ejemplo, TiO₂, Fe₂O₃, Cr, Ga, Nb, Sc, V, Zn, Th. Destacan en esta muestra las altas concentraciones (relativas a la fracción <297 μm) de Zr, Hf y U, que se obtienen en la fracción <125 μm y en menor medida 180 μm. Los demás elementos no presentaron notorias diferencias entre las distintas granulometrías o no presentaron un patrón claro.
- **CR-10:** Al aumentar el tamaño de grano, aumentan las concentraciones de Mg, CaO, Na₂O, K₂O, Cr, Ni y disminuyen las de P₂O₅, Pb, Y, As, Cu, S total, Mo, Cs, U. Los demás elementos no presentaron notorias diferencias entre los distintos tamaños de grano.
- **TR-10:** Al aumentar el tamaño de grano, aumentan las concentraciones de SiO₂, Na₂O, K₂O, y disminuyen las de TiO₂, Fe₂O₃, MnO, P₂O₅, Cr, Nb, Ni, Pb, Sc, V, Zr, As, Zn, Cu, Cs, Hf y Th. Algunos elementos presentaron mayor enriquecimiento en la fracción media (<180 μm), como por ejemplo CaO y MgO. Los demás elementos no presentaron notorias diferencias entre los distintos tamaños de grano.
- **TR-66:** Al aumentar el tamaño de grano, aumentan las concentraciones de Na₂O, K₂O, Ba, Rb y disminuyen las de TiO₂, Fe₂O₃, MnO, P₂O₅, Cr, Nb, Ni, Pb, Sc, V, Zr, As, Zn, Cu, Hf, Th, U. Algunos elementos presentaron mayor enriquecimiento en la fracción media (<180 μm), como por ejemplo CaO y MgO. Destacan en esta muestra las altas concentraciones de S total y U, obtenidas en la fracción más fina (<125 μm). Los demás elementos no presentaron notorias diferencias entre los distintos tamaños de grano.

- **TR-84:** Al aumentar el tamaño de grano, aumentan levemente las concentraciones de SiO₂, K₂O, Rb y disminuyen las de TiO₂, Fe₂O₃, MnO, P₂O₅, Cr, Nb, Pb, Sc, V, Y, Zr, As, Cu, Mo, Hf, U. Destacan en esta muestra las altas concentraciones de Zr, Hf, Th y U obtenidas en la fracción más fina (<125 μm). Los demás elementos no presentaron notorias diferencias entre las distintas granulometrías.
- **TR-36:** Al aumentar el tamaño de grano, aumentan levemente las concentraciones de MgO, K₂O y disminuyen las de Zr, Mo, Hf, U y levemente las de Fe₂O₃, Nb, Pb, Sc, V, Y, As, Zn, Cu y Cs. Destacan en esta muestra las altas concentraciones (relativas a la fracción <297 μm) de Zr y Hf, que se obtienen en la fracción <125 μm y en menor medida 180 μm. Los demás elementos no presentaron notorias diferencias entre las distintas granulometrías o no presentaron un patrón claro.
- **JB-04:** Al aumentar el tamaño de grano, aumentan las concentraciones de Na₂O, y disminuyen las de TiO₂, Fe₂O₃, MnO, P₂O₅, Nb, Pb, V, Y, Zr, Hf, Th, U. Destacan en esta muestra las altas concentraciones (relativas a la fracción <297 μm) de Zr y Hf, que se obtienen en la fracción <125 μm y en menor medida 180 μm. Los demás elementos no presentaron notorias diferencias entre los distintos tamaños de grano.

Por último, se desprende de los diagramas de comparación granulométrica (Anexo D) que las diferencias o fraccionamientos obtenidos entre las distintas granulometrías para la mayoría de los elementos estudiados, son mayores en las muestras FA-19 Y TR-66. Lo contrario ocurre para las muestras CR-10, TR-36, JB-04, mostrando un menor fraccionamiento, tanto para los elementos mayores como para los elementos traza estudiados.

5 DISCUSIONES

En este trabajo se considera que un valor de concentración es alto para cierto elemento, cuando el valor es notoriamente mayor a los que se presentan en el resto de la cuenca. Esto se evalúa mediante la observación de los Mapas geoquímicos Univariados (Anexo B.4), y además es confirmado con el dato del factor de enriquecimiento (Anexo B.1).

5.1 Control de calidad de datos

Tomando en cuenta la información entregada por las muestras duplicadas, gemelas, y estándar se evalúan las etapas de muestreo y de análisis de laboratorio, de manera independiente.

- **Muestreo.** Según los criterios descritos en metodologías, el análisis de muestreo se clasifica como aceptable, a excepción de los siguientes casos: S total, Be, Sn, Ta, W, Cd, Bi, Au, Hg, Tl, B, C y Cu. Excluyendo al Cu, todos los elementos mencionados entregaron concentraciones bajas en numerosas muestras y cercanas (e incluso menores en algunos casos) al límite de detección. Al estar más cerca del límite de detección, se aumenta la posibilidad de tener altos valores para el error fundamental debido a que en ese campo, la medición es muy sensible a pequeños cambios en las concentraciones registradas.
- **Laboratorio.** Para la precisión del análisis de laboratorio, dentro de los elementos que presentaron más de un 20% de pares fallidos están Be, Sn, W, Cd, Bi, Au, Hg, Tl, B, Mo. Como se describió anteriormente, estos elementos poseen en varias muestras, bajas concentraciones y cercanas al límite de detección, por ende ese podría ser el principal factor que influye en el error fundamental. Otro grupo de elementos en los que se obtuvo una proporción de pares fallidos mayor al 20% corresponden a Cr, Co, Hf, Th, U, Zr, Gd, Tm, Ta. Estos elementos suelen estar asociados a minerales densos, por lo tanto, tienden a segregarse en una muestra. Al ocurrir esta segregación, se aumentan las posibilidades de obtener errores fundamentales considerables, condicionados por la porción de la muestra que se utilice para el análisis. Se puede asumir que la segregación de minerales densos en una muestra, ocurre en el laboratorio y no en terreno, ya que estos elementos no presentaron errores considerables en el análisis de muestreo.
Por otro lado, cómo se mencionó en metodologías, se considera que la exactitud del análisis del laboratorio es buena si es que el sesgo es menor a un 5 %. En este caso se obtuvo un sesgo de 2,68%, así, la exactitud del análisis es aceptable.

Es importante señalar que las altas concentraciones obtenidas en los elementos químicos son más fiables que las bajas (y cercanas al límite de detección) básicamente debido a que una diferencia dada genera menores errores en un campo alejado del

límite de detección. Este factor se debe considerar al interpretar la información química obtenida en los elementos que presentaron mayor error fundamental.

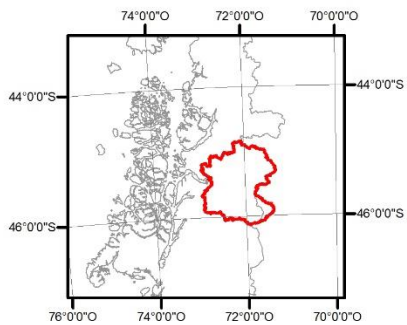
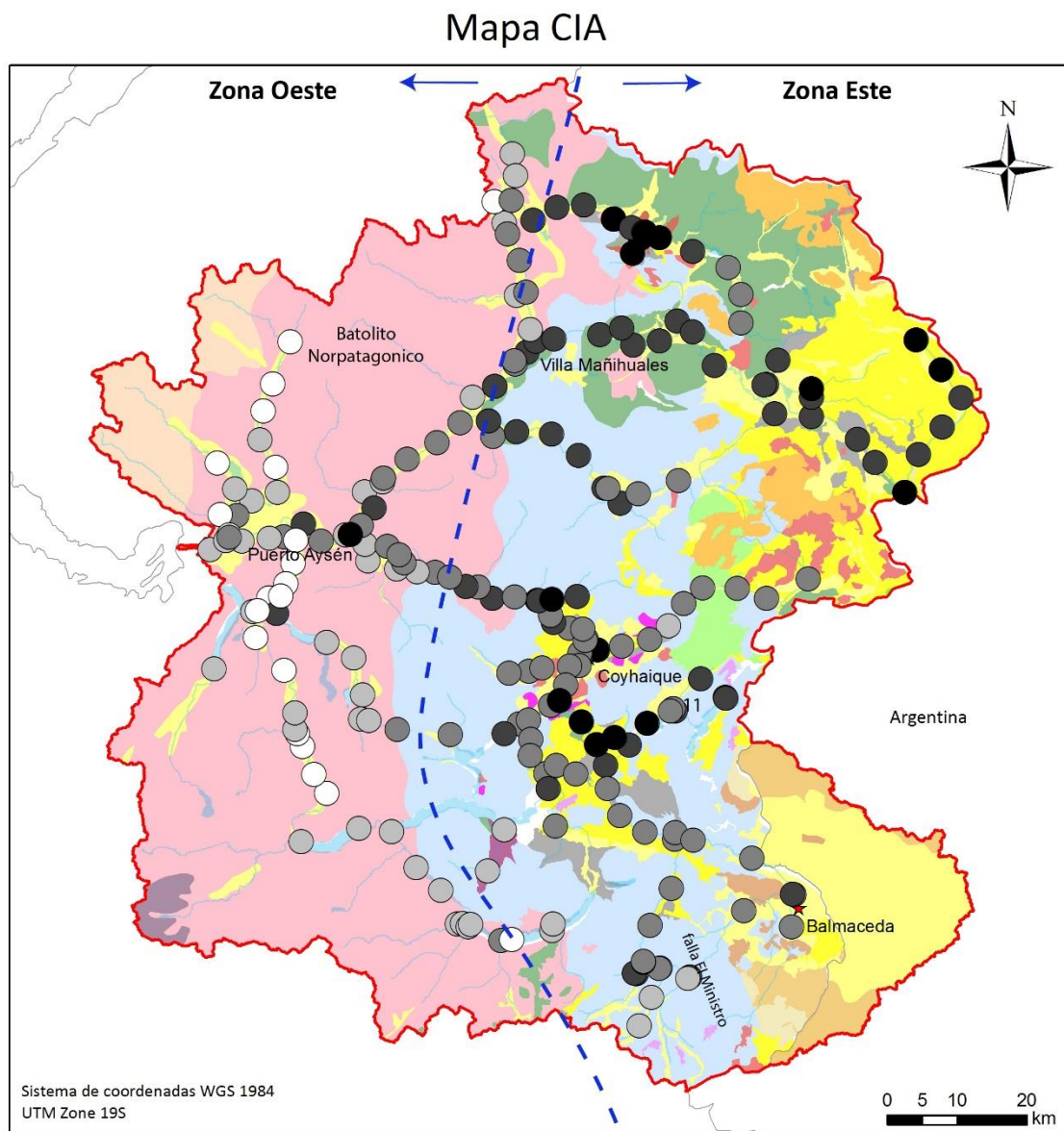
Por último, considerando los resultados obtenidos del control de calidad de datos, se decidió que para efectos de la discusión, no se consideraran los elementos químicos Be, Sn, Ta y W, por su tan alto % de pares fallidos, tanto para muestras gemelas como para duplicados finos.

5.2 Zona este

5.2.1 Río Blanco este

Este río, ubicado en el sector sur de la cuenca, drena sobre la Formación Divisadero (*Ki3ai*), caracterizada por rocas volcánicas y piroclásticas, principalmente de composición riolítica, dacítica y andesítica. Además en las cercanías de este río se encuentran algunos afloramientos de intrusivos de composición basáltica, andesítica y diorítica.

Al observar los Mapas Geoquímicos Univariantes de la cuenca (Anexo B.4) se desprende que este río presenta altas concentraciones de K_2O , Rb, Cs y moderadamente altas de SiO_2 y Ba. Esta signatura refleja un aporte desde fuentes de composición félsica (Salminen *et al.*, 2005; Dinelli *et al.*, 2005). Además, elementos como Rb, Cs y Ba comúnmente se incorporan en el feldespato potásico, y se mantienen cuando el feldespato sufre meteorización química, debido a que se adsorben a las arcillas (Nesbitt & Price, 1980). Sin embargo, al observar el mapa CIA (Figura 5.1), se desprende que las muestras de este río no evidencian una meteorización considerable de la fuente, al menos en relación al resto de la cuenca.



Leyenda

CIA

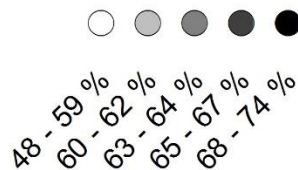


Figura 5.1. Índice de meteorización química (C.I.A) en los sedimentos fluviales de la cuenca del río Aysén.

Es importante notar que la muestra 63 de este río, presenta altas concentraciones de Cu, en relación a la cuenca (FE 5.18) y que además se encuentra enriquecida (en relación al resto del río) en B, S total, Al_2O_3 y P_2O_5 . La descripción en terreno de esta muestra menciona la presencia de clastos de brecha hidrotermal y otros clastos con importante alteración argílica y abundantes hidróxidos de hierro en la zona.

Un afluente que proviene desde el extremo sur de la cuenca (se llamará afluente sur en este trabajo) presenta un comportamiento químico distinto para algunos elementos al descrito previamente, exhibiendo mayores concentraciones de Cs, CaO, Fe_2O_3 , MgO, Sc, P_2O_5 , As, Sb, Hg y menores de SiO_2 , Ba y K_2O (Figura 5.2 para el caso de SiO_2). Esta signatura es característica de una fuente de composición más máfica (Ortiz & Roser, 2006; Ohta et al., 2006; Sensarma et al., 2007; Dinelli et al., 2005). La mineralogía del lugar también evidencia esta diferencia, de manera que en las muestras obtenidas del afluente sur, los feldespatos corresponden a albita, en comparación con las muestras de este río y/o demás afluentes, donde los feldespatos corresponden principalmente a ortoclasas, mineral que aporta con Rb, Ba y K_2O .

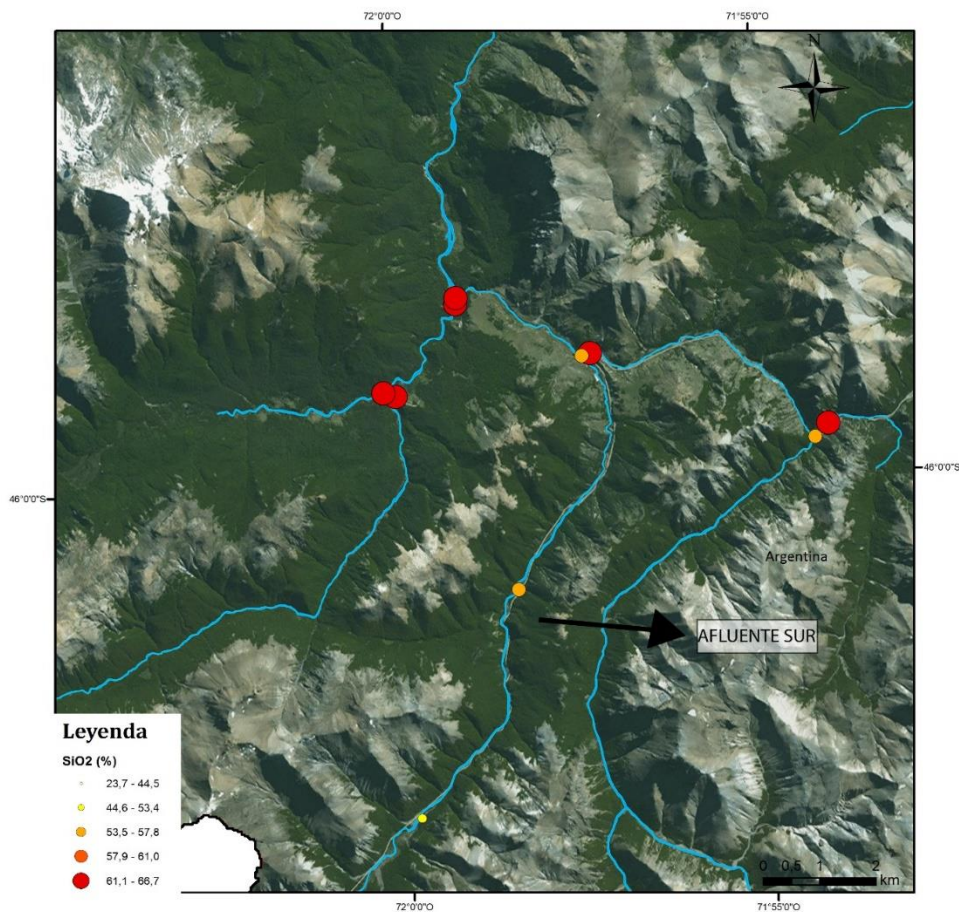


Figura 5.2. Concentración de SiO_2 en las muestras del río Blanco este y sus afluentes.

Esta diferencia también se refleja en el diagrama de clasificación TAS (Anexo B.2), donde las muestra provenientes del afluente sur clasifican como andesitas y andesita-basáltica, y las demás como dacitas.

En las cercanías del afluente sur, existen cuerpos hipabisales básicos, definidos como la unidad Hipabisales básicos (*ksh*), conformada principalmente por andesitas con fenocristales de plagioclasa (Ver Marco geológico*). También se describe en este lugar, un afloramiento de lavas andesíticas y basálticas incluidas en la Formación Divisadero (*ki3ai*). Ambas unidades descritas se ubican de manera local en las cercanías de las muestras del afluente sur, y podrían explicar la composición relativamente más básica en ellas (en relación a las demás de este río y afluentes). Esta diferencia química parece reflejar una diferencia entre la fuente litológica de las muestras del afluente sur con respecto a las demás.

Finalmente, llama la atención el contenido de As y Sb en las muestras de este afluente, con factores de enriquecimiento de hasta 1.43 y 4.39 respectivamente en relación al resto de la cuenca (Anexo B.1). El Sb posee características geoquímicas similares al As, por lo que muchas veces estos elementos se encuentran asociados (Salminen et al., 2005).

5.2.2 Río Oscuro- río Simpson- río Aysén

Nace en el extremo sur - este de la cuenca con el nombre de río Oscuro y posterior a la localidad de Balmaceda cambia su nombre a río Simpson (ver Hidrografía). Drena largas distancias por diversas formaciones, hasta confluir con el río Mañihuales y dar nacimiento al río Aysén.

En relación al resto de la cuenca, este río posee en general concentraciones mayores de SiO₂, K₂O, Rb, intermedias de Al₂O₃, Sr, y menores de CaO (Anexo B.4). Esta signatura refleja un aporte desde litologías félsicas (Salminen *et al.*, 2005; Dinelli *et al.*, 2005). Lo anterior es consistente con el diagrama TAS obtenido (Anexo B.2), donde la mayoría de las muestras del río son clasificadas como dacitas (y algunas como andesitas).

A pesar de los diversos afluentes que desaguan en este río, y de drenar por distintas unidades geológicas, la señal geoquímica a lo largo de este no varía mayormente a excepción de algunas zonas puntuales que se describirán más adelante.

En un principio, la señal geoquímica se caracteriza por altas concentraciones de Sr, Al₂O₃, CaO y relativamente altas de SiO₂, K₂O, Rb, Na₂O y Ba. Luego, aguas abajo de la confluencia con el río Blanco este (descrito anteriormente) la señal geoquímica se ve abruptamente alterada en algunos elementos, mostrando un aumento de Na₂O, Rb, As, Cs, SiO₂, K₂O, Ba, y disminución en el contenido de Al₂O₃, Sr, MgO y CaO (Figura 5.3). Probablemente el cambio en la señal se debe al aporte de las aguas del río Blanco este.

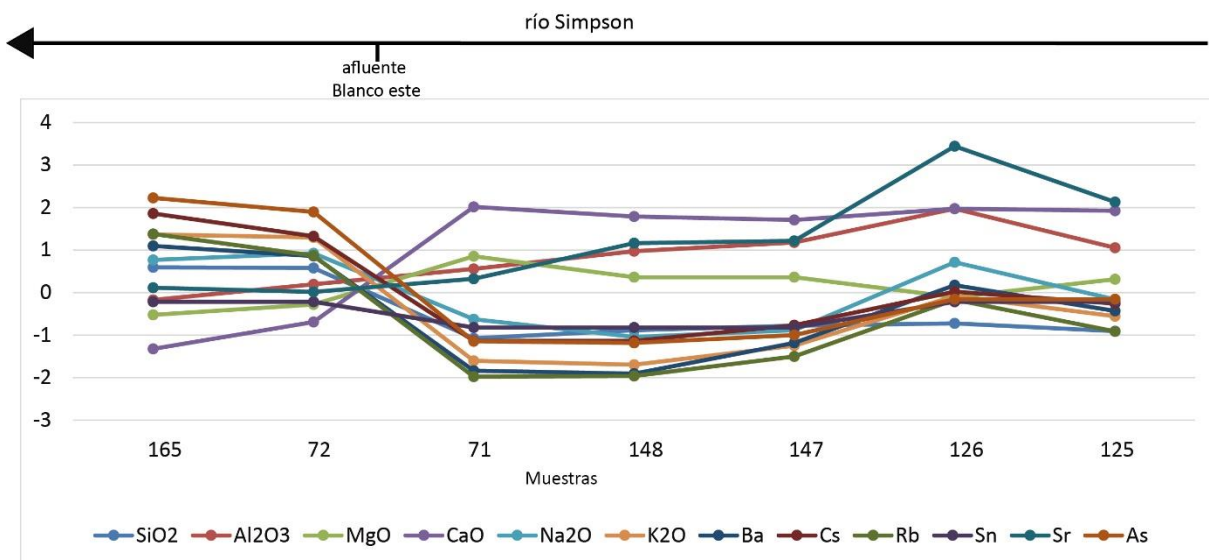


Figura 5.3. Diagrama estandarizado para las muestras del río Simpson.

A medida que el río sigue su rumbo hacia el norte, un afluente desde el oeste desagua en él (representado por la muestra 137). Este afluente no altera en gran medida las concentraciones del curso principal (Anexo B.6), sin embargo es importante destacar que posee concentraciones mayores a las registradas en el río Simpson de C total (FE 2.92), P_2O_5 (FE 1.34), Ga (FE 0.95), Co (FE 0.97), Ni (FE 0.95).

Un tributario importante del río Simpson, es el río Pollux, que proviene desde el oriente (ver Hidrografía). Este río posee una señal muy dispersa, cambiando abruptamente sus concentraciones químicas. Al observar los mapas geoquímicos univariados, destaca (o llama la atención) una muestra que posee altas concentraciones de K_2O , Rb, Al_2O_5 , B, Sr, Ba (FE mayores a 1 para todos esos elementos) y bajas de CaO (FE 0.79). Como se mencionó anteriormente, los minerales primarios (como feldspatos) se alteran a arcillas producto de la meteorización química. En este proceso existen elementos que se adsorben a las arcillas debido a su carácter inmóvil (como por ejemplo Rb, Cs y Ba) y otros que son rápidamente removidos y disueltos (ejemplo CaO y Na_2O) (Nessbit *et al.*, 1980). De esta manera, la química obtenida parece reflejar la presencia de arcillas producto de meteorización química en el lugar.

Otro afluente importante y que posee una señal química muy marcada es el río Claro (ver Hidrografía), que confluye con el Simpson desde el oeste, y previo a la ciudad de Coyhaique. En relación al río Simpson, se caracteriza por concentraciones mayores de HREE (+Eu), Bi, CaO, Sc, Ga, Al_2O_5 , intermedias de Ni, Cr, Sn, P_2O_5 y menores de SiO_2 , K_2O , Na_2O , signatura que evidencia una fuente de composición más máfica (Ortiz & Roser, 2006; Ohta *et al.*, 2006; Sensarma *et al.*, 2007; Dinelli *et al.*, 2005) en comparación al río Simpson. Este tributario parece evidenciar que los sedimentos de afluentes provenientes desde el oeste poseen una química más máfica que el río Simpson. Lo anterior concuerda con la información entregada en el diagrama TAS (Figura 5.4), donde todas las muestras del río Claro clasifican como andesitas versus las del río Simpson que clasifican como dacitas (y algunas andesitas).

Río Simpson TAS (Le Bas et al. 1986)

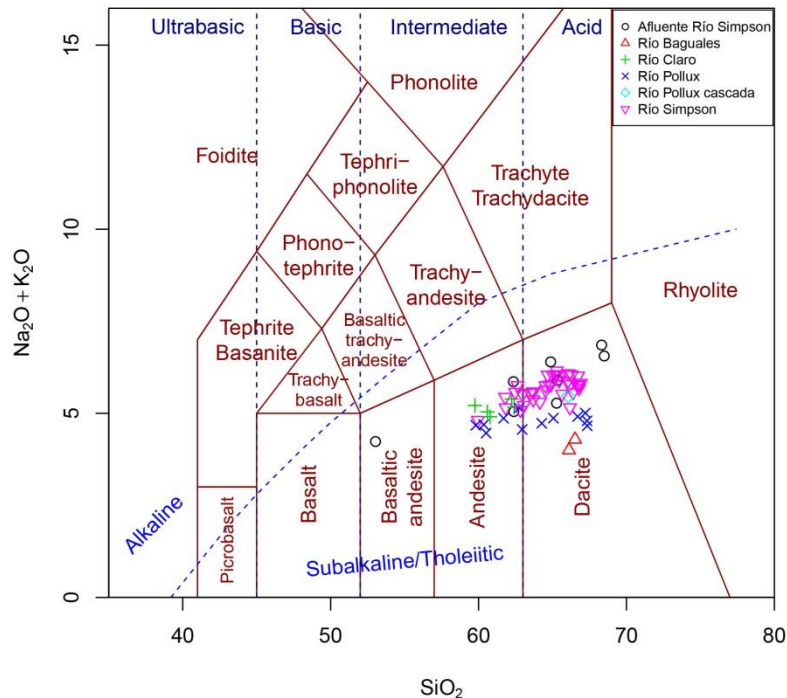


Figura 5.4. Diagrama TAS para las muestras del río Simpson y sus afluentes.

Posterior a la ciudad de Coyhaique, recibe las aguas del río Baguales. Este río está caracterizado por 2 muestras (132 y 102) que entregan altas concentraciones de S total (FE hasta 10.22), P₂O₅ (FE hasta 5.3), B (FE hasta 4.36), C total (FE hasta), Se (FE hasta 3.32), Hg (FE hasta 4.07), Mo (FE hasta 3.35) y Ba (FE hasta 1.77). Considerando que la litología de la zona se caracteriza, además de la formación divisadero ya descrita, por la formación Katterfeld, que incluye lutitas negras fosilíferas, es probable que el factor que predomina en la señal química obtenida en el río Baguales es la litología de la zona, en particular las lutitas negras de esta formación (Salminen *et al.*, 2005).

Posterior a confluir con el tributario río Baguales, el río Simpson cambia de dirección al oeste. A lo largo de su trayecto, recibe numerosos afluentes provenientes del norte y del sur mayoritariamente, y que entregan, en algunos casos, concentraciones que destacan (en relación a la cuenca) para algunos metales de interés económico.

- El primero, proveniente desde el norte, está representado por la muestra 80 y presentó concentraciones que destacan para los elementos: Cu (FE 1.65), Pb (FE 2.55), Zn (FE 1.09), Cd (FE 3.33), Ag (FE 1.11), Sb (FE 2.79), Se (FE 2.98), Hg (FE 7.45), S total (FE 1.63), C total (FE 2.71), Cs (FE 2.18), B (FE 2.52), y TI (FE 4.13).
- Un segundo tributario, proveniente desde el norte y representado por la muestra 83 entregó mayores valores de C total (FE 1.59), S total (FE 2.09), Mo (FE 1.68), Pb (FE 1.44), Cd (FE 1.54), TI (FE 1.38), Hg (FE 1.36).

- Otro tributario que al igual que los anteriores, desciende desde el norte está representado por la muestra 86 entregó altos valores de C total (FE 1.46), U (FE 4.28), Mo (FE 7.31), Pb (FE 1.19).
- El primer afluente que proviene desde el sur, está caracterizado por la muestra 87 que entregó concentraciones que destacan, en relación a la cuenca, para los elementos: C total (FE 1.22), U (FE 3.04), Mo (FE 2.76), Pb (FE 1.19) y Bi (FE 1.98).
- Finalmente, un segundo tributario que drena desde el Suroeste y que está representado por la muestra 89, entregó mayores concentraciones en: C total (FE 3.17), U (FE 4.14), Mo (FE 7.67).

En el tramo descrito, el único registro de alguna manifestación corresponde a una alteración de Cu-Mo en forma de veta (ver Marco geológico*), ubicada en las cercanías del segundo afluente descrito, representado por la muestra 83.

A pesar de los altos valores de Factor de Enriquecimiento de algunos elementos en las muestras descritas, el único afluente que provocó una influencia visible en los diagramas de variación geográfica del río Simpson, fue el último descrito (muestra 89) que alteró levemente las concentraciones de C total en el río.

Posteriormente, el río Simpson confluye con el río Mañihuales, que proviene desde el norte, dando origen al río Aysén. La señal geoquímica obtenida de los sedimentos del río Aysén es muy variable, posiblemente como consecuencia de recibir múltiples afluentes con diversas firmas químicas (ríos Pangal, Blanco, Mañihuales y Simpson). Esta diversidad composicional también se plasma en el diagrama TAS (Anexo B.2) donde las muestras obtenidas del curso principal, posterior a los afluentes Pangal y Blanco, poseen la composición química más básicas en el diagrama TAS (andesitas basálticas y andesitas) versus las demás, que siguen la señal geoquímica del río Simpson (andesitas y dacitas en el diagrama TAS). Lo anterior, también se ilustra en los diagramas estandarizados (Figura 5.5), donde se distinguen peaks positivos y negativos considerables para algunos elementos. Precisamente, en las muestras posteriores a los afluentes Blanco y Pangal (muestras 210 y 231), se describen peaks positivos para elementos químicos asociados a una firma básica como Ni, Cr, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, V, Nb, Sc, Co, Hf, Zr, Cr y negativos de Sr, SiO₂, Ba, K₂O, Rb y Al₂O₃. (Ortiz & Roser, 2006; Ohta *et al.*, 2006; Sensarma *et al.*, 2007; Dinelli *et al.*, 2005).

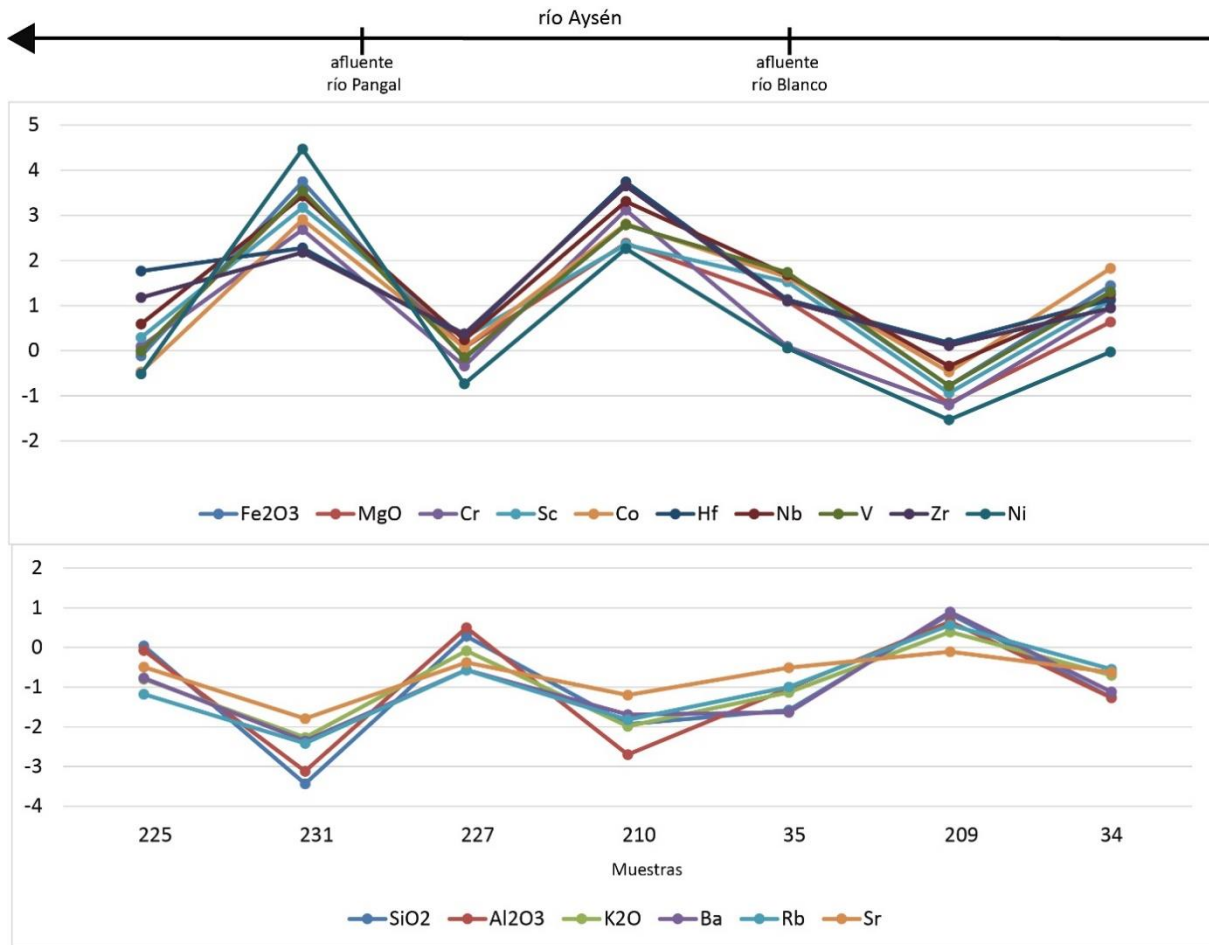


Figura 5.5. Diagrama estandarizado para las muestras del río Aysén.

5.2.3 Río Coyhaique

El río Coyhaique drena por el sector centro-este de la cuenca, sobre la formación divisadero. La señal geoquímica entregada es bastante homogénea, con concentraciones relativamente altas de SiO₂, moderadas de K₂O, Ba, Rb y menores de Al₂O₃ (con respecto al resto de la cuenca). Se observa una clara anomalía de europio en la zona (Figura 5.6) lo que sugiere la influencia de rocas félsicas en la señal geoquímica (Salminen *et al.*, 2005). Esto es consistente con el diagrama TAS, donde las muestras se clasifican de composición dacítica (Anexo B.2).

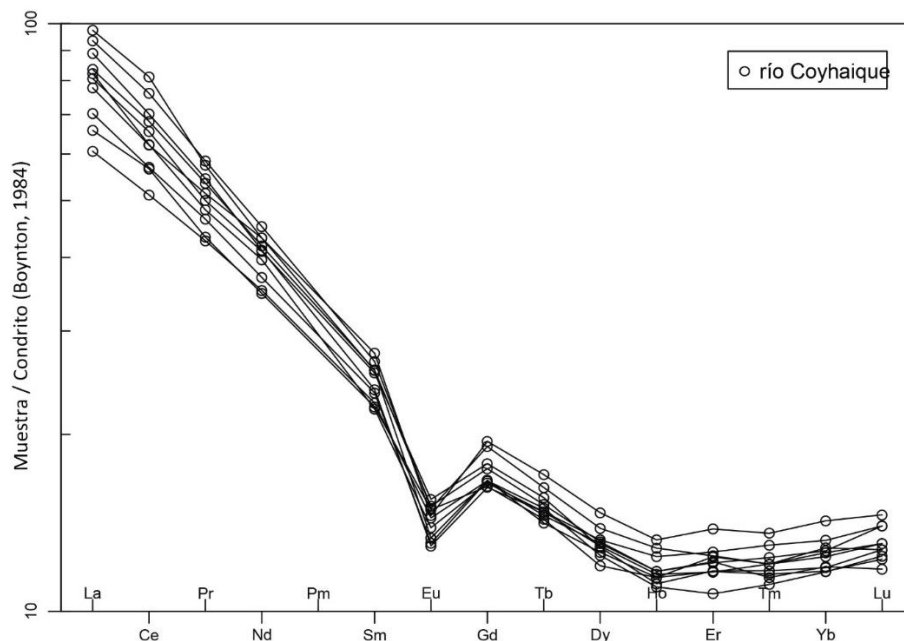


Figura 5.6. Diagrama spider normalizado al condrito (Boynton 1984) para las muestras del río Coyhaique.

Existen 2 muestras (39 y 40) que entregan mayores concentraciones de SiO_2 , K_2O , Ba y Rb ubicadas exactamente posteriores a un cambio de dirección del río (de SW a NW) y que podría estar reflejando mayores aportes de feldespatos o arcillas.

Existe también una muestra (41) que entregó altas concentraciones de C Total (FE 3.4), S total (FE 1.63), MnO (FE 1.94), Sn (FE 1.83), Mo (FE 1.44), Cu (FE 1.7), Hg (FE 1.36), Tl (FE 1.38), Se (FE 2.65) (relativo a las demás de este río) y que drena sobre la Formación El Toro, compuesta por lavas basálticas, andesíticas y dacíticas. No existe registro de alteración en esta parte que pueda explicar estas concentraciones.

Del diagrama estandarizado (Figura 5.7), se observa en la muestra 43 un peak positivo para los elementos: Ni, Cr, Co, MgO, TiO_2 , Ga, V, Sc, Fe_2O_3 , Zr, Hf, Nb negativo de SiO_2 , K_2O , Ba, Rb. En esta misma muestra se encontró olivino al analizar la mineralogía mediante briquetas (Anexo C). En el lugar de la muestra se ubica la Unidad Geológica Gabro Bandurrias caracterizada como gabros homogéneos con piroxeno, olivino y biotita (ver Marco geológico*). Por todo lo anterior, es probable que el factor litológico, es decir, una fuente de composición máfica, sea el factor responsable de este peak en la composición química de los sedimentos.

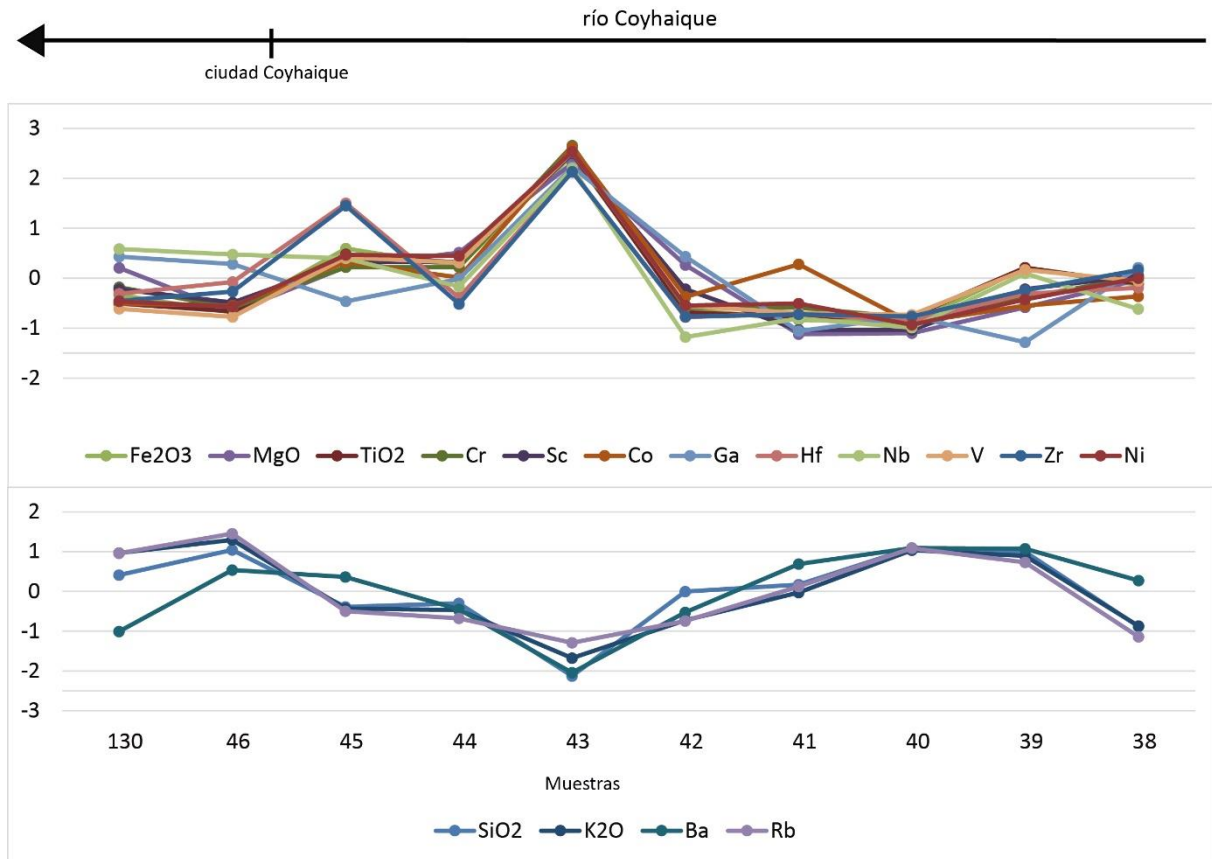


Figura 5.7. Diagrama estandarizado para las muestras del río Coyhaique.

Cerca de la ciudad de Coyhaique, específicamente en la muestra 45, aumentan las concentraciones de algunos elementos como: S total (FE 7.43), P₂O₅ (FE 1.45), Hg (FE 1.36), esta muestra se ubica previo a la ciudad, donde el río comienza a drenar sobre las lutitas negras de la Formación Katterfeld. Esta litología podría explicar estas concentraciones, como se mencionó anteriormente para el caso del río Baguales.

En la muestra 46, extraída en las cercanías de la ciudad de Coyhaique, se observa un peak de Boro (FE 3.19). Este peak puede ser de origen natural, asociado a las rocas volcano-sedimentarias del lugar, como también de origen antrópico, asociado a la presencia de un centro urbano e industrias en el lugar.

5.2.4 Río Emperador Guillermo

En general la señal de este río se caracteriza con concentraciones relativamente altas (con respecto a la cuenca) de Cs, Ba, Rb, As, Pb, Hg, Ag. Sin embargo la primera muestra que representa a este río (202) es distinta a la señal descrita, con mayores concentraciones (que el resto del río) de Ga, Al₂O₃, Sr, C, CaO, MgO, Ni y menores de Ba, Rb, SiO₂, K₂O, Th, HREE, mostrando una signatura asociada a una fuente intermedia.

De la Figura 5.1, se desprende que la meteorización es considerable en este río, al menos en relación a los demás de esta cuenca. Cuando ocurre meteorización química

en un lugar, muchos procesos se desarrollan dependiendo de la “roca caja”. Como se mencionó anteriormente, un ejemplo de esto es el caso del feldespato, que cuando sufre procesos de meteorización se altera a arcillas. Algunos elementos como Ba, Cs y Rb, poseen un carácter inmóvil que permite que se mantengan posterior a la meteorización, principalmente gracias a que se adsorben a las arcillas (Nesbitt & Price, 1980). Lo anterior es consistente con la mineralogía de las muestras de este río, donde se encontraron arcillas y micas, como por ejemplo hidrobiotita, micas blancas, montmorillonita y caolinita. Las arcillas además de los elementos descritos, posee importantes cantidades de Al_2O_3 . Como se observa en el diagrama estandarizado (Figura 5.8), los peaks de Al_2O_3 son opuestos con los de Zr, TiO_2 , Fe_2O_3 y V. Este comportamiento manifiesta la influencia de las condiciones hidrodinámicas en la señal química obtenida, donde los minerales livianos como arcillas y micas, ricos en aluminio, se depositan en zonas con menor energía de arrastre del sedimento (por efecto de geomorfología del lecho y/o caudal del río), versus los pesados, que pueden depositarse en condiciones de mayor energía, generando este efecto de concentraciones opuestas.

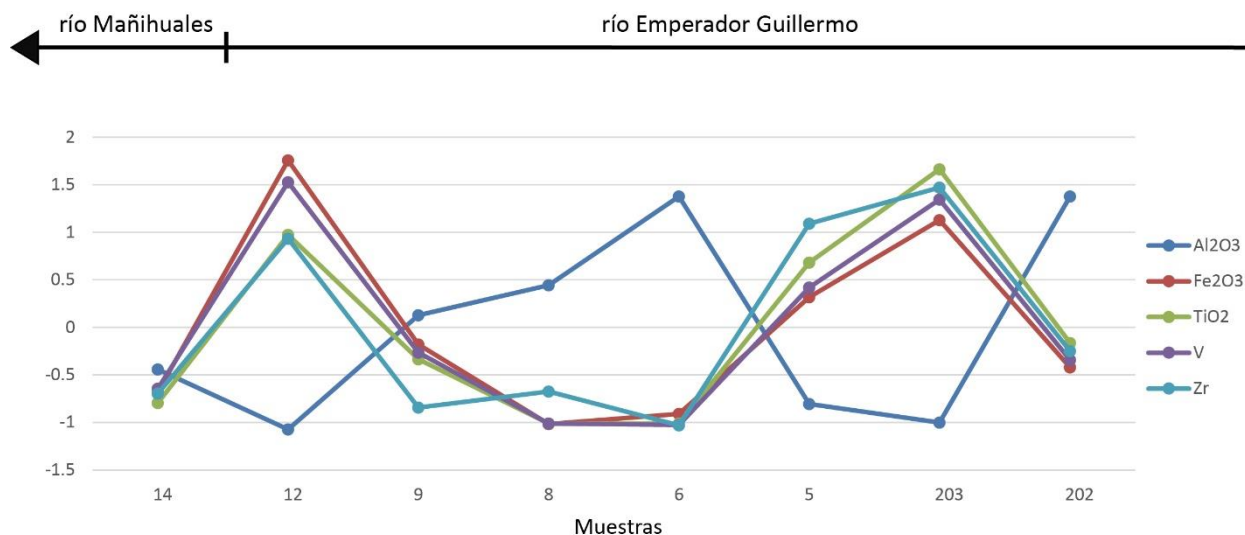


Figura 5.8. Diagrama estandarizado para las muestras del río Emperador Guillermo.

La muestra 6, se extrajo posterior a que un afluente del río Emperador Guillermo proveniente desde el sur, confluyera con este. En esta muestra, se observa un aumento (en relación a las muestras previas a ese afluente) en la concentración de P_2O_5 (FE 1.34), C total (FE 2.09), Cu (FE 1.46). Este afluente nace en las cercanías de la unidad Katterfeld, caracterizada por lutitas negras, que podrían explicar las concentraciones de estos elementos (Salminen *et al.*, 2005). De esta manera podrían asociarse las concentraciones de P_2O_5 principalmente a un origen litológico.

Al seguir el curso del río principal, un nuevo tributario confluye desde el sur. La muestra 10, obtenida en este tributario, presentó altos valores para algunos metales: Pb (FE 2.8), Cu (FE 1.38), Zn (FE 1.11), Ag (FE 2.21). Aguas arriba de la muestra obtenida de este afluente, existe una manifestación de alteración conocida como “Vetas río Malito” (Ver Marco geológico*) correspondiente a vetas alojadas en lavas andesíticas, de donde se extrae Zn, Pb, Cu, Ag.

Otro aspecto importante en esta zona corresponde a la información entregada por la muestra 7, que fue obtenida de una terraza fluvial (y que por lo tanto podría representar un background de la zona, según lo descrito en metodologías). En ella, las concentraciones de Cu, As, Cd y Pb son incluso mayores a las obtenidas de muestras activas en el mismo lugar, mostrando razones de concentración terraza(ppm)/activo(ppm) iguales a As: 17,2/13,9, Cu: 22,5/12, Cd: 0,2/0,1 y Pb: 23,4/16.6. Lo anterior, parece evidenciar un posible origen natural, para las concentraciones metálicas obtenidas en este río.

5.2.5 Río Ñirehuao

Las primeras muestras de este río (28, 29, 30, 31, 32, 79 y 47, sin tomar en cuenta la 33) ilustran un patrón en zig-zag (Figura 5.9), donde aquellas que poseen peaks positivos para los elementos Fe_2O_3 , TiO_2 , Cr, Co, Hf, Sc, Zr, MnO, V, Nb, Ta, Ni muestran peaks negativos para Al_2O_3 y SiO_2 (y en menor grado K_2O , Rb, Ba, Sr). Así mismo, las muestras con mayores contenidos de Al y Si poseen menores cantidades de Fe_2O_3 , TiO_2 , Cr, Co, Hf, Sc, Zr, MnO, V, Nb, Ta, Ni. En este sector, el río es de carácter muy meándrico, por lo que este patrón podría deberse a efectos hidrodinámicos, donde los elementos pesados depositan en condiciones de mayor energía de arrastre, y los livianos en los lugares de menor energía, tal como se describió anteriormente.

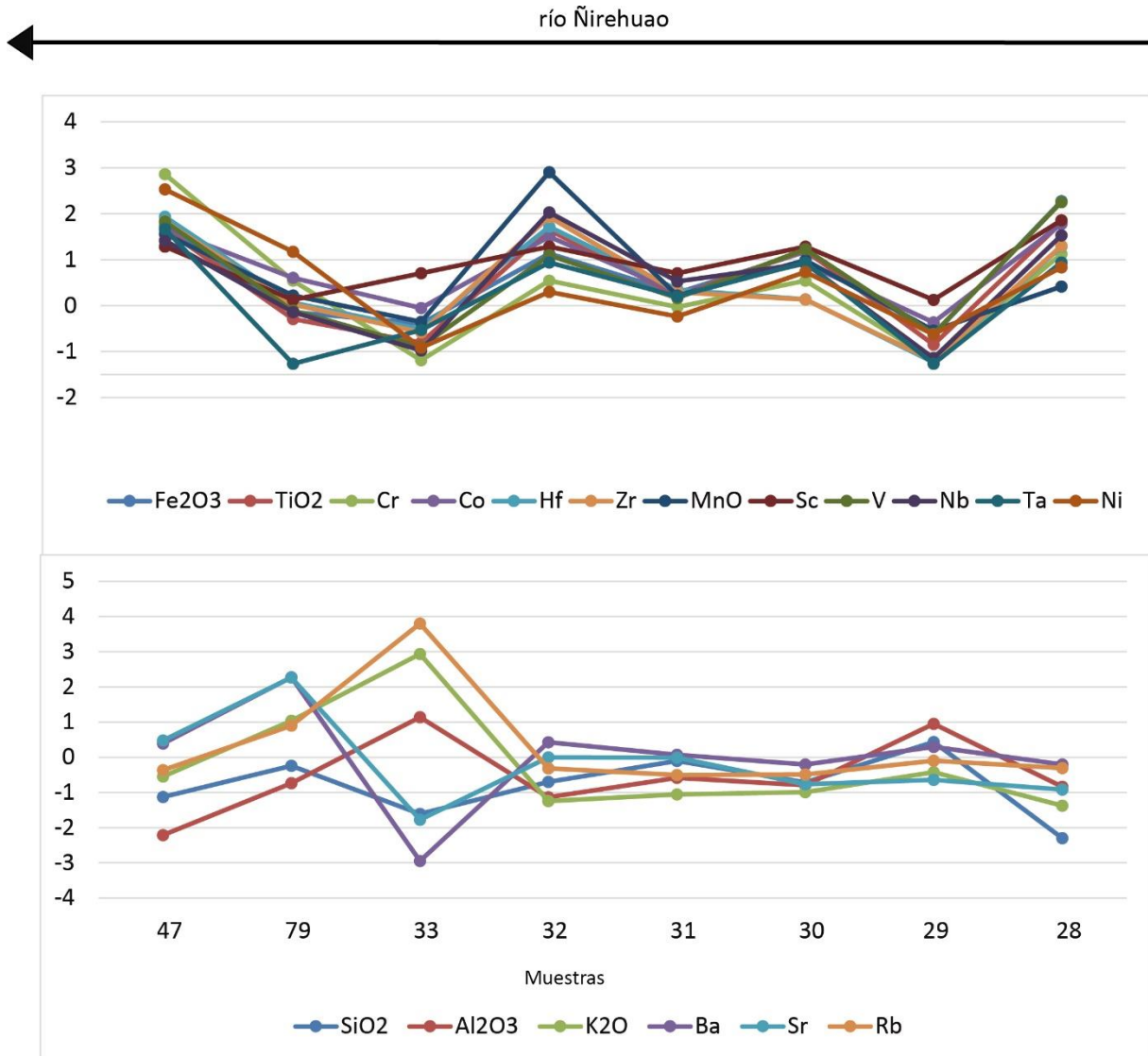


Figura 5.9. Diagrama estandarizado para las muestras del río Ñirehuao.

Es importante mencionar que la muestra 30 posee concentraciones mayores al resto del río, en algunos metales de interés económico: Cu (FE 1.33), Sb (FE 1.6), Au (10.36). No existe registro de alteración en las cercanías a este lugar, por lo que esta muestra podría estar reflejando alguna zona de alteración no estudiada.

La muestra número 33 presenta un comportamiento totalmente diferente al descrito previamente en el río Ñirehuao, con concentraciones mayores de Rb, Cs, Ga, Al₂O₃, K₂O, B, MgO, Th, HREE, Pb, y menores de C total, Ba, Na₂O, CaO, P₂O₅, MnO, Cr, Ni, Sr, V, Zr, LREE, Mo y Cd (Figura 5.9). Esta muestra se ubica exactamente en el lugar donde el río cambia su dirección en 90°, posterior a chocar con el límite de la cuenca (y de territorio nacional). En terreno se describieron diversas litologías en los clastos asociadas al lugar de muestreo, que incluyen areniscas, areniscas calcáreas, granitoides e incluso distintas lavas como andesitas y basaltos. Esta señal química difusa y variada puede deberse a que corresponde a un lugar donde “convergen” las distintas litologías de la zona, previo a cambiar el rumbo del río.

Posterior a ello, existe un tributario proveniente del sur y que pasa por la localidad de Ñirehuao. En este se encontraron altas concentraciones de B (FE 3.19) en la muestra 120, obtenida al costado de la localidad de Ñirehuao, por lo que se podrían asociar estas concentraciones a un posible origen antrópico, al igual como se describió para Coyhaique.

Finalmente, existen 2 afluentes que vienen del norte de la cuenca y que fueron muestreados previo a la confluencia con el río Ñirehuao (muestras 77 y 122). Las muestras entregaron altas concentraciones de Hg (FE hasta 4.07), S total (FE hasta 1.63), Pb (FE hasta 1.37), Cu (FE hasta 1.1), B (FE hasta 1.85). Posiblemente estas concentraciones se deban a la presencia de la zona de alteración El Toqui en las cercanías de donde nacen estos afluentes, de esta manera pueden estar representando la química asociada a esa zona de alteración.

5.2.6 Río Toqui

De los Mapas Geoquímicos Univariantes (Anexo B.4), se desprende que este río presenta muy altas concentraciones (las más altas de la cuenca del río Aysén) en los elementos As, Au, Bi, Cd, Cu, Pb, Ag, Zn, Sb, Tl. Además posee concentraciones que destacan con respecto a la cuenca de Se, S total, MnO, Co y Hg. Esto se ilustra de mejor manera en la Tabla 5.1, donde se presentan los valores medios de la cuenca y los Factores de Enriquecimiento en las muestras del río Toqui.

Tabla 5.1. Promedios de concentración de algunos elementos químicos obtenidos en la cuenca y el Factor de Enriquecimiento obtenido a partir de las muestras extraídas del río Toqui.

Elemento	Media Cuenca río Aysén	Factor Enriquecimiento río Toqui
S total	0.03	6.43
Mo ppm	0.80	1.85
Cu ppm	17.45	3.23
Pb ppm	14.00	8.15
Zn ppm	84.77	11.66
Ni ppm	12.99	0.60
As ppm	7.01	43.51
Cd ppm	0.18	22.40
Sb ppm	0.21	4.84
Bi ppm	0.28	17.89
Ag ppm	0.06	10.44
Au ppb	1.63	37.41
Hg ppm	0.01	2.67
Tl ppm	0.07	0.89
Se ppm	0.29	1.74
Te ppm	0.10	3.14
B ppm	11.01	2.43

Como se mencionó en el marco geológico, en este lugar existen distintas unidades geológicas, dentro de las cuales se encuentra la formación Toqui. Alojada en las calizas de esta formación existe una mineralización polimetálica de Zn-Au-Cu-Pb-Ag. Los minerales de mena asociados corresponden a esfalerita, galena, calcopirita, pirrotina, arsenopirita, tetraedrita, oro y bismuto nativo.

Del diagrama de la Figura 5.10, donde se exponen las concentraciones estandarizadas para los metales Mo, Pb, Cu, Zn, As, Cd y Sb se observa que existe un peak positivo en la muestra 197, donde aumentan de golpe las concentraciones de estos elementos, posterior a este peak, comienzan a disminuir paulatinamente.

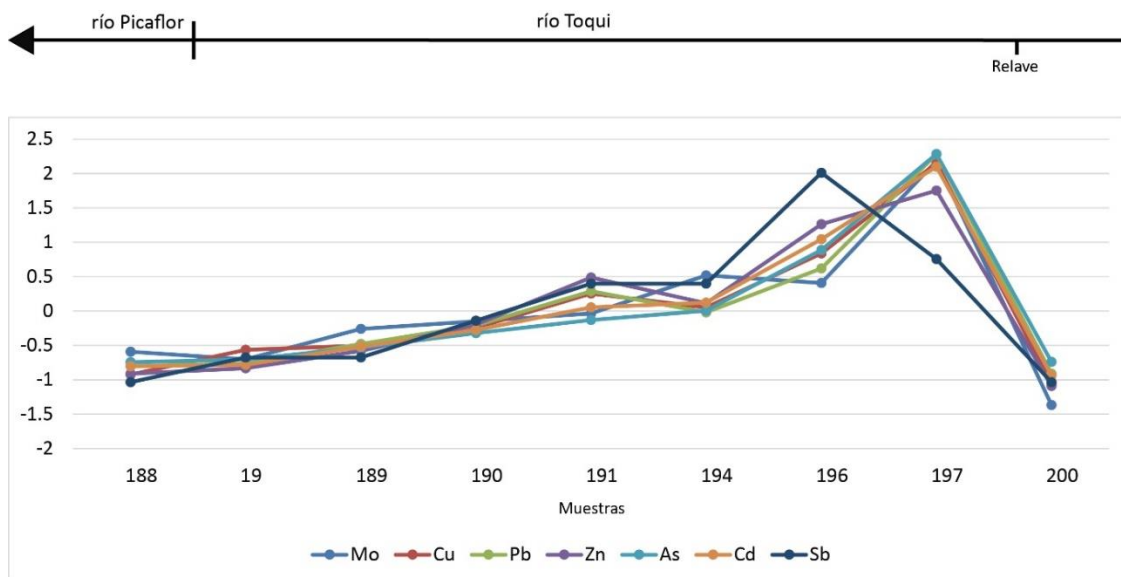


Figura 5.10. Diagrama de variación geográfica estandarizado para los metales Mo, Cu, Pb, Zn, As, Cd y Sb en las muestras del río Toqui.

El patrón de concentración que generan las muestras activas a lo largo del río, se asemeja al patrón de dilución mostrado por Fletcher (1997) (Figura 5.11), donde se expone como varían las concentraciones cuando existe una fuente puntual de uno o más elementos. En la figura 26 se ilustra un punto de corte (que corresponde a un peak positivo mostrado posterior a la fuente puntual), y luego una curva de dilución que evidencia la disminución de las concentraciones hasta alcanzar su nivel natural.

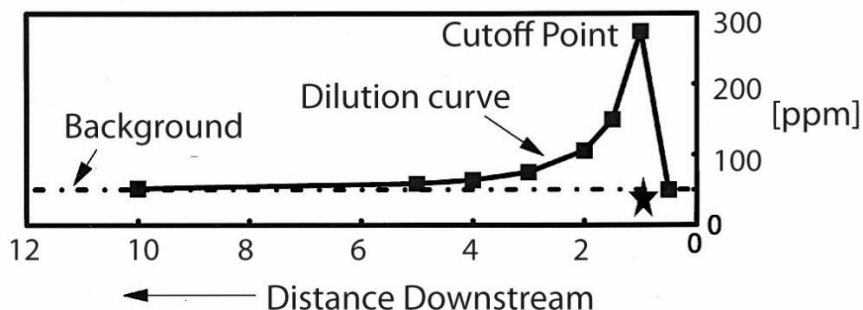


Figura 5.11. Patrón de dilución asociado a una fuente puntual de anomalía, obtenido de Fletcher (1997).

A modo de ejemplo se ilustra en la Figura 5.12, el diagrama de variación geográfica del Arsénico (As) en el río Toqui (para los demás elementos, los diagramas se presentan en Anexo B.6).

La primera muestra, entregó una concentración de As de 34,7 ppm, luego, en la segunda muestra de este diagrama se obtuvo una concentración de 1171,5 ppm de As representando un peak positivo. Desde la tercera muestra en adelante, las concentraciones disminuyen hasta alcanzar 32 ppm al confluir con el río Picaflor. Las terrazas fluviales obtenidas del lugar, entregaron concentraciones de 73,1 ppm, 24,4 ppm y 40,4 ppm (cuadrados verdes en la Figura 5.12). Al comparar este diagrama con el propuesto por Fletcher 1997, se sugiere que la presencia de un relave (ubicado previo a la muestra que entregó el peak positivo) podría estar representando la fuente puntual. Por otro lado, si se asume que las terrazas representan un background del lugar (como se mencionó anteriormente), la concentración natural de As en el lugar iría desde 20 hasta 70 ppm. Esto es consistente si se considera la muestra previa a la supuesta fuente de la anomalía, que entregó 34,7 ppm de As, que podrían estar reflejando, justo a las terrazas, el nivel natural de As en el lugar.

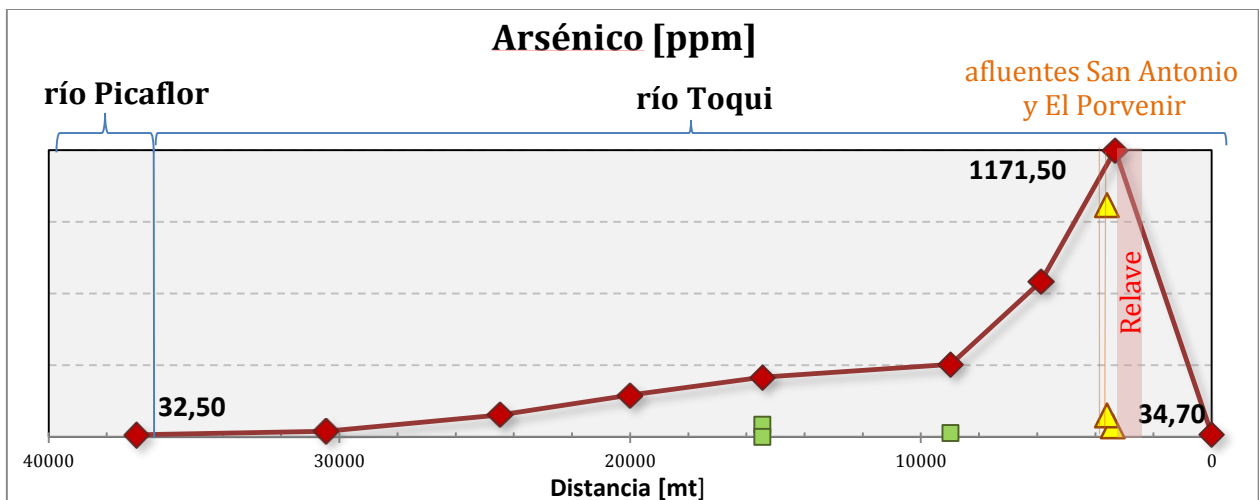


Figura 5.12. Diagrama de variación geográfica en las muestras del río Toqui. Cuadrados verdes representan muestras de terrazas fluviales y triángulos amarillos representan muestras de afluentes.

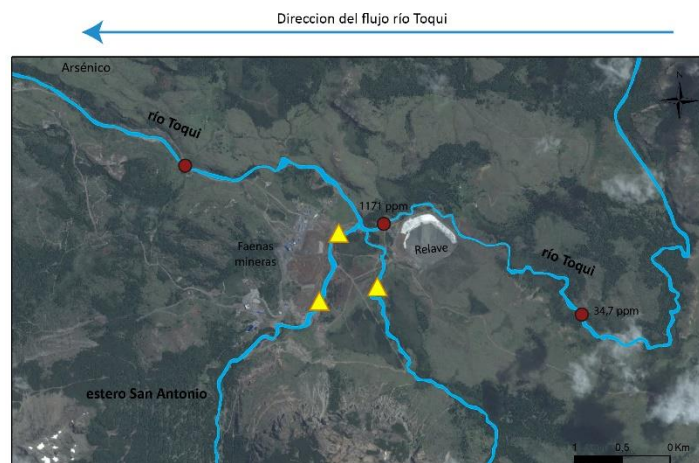


Figura 5.13. Imagen en planta de la minera El Toqui.

Se podría pensar que la fuente de anomalía corresponde a la zona de mineralización, siendo así, una fuente de origen natural. Esto último parece poco probable, ya que en ese caso las muestras obtenidas en terrazas fluviales, también debiesen entregar estos peaks positivos, y como se observa en la Figura 5.12, no es el caso.

Tomando en cuenta los Factores de Enriquecimiento entregados en la Tabla 5.1, se observa que estos metales poseen concentraciones mucho mayores al promedio de la cuenca (en varios ordenes de magnitud en algunos casos), de esta manera, probablemente exista un efecto de enmascaramiento en los Mapas Geoquímicos Univariados de la cuenca, es decir, las altas concentraciones de los metales descritos en el río Toqui pueden estar impidiendo visualizar de manera correcta las concentraciones o posibles anomalías de menor escala en la cuenca. Para ello, se re generaron los Mapas Geoquímicos Univariados, sin considerar las muestras del Toqui (ni las influenciadas por el) y se obtuvo que efectivamente había un enmascaramiento (Anexo B.4).

5.2.7 Río Picaflor - río Mañihuales

Este río, que drena en dirección norte-sur, recibe el nombre de Picaflor hasta la localidad de Mañihuales donde al confluir con el río Ñirehuao cambia su nombre a río Mañihuales. Parte con una señal caracterizada por concentraciones altas (en relación a la cuenca) de Nb, U, REE (-Eu), K₂O, Na₂O, SiO₂, moderadas de MnO, Hf, Th, Zr y bajas de Ga, Fe₂O₃, MgO, Bi, Al₂O₃, Mo. El Eu está en muy bajas concentraciones con respecto a las demás REE, al observar el diagrama normalizado al condrito (Figura 5.14), se desprende una importante anomalía negativa de Eu, característico de rocas con composiciones félsicas (Salminen et al., 2005). Esto es consistente también con lo entregado por el diagrama TAS, donde las muestras son clasifican como andesitas y dacitas (Anexo B.2).

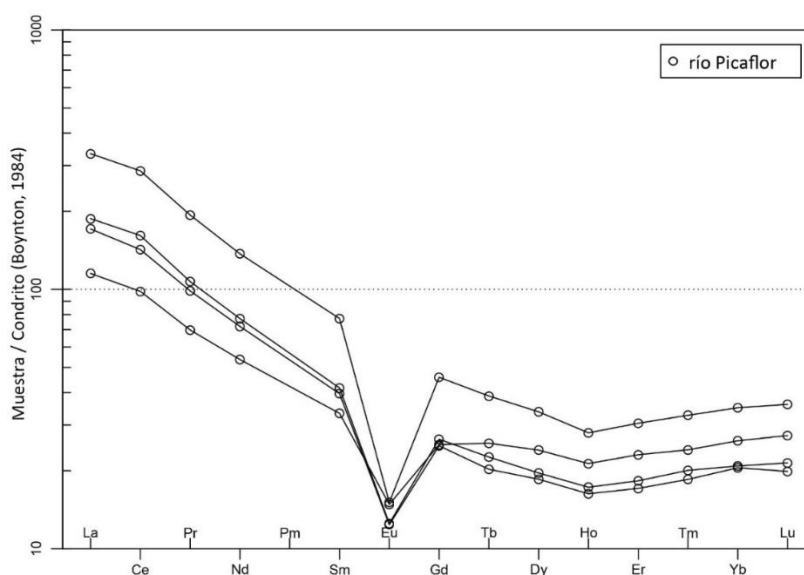


Figura 5.14. Diagrama spider normalizado al condrito (Boynton 1984) para las muestras del río Picaflor.

La señal geoquímica del río descrita cambia aguas abajo de la confluencia con el río Toqui. Este cambio se visualiza de mejor manera en el diagrama estandarizado (Figura 5.15) donde se observa un importante aumento en las concentraciones de Au, Cd, Zn, Sb, Ag, As, Pb, Cs, S total, Bi posterior a la confluencia con el río Toqui (entre la muestra 17 y 188). Es probable que el aumento de concentración de metales descritos se debe a la presencia de la minera El Toqui.

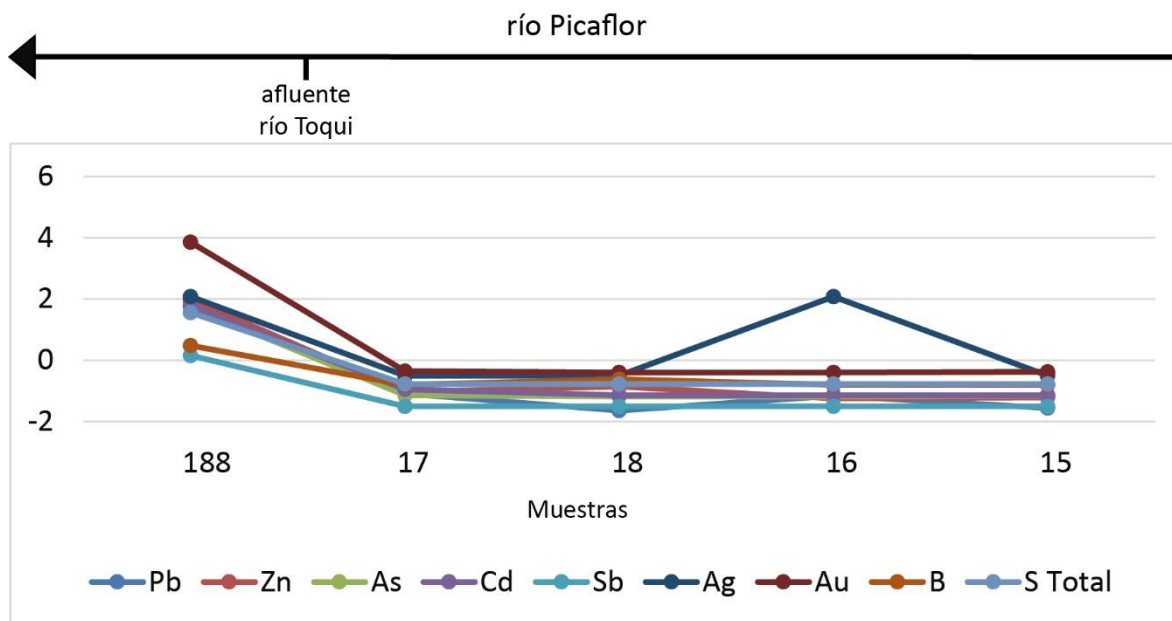


Figura 5.15. Diagrama estandarizado para las muestras del río Picaflor.

Posterior a esto, la señal geoquímica del río se mantiene relativamente constante, y los metales mencionados vuelven a las concentraciones previas a la confluencia del río Toqui, posiblemente por el efecto de dilución ya descrito (Fletcher, 1997). La señal del río no se ve mayormente afectada por los afluentes que provienen del oeste, caracterizados por altas concentraciones (en relación al río Mañihuales) de Ga, Fe₂O₃, Zr, Hf, REE (+Eu), Sc, CaO, MgO, Cr, Ni y bajas de K₂O, SiO₂, Al₂O₃, Rb, Ba, Cs (signatura característica de una fuente más básica (Ortiz & Roser, 2006; Ohta *et al.*, 2006; Sensarma *et al.*, 2007; Dinelli *et al.*, 2005)), ni por los del este, que posee altas concentraciones (en relación al río Mañihuales) de K₂O, Ba, Cs, Rb.

Existe una muestra (número 68) obtenida de un tributario proveniente del este, que posee concentraciones que destacan de S total (FE 1.86), Pb (FE 3.94), Zn (FE 2.33), Cd (FE 3.33), Sb (3.19), Ag (FE 5.54), Se (FE 2.32), B (FE 1.68), Cs (FE 1.54), Cu (FE 1.26), TI (FE 1.38). Relativamente cerca del lugar de donde se adquirió esta muestra existe una zona de alteración conocida como Cerro Colorado, donde se describe una silicificación y mineralización de sulfuros en vetas alojadas en la formación Divisadero. Esta zona de alteración, aguas arriba de donde se obtuvo la muestra, podría ser la responsable de las concentraciones descritas.

5.3 Zona oeste

5.3.1 Río Pangal - río Los Palos

Al estudiar los Mapas Geoquímicos Univariados (Anexo B.4), se observa que las muestras de este río entregan, en relación a toda la cuenca estudiada, altos valores de Sc, CaO, Cr, Ni, Co, Fe₂O₃, MgO, Ga, Sr y bajas concentraciones de SiO₂, Rb, K₂O, Ba. Esta señal química es característica de fuentes de sedimento de composición básica (Ortiz & Roser, 2006; Ohta *et al.*, 2006; Sensarma *et al.*, 2007; Dinelli *et al.*, 2005). Existen muestras con pequeñas variaciones en algunos elementos que se describirán más adelante.

En el diagrama estandarizado (Figura 5.16), se observan dos grupos de elementos con comportamientos opuestos para este río. El primer grupo está caracterizado por los elementos: Th, U, V, Zr, REE (sin Eu), Fe₂O₃, TiO₂, MnO, Hf, Nb, Ta, MgO, Cr, Sc, Co, Ga mientras que el segundo por: Cs, Rb, Ba, K₂O, Sr, Na₂O, Al₂O₃, SiO₂.

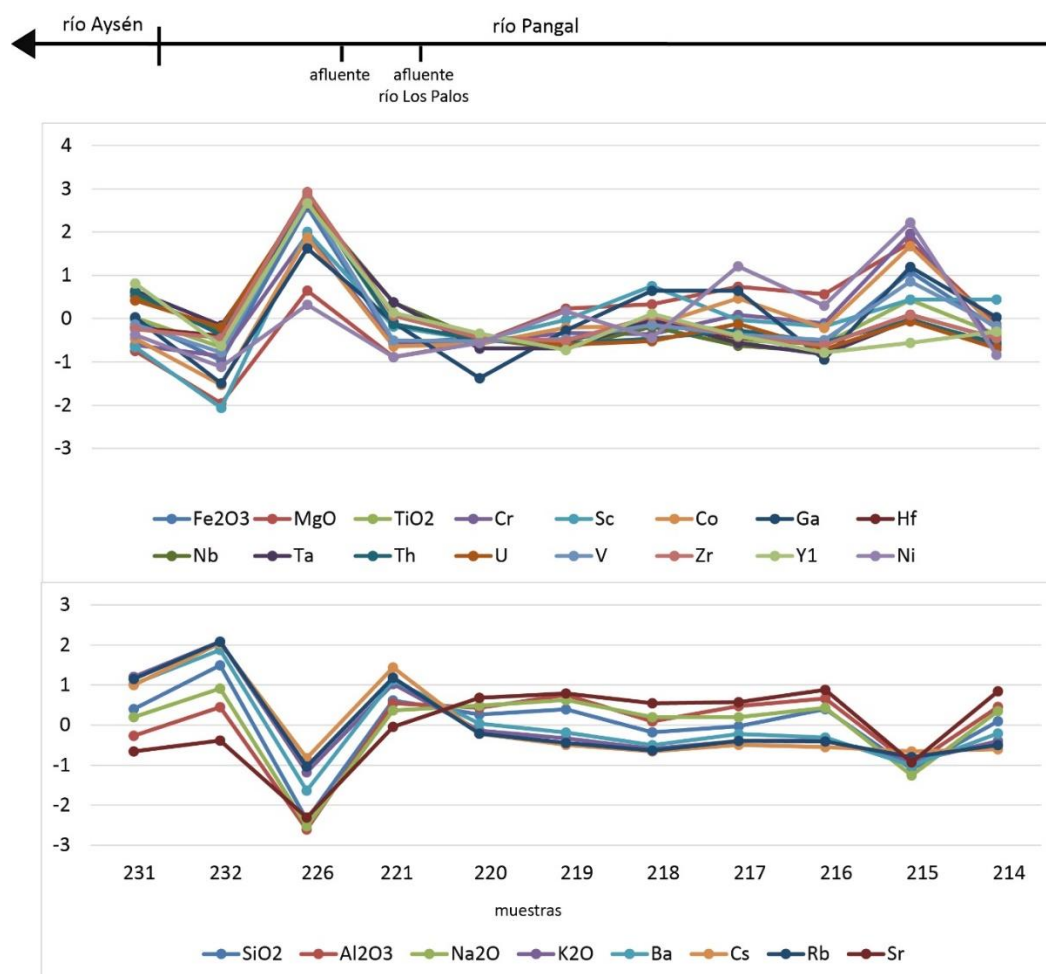


Figura 5.16. Diagrama de variación geográfica estandarizado para las muestras del río Pangal.

En la muestra 215, posterior a un pequeño afluyente que proviene desde el oeste, se observó que las concentraciones descritas se acentúan, entregando aún más altas concentraciones de Fe₂O₃, MgO, TiO₂, MnO, Cr, Co, Ga, V, U, Ta, Th, Zr, Ni y más bajas de SiO₂, Al₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O, Ba, Sr.

En esta muestra, se obtiene que las concentraciones de Cr y Ni son muy altas en relación a las de Zr, que a pesar de generar un peak positivo, este es moderado en relación al generado por el Cr y Ni. Lo anterior permite sugerir que las concentraciones obtenidas en esta muestra son debido a un efecto litológico (es decir una fuente máfica como se mencionó anteriormente), más que uno hidrodinámico. Esto es consistente con la mineralogía obtenida en este lugar, donde se encontró cromita (mineral asociado a rocas máficas o ultramáficas).

Ocurre lo contrario en la muestra 218 que presenta un peak negativo para Cr, Ni y Co y positivo para Zr, Sc, TiO₂, Ta, Fe₂O₃, Ga. Considerando los relativamente bajos (en relación al resto del río) contenidos de Ni y Cr versus las altas concentraciones de Zr en esta muestra, es probable que haya un efecto hidrodinámico afectando las concentraciones.

Un tributario del río Pangal, corresponde al río Los Palos. La muestra 223, se obtuvo del río Los palos, previa a la confluencia con el río pangal, y destaca por sus relativamente altas concentraciones de C total, Al₂O₃, CaO, P₂O₅, Na₂O, Ga, Sr, Eu, Hg.

Posterior a la confluencia con el río Los Palos, el Pangal recibe las aguas de otro tributario proveniente del oeste. Este afluente posee una señal geoquímica muy parecida a la del río Pangal, y destaca por tener aún mayores concentraciones de MgO, CaO y Sc.

En la muestra 226 del río Pangal, previo a confluir con el río Aysén, se observa un peak positivo muy notorio en los elementos del grupo 1. Este parece sugerir una fuente máfica para los sedimentos de esta muestra, sin embargo, se debe tener en cuenta que el contenido de Zr es muy alto en relación al de Ni. De esta manera, no se puede descartar la influencia del factor hidrodinámico en la muestra (como se explicó anteriormente).

Según el diagrama TAS, las muestras del río Pangal clasifican como gabros (al igual que las muestras de sus tributarios). Las únicas excepciones corresponden a una muestra posterior a la convergencia del río Los Palos, que clasificó como diorita y la última muestra del río Pangal, que se ubica prácticamente en el río Aysén, y que parece estar más influenciada por la química del río Aysén que la del pangal, que fue clasificada como granodiorita en el diagrama TAS (Anexo B.2).

Para corroborar que las muestras de este río están reflejando la química de una fuente de composición básica, se puede utilizar el Índice de Basicidad. En el mapa de la Figura 5.17 se presentan los Índices obtenidos para las muestras de la cuenca. Si se consideran los valores entregados por Taylor (1965), donde se define BI=0,15 para andesitas; BI=0,22 para LSA (andesitas con bajo contenido de sílice) y BI=0,31 para basaltos, los círculos negros de la Figura 5.17, estarían representando aquellas muestras con un BI>0,31 y por ende con una signatura similar a la de un basalto, según los valores entregados por Taylor (1965). De esta manera, se desprende que la química de los sedimentos de los ríos Pangal y Los Palos se asemeja a la de un basalto.

Índice Basicidad

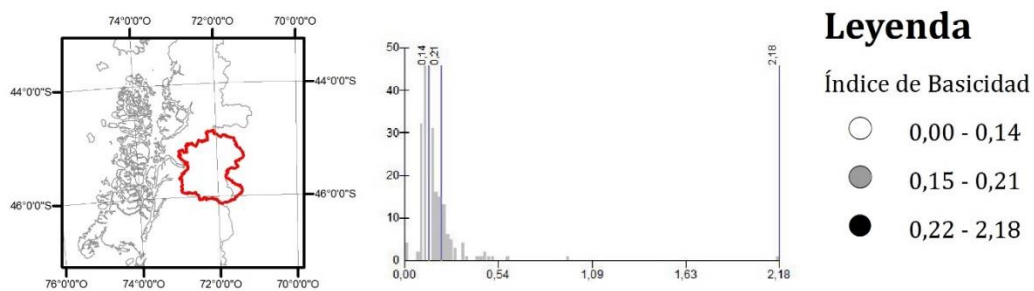
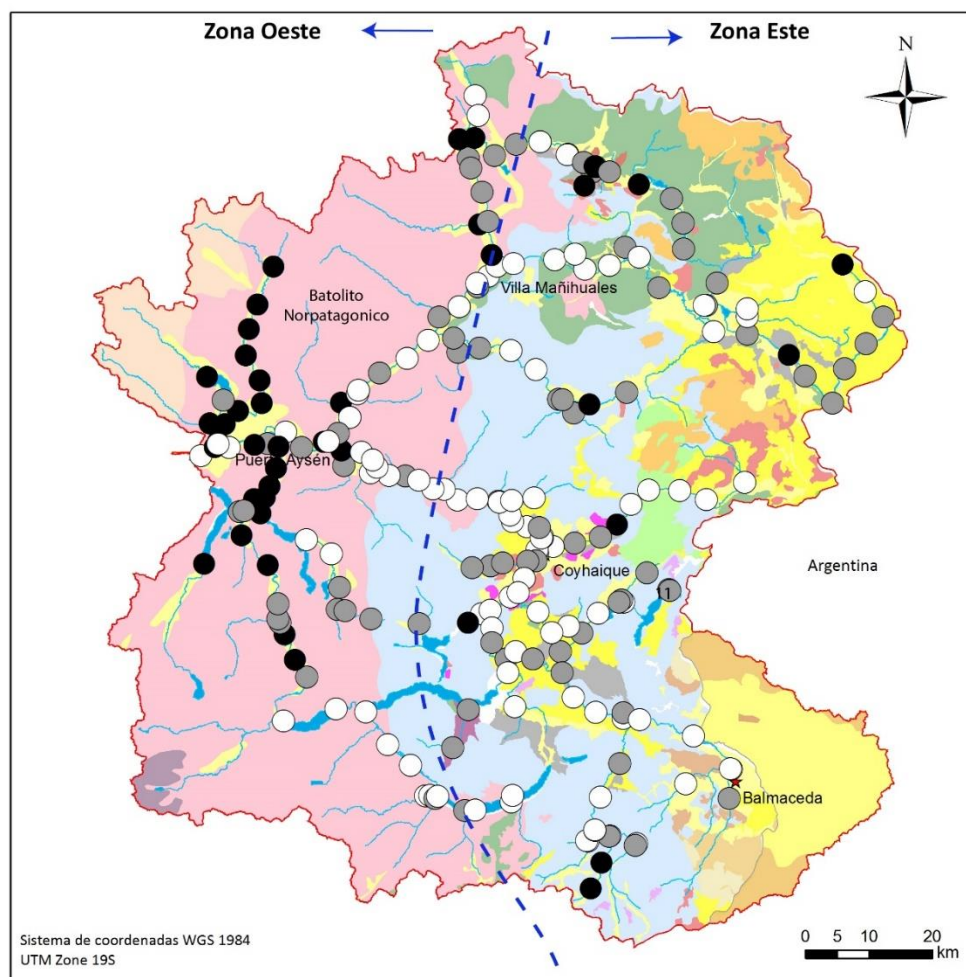


Figura 5.17. Índice de Basicidad en las muestras de sedimento fluvial de la cuenca del río Aysén.

Otra manera de evaluar la composición de la fuente, es estudiando el grado de diferenciación, con respecto a UCC (*Upper Continental Crust*) (McLennan, 2001). En este tipo de diagrama, se plotean las concentraciones de distintos elementos normalizados según los valores promedios de la corteza continental superior, entregados en Taylor 1985. De esta manera se puede ver el grado de diferenciación de la fuente de las muestras obtenidas (Figura 5.18).

En relación a UCC se observan peaks negativos de K₂O, Rb, Ba, y positivos de CaO, MgO, Sc, Y, Fe₂O₃, TiO₂, Cr, V. Esto refleja que las muestras están enriquecidas en elementos asociados a rocas básicas, en relación al UCC. Además, se desprende que el diagrama presenta una señal en zig zag, reconocido como típico de sedimentos con proveniencia máfica (Barry Roser, Comunicación Personal 2015)

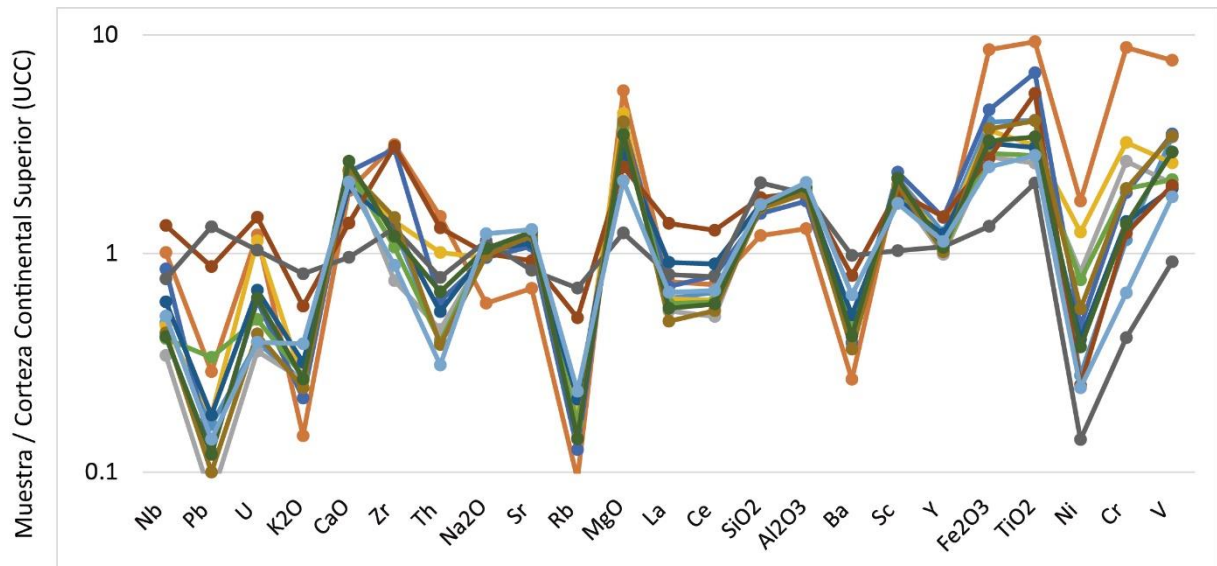


Figura 5.18. Diagrama normalizado a la corteza continental superior según los valores publicados en Taylor (1985).

Los altos contenidos de Cr y Ni se pueden asociar a la presencia de rocas ultramáficas. (Dinelli *et al.*, 2005). En efecto, según Wells (1979), existe un cuerpo peridotítico ubicado en el fiordo Aysén, cercano al río descrito.

Por otro lado, razones Cr/Ni entre 1,3 y 1,5 es diagnóstico de un fuente de rocas ultramáficas (Garver *et al.*, 1996). Sin embargo, en el río Pangal las razones Cr/Ni son mayores a 2,0. Estas altas razones pueden explicarse debido al fraccionamiento de cromo detrítico en el ciclo sedimentario, donde la cromita es concentrada preferencialmente (Garver *et al.*, 1996).

5.3.2 Río La Paloma- río Blanco

El río La paloma nace en el sur de la cuenca, siendo regulado por algunos lagos en su camino. Posterior a desaguar en el lago Caro, cambia su nombre a río Blanco. En este punto se generan importantes diferencias en la señal geoquímica que se describen más adelante.

De los Mapas Geoquímicos Univariados (Anexo B.4) se desprende que este río está caracterizada por altas concentraciones, en relación a la cuenca, de Al₂O₃, Na₂O, HREE (+Eu), K₂O, Ba, Pb y moderadas de LREE y SiO₂. En general este río drena sobre el Batolito Norpatagónico, caracterizado en esta zona por granodioritas de anfíbola y biotita. También en su extremo sur drena por la Formación Ibáñez. La señal de este río es bastante homogénea, como se observa en el diagrama estandarizado de la Figura 5.19, sin presentar importantes peaks.

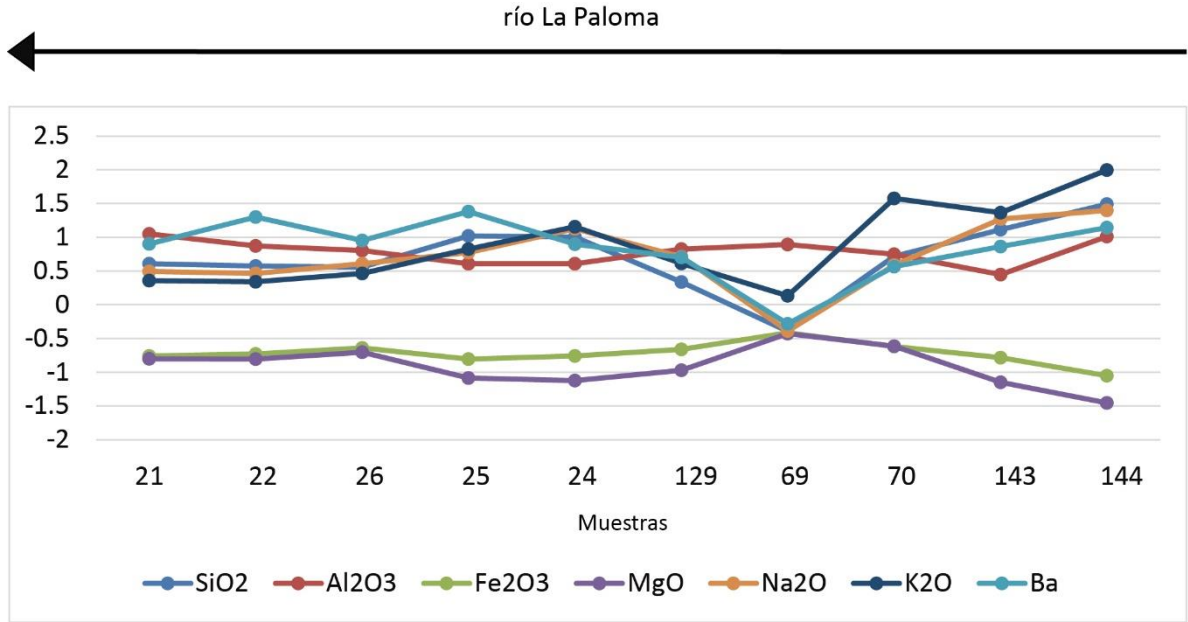


Figura 5.19. Diagrama estandarizado para las muestras del río La Paloma.

Existe una muestra (número 143) con contenidos considerables de S total (FE 1.16), Pb (FE 1.88), Cd (FE 2.31), Cu (FE 3.19), Ag (FE 2.21), Zn (FE 1.28) y Mo (FE 2.52). Esta se obtuvo precisamente donde se ubica una manifestación de alteración correspondiente a vetas de Cu-Mo alojadas en granitos y granodioritas, conocido como “Manifestación lago La Paloma” que podría explicar las concentraciones de estos elementos (Ver Marco geológico*).

Posterior al lago Caro, comienza el río Blanco, sin embargo la señal geoquímica de las primeras 5 muestras entrega una transición entre la señal de ambos ríos. Con contenidos/concentraciones intermedias entre ambos ríos. En estas muestras se observan dos grupos de elementos con comportamientos opuestos Grupo 1: Cr, TiO₂, F₂O₃, MnO versus grupo 2: SiO₂, K₂O, Na₂O, Al₂O₃ (Figura 5.20). Esto refleja la influencia de condiciones hidrodinámicas en este sector, como ya se explicó anteriormente.

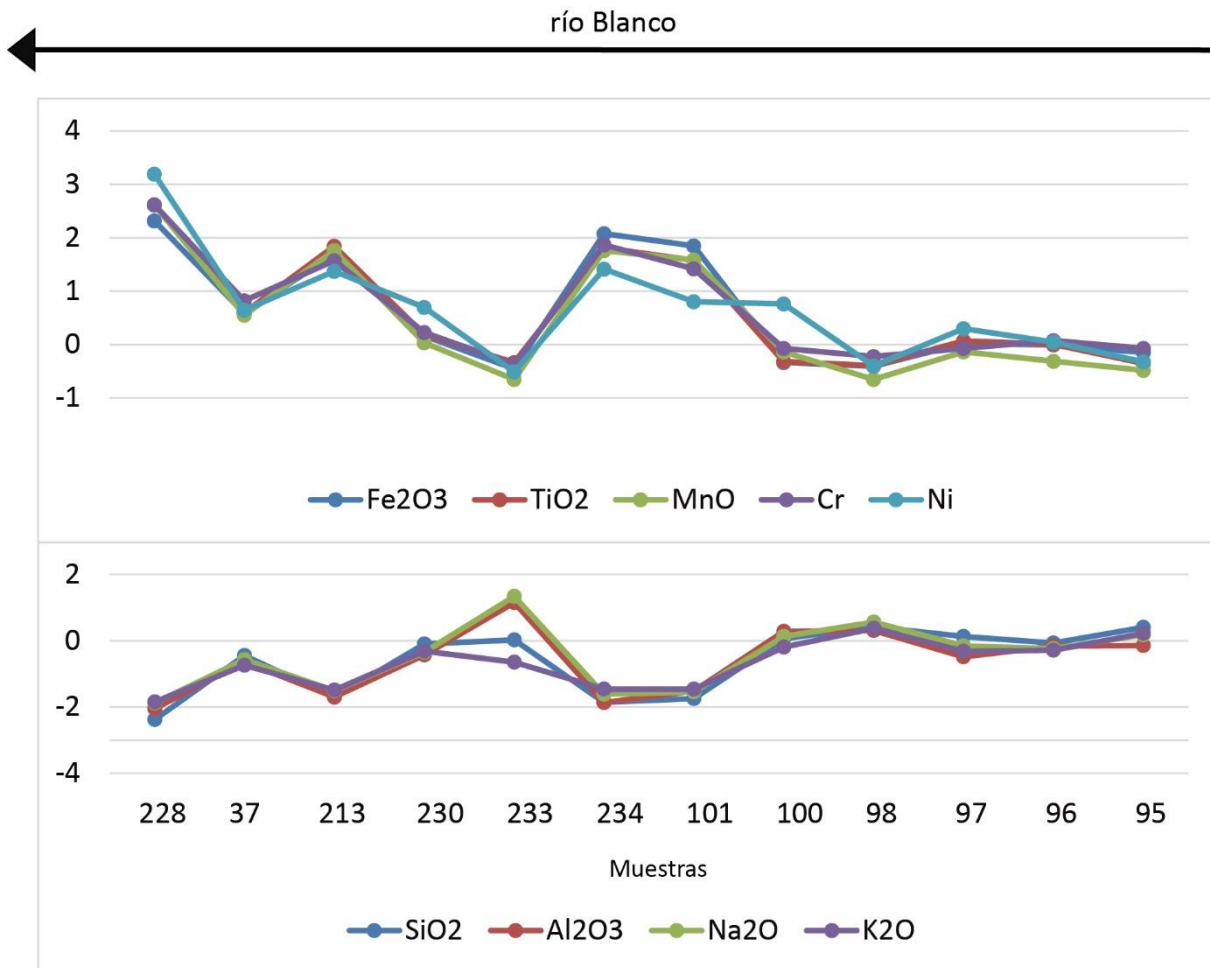


Figura 5.20. Diagrama estandarizado para las primeras muestras (de "transición") del río Blanco.

Luego de estas "muestras de transición", el río Blanco presenta contenidos elevados de P_2O_5 , Sn, REE, Cr, Ni, Fe_2O_3 , MgO, Sc, CaO, Ga, Co y bajos de SiO_2 , Rb y Ba.

La señal química de este río es muy similar al río Pangal descrito anteriormente. Se diferencian principalmente en el contenido de REE, P_2O_5 , K_2O (levemente mayores en el río Blanco) y en el contenido de CaO y MgO (ligeramente mayores en el río Pangal).

Se observan dos grupos con comportamientos opuestos, Grupo1: Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 , MnO, Cr, Sc, Co, Ga, Hf, Nb, Ta, V, Zr, REE (sin Eu) y Ni versus Grupo 2: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, Na_2O , K_2O , Ba y Sr (Figura 5.21). Es interesante notar que las muestras 233 y 37 poseen menos Ni que las demás, por lo que se podría pensar que estas muestras están influenciadas en algún grado por factores hidrodinámicos (al igual que algunas muestras del río Pangal, como se discutió anteriormente). Las demás muestras presentan contenidos químicos característicos de rocas de composición básicas (Ortiz & Roser, 2006; Ohta *et al.*, 2006; Sensarma *et al.*, 2007; Dinelli *et al.*, 2005).

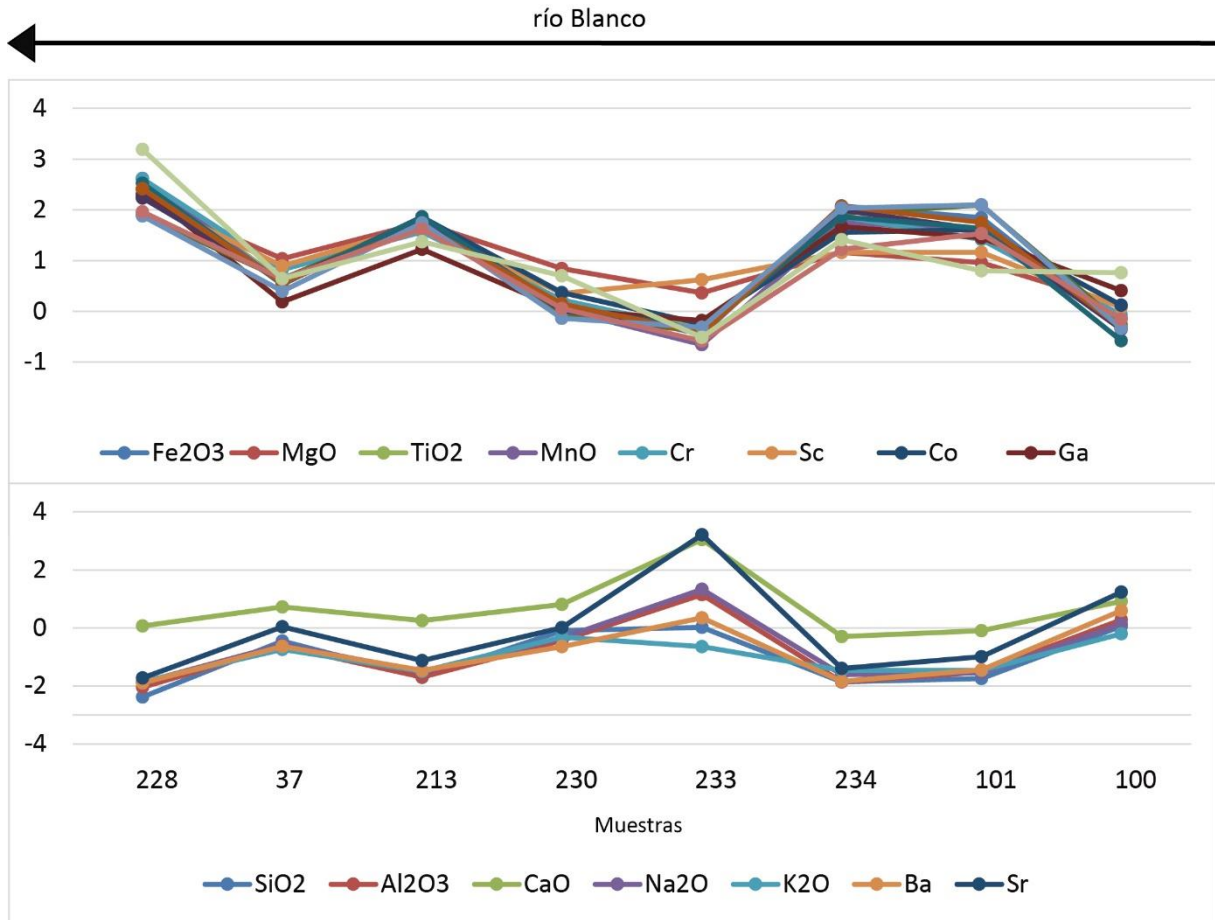


Figura 5.21. Diagrama estandarizado para las muestras del río Blanco.

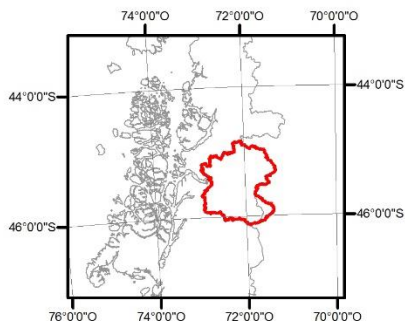
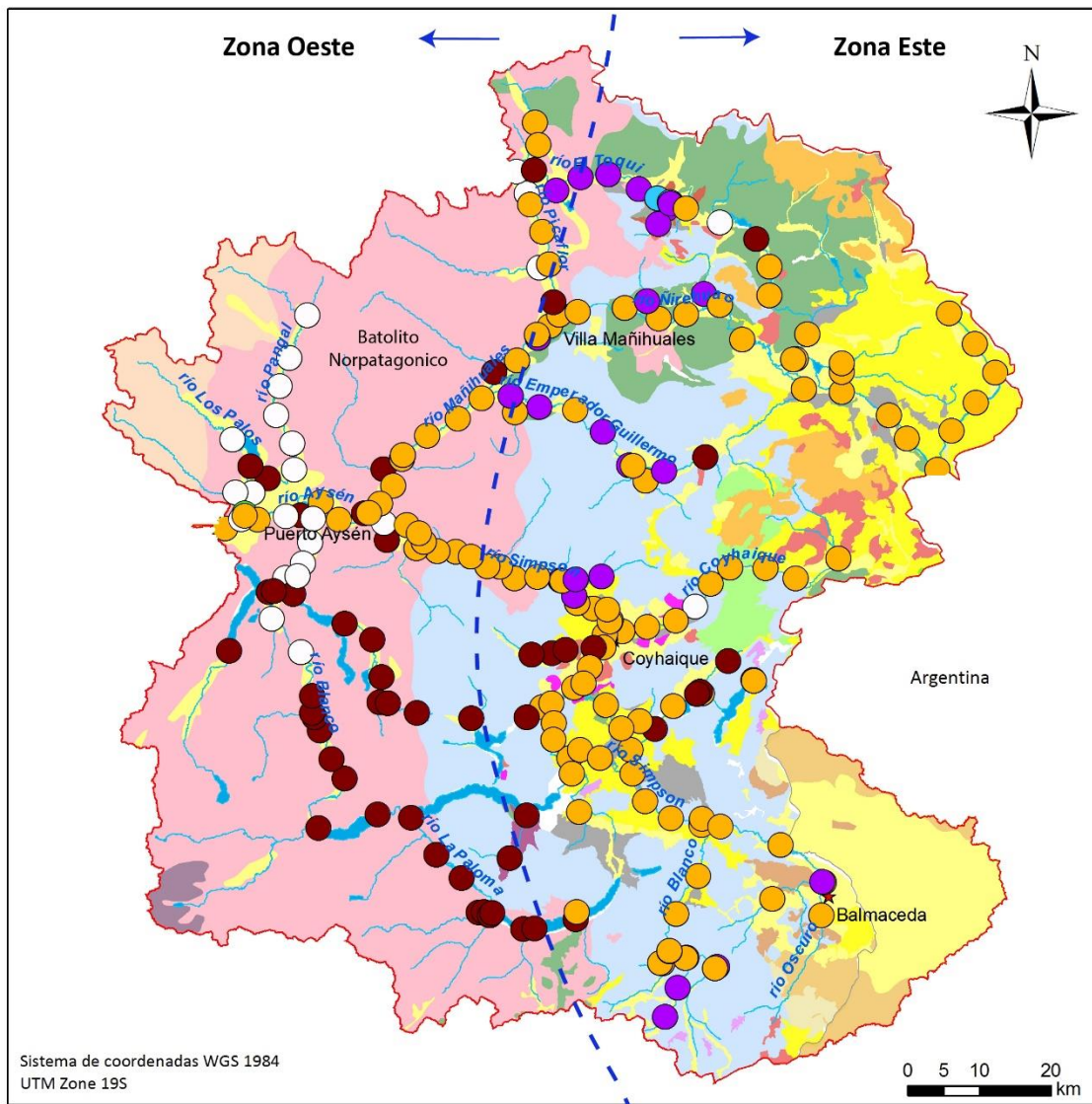
La muestra 228 obtenida en el río Blanco, previo a confluir con el río Aysén presentó una mineralogía donde destacan minerales que no se encontraron en otro lado de la cuenca como fluoroedenita, una anfíbola de flúor que se asocia a lavas alteradas (posiblemente cristaliza a partir de fluidos hidrotermales de fase tardía) y niimita, que corresponde a una clorita rica en Ni, asociada a serpentinitas, y formada en rocas ultramáficas alteradas por circulación de fluidos hidrotermales (Waal, 1970). Estos minerales son consistentes con algún grado de alteración hidrotermal en rocas máficas o ultramáficas en la zona.

Según el diagrama de clasificación TAS, las muestras de este río presentan una química andesítica y algunas basálticas, muy parecido a lo que ocurre con las muestras del río Pangal.

5.4 Análisis multivariable

Al agrupar las muestras según el algoritmo k-means, se obtiene que existe una relación entre los distintos grupos y la geología de la cuenca (Figura 5.22). Los grupos 1, 2 y 5 se ubican en la zona este, caracterizada por unidades volcano - sedimentarias, mientras que los nodos 1 y 2 en la zona oeste, conformada por el Batolito Norpatagónico.

Mapa Multivariable



Leyenda

- Grupo 1
- Grupo 2
- Grupo 3
- Grupo 4
- Grupo 5
- Grupo 6

Figura 5.22. Distribución de los nodos o grupos en la cuenca del río Aysén.

La signatura química asociada a cada grupo es consistente con la información geológica del lugar. De esta manera el Grupo 1, caracterizado por altos contenidos de SiO₂, K₂O y Rb (signatura asociada a rocas de composición félsica), se ubica en los ríos Picaflor, Mañihuales, Simpson, Coyhaique, Ñirehuao y Emperador Guillermo. Esto también es consistente con los diagramas TAS obtenidos para las muestras de cada uno de estos ríos, donde la signatura característica es de composición dacítica. Por otro lado, al observar el mapa C.I.A (Índice de Meteorización Química) de los sedimentos de la cuenca, se desprende que las muestras que pertenecen al Grupo 1, poseen los mayores valores de este índice. Lo anterior podría estar asociado a una mayor exposición de estos sedimentos a condiciones meteorizantes. Un factor que puede influir y explicar aquello, es el rol de los glaciares. Considerando que diversos estudios (Arqueros, 2004; Mardones *et al.*, 2011) han mostrado que durante el Último Máximo Glacial (LGM) el hielo cubría gran parte de la cuenca, y que las lenguas de hielo y ríos fluían hacia el oriente (contrario a la dirección del drenaje actual) es posible que los detritos o depósitos glaciares hayan sido depositados mayoritariamente hacia el este de la cuenca, mientras que las rocas del oeste continuaban subyacente a los glaciares. De esta manera se puede sugerir que las muestras del Grupo 1 (ubicadas al este de la cuenca principalmente) pueden estar reflejando detritos que quedaron expuestos a condiciones meteorizantes previamente.

Por otro lado, el Grupo 5, caracterizado por contenidos muy altos de distintos metales pesados, se ubica únicamente en el río Toqui (Figura 5.22), siendo más específico, en las muestras posteriores al relave que se mencionó anteriormente. De esta manera este grupo podría estar reflejando concentraciones excesivamente altas de metales y que como se discutió anteriormente, podrían tener un origen antrópico.

Luego, el Grupo 2 caracterizado por concentraciones altas de S_{total}, Ba, Be, Rb, Hg, Cs, y de distintos metales, se ubica principalmente en las muestras del río Toqui, algunas del río Emperador Guillermo, en el río Baguales, y las muestras sur del río Blanco este (Figura 5.22). Este grupo parece reflejar zonas mineralizadas con contenidos naturales de algunos metales alojados en las formaciones volcano-sedimentarias del lugar. Es posible identificar que las muestras de este grupo constituyen una franja N-S, que coincide espacialmente con el cinturón metalogénico del cretácico inferior desarrollado en la Patagonia chilena. Por último, las muestras de este grupo ubicadas en la zona del río Baguales, parecen estar mostrando los altos contenidos de azufre aportados por las lutitas de la formación Katterfeld.

Con respecto a la zona oeste, representada por el Batolito Norpatagónico, existen 2 grupos dominantes (Grupos 4 y 3). El grupo 4 está caracterizado por altos contenidos de elementos asociados a una composición máfica de la fuente, como lo son: Fe₂O₃, MgO, CaO, Ni, Cr entre otros. Este grupo se distribuye en el río Pangal-Los Palos y Blanco (parte norte de este) (Figura 5.22). Como se mencionó en discusiones, estos ríos entregaron características químicas y mineralógicas (diagrama UCC, Índice de Basicidad, presencia de minerales ultramáficos, entre otros) que efectivamente permiten sugerir una fuente de signatura máfica para los sedimentos de estas muestras.

Finalmente el Grupo 3, caracterizado por altos contenidos de Al_2O_3 , Na_2O , P_2O_5 , Sr, CaO, Ni, Cr, Ga entre otros, se ubica principalmente en río La Paloma, y Blanco (parte sur) parece estar reflejando rocas de composición máfica-intermedia asociadas al batolito Norpatagónico.

5.5 PEC (*Probable Effect Concentration*)

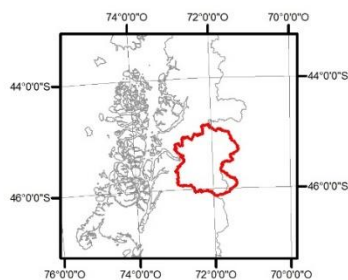
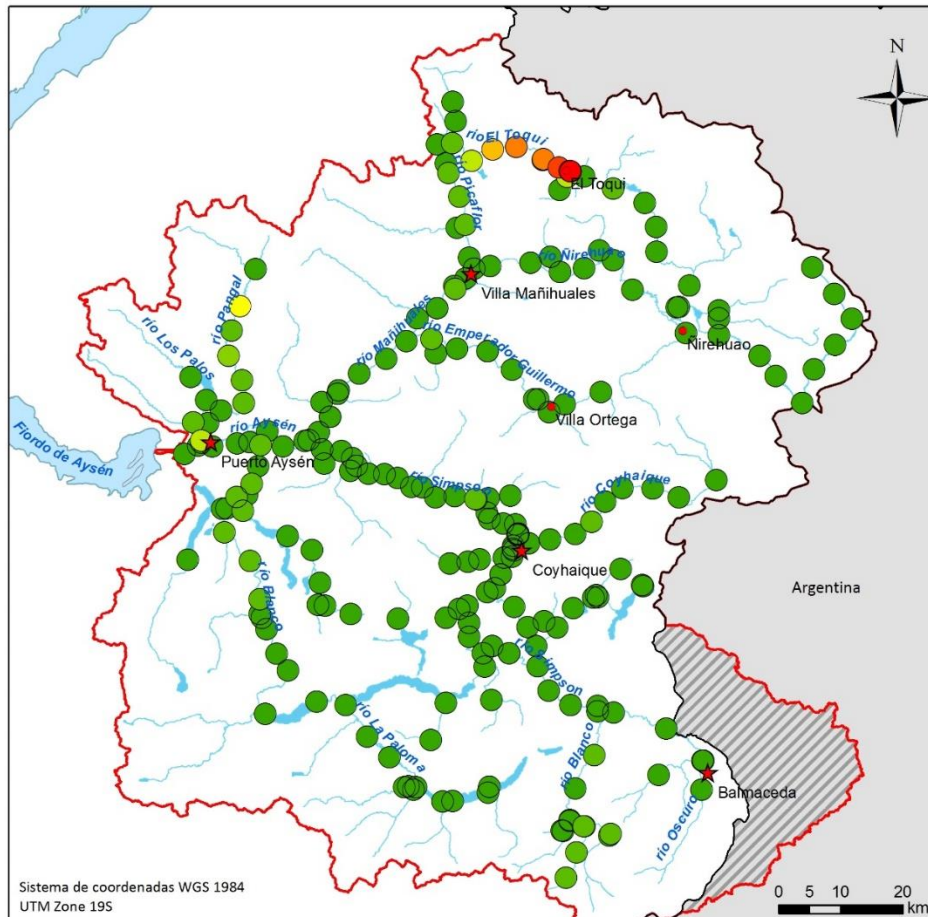
En la guía de MacDonald (2000), algunos de los efectos perjudiciales para los organismos que conviven con los sedimentos corresponden a sobrevivencia, crecimiento o reproducción. Estos se evalúan en organismos macro invertebrados bentónicos, que corresponden a organismos invertebrados presentes en casi todos los sistemas acuáticos continentales. Estos poseen diferentes grados de tolerancia a las actividades humanas, tienen una reducida movilidad y además están presentes durante todo el año. Estas características los hacen útiles para detectar algún nivel de contaminación o perturbación en un sistema acuático. Algunos de los organismos utilizados en MacDonald (2000) se encuentran también en la cuenca del río Aysén. Por ejemplo, amphipoda (*hyalella*), distintas especies de la familia chironomidae o de la clase oligochaeta (DGA, 2004), (Oyanedel, 2008), (SEREMI Medio Ambiente Aysén, 2010). De esta manera la guía de MacDonald (2000) puede ser aplicada a la cuenca del río Aysén.

El mapa PEC obtenido, evidencia que en la cuenca existen lugares tóxicos, para los organismos que conviven con estos sedimentos. Por un lado la zona oeste muestra ser toxica por sus contenidos de Cr y Ni. Sin embargo se debe tener en cuenta que la contaminación se define como alteración de la pureza o de las condiciones normales de un medio por agentes químicos o físicos (RAE). De esta manera se desprende que si un lugar posee concentraciones naturales sobre el valor PEC, no necesariamente se puede hablar de contaminación y por ende no puede definirse como zona contaminada. Además para efectos de toxicidad, existe una tolerancia adquirida en las especies que conviven con estas sustancias, por lo que probablemente no se generen efectos adversos en estos organismos. Como se discutió anteriormente, las concentraciones de Cr y Ni en la zona parecen ser de origen natural, asociados a la presencia de rocas máficas, por ende es muy probable que esta zona no presente contaminación.

Distinto es el caso para el río Toqui, donde el parámetro se ve sobrepasado para varios metales, que presentaron concentraciones muy inferiores en terrazas del mismo lugar, es decir, el nivel natural o background del lugar es muy inferior al registrado en los sedimentos fluviales. Por lo anterior, es probable que la biota del lugar no este adaptada y efectivamente se trate de un lugar contaminado y tóxico para esta.

Tomando en cuenta el parámetro Pec-Qm, descrito en metodologías, para los 8 metales descritos anteriormente, se obtuvieron porcentajes de toxicidad para la cuenca como se muestra en la Figura 5.23.

Mapa de toxicidad (MacDonald, 2000)



Leyenda

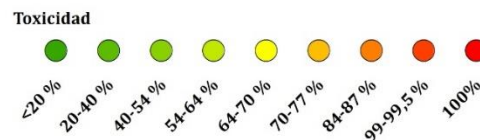


Figura 5.23. Mapa de toxicidad para las muestras de sedimento fluvial en la cuenca del río Aysén.

Se desprende que las muestras 100% tóxicas corresponden a las obtenidas en las cercanías del relave (círculos rojos en la Figura 5.23), además de este río se obtiene un porcentaje considerable de toxicidad (alrededor de 64-70%) en una muestra del río Pangal, sin embargo, como se mencionó anteriormente, es probable que la biota de este lugar ya este adaptada o con un grado de tolerancia ante tales concentraciones, de origen natural, en Cr y Ni.

Se debe tener en cuenta que en este estudio hay una subestimación de la real toxicidad, debido a que solo se consideraron las concentraciones de 8 metales, sin tomar en cuenta ni un contaminante orgánico por ejemplo.

Existe también una subestimación en el porcentaje entregado ya que no se considera (tampoco en el trabajo de MacDonald) el potencial por bioacumulación en los organismos acuáticos y subsecuentemente, la transferencia en la cadena alimentaria, a los humanos por ejemplo (Department of Natural Resources, Wisconsin, 2003)

Por último, es importante tener en cuenta que en el trabajo de MacDonald *et al.*, 2000 no se considera un tamaño de grano específico para los sedimentos utilizados. Lo anterior puede generar un sesgo importante en los resultados obtenidos.

5.6 Efecto de la granulometría sobre la composición química

Al clasificar las muestras utilizando las razones Zr/Sc versus Th/Sc en las distintas granulometrías, se obtuvo que solo una muestra (FA-019) mostró diferencias considerables entre las distintas granulometrías. La fracción <180 μm de esta muestra se situó cercano al campo de riolitas (NZ rhyolite), mientras que la fracción <297 de esta muestra, cambió su posición drásticamente, situándose cercano al campo de las dacitas (Figura 18). A pesar de que todas las muestras, a medida que aumentan el tamaño de grano se mueven hacia una composición más intermedia, la FA-019 lo hace más que las otras. Este comportamiento puede estar condicionado por la presencia del mineral pesado zircón, que posee una concentración preferencial en la fracción <125 μm (Barry Roser, Comunicación Personal 2015). Tomando en cuenta lo anterior, se desprende que la fuente de la muestra FA-19 probablemente pueda corresponder a una roca félsica plutónica más que una félsica volcánica. Lo anterior se deduce del hecho de que el zircón es más fácil de liberar desde intrusivos granodioríticos por ejemplo que de rocas volcánicas, donde el Zr se encuentra contenido en vidrio. La muestra FA-19 se obtuvo del río Blanco, que drena sobre el batolito Norpatagónico, es decir, posee un carácter plutónico que respalda lo anterior.

De los diagramas normalizados a la fracción <297 μm (Anexo D), se desprende que al disminuir el tamaño de grano disminuyen los contenidos de Na_2O , K_2O y ocasionalmente SiO_2 . Este comportamiento es esperado, debido a la preferencia de los feldespatos y cuarzo por la fracción gruesa. Por otro lado, los contenidos de Sr, Rb y Ba se ven ligeramente enriquecidos en la fracción gruesa para algunas muestras. Lo anterior llama la atención principalmente debido a que estos elementos están asociados a las arcillas, por lo que se espera que se estén enriquecidos en la fracción más fina. El resultado obtenido parece sugerir que en las muestras estudiadas, el contenido de arcillas no es tan influyente, y posiblemente estos elementos estén ligados al feldespato (sin una meteorización considerable), más que a las arcillas, al menos para esas muestras.

En general se observa que al disminuir el tamaño de grano, aumentan los contenidos de Fe_2O_3 , TiO_2 , Cr, V, MnO, P_2O_5 , Sc, Nb, Zr, Hf, Th, U. Estos elementos están

asociados a minerales pesados. Posiblemente la concentración preferencial de algunos minerales pesados, como por ejemplo zircón, magnetita, etc. por la fracción más fina, sea el factor responsable de este resultado. Hay que tener en cuenta que los primeros 6, Fe₂O₃, TiO₂, Cr, V, MnO, P₂O₅, también se encuentran asociados a las arcillas, por ende ese factor también puede estar influyendo en el resultado obtenido.

Se observó además, que en algunas muestras había una concentración mayor de TiO₂, Fe₂O₃, Cr, Ga, Nb, Sc, V, en la fracción <180 μm más que en la 125 μm. Lo anterior se puede asociar al contenido de fases minerales específicas, como titanomagnetita, en aquellas muestras (este mineral pesado, posee una concentración preferencial en la fracción 125-180 μm (Barry Roser, Comunicación Personal 2015)). Por otro lado, las concentraciones de los metales As, Pb, Mo, Cu y Zn aumentan al disminuir el tamaño de grano. Esto se atribuye principalmente a que las partículas de menor tamaño (arcillas), poseen mayor superficie y por ende contienen mayores cantidades de metales asociados mediante adsorción (Singh *et al.*, 1999).

Finalmente, si se consideran los diagramas composicionales generados (Figura 18) se desprende que las muestras TR-51 y CR-10, en las diferentes granulometrías, siempre presentan una composición un poco más básica que las muestras TR-84 y TR-66. De esta manera, se podría asumir que las muestras TR-51 y CR-10 representan una fuente de composición un poco más básica que las muestras TR-84 y TR-66. Considerando esto, se desprende que el fraccionamiento obtenido entre las distintas granulometrías es mayor en las muestras de composición más félsica, en relación a las más básicas. Este comportamiento se atribuye a que los componentes líticos básicos asociados a la fracción gruesa se equilibran con los productos de meteorización de minerales ferromagnesianos asociados a la fracción fina, generando un menor fraccionamiento en muestras de composición básica (Barry Roser, Comunicación Personal 2015).

6 CONCLUSIONES

En este estudio se analizó la composición química y mineralógica de 234 muestras de sedimentos fluviales de la cuenca del río Aysén que permitió determinar la influencia de los factores antrópicos y naturales en esta cuenca. El factor natural que mayor influencia tiene sobre la composición química de los sedimentos es la litología del basamento en que se desarrollan los cauces fluviales, por otro lado también es posible distinguir la influencia de las actividades antrópicas en la composición química de los sedimentos, como es el caso de las concentraciones de algunos metales, asociada a la existencia y explotación de yacimientos minerales.

Los resultados de los análisis geoquímicos, mineralógicos y la información geológica para la cuenca muestran una relación consistente. Esta relación permite dividir la cuenca del río Aysén en dos zonas, una zona este que se encuentra caracterizada por una litología asociada a las unidades volcano-sedimentarias, y una zona oeste que se caracteriza por rocas intrusivas asociadas al batolito Norpatagónico.

De esta manera, la zona este de la cuenca está conformada por tres grupos de muestras:

- Grupo 1: conformado por muestras que evidencian una composición química y mineralología de carácter félsico y con alto Índice de Meteorización Química (C.I.A) posiblemente por el efecto de los glaciares en la zona.
- Grupo 2: conformado por muestras con contenidos metálicos asociados a zonas de alteración, que además definen una franja N-S que coincide espacialmente con el cinturón metalogenico del cretácico inferior desarrollado en la Patagonia chilena.
- Grupo 5: conformado por muestras ubicadas posterior a un relave en el río Toqui, con contenidos metálicos excesivamente altos, posiblemente de origen antrópico.

Por otro lado la zona oeste de la cuenca este conformada por dos grupos de muestras:

- Grupo 3: integrado por muestras de composición máfica-intermedia.
- Grupo 4: conformado por muestras de composición máfica, posiblemente por la influencia de la litología del Batolito Norpatagónico en el sector.

A pesar de que los diagramas TAS se ocupan respecto a datos químicos en roca total, en este trabajo se consideró de utilidad aplicarlos a las muestras de sedimentos para poder realizar una comparación relativa entre las muestras, lo que resultó de utilidad ya que permitió apoyar la utilización de otras herramientas de comparación para agrupar las distintas características de las muestras estudiadas.

A partir de la evaluación del parámetro PEC en la cuenca se registraron dos sectores con valores que sobrepasan los valores establecidos, y que indican una potencial toxicidad. Estos sectores corresponden al río Pangal y a cercanías del yacimiento El Toqui. En el río Pangal los valores se podrían atribuir a concentraciones naturales de ciertos elementos que estarían asociados a una litología particular. Por otro lado los

valores en las cercanías de El Toqui estarían relacionados a la existencia y explotación del yacimiento del mismo nombre.

De las relaciones entre química y granulometría se tiene que en general, al disminuir el tamaño del grano se observa un aumento en la concentración de elementos asociados a minerales pesados y a arcillas principalmente.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Adiyiah, J., Acheampong, M. A., Ansa, E. D. O., Kelderman, P., Operations, F., Agency, E. P., ... Ahafo, S., 2014. Grain-Size Analysis and Heavy Metals Distribution in Sediment Fractions of Lake Markermeer in the. *International Journal of Environmental Science and Toxicology Research*, 2(8), 160–167.
- Alfaro, G. 2010. Antecedentes preliminares sobre la composición y génesis de las cromitas de La Cabaña (Cautín). *Revista Geológica de Chile* 11, 29-41.
- Arqueros, C.R. 2004. Evolución glacial de la hoya del río Coyhaique: Una aproximación a partir del análisis geomorfológico y morfoestratigráfico. Tesis de Magister (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 114 p.
- 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. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología: 156 p.
- Baeza Bravo, L. I., 2010. Estudio Ambiental y Económico: Análisis Mineralógico y Geoquímico de Sedimentos del Sistema Fluvial del Río Lluta, XV Región de Arica y Parinacota, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología: 151 p.
- Beeson, R., 1995. A drainage sediment geochemical orientation study at Boddington, Western Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 54(1), 63–71. [http://doi.org/10.1016/0375-6742\(95\)00007-C](http://doi.org/10.1016/0375-6742(95)00007-C)
- Birch, G. F., Robertson, E., Taylor, S. E., & McConchie, D. M., 2000. The use of sediments to detect human impact on the fluvial system. *Environmental Geology*, 39(9), 1015–1028. <http://doi.org/10.1007/s002549900075>
- Birch, G., Siaka, M., & Owens, C., 2001. The Source of Anthropogenic Heavy Metals in Fluvial Sediments of a Rural Catchment: Coxs River, Australia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 126(1-2), 13–35. <http://doi.org/10.1023/A:1005258123720>
- British Geological Survey, 2000. Mineral exploration in Britain.
- Cambroner, C. G., & Moreno, I G. (2006). Algoritmos de aprendizaje: knn & kmeans. Inteligencia en Redes de Comunicación, Universidad Carlos III de Madrid.
- De la Cruz, R.; Suárez, M; Belmar, M.; Quiroz, D.; Bell, M. 2003. Área Coyhaique-Balmaceda, Región de Aisén de General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Seria geología básica N°80, 40 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- De Waal, S. A. (1970). Nickel minerals from Barberton, South Africa: III. Willemseite, a nickel-rich talc. *American Mineralogist*, 55(1-2), 31-42.
- Dinelli, E., Cortecchi, G., Lucchini, F., & Zantedeschi, E., 2005. Sources of major and trace elements in the stream sediments of the Arno river catchment (northern Tuscany, Italy). *GEOCHEMICAL JOURNAL*, 39(6), 531–545. <http://doi.org/10.2343/geochemj.39.531>
- Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. 2004, Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Aysén, Diciembre 2004.

- Espinoza Haberland, F. P., 2013. Influencia de los factores naturales y antropogénicos en la geoquímica de sedimentos fluviales de las Cuencas Vitor y San José de Azapa; XV Región de Arica y Parinacota, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología: 137 p.
- Fletcher, W. K., 1997. Stream sediment geochemistry in today's exploration world. In *Proceedings of exploration* (Vol. 97, pp. 249-260).
- Garver, J. I., Royce, P. R., & Smick, T. A. (1996). Chromium and Nickel in Shale of the Taconic Foreland: A Case Study for the Provenance of Fine-Grained Sediments with an Ultramafic Source. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 66(1), 100–106. <http://doi.org/10.1306/D42682C5-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Gobierno Regional de Aysén/SERPLAC. 2005. Plan Regional de Ordenamiento Territorial de Aysén. Coyhaique, Chile.
- Gobierno Regional de Aysén/SEREMI Medio Ambiente. 2010. Diagnóstico ambiental cuenca del río Aysén y sector costero adyacente. Informe final. Coyhaique, Chile. 270 p.
- Gobierno de Chile/CONAF. 2002. Plan de manejo Reserva Nacional río Simpson. Coyhaique, Chile.
- González, I., Jordán, M. M., Sanfeliu, T., Quiroz, M., & de la Fuente, C., 2006. Mineralogy and heavy metal content in sediments from Río Gato, Carelmapu and Cucao, Southern Chile. *Environmental Geology*, 52(7), 1243–1251. <http://doi.org/10.1007/s00254-006-0562-0>
- Guagliardi, I., Apollaro, C., Scarciglia, F., & Rosa, R. De., 2013. Influence of particle-size on geochemical distribution of stream sediments in the Lese river catchment, southern Italy. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 17(1), 43–55.
- Horowitz, A. J., & Elrick, K. A., 1987. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Applied Geochemistry*, 2(4), 437–451. [http://doi.org/10.1016/0883-2927\(87\)90027-8](http://doi.org/10.1016/0883-2927(87)90027-8)
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2008. Población y Sociedad, Aspectos Demográficos. Chile.
- Ferrando, F., Muñoz, M. 1979. Geomorfología. Perspectivas de desarrollo de los recursos de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Intendencia de región de Aysén. Publicación 28. 69 p.
- Johnson, C. C., Flight, D. M., Ander, E. L., Lister, T. R., Breward, N., Fordyce, F. M., & Nice, S. E. 2008. The collection of drainage samples for environmental analyses from active stream channels. *Environmental Geochemistry: site characterization, data analysis and case histories*. Oxford: Elsevier, 59-92.
- Johnsson, M. J., 1993. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. *Geological Society of America Special Papers* (Vol. 284). Geological Society of America: 1 p.–20 p. <http://doi.org/10.1130/SPE284>
- MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A., 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1), 20–31. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10790498>
- MacQueen, J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* (Vol. 1, No. 14, pp. 281-297).

- Maslennikova, S., Larina, N. and Larin, S. 2012. The effect of sediment grain size on heavy metal content. Lakes, reservoirs and ponds. 6 (1): 43-54.
- McLennan, S. M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1029/2000GC000109>
- Miralles González, C. (2013). Evaluación de los factores que controlan la geoquímica de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV Región de Coquimbo, Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Nesbitt, H. W., 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, 279(5710), 206–210. <http://doi.org/10.1038/279206a0>
- Nesbitt, H. W., Markovics, G., & Price, R. C. , 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11), 1659–1666. [http://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90218-5](http://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90218-5)
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., McLennan, S. M., & Keays, R. R., 1996. Effects of Chemical Weathering and Sorting on the Petrogenesis of Siliciclastic Sediments, with Implications for Provenance Studies. *The Journal of Geology*, 104(5), 525 – 542.
- Niemeyer, H. 1982, Hoyas hidrográficas de Chile. 11ª región de Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo, 12ª Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. 156 p.
- Ohta, A., Imai, N., Terashima, S., & Tachibana, Y., 2005. Influence of surface geology and mineral deposits on the spatial distributions of elemental concentrations in the stream sediments of Hokkaido, Japan. *Journal of Geochemical Exploration*, 86(2), 86–103. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.04.002>
- Ortiz, E., & Roser, B. P., 2006. Major and trace element provenance signatures in stream sediments from the Kando River, San'in district, southwest Japan. *The Island Arc*, 15(2), 223–238. <http://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2006.00523.x>
- Oyanedel, A., Valdovinos, C., Azocar, M., Moya, C., Mancilla, G., Pedreros, P., Figueroa, R.. (2008). PATRONES DE DISTRIBUCION ESPACIAL DE LOS MACROINVERTEBRADOS BENTONICOS DE LA CUENCA DEL RIO AYSÉN (PATAGONIA CHILENA). *Gayana (Concepción)*, 72(2), 241-257.
- Oyarzún, J., Maturana, H., Paulo, A., & Pasiieczna, A., 2003. Heavy Metals in Stream Sediments from the Coquimbo region (Chile): Effects of Sustained Mining and Natural Processes in a Semi-arid Andean Basin. *Mine Water and the Environment*, 22(3), 155–161. <http://doi.org/10.1007/s10230-003-0016-9>
- Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J., & Maturana, H., 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: Industrial (gold mining at El Indio-Tambo district) vs. geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 84(2), 53–64. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2004.03.002>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <http://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Quiroz, D.; Bruce, Z. 2010. Geología del Área Puerto Ingeniero Ibáñez-Villa Cerro Castillo, Región Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 124: 48 p., 1 mapa escala 1: 100.000.

- Ranasinghe, P. N., Chandrajith, R. L. R., Dissanayake, C. B., & Rupasinghe, M. S., 2002. Importance of Grain Size Factor in Distribution of Trace Elements in Stream Sediments of Tropical High Grade Terrains – A Case Study from Sri Lanka. *Chemie Der Erde - Geochemistry*, 62(3), 243–253. <http://doi.org/10.1078/0009-2819-00015>
- Rioseco, Reinaldo y Tesser, Claudio: Cartografía Interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. <www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva> [26/08/2016]
- Salminen, R. (Chief-editor), Batista, M. J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., Jordan, G., Klaver, G., Klein, P., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mazreku, A., O'Connor, P. J., Olsson, S.Å., Ottesen, R.-T., Petersell, V., Plant, J.A., Reeder, S., Salpeteur, I., Sandström, H., Siewers, U., Steenfelt, A., Tarvainen, T., 2005. *Geochemical Atlas of Europe. Part 1: Background Information, Methodology and Maps*. Espoo, Geological Survey of Finland, 526 pages, 36 figures, 362 maps., <http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas>
- Sensarma, S., Rajamani, V., & Tripathi, J. K., 2008. Petrography and geochemical characteristics of the sediments of the small River Hemavati, Southern India: Implications for provenance and weathering processes. *Sedimentary Geology*, 205(3-4), 111–125. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2008.02.001>
- Sekabira, K., Kakudidi, E., Mutumba, G., Oryem-Origa, H., & Basamba, T. A. (2012). *Grain Size and Source Apportionment of Heavy Metals in Urban Stream Sediments*. INTECH Open Access Publisher.
- Singh, A. K., Hasnain, S. I., & Banerjee, D. K., 1999. Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River - a tributary of the lower Ganga, India. *Environmental Geology*, 39(1), 90–98. <http://doi.org/10.1007/s002540050439>
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital*, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.
- SERNAGEOMIN, 2004. Yacimientos de rocas y minerales industriales de la XI Región del General Carlos Ibáñez del Campo, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos N°19.
- Suárez, M.; De la Cruz, R.; Bell, M. 2007. Geología del área Ñireguao-Baño Nuevo, Región Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 108: 56 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Taylor, S. R., & White, A. J. R. (1965). *Geochemistry of andesites and the growth of continents*.
- Tironi, A., Ramírez, A., & Yarrow, M. M. 2005. Análisis General del Impacto Económico Social de la Norma Secundaria de Calidad de Aguas del Río Aysén en el sector Agropecuario y otras actividades económicas. Servicio Agrícola Ganadero XI Región, MINAGRI, Coyhaique, Chile.
- Vignati, D.A.L. and Berlinsky, N. 2010. Potential environmental risks from sediment-bound trace elements: the Ukrainian part of the Danube Delta. *Terre et Environnement*, *Terre et Environnement*, 88, 167–173.
- Winsconsin Department of Natural Resources. 2003. Consensus-based Sediment Quality Guidelines. WT-732 2003. 35p.

ANEXOS

ANEXO A Mapa de Ubicación de muestras

Mapa en que se localizan las muestras obtenidas en terreno y que fueron utilizadas en este trabajo.

ANEXO B Datos Geoquímicos

B.1 Factor de enriquecimiento

El factor de enriquecimiento es una tabla que muestra la relación entre la concentración de cierto elemento en una muestra dada, respecto a la concentración media de dicho elemento en la cuenca.

B.2 Diagramas TAS

Diagramas Total Alkali Silica en que se grafican los valores de las muestras para los distintos ríos estudiados.

B.3 Control de calidad de datos

Se muestran los gráficos de duplicados finos y de muestras gemelas.

B.4 Mapas geoquímicos univariantes

Mapas geoquímicos univariantes de la cuenca, considerando todas las muestras activas. Se incluye el gráfico de los cortes naturales de Jenks

B.5 Análisis multivariante según caja y bigote

Se muestran los diagramas de caja y bigote para cada elemento según los grupos obtenidos a partir del algoritmo de agrupamiento K-means.

B.6 Diagramas de variación geográfica

Diagramas de variación geográfica para los distintos ríos de la cuenca. Se incluyen las concentraciones de terrazas fluviales (cuadrados verdes), concentración de afluentes (triángulos amarillos) y se marcan las ciudades

ANEXO C Datos mineralógicos

Imágenes y descripción de las briquetas en nicoles cruzados y paralelos.

ANEXO D Estudio granulométrico

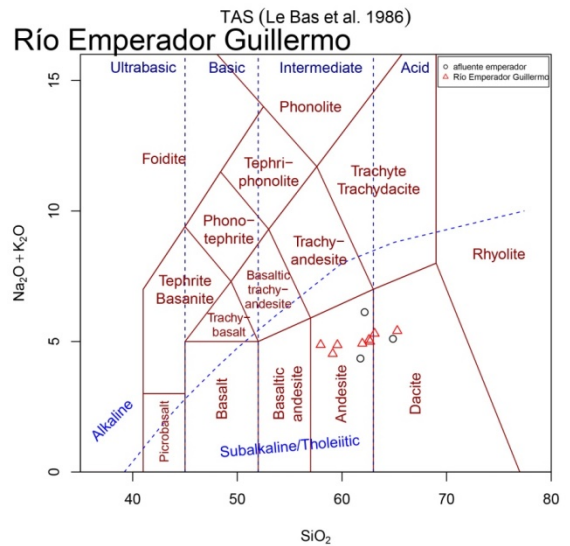
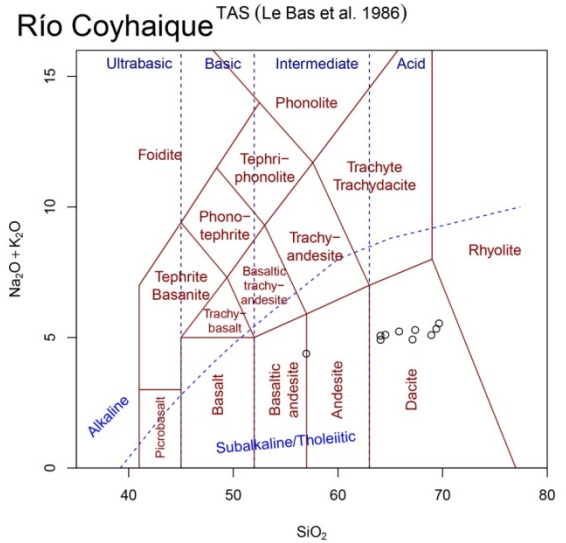
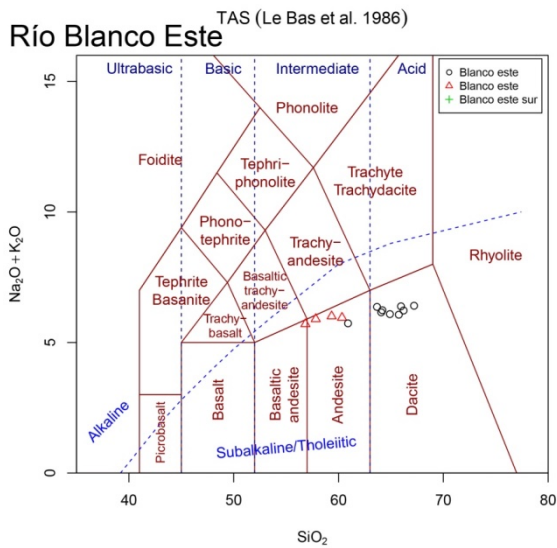
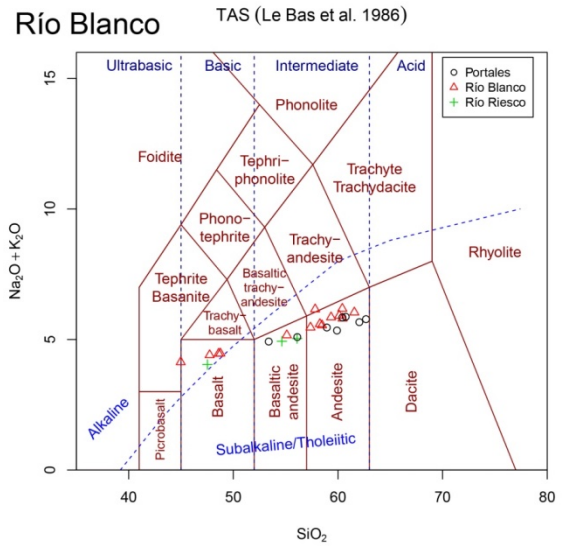
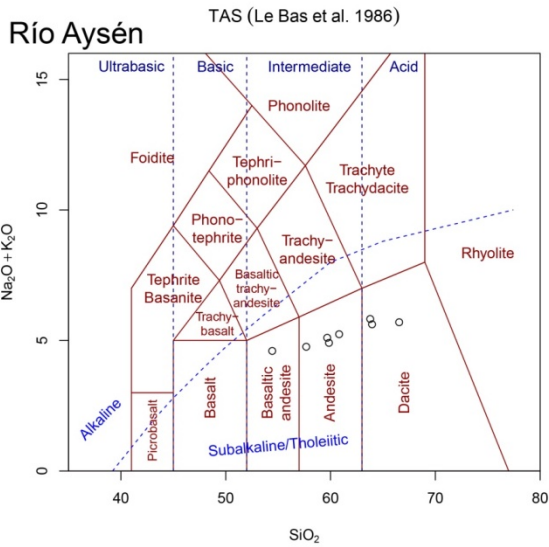
Concentraciones químicas obtenidas para elementos químicos en las distintas granulometrías en ocho muestras.

ANEXO A Mapa de Ubicación de Muestras

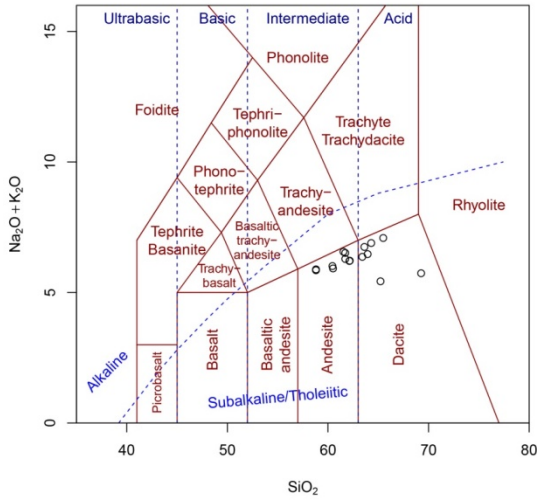
ANEXO B Datos geoquímicos

B.1. Factor de enriquecimiento

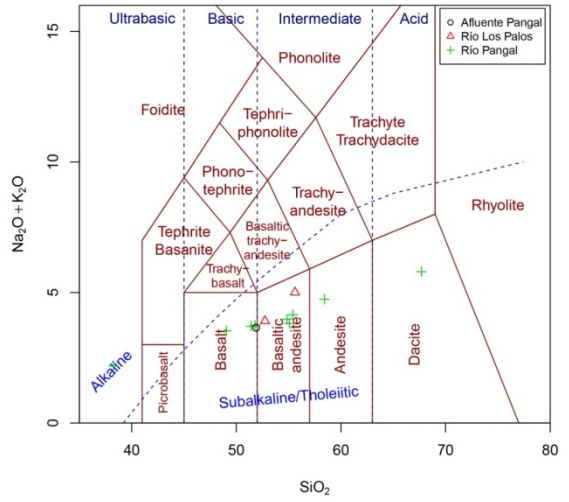
B.2. Clasificación mediante Diagramas TAS



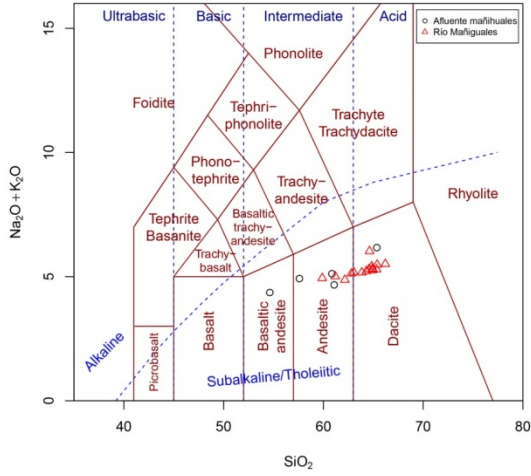
Río La Paloma TAS (Le Bas et al. 1986)



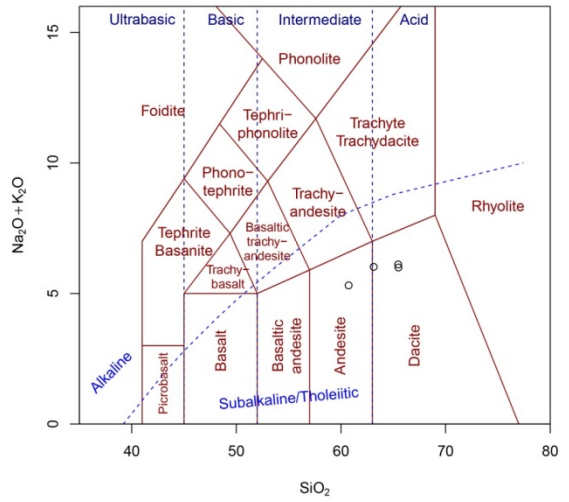
Río Pangal TAS (Le Bas et al. 1986)



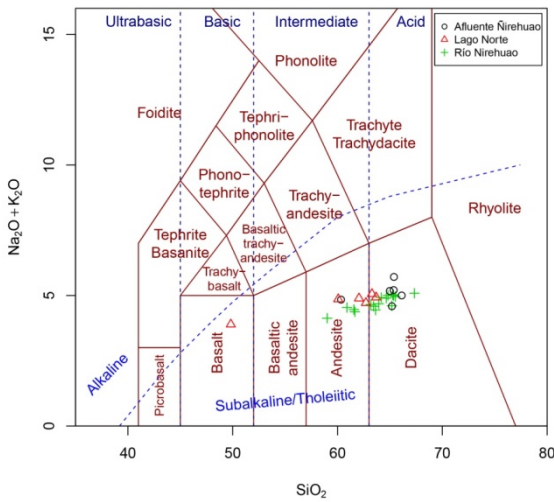
Río Mañihuales TAS (Le Bas et al. 1986)



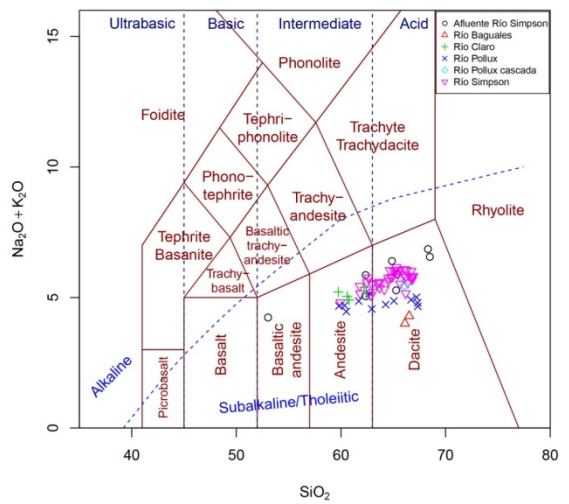
Río Picaflor TAS (Le Bas et al. 1986)



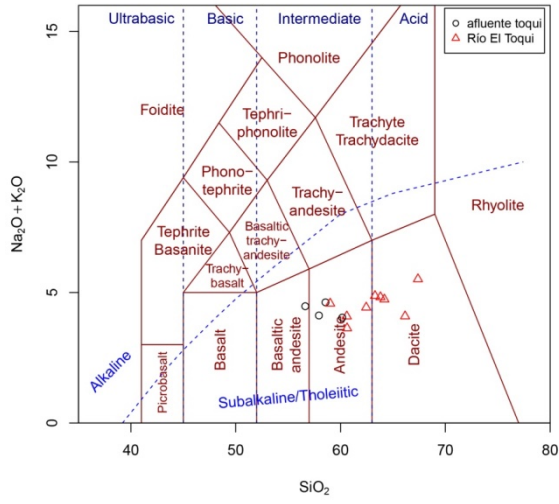
Río Ñirehuao TAS (Le Bas et al. 1986)



Río Simpson TAS (Le Bas et al. 1986)

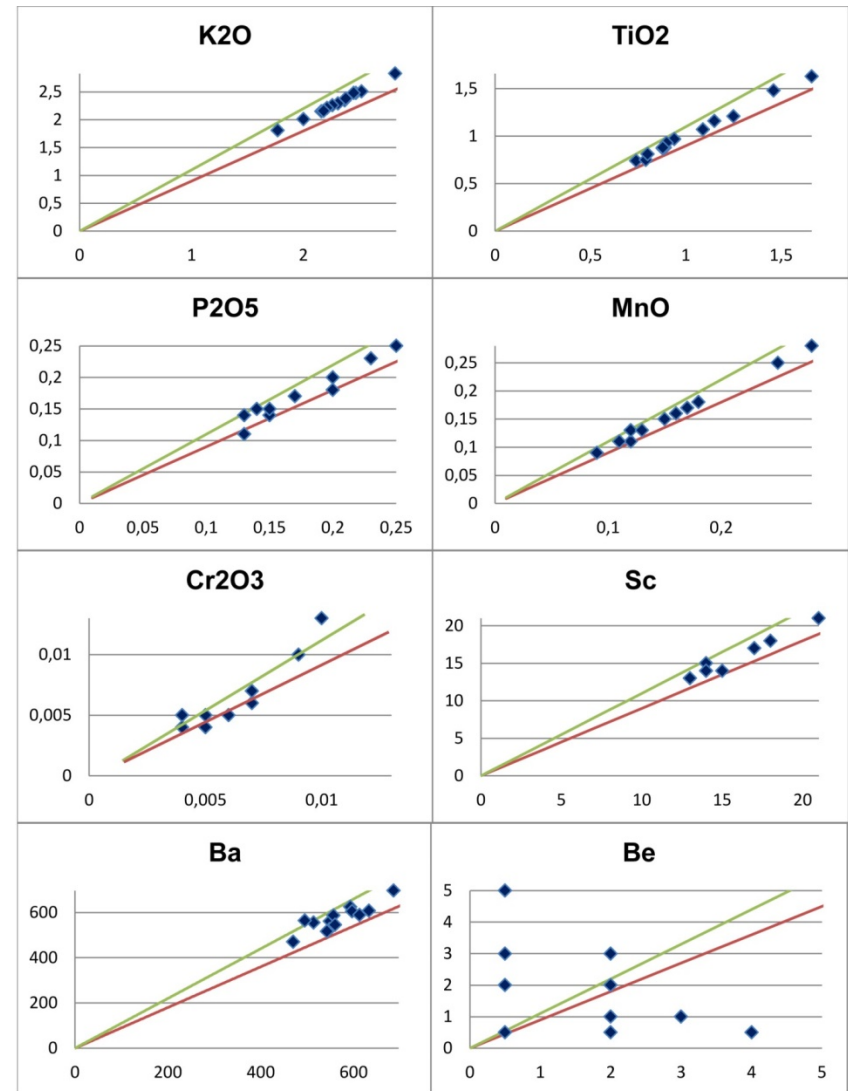
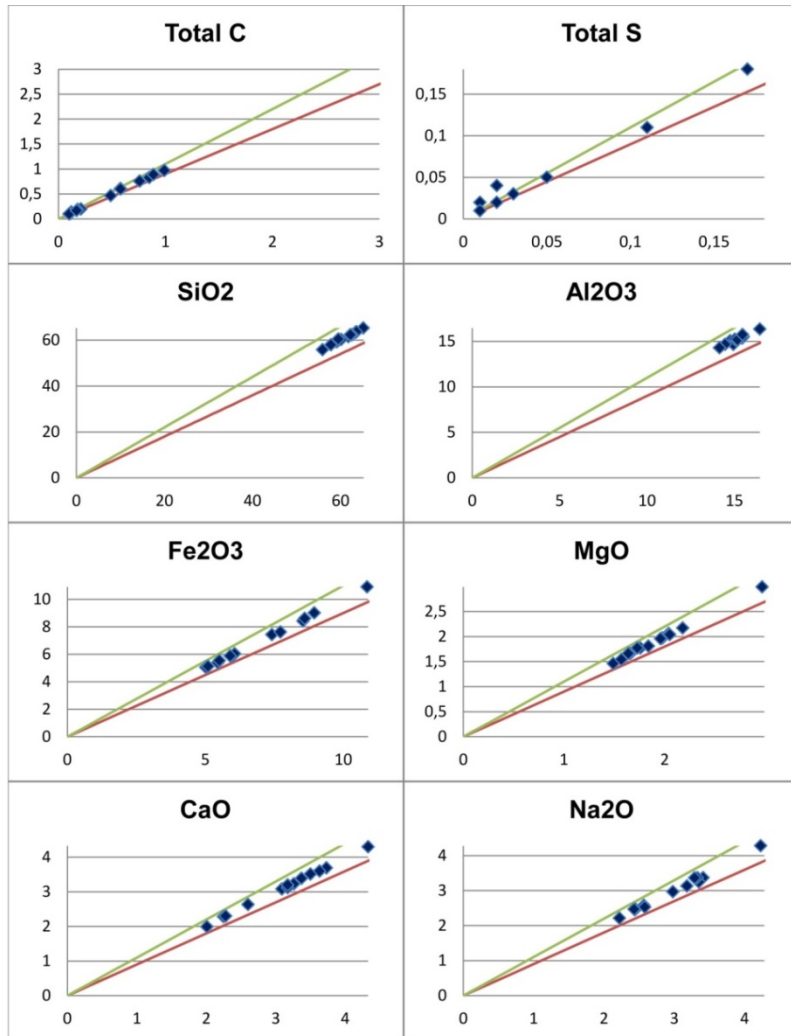


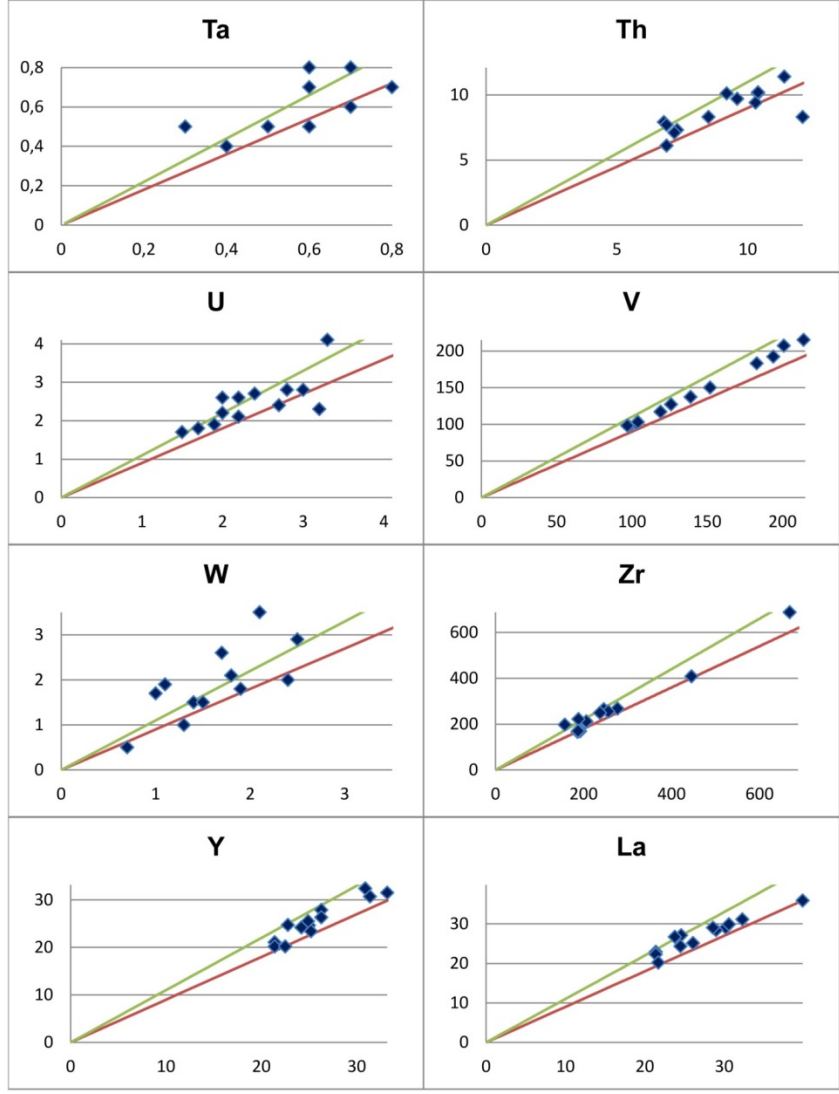
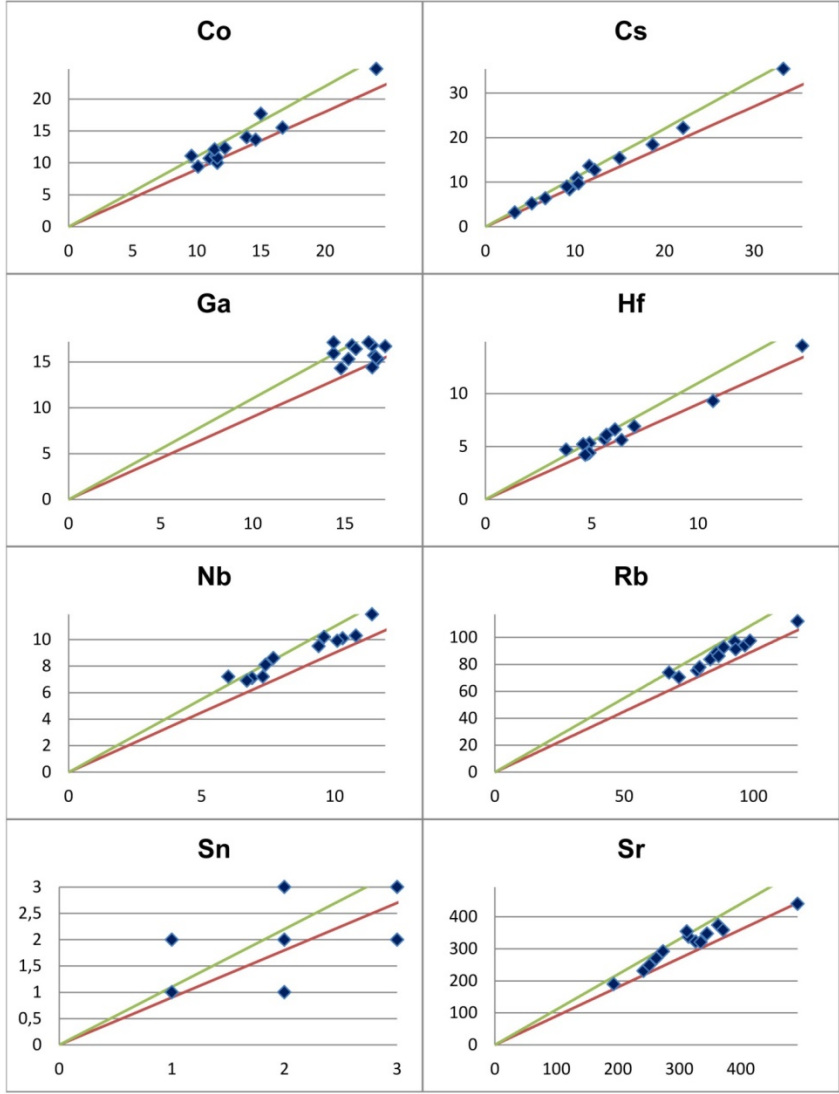
Río El Toqui TAS (Le Bas et al. 1986)

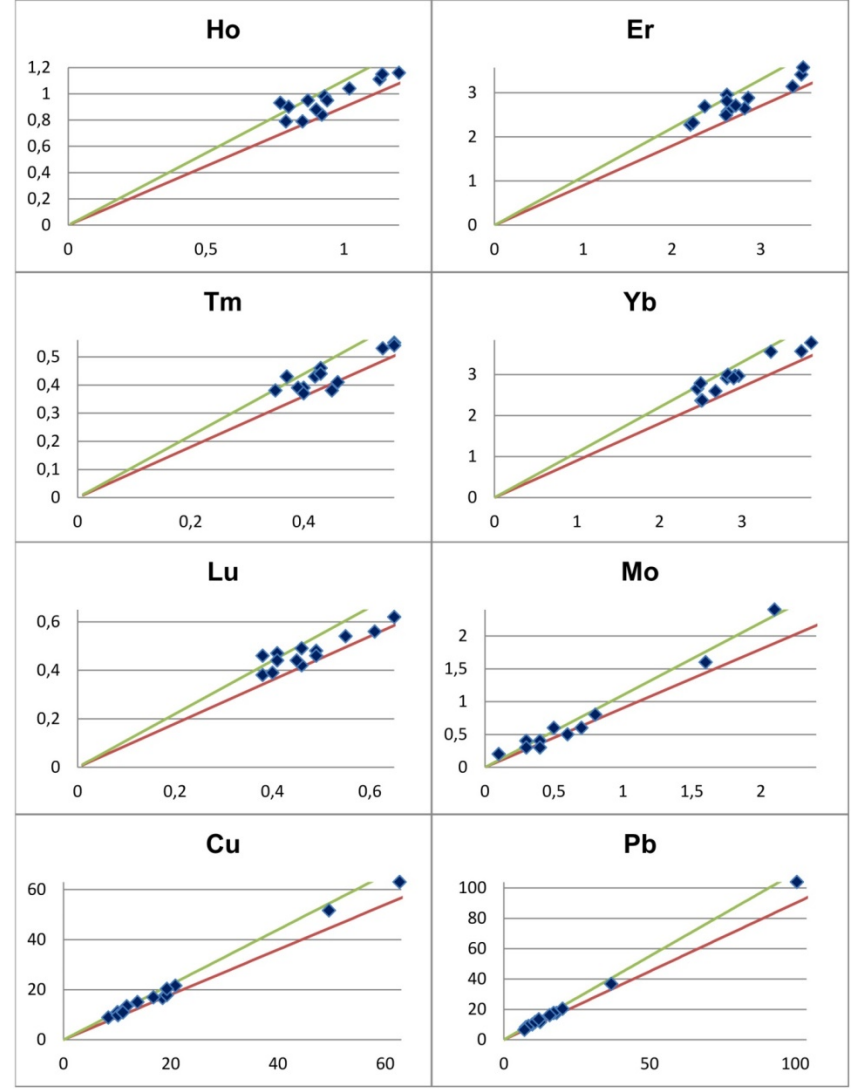
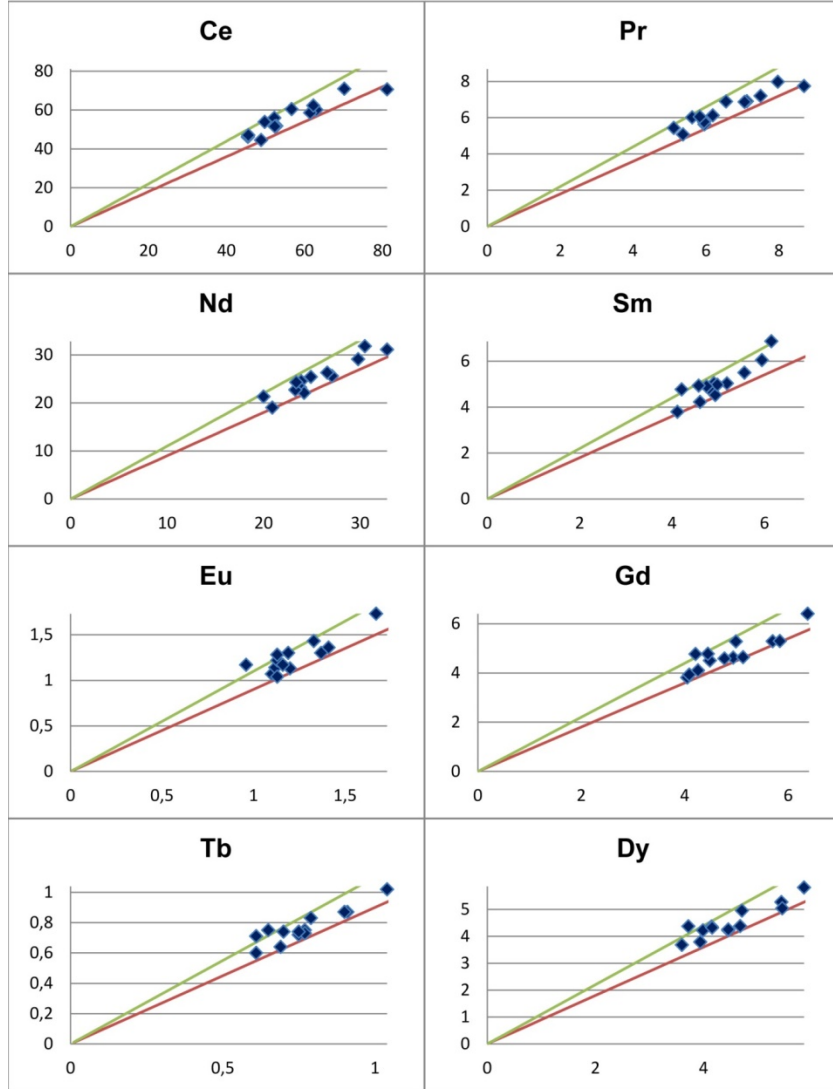


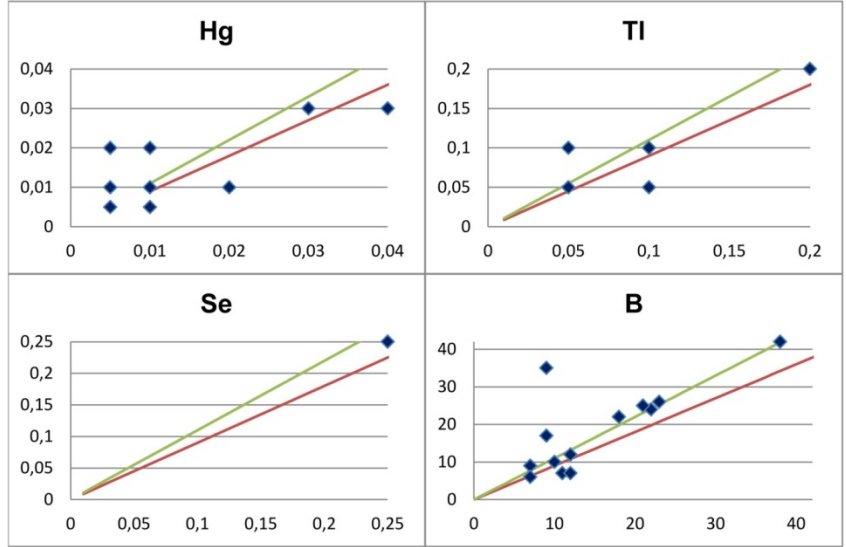
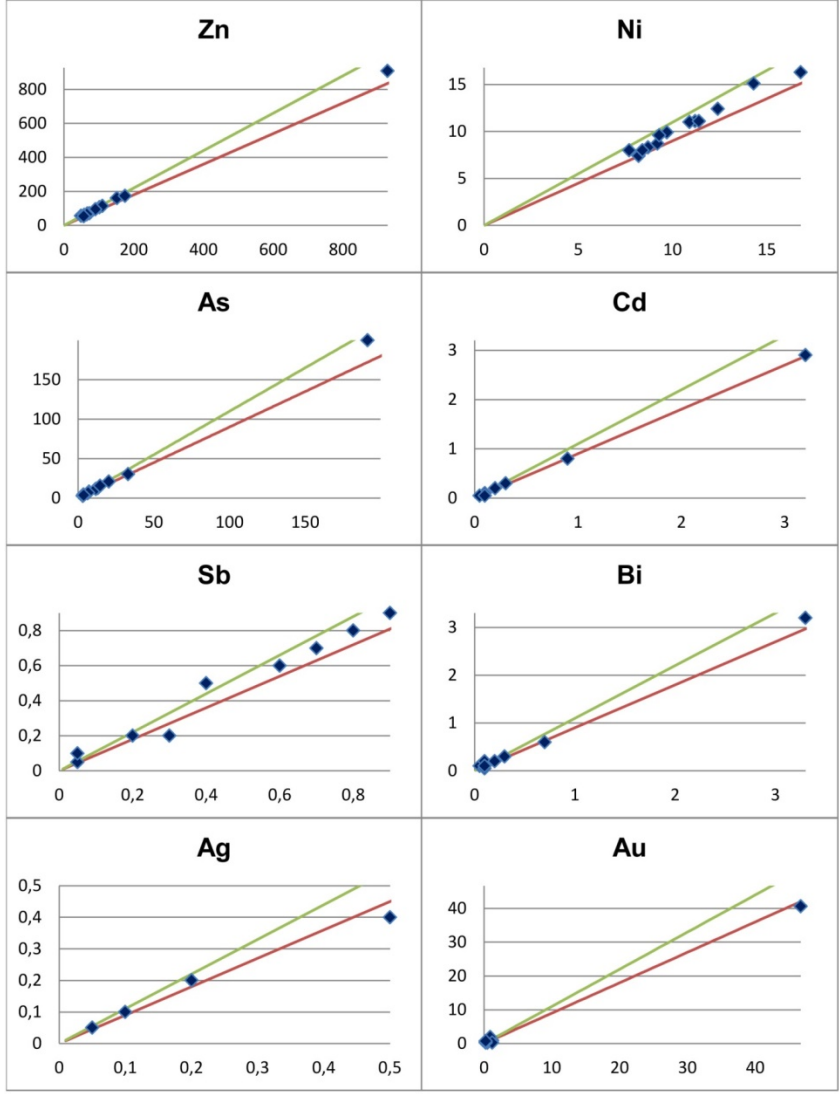
B.3. Control de calidad de datos

i) DUPLICADOS FINOS

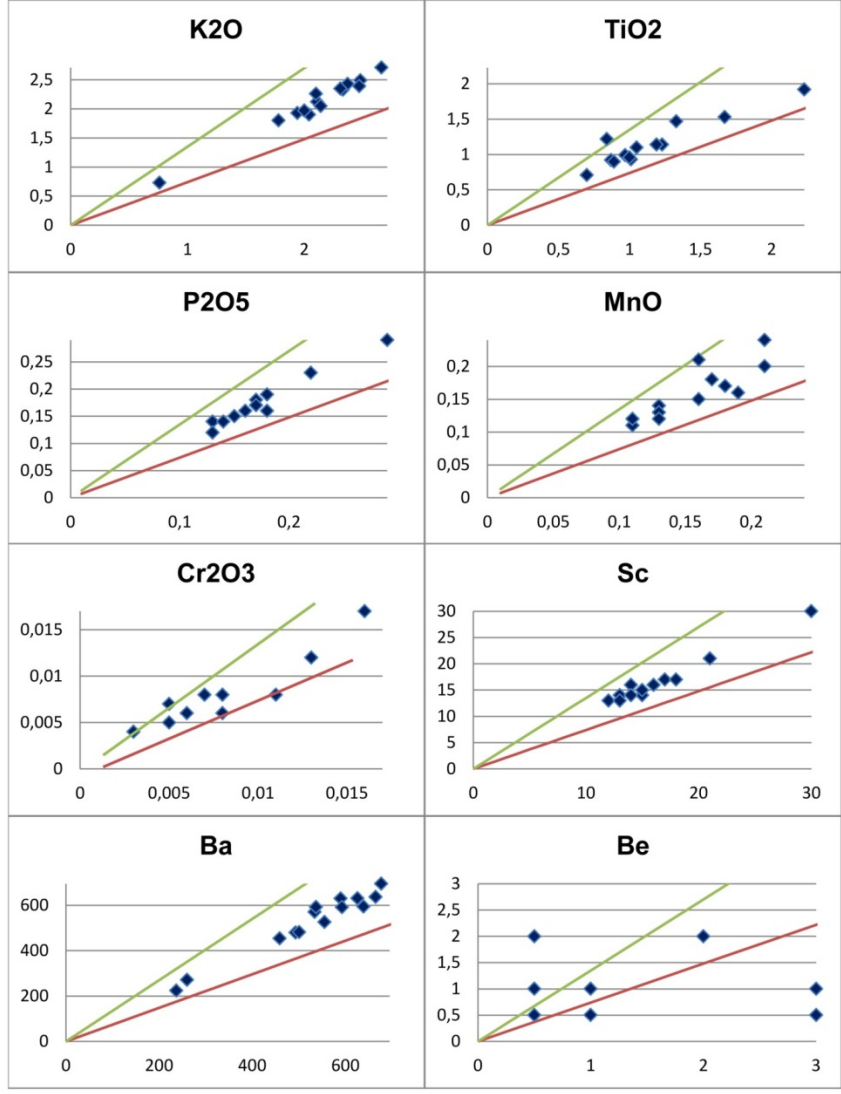
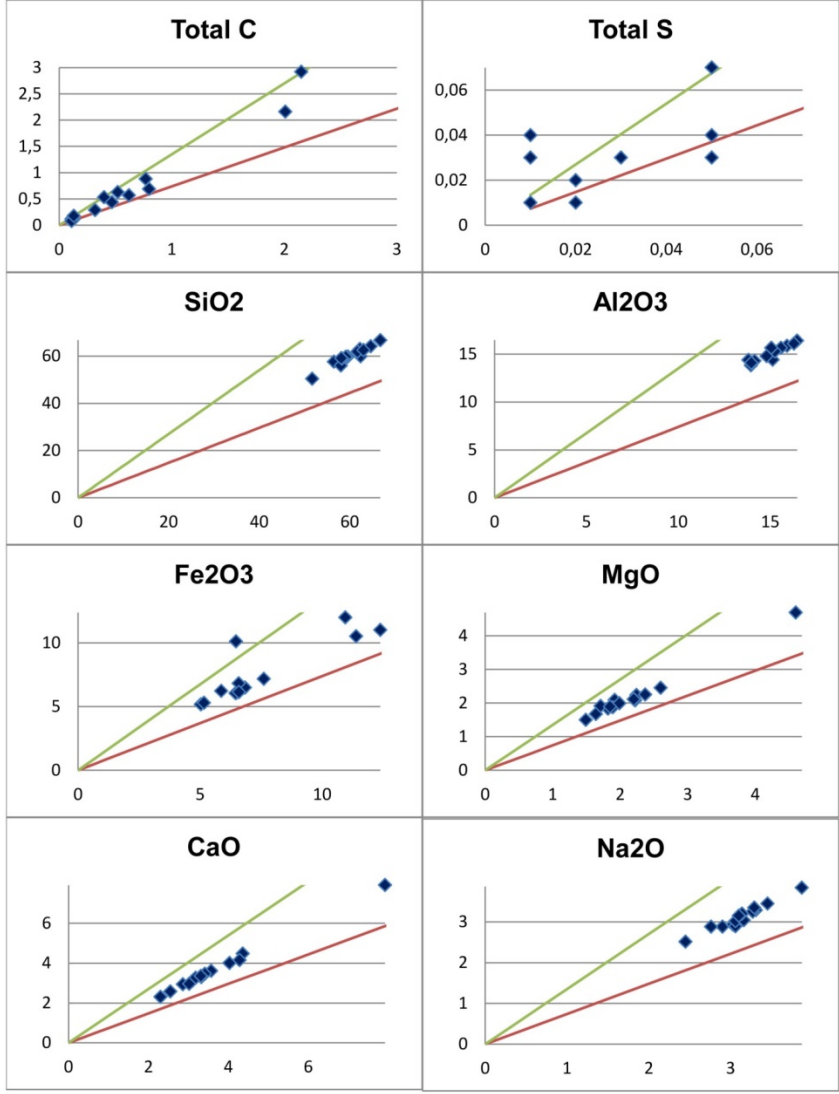


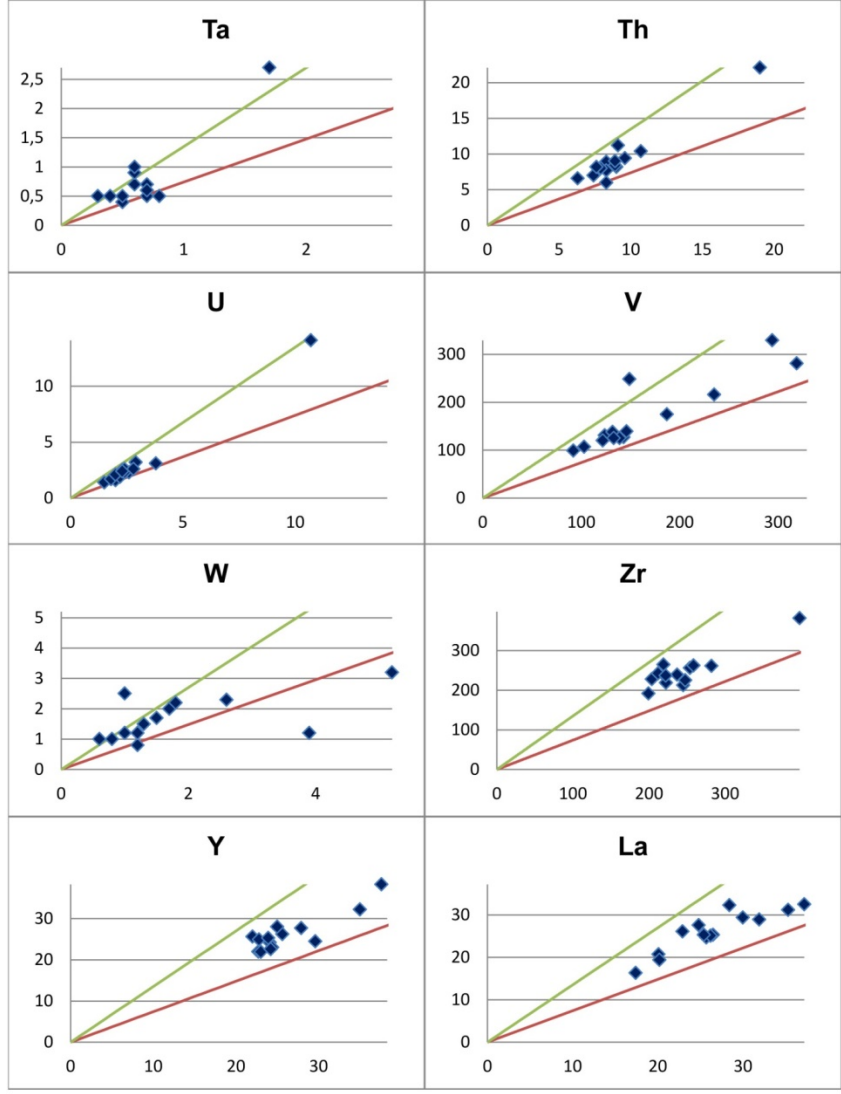
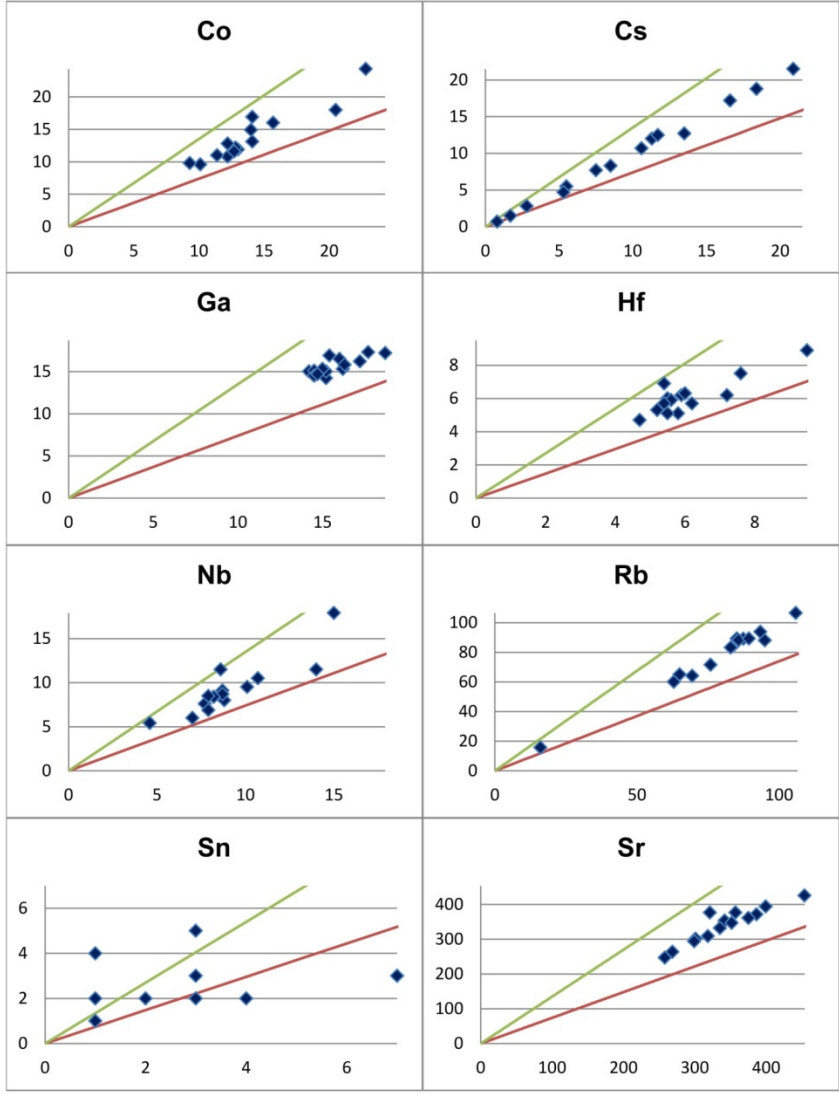


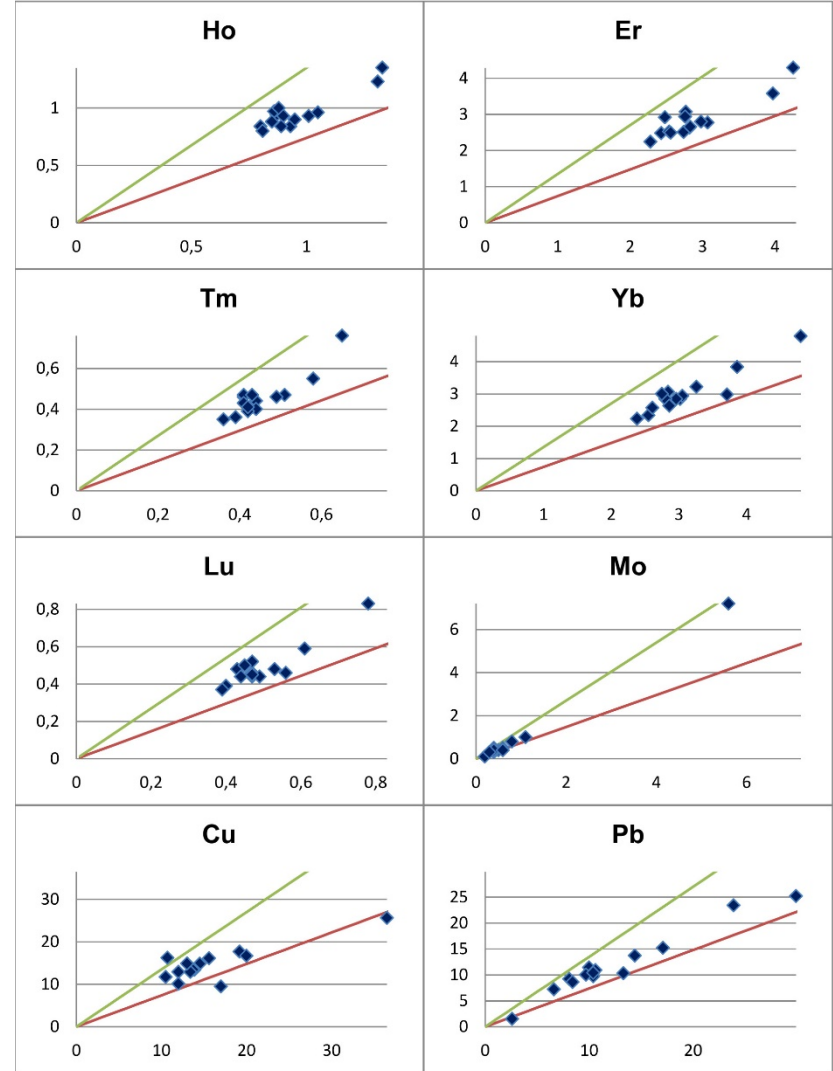
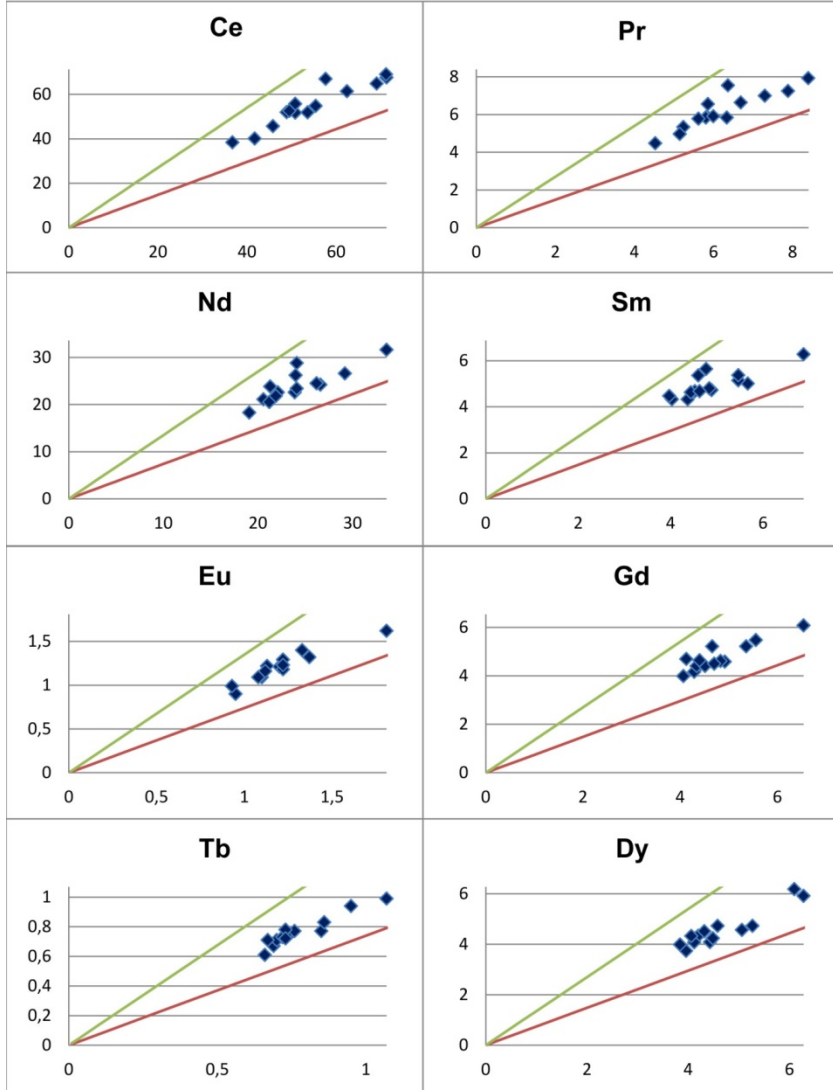


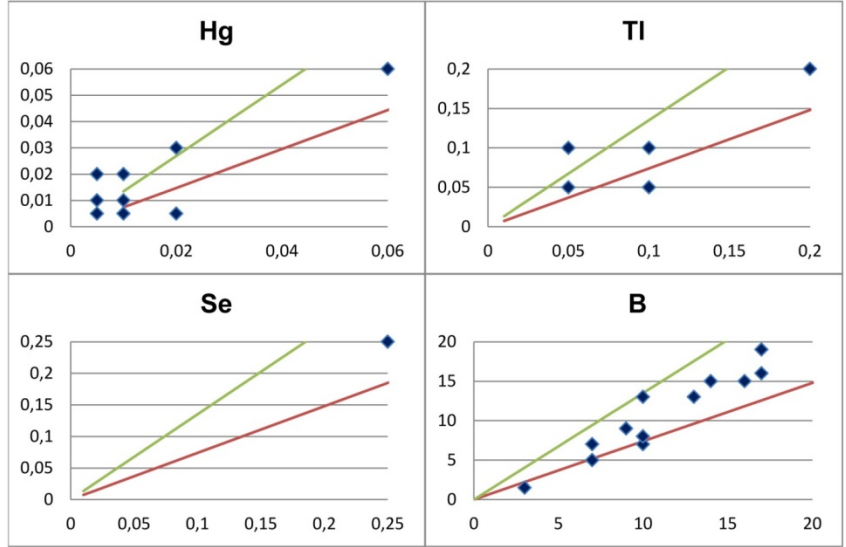
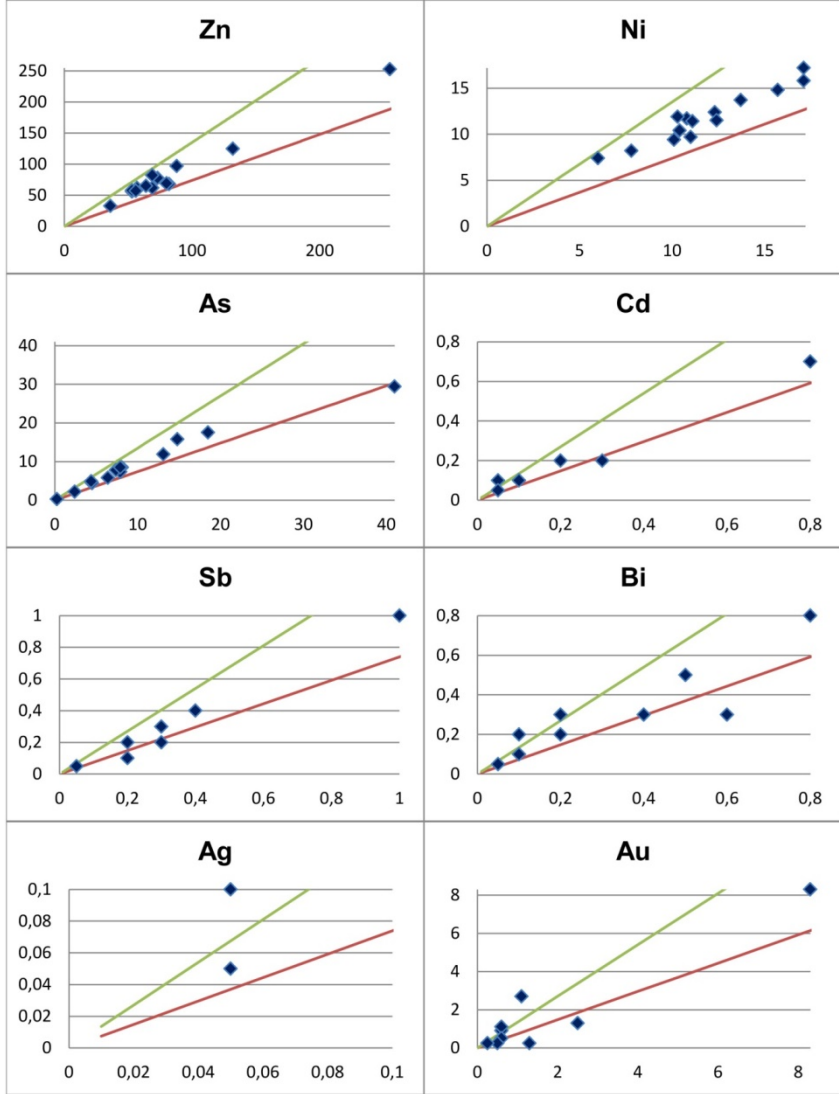


ii) GEMELAS

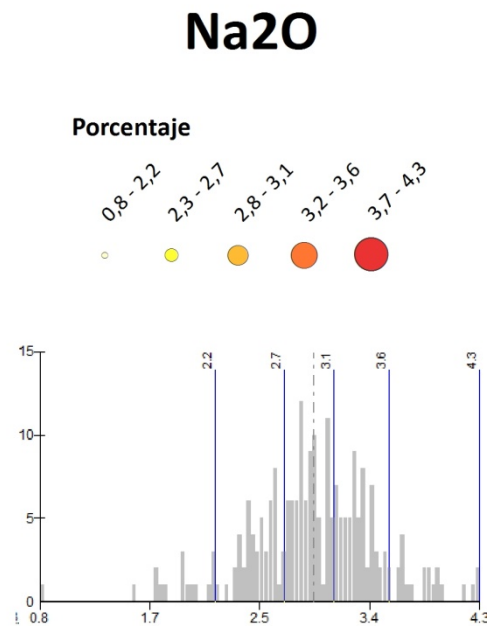
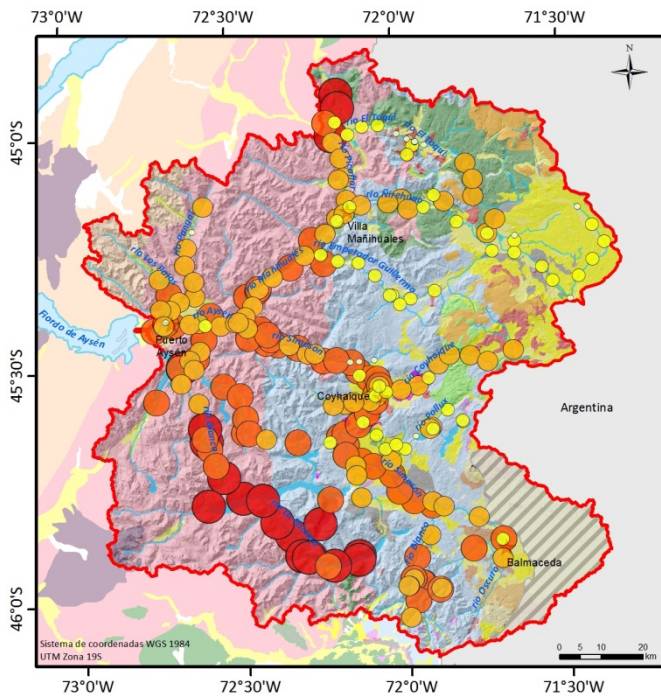
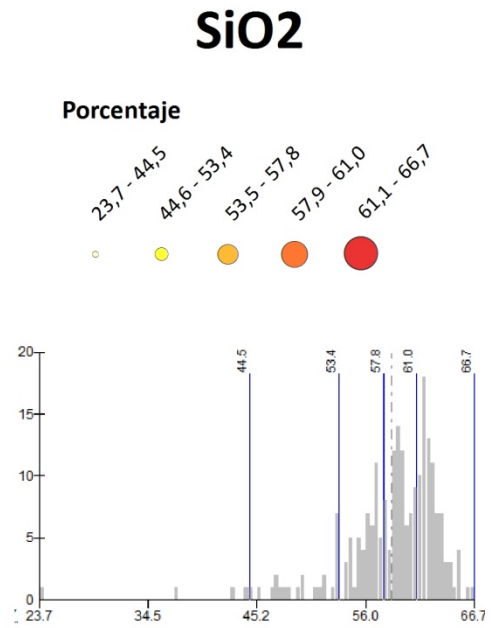
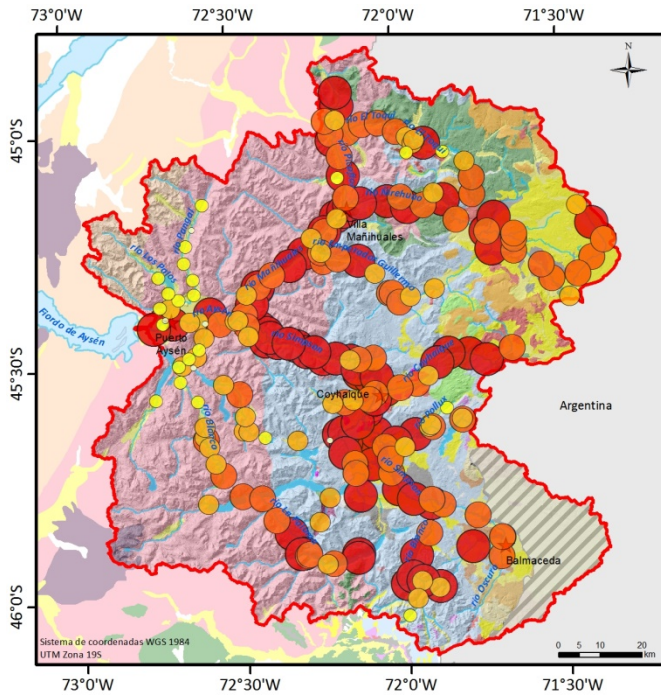


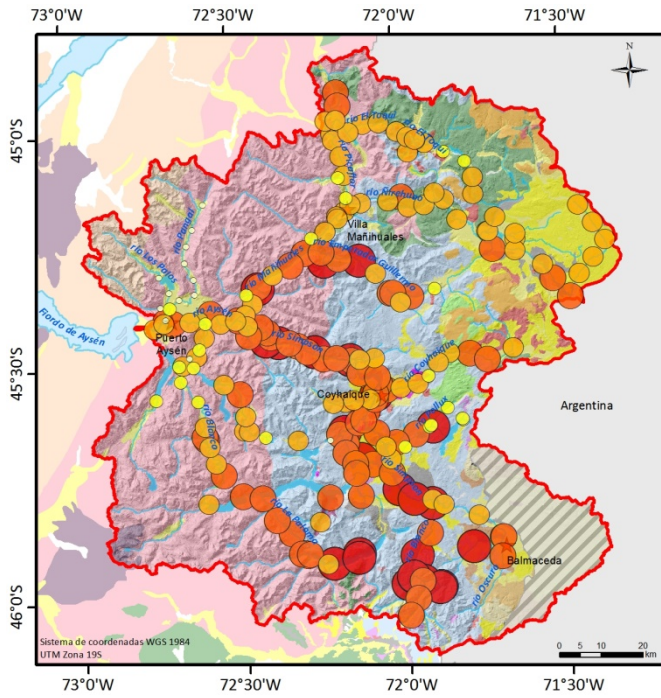






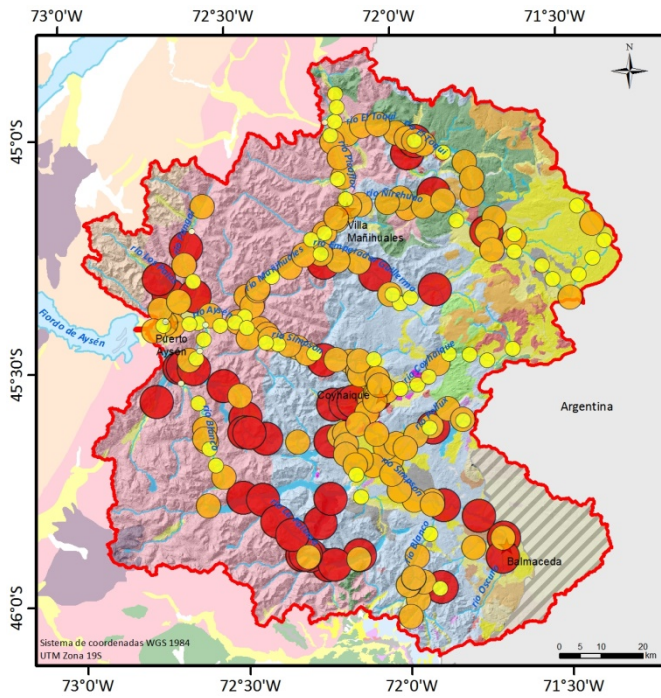
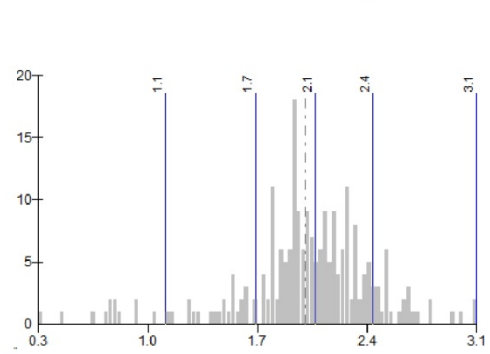
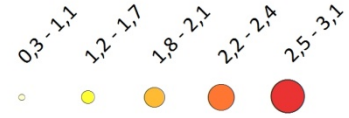
B.4. Mapas Geoquímicos Univariados





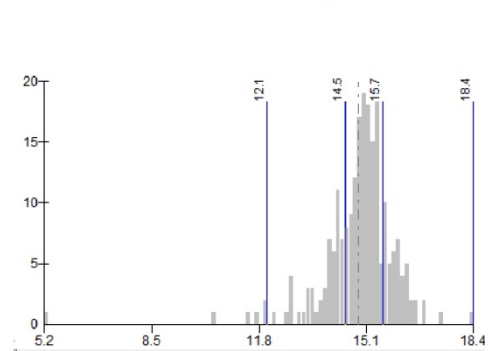
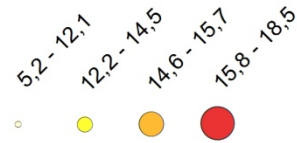
K2O

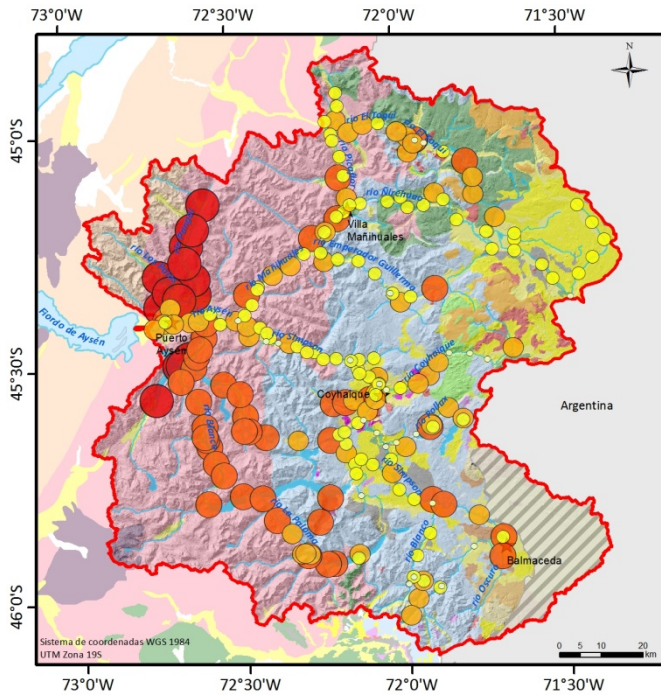
Porcentaje



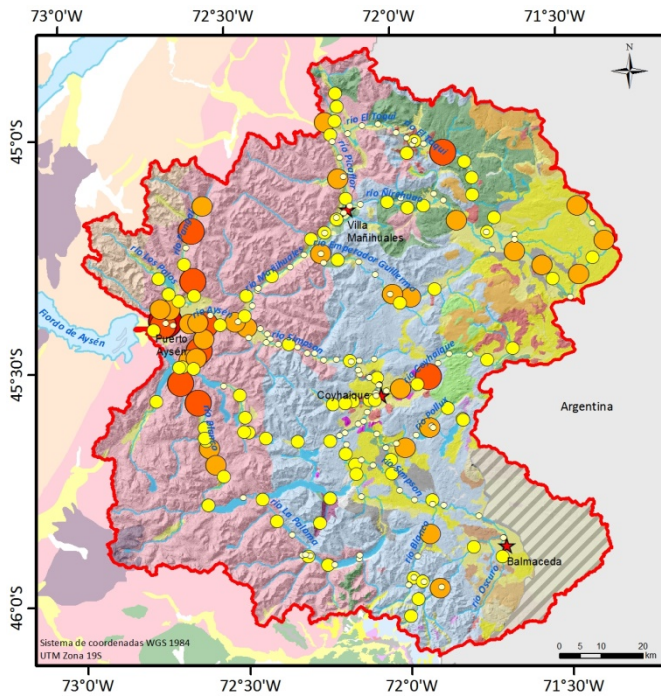
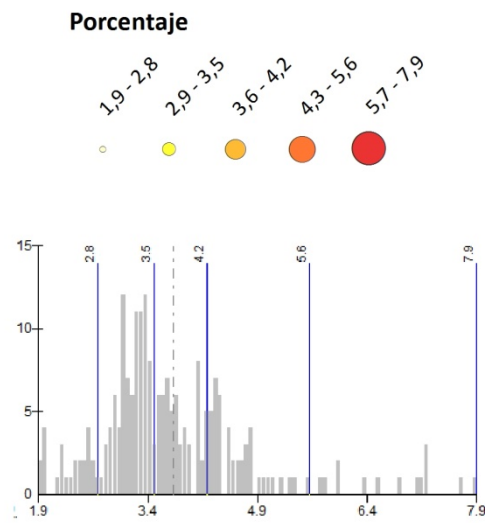
Al2O3

Porcentaje

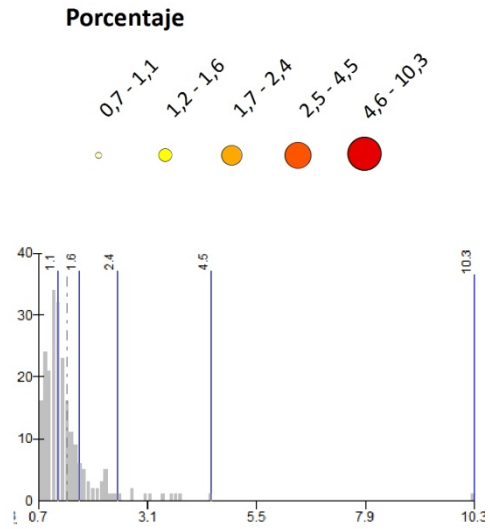


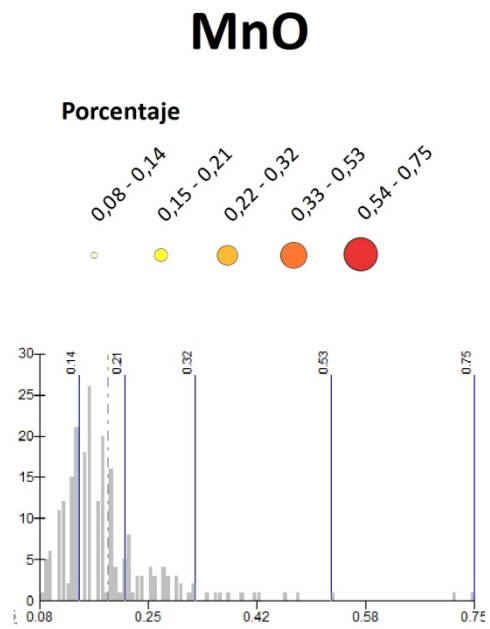
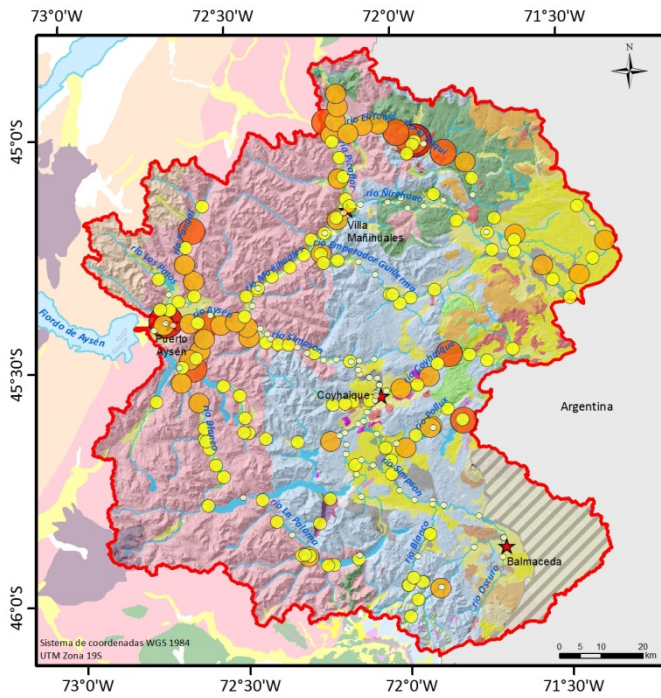
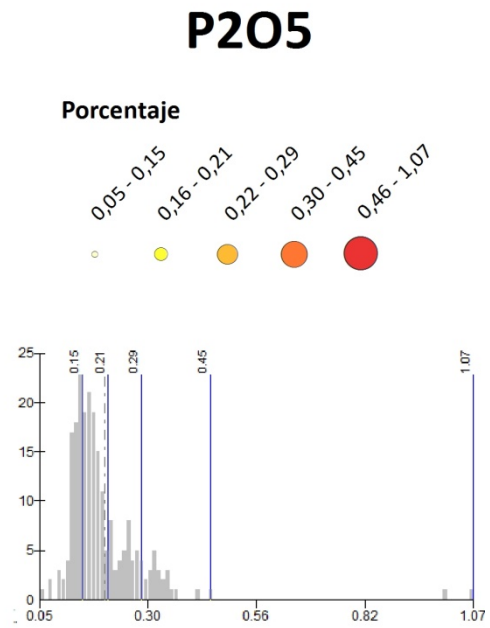
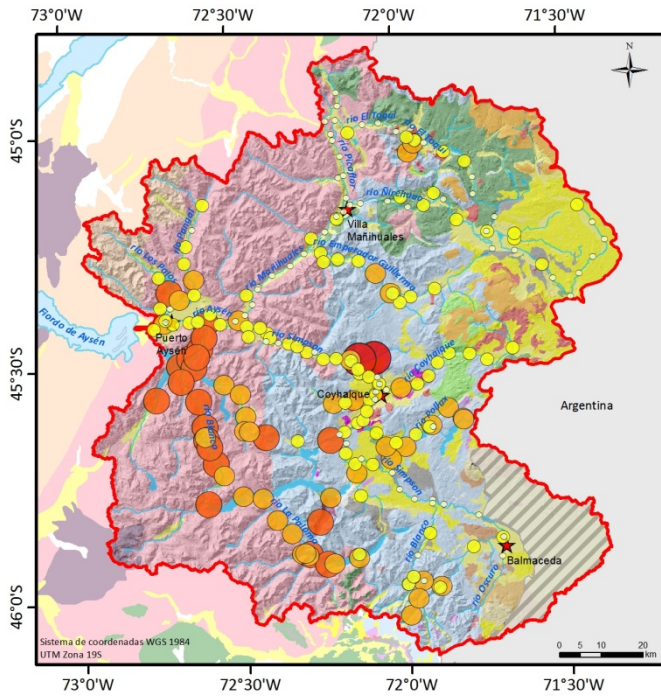


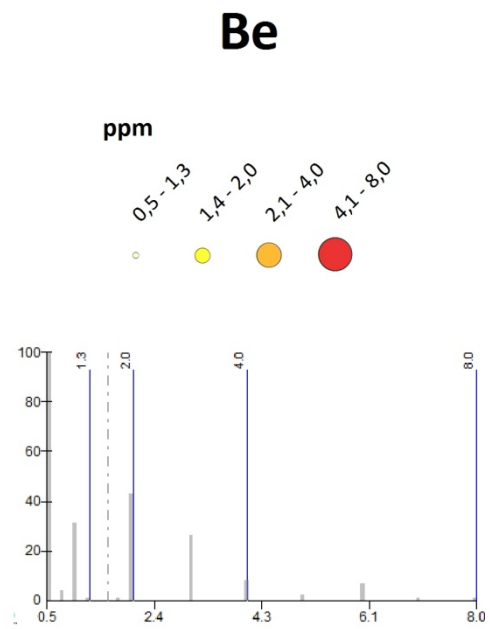
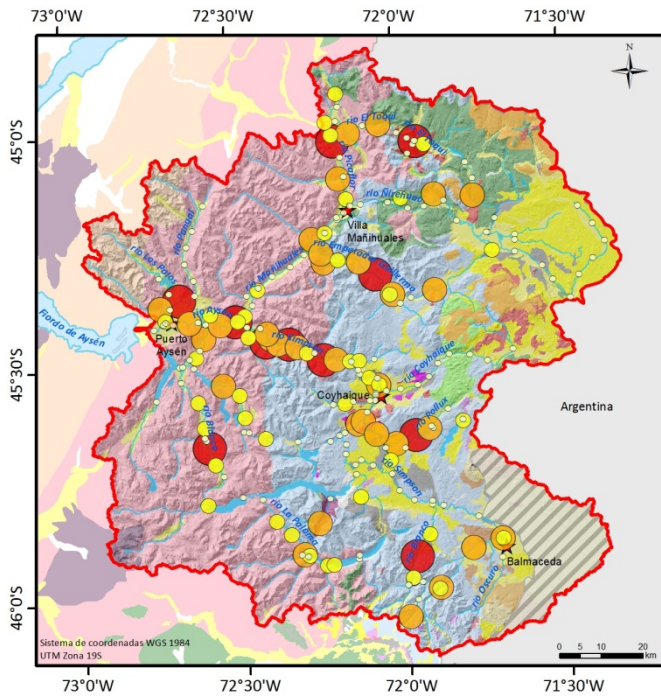
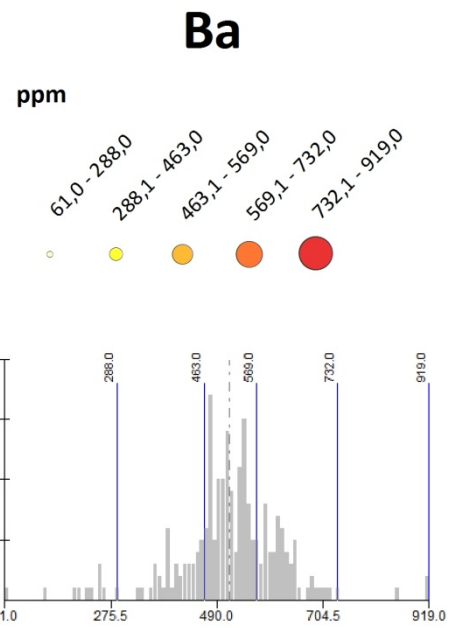
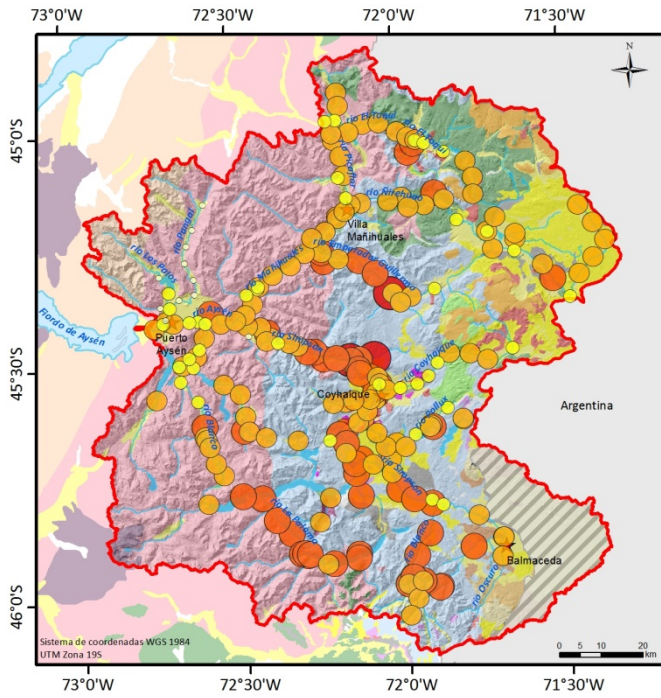
CaO

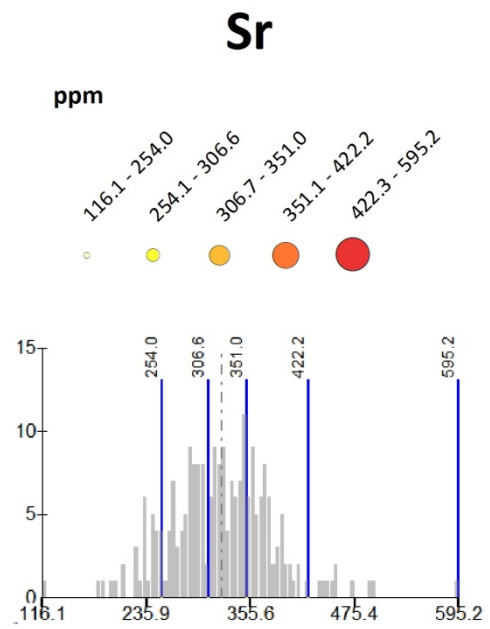
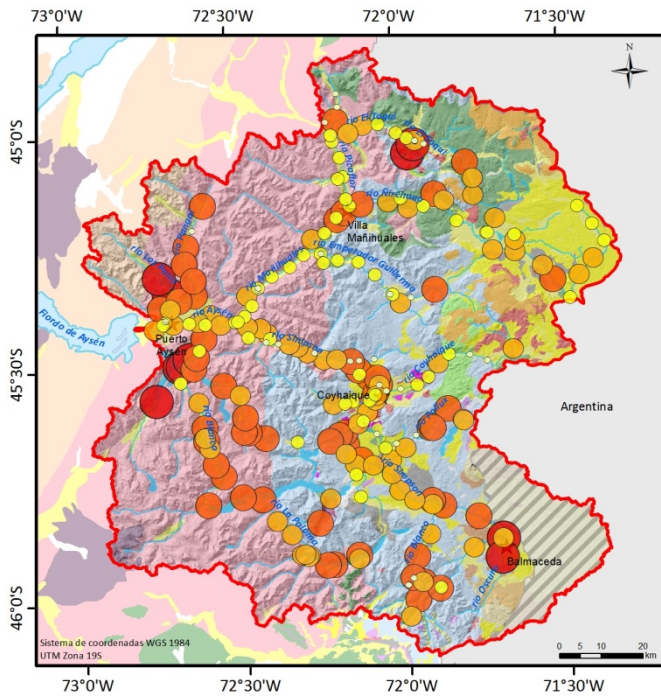
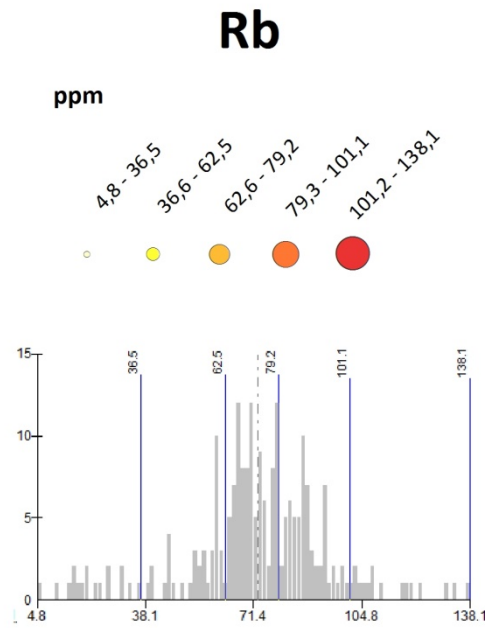
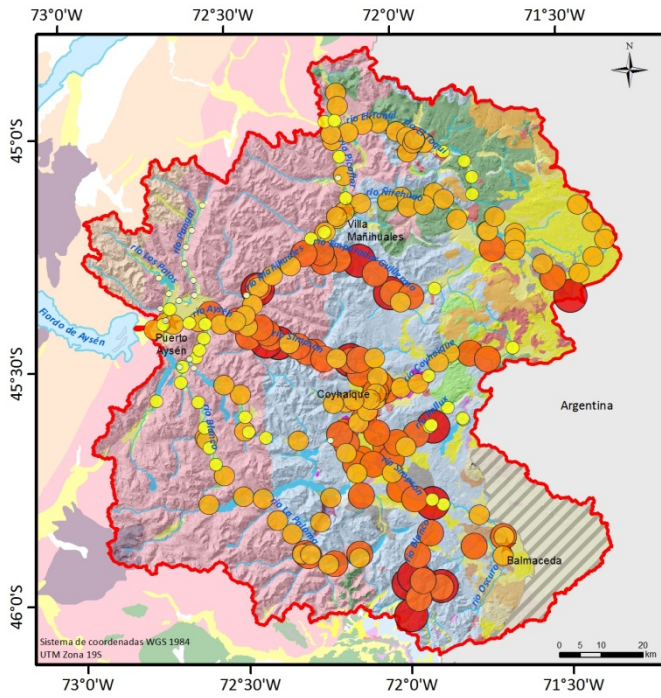


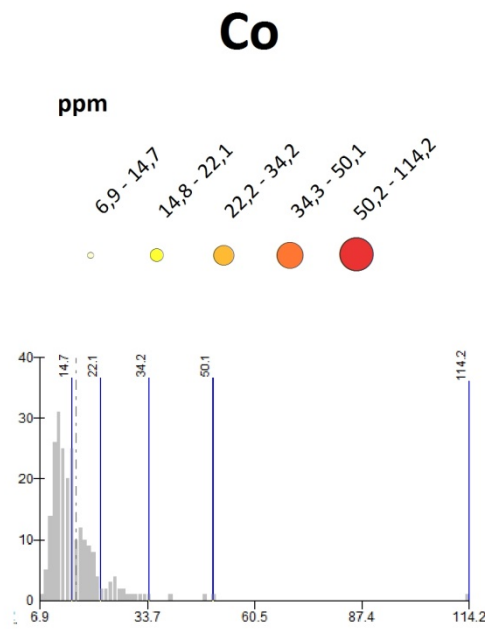
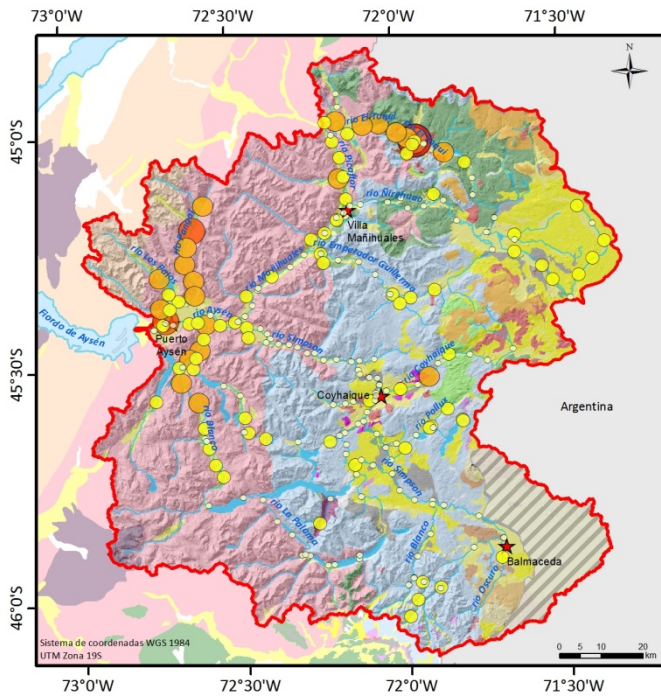
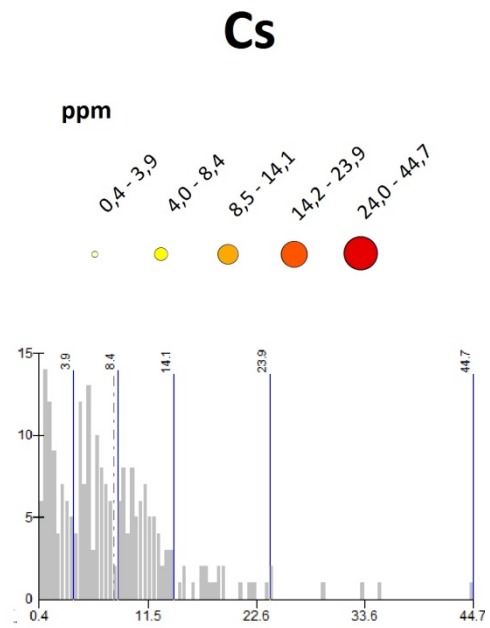
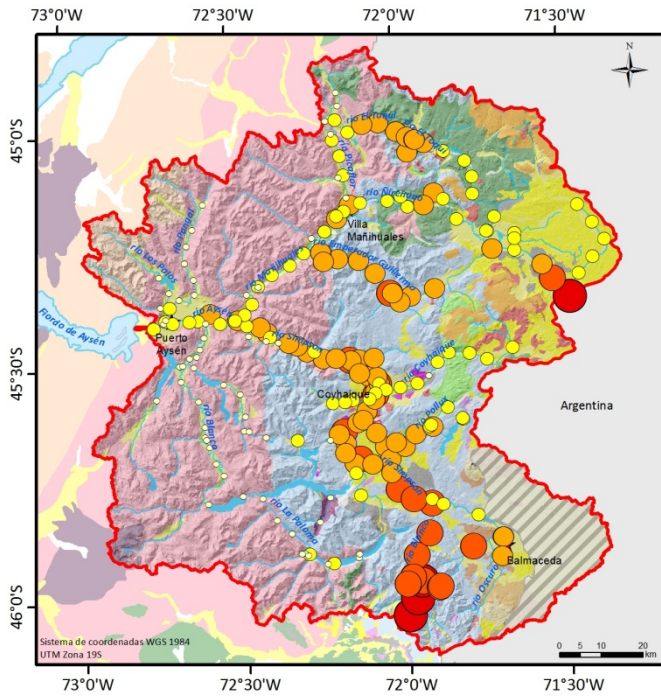
TiO2

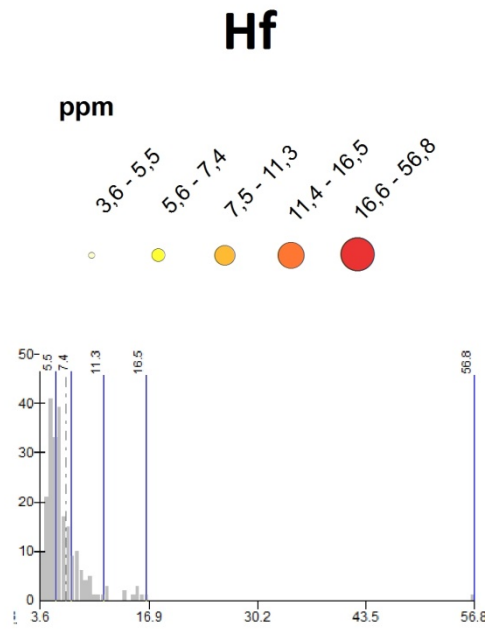
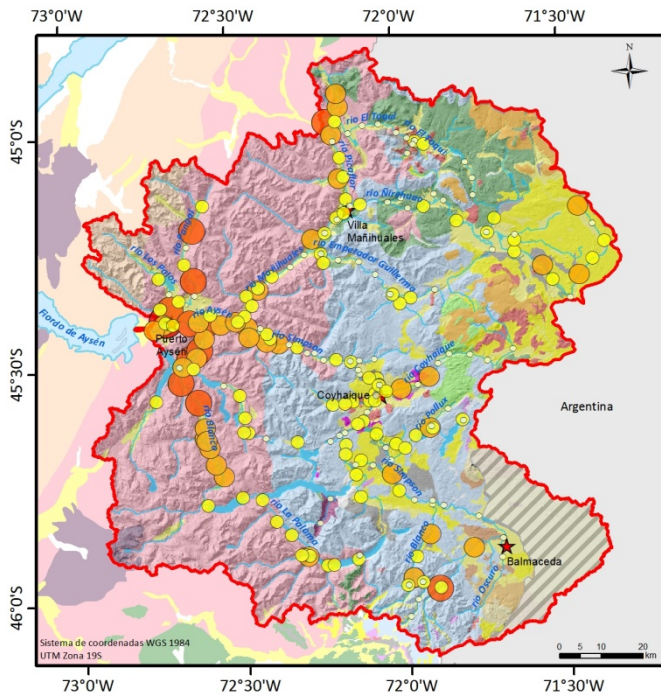
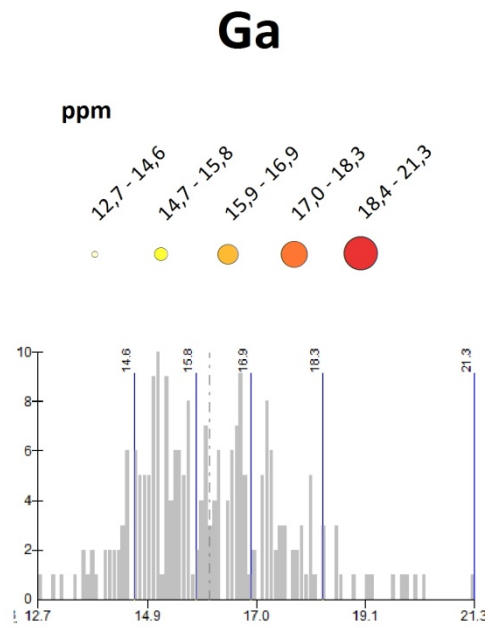
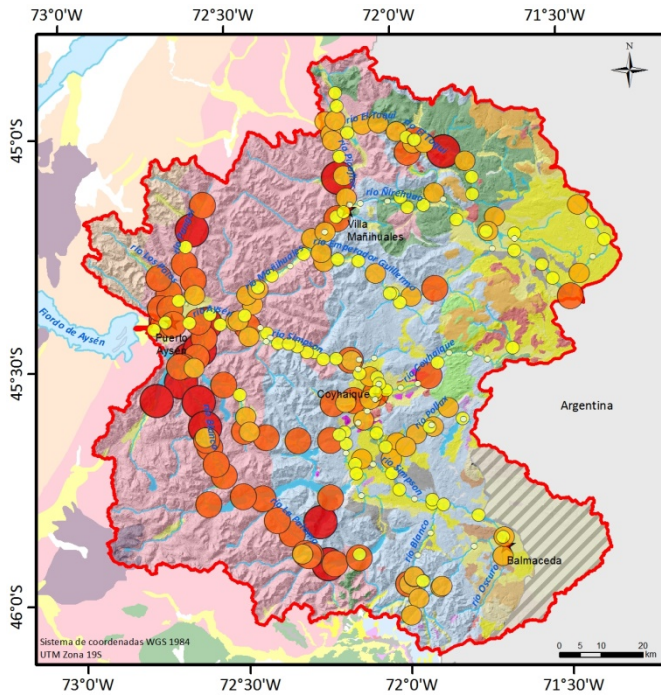


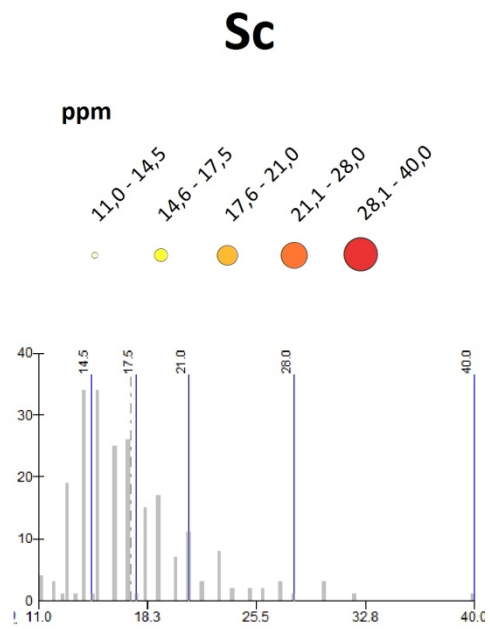
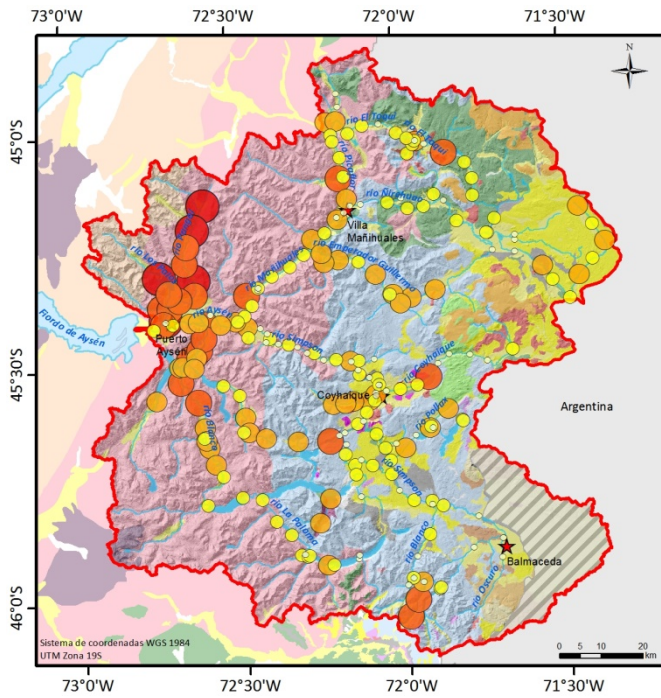
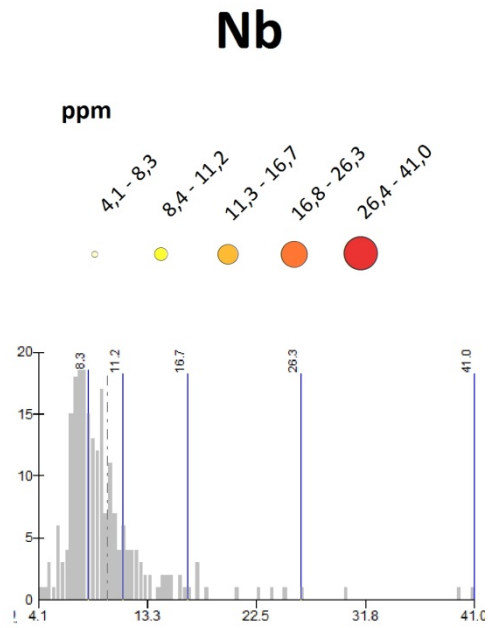
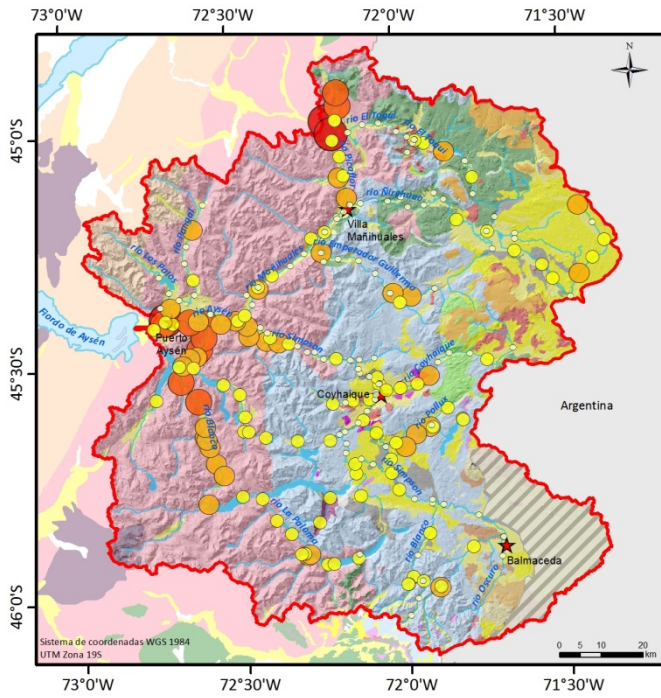


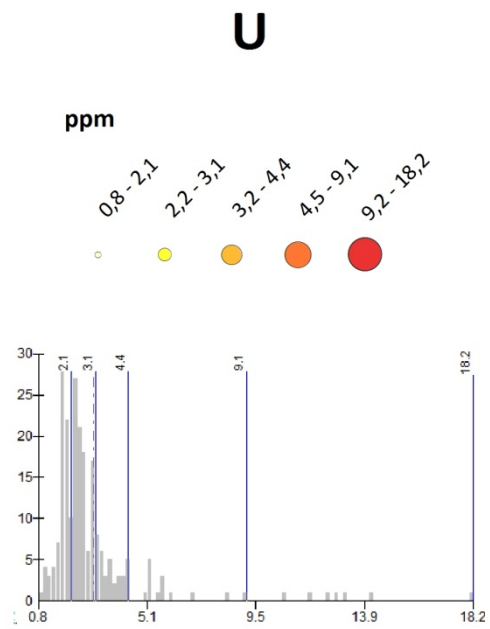
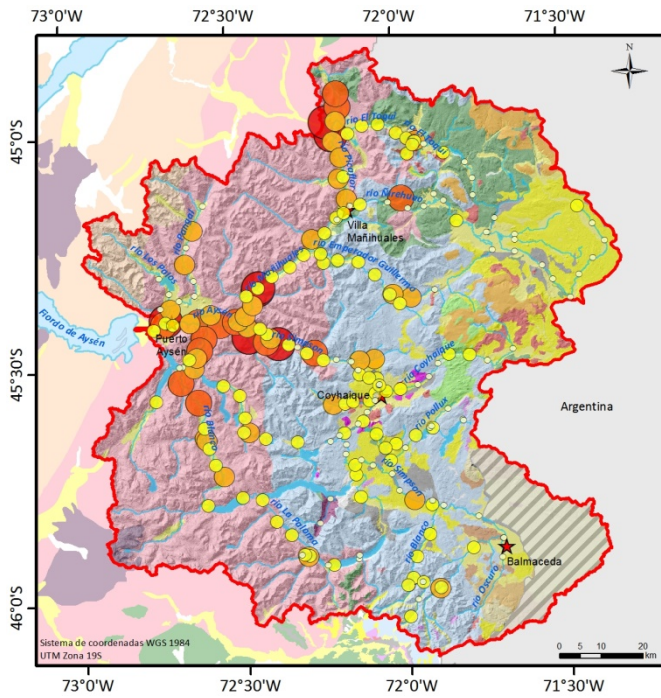
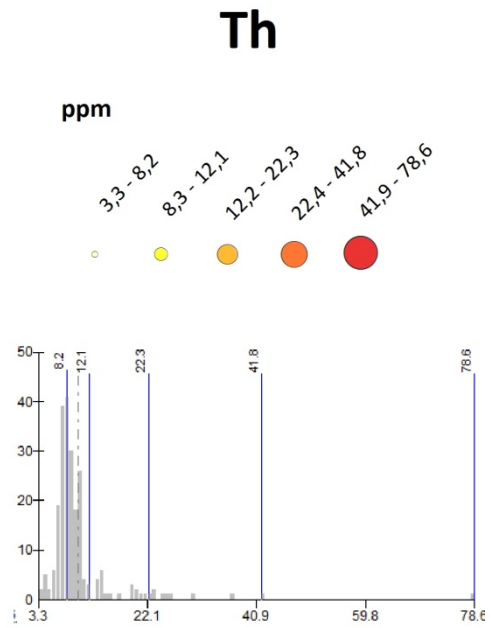
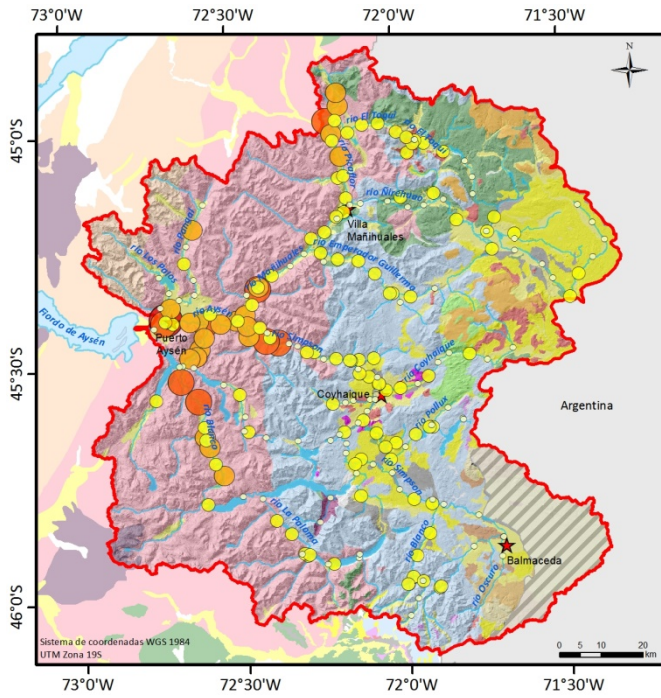


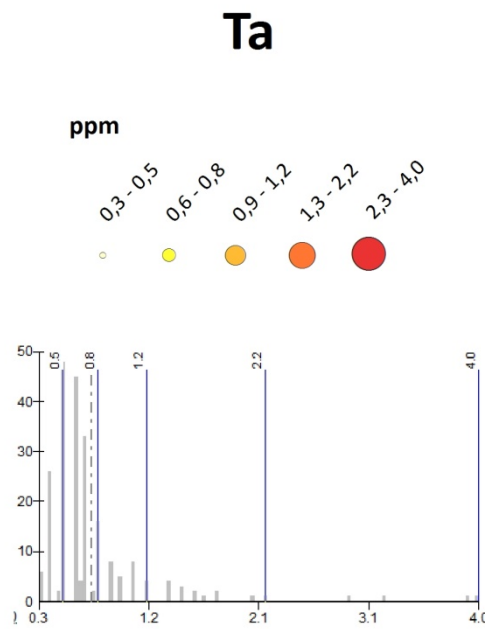
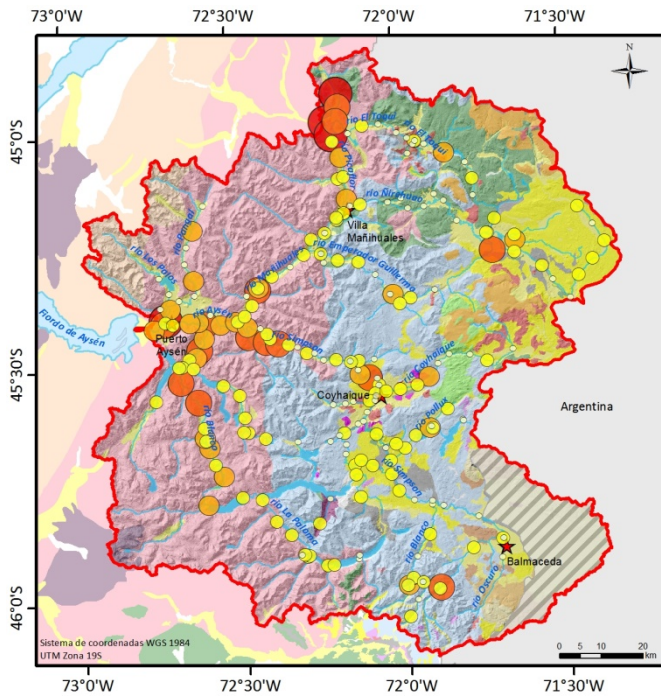
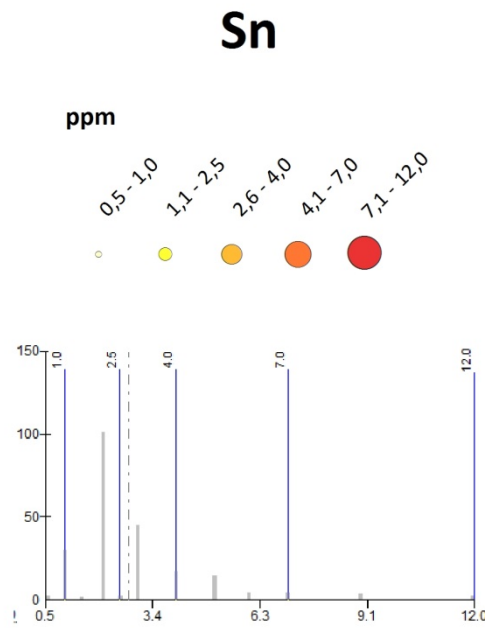
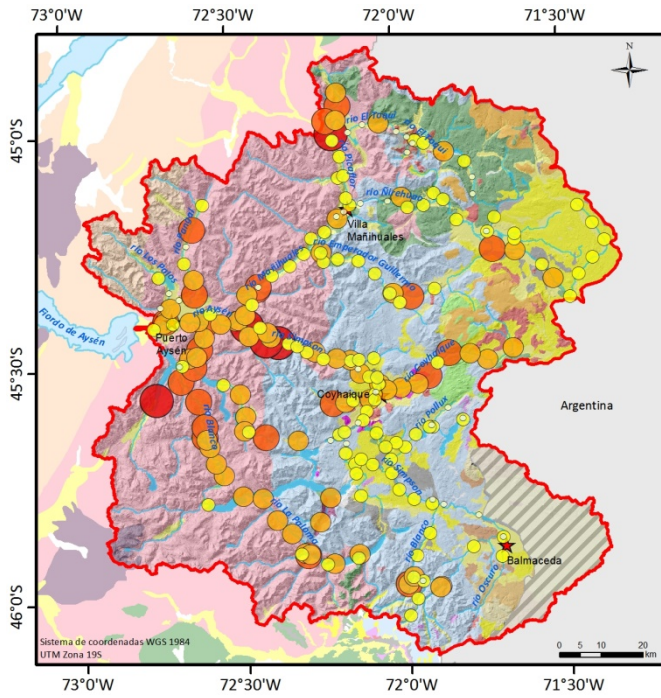


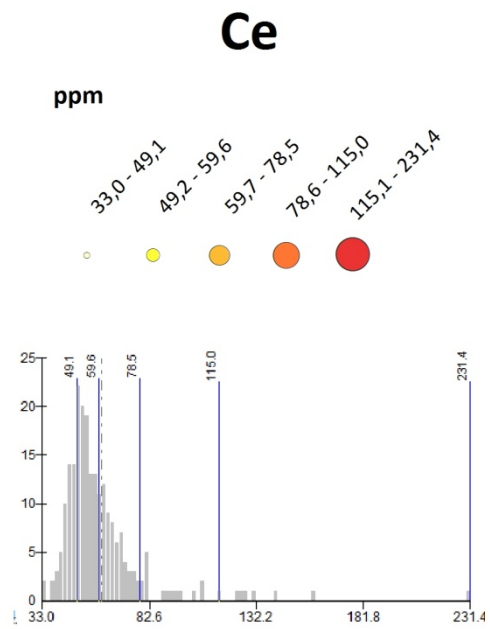
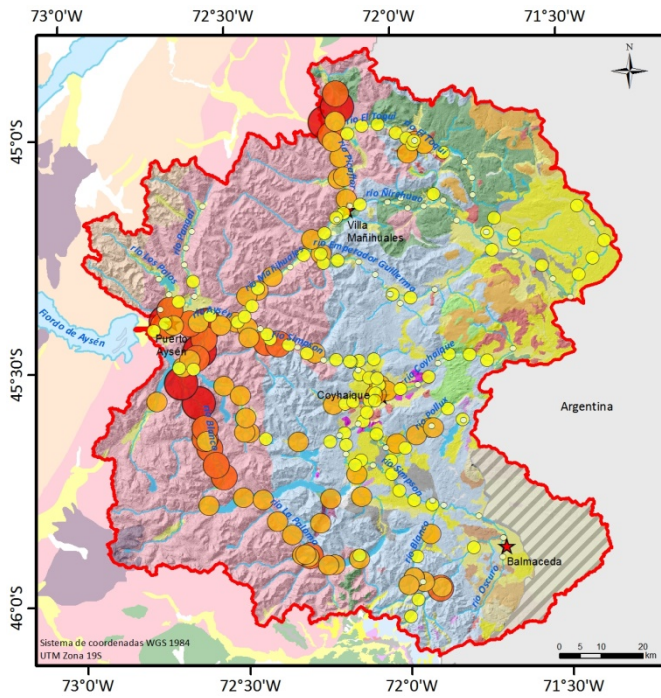
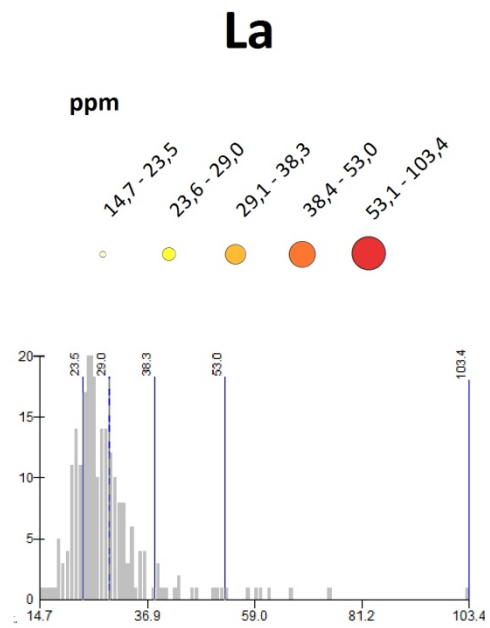
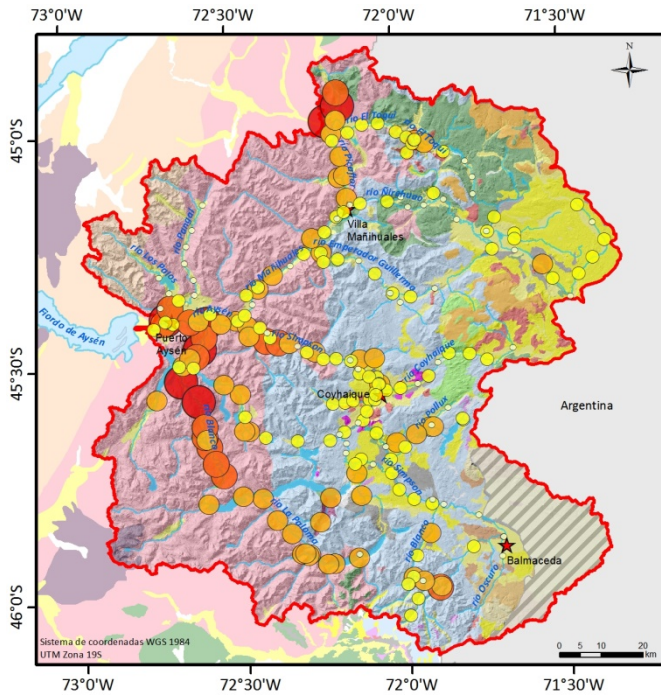


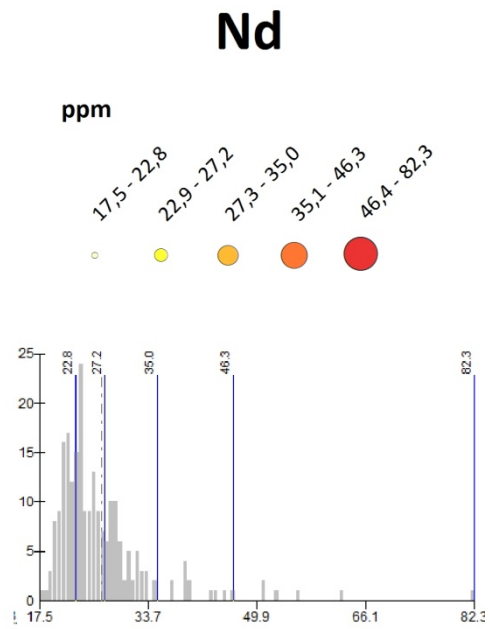
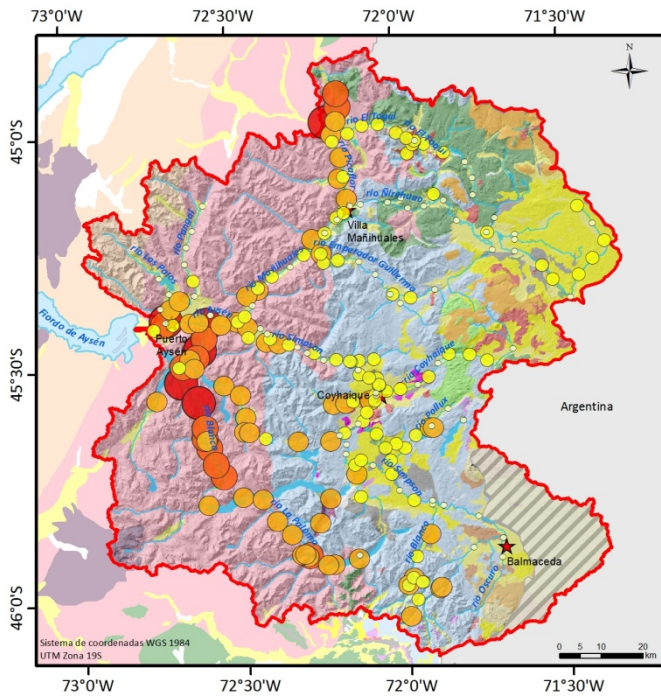
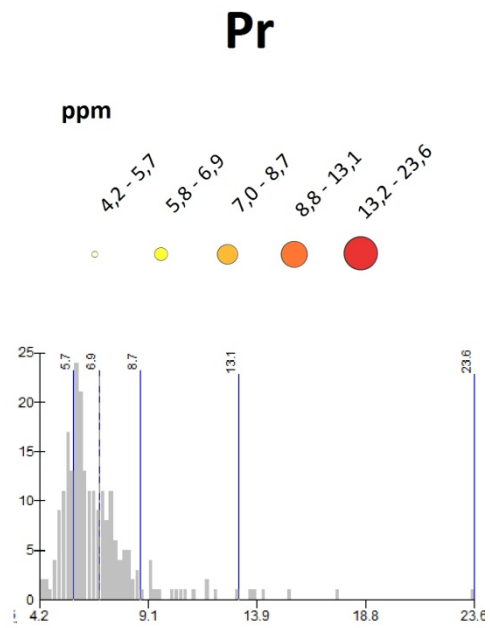
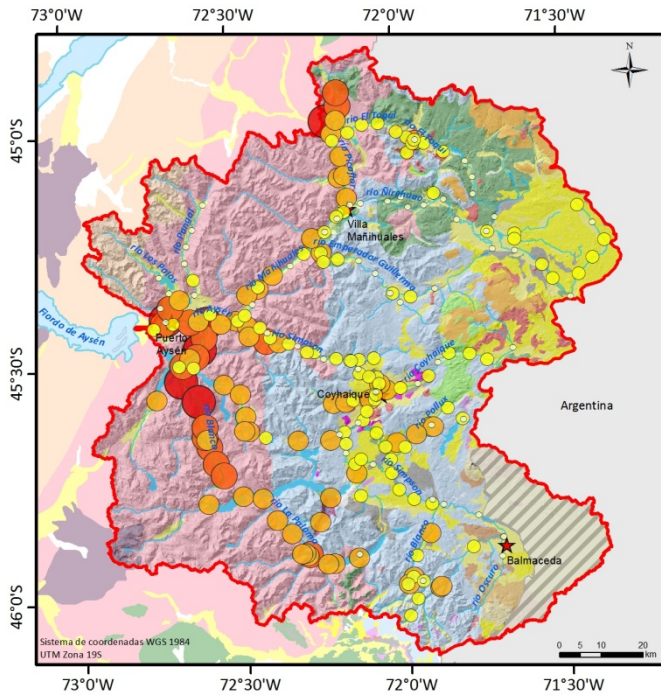


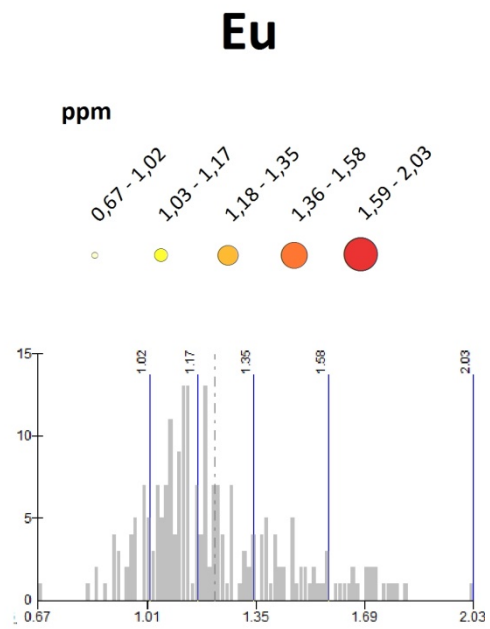
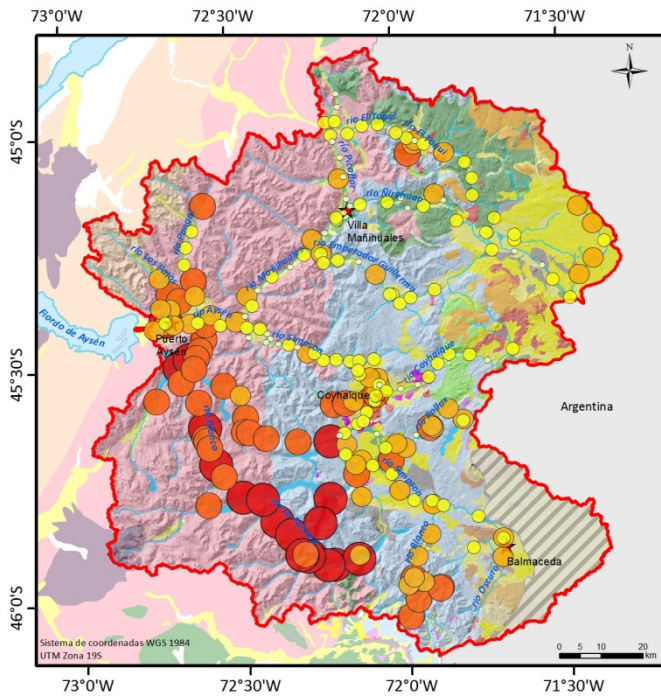
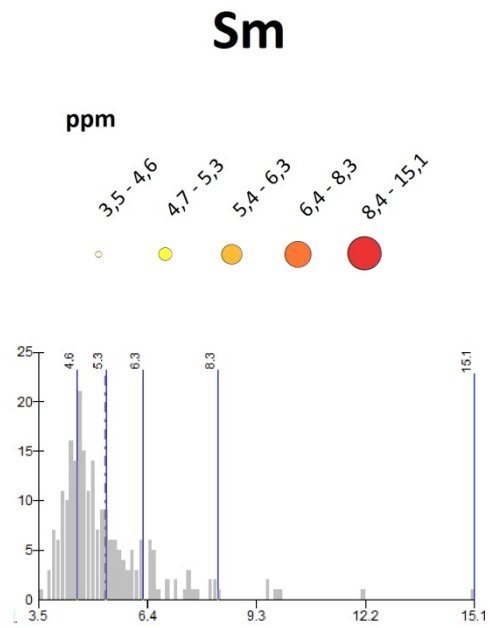
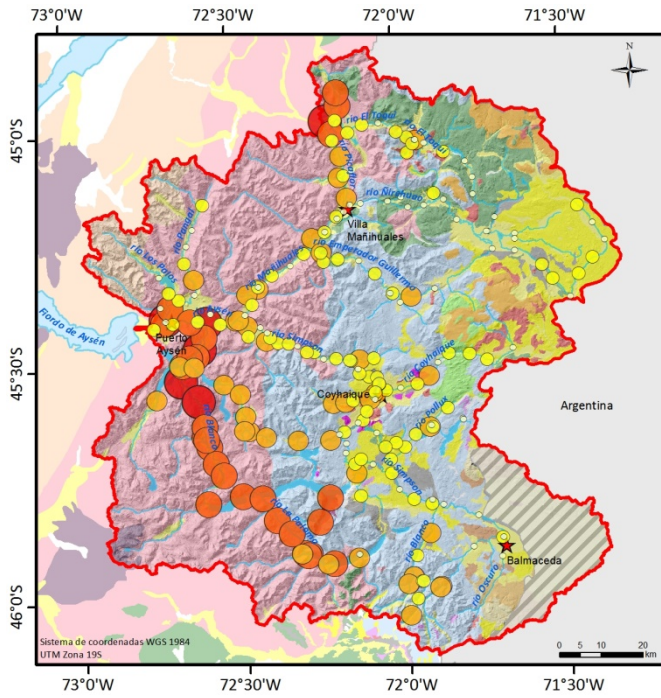


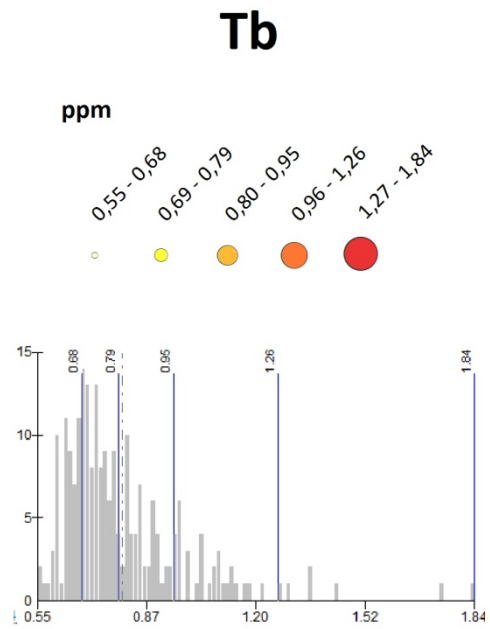
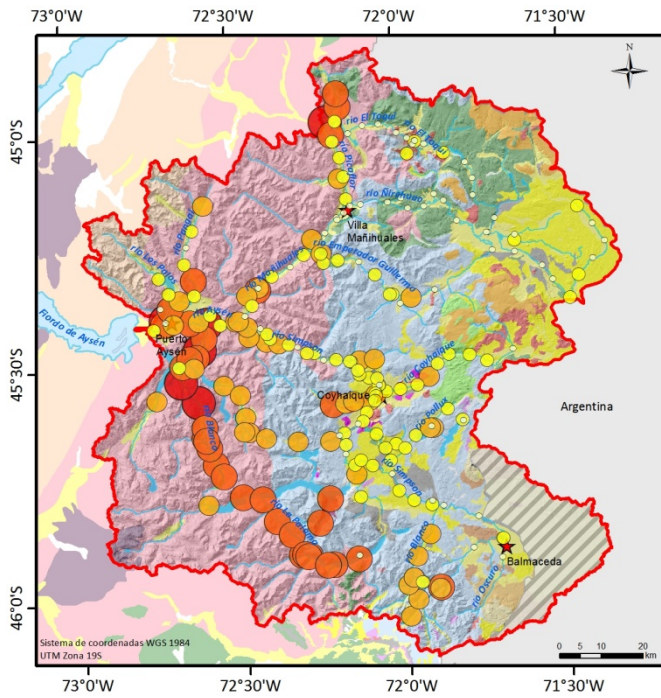
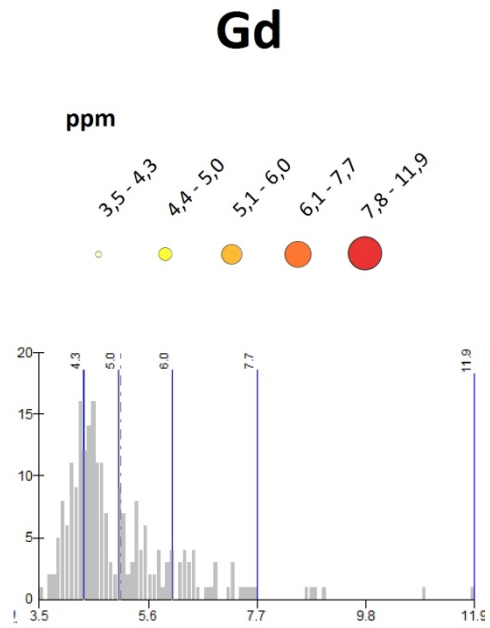
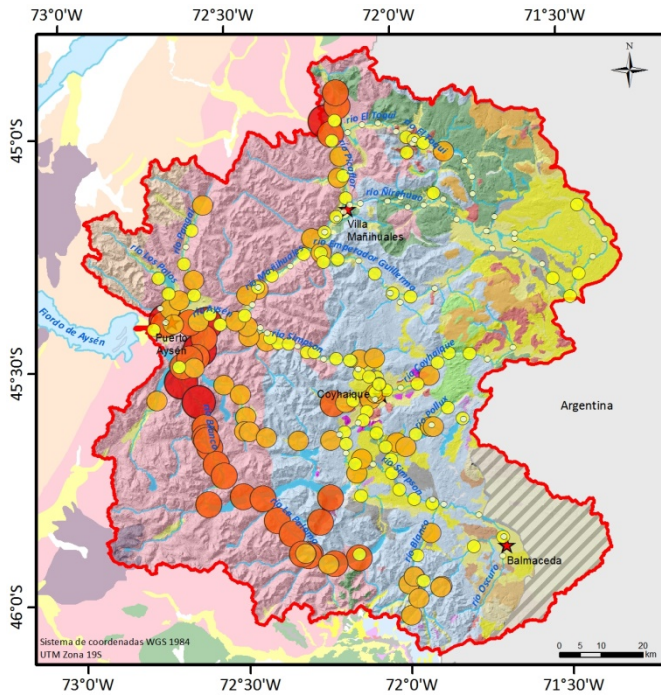


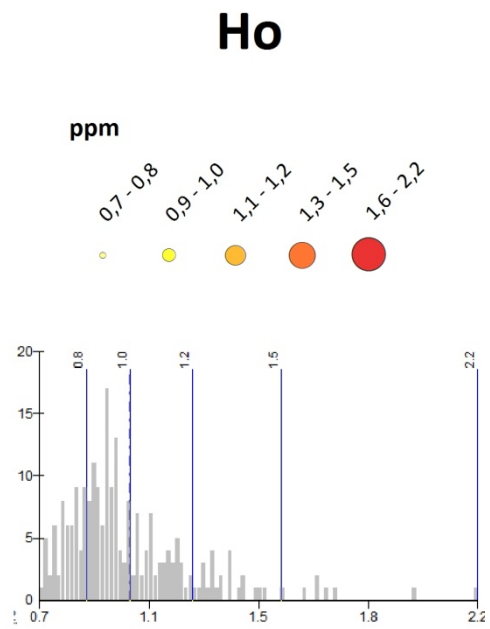
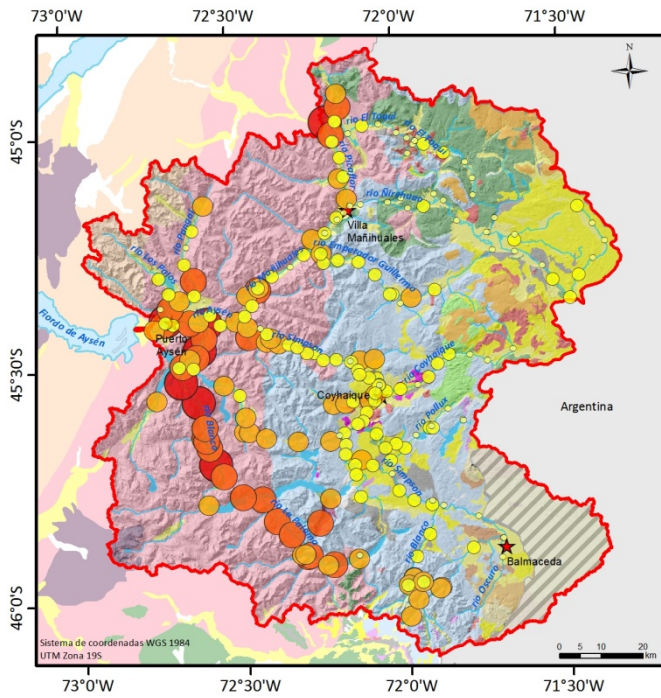
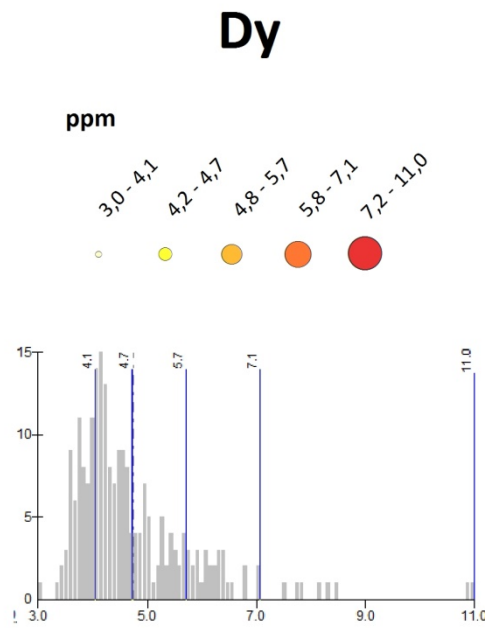
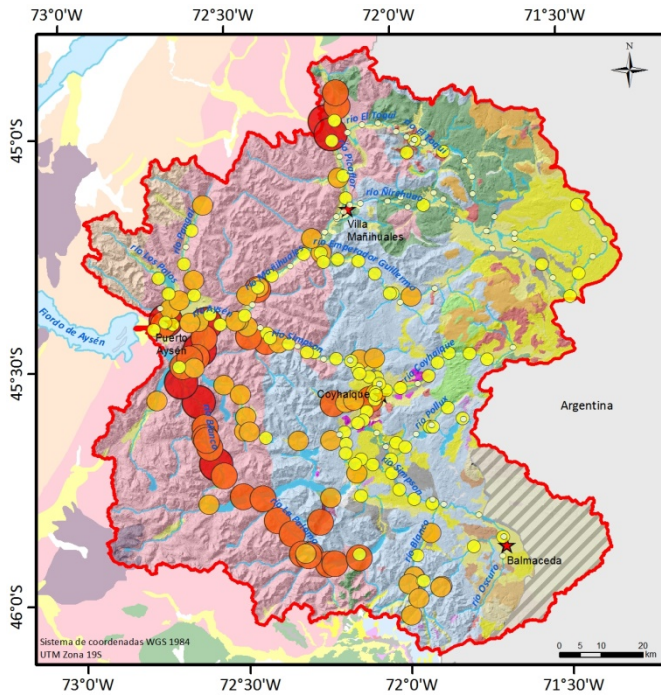


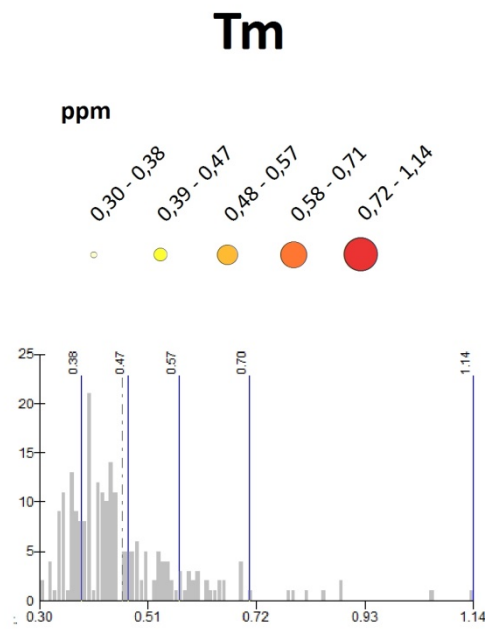
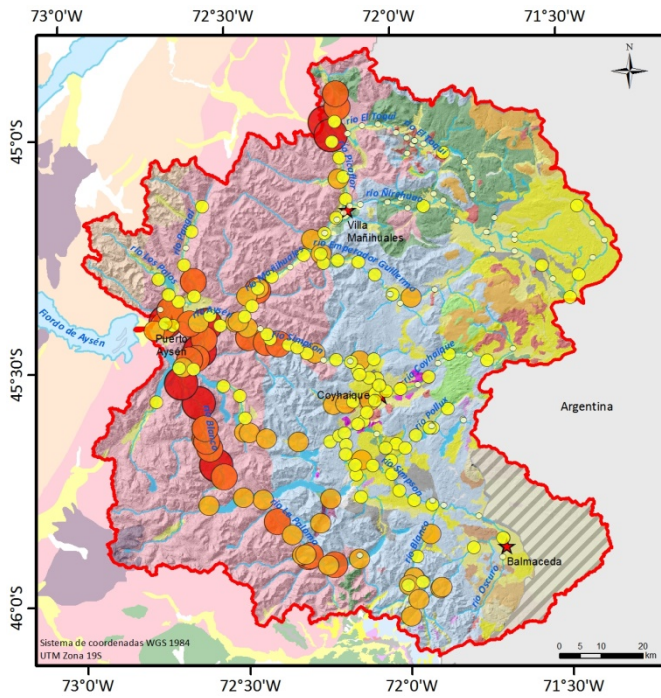
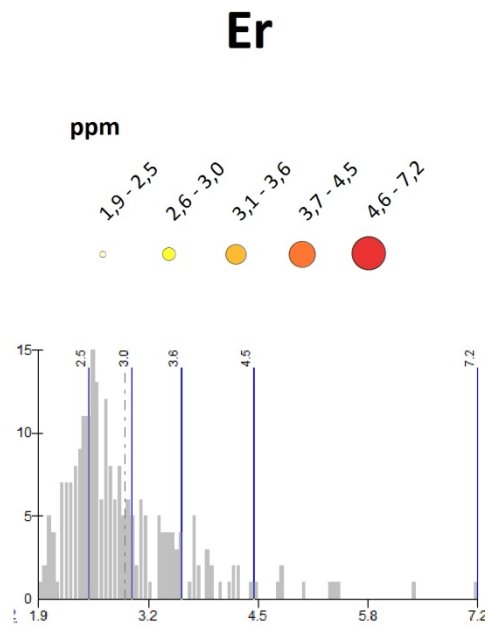
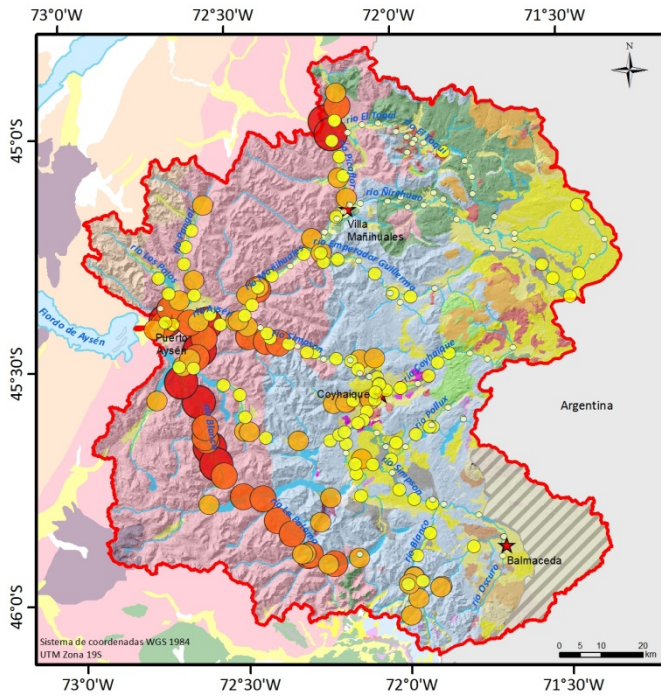


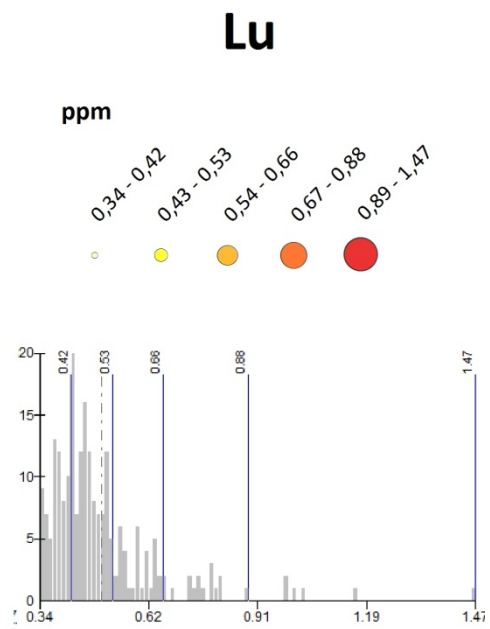
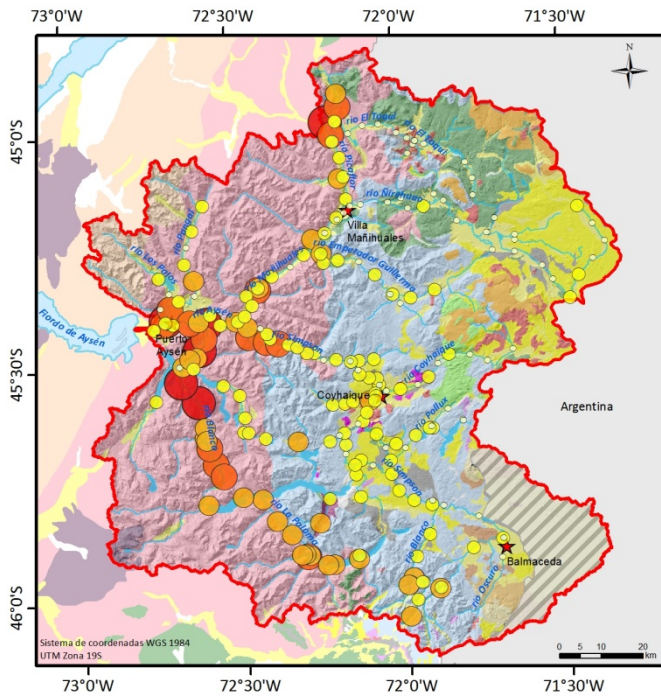
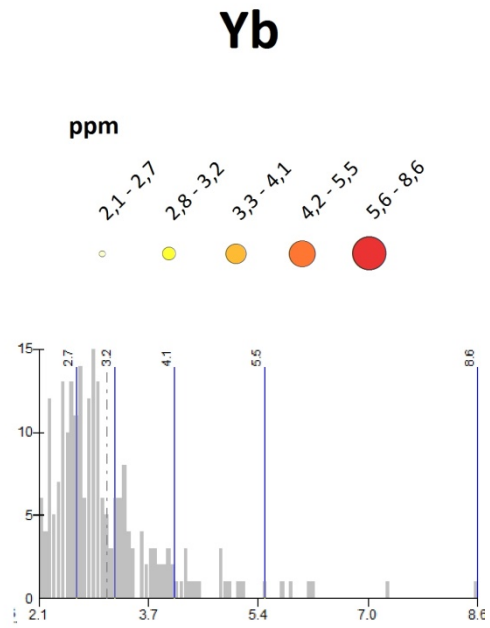
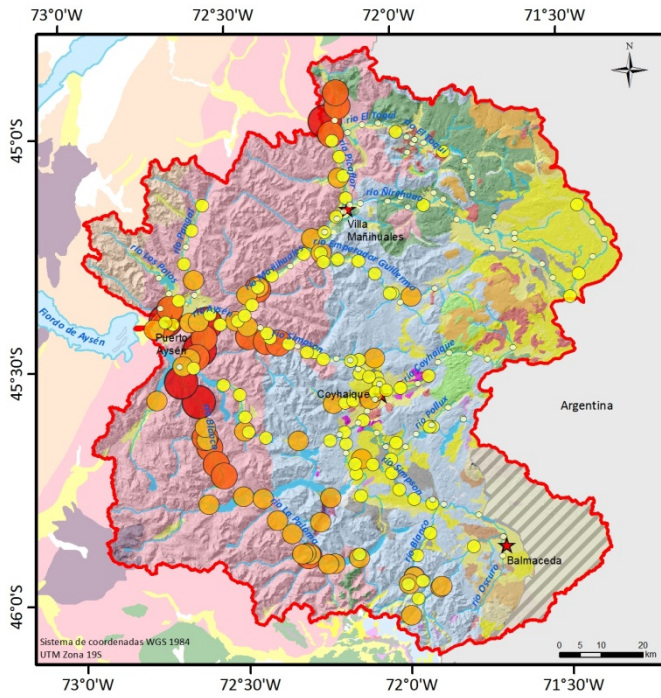


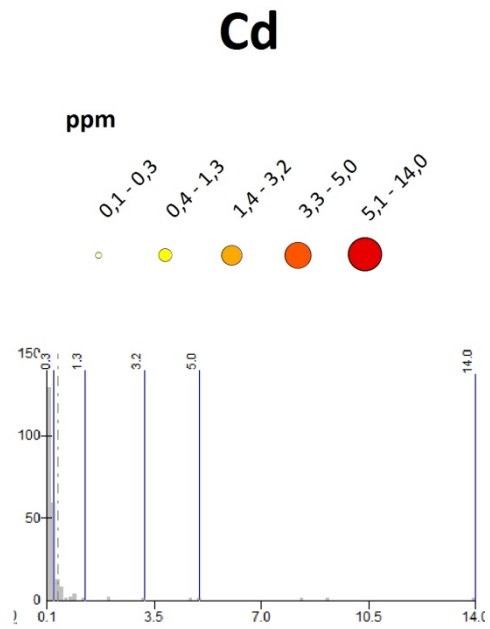
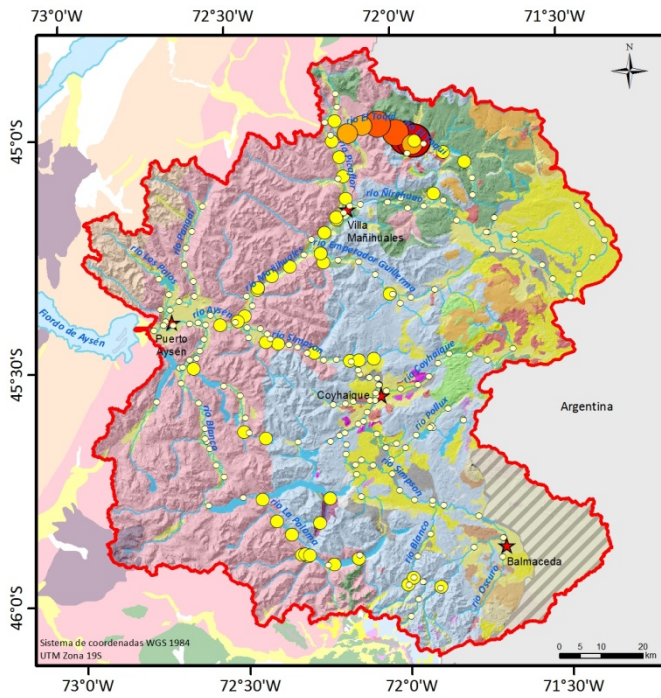
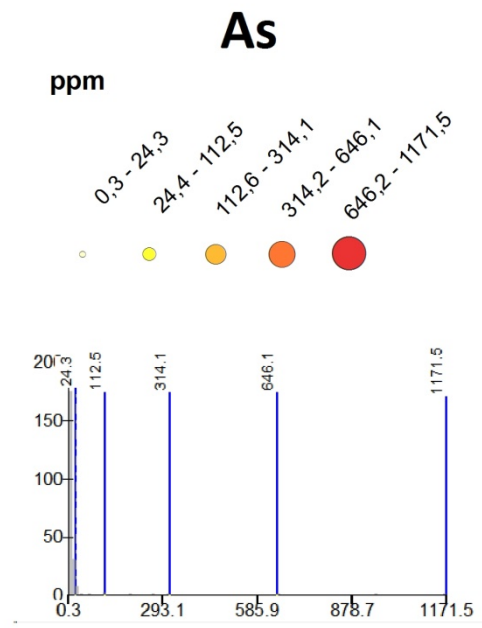
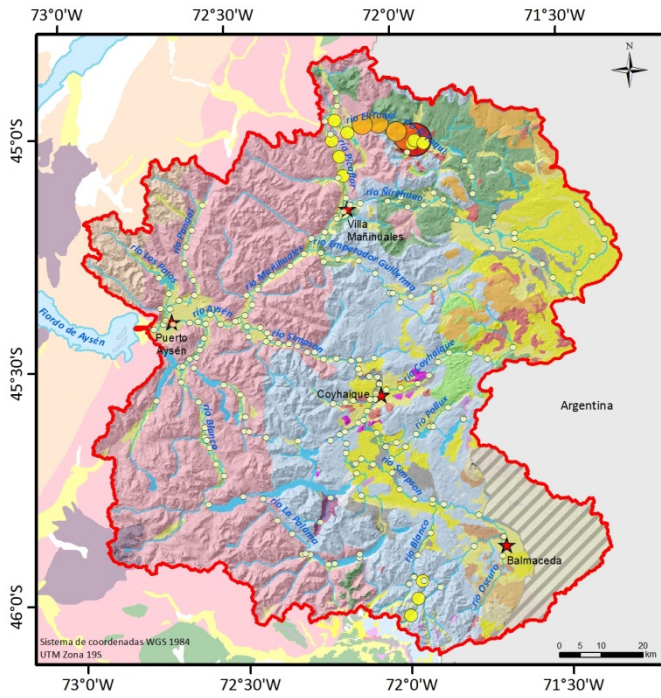


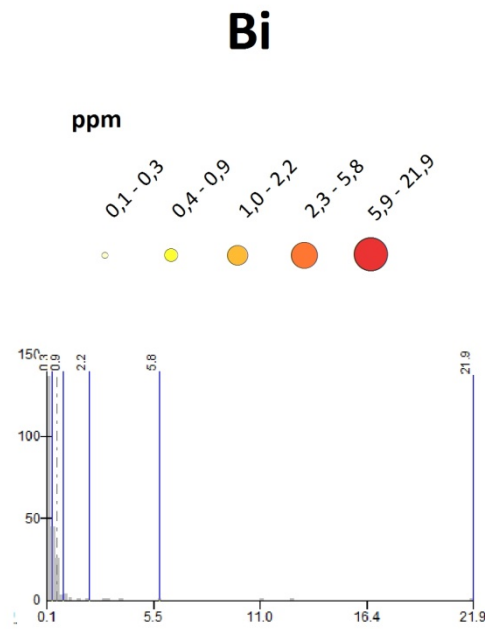
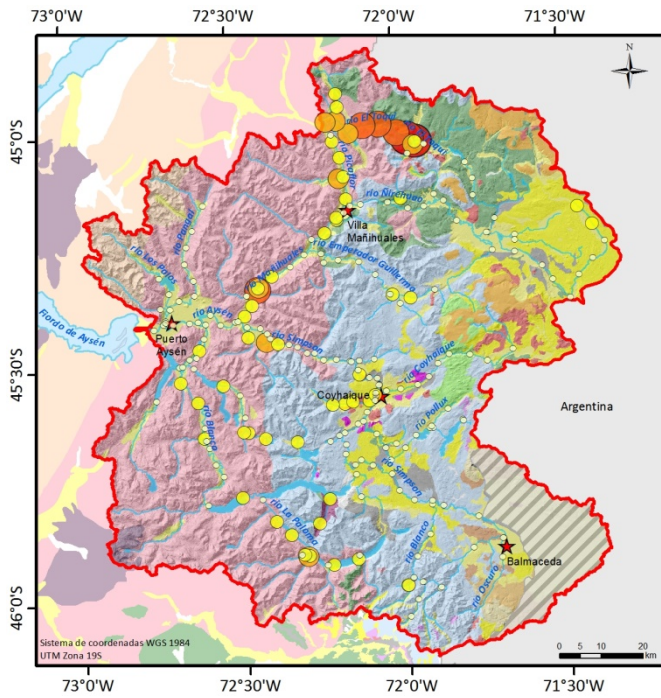
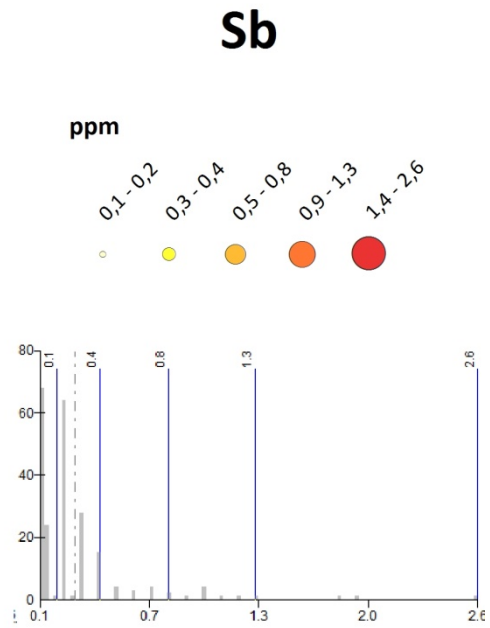
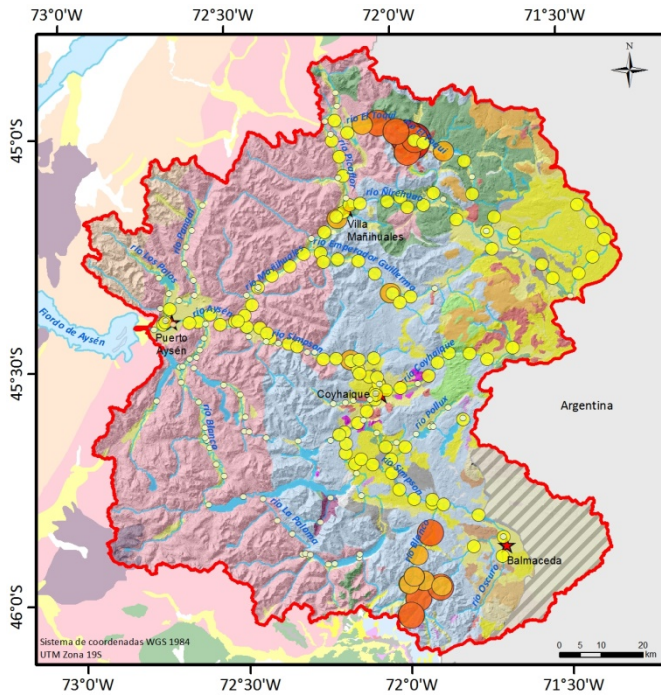


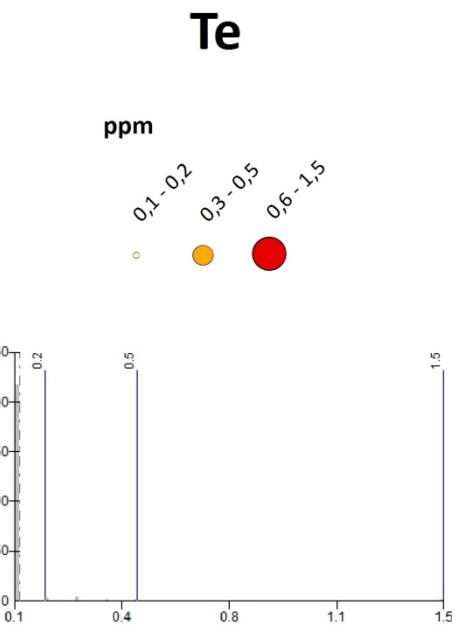
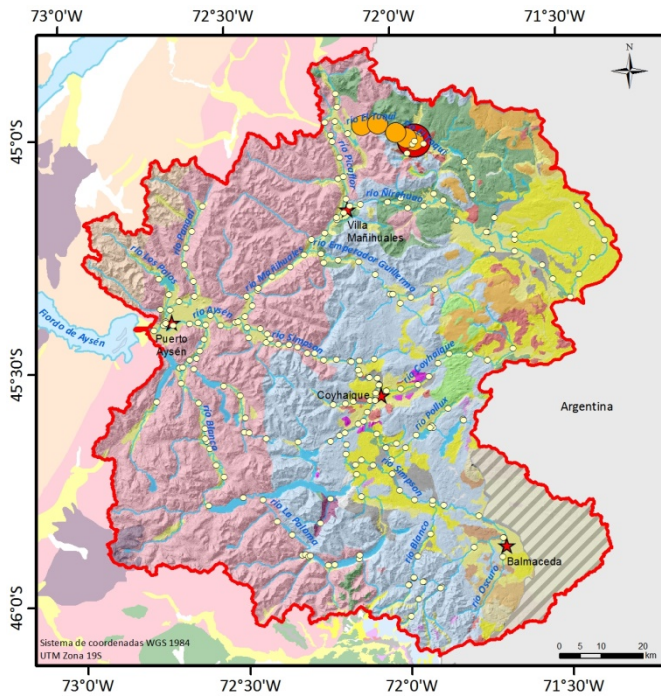
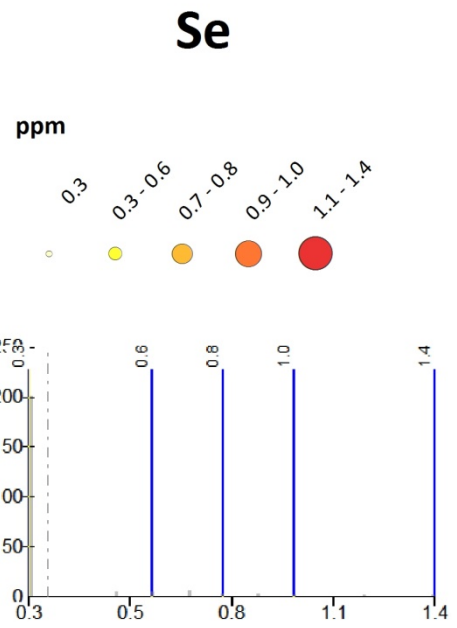
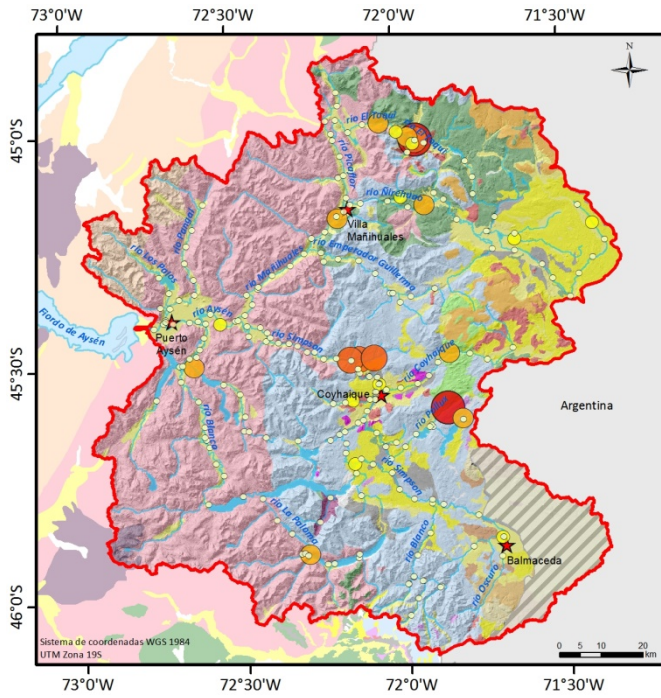


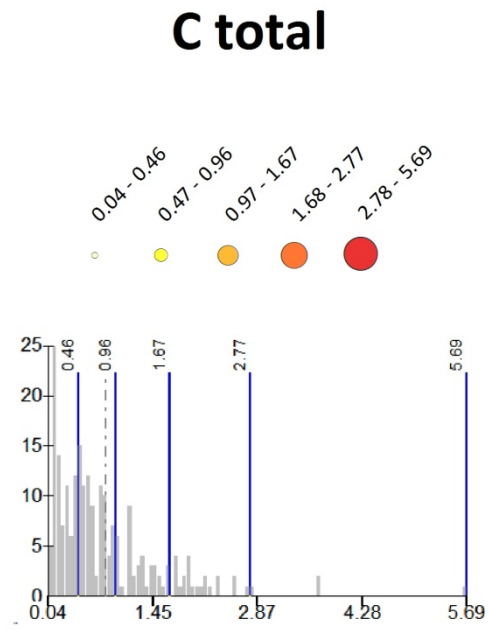
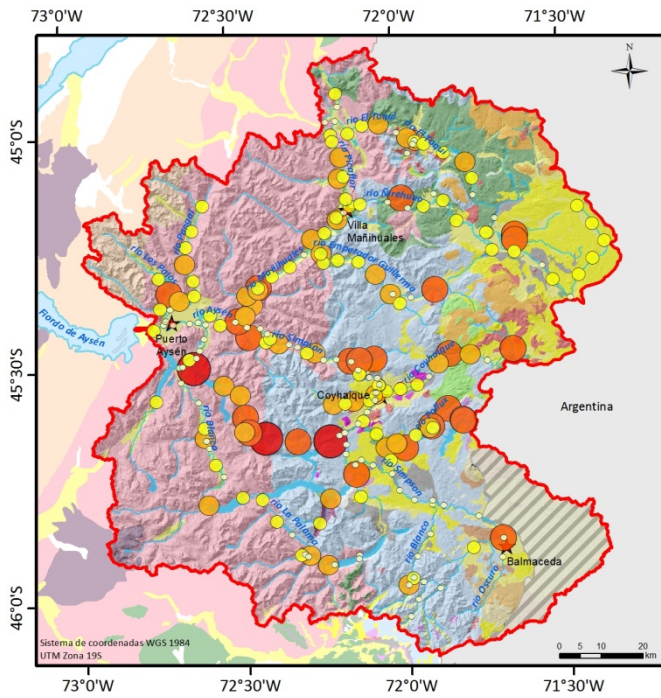
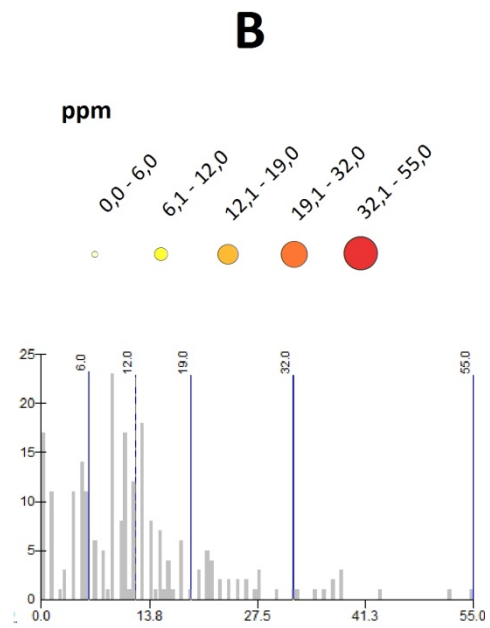
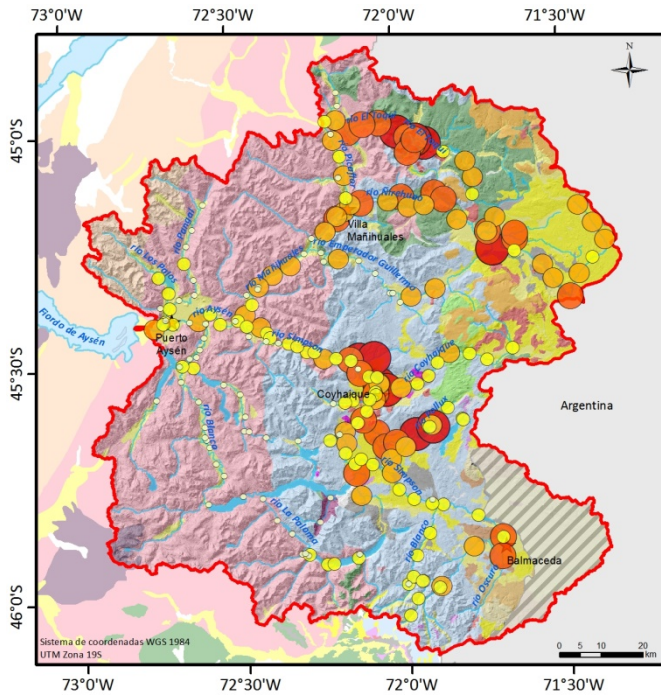


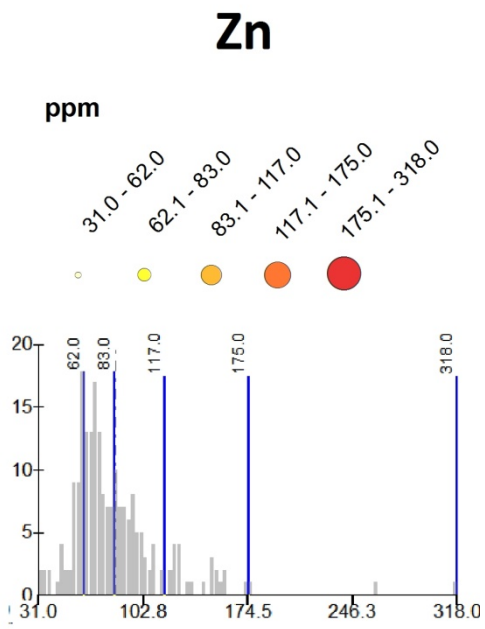
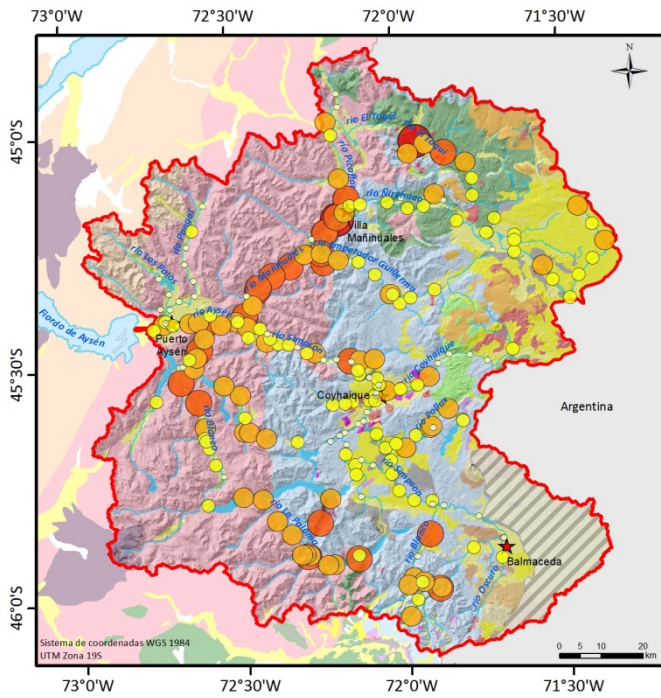
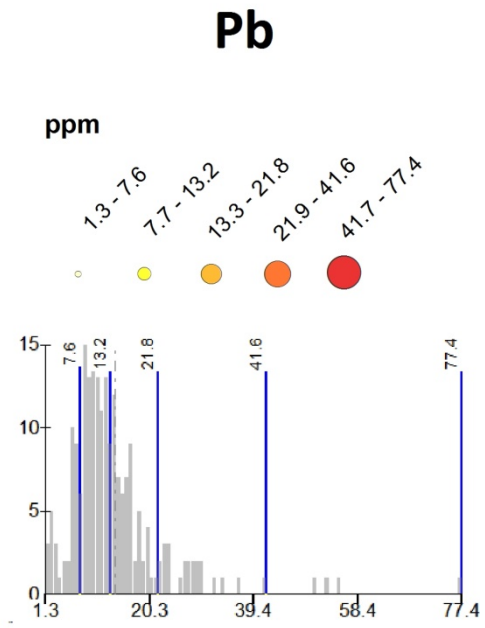
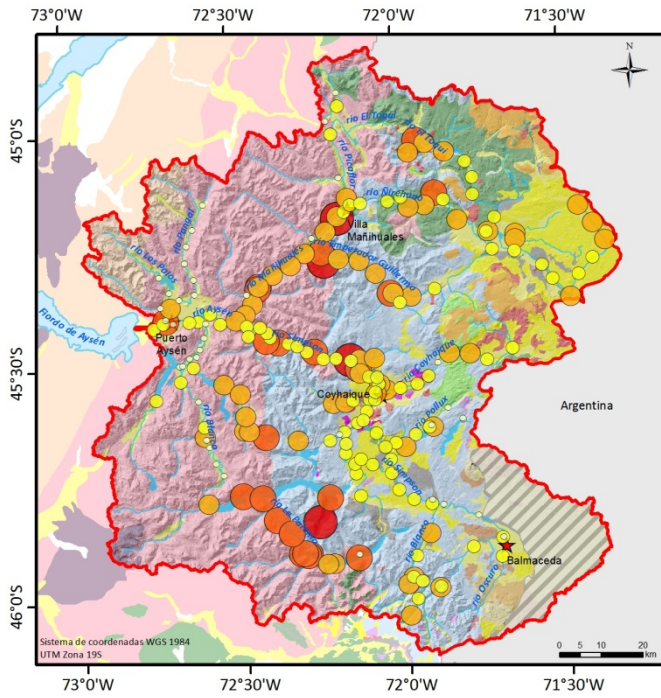


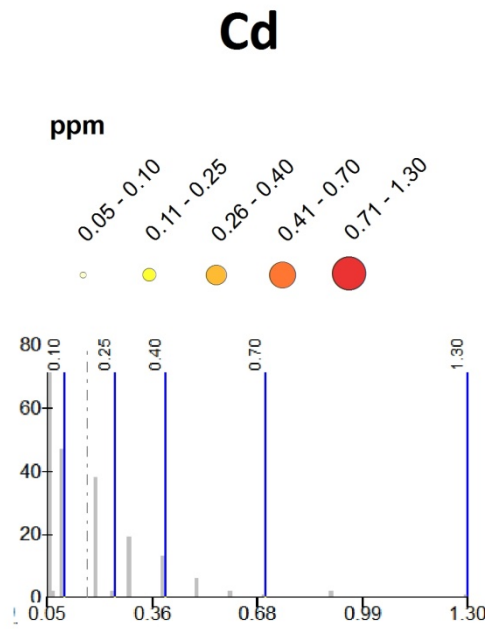
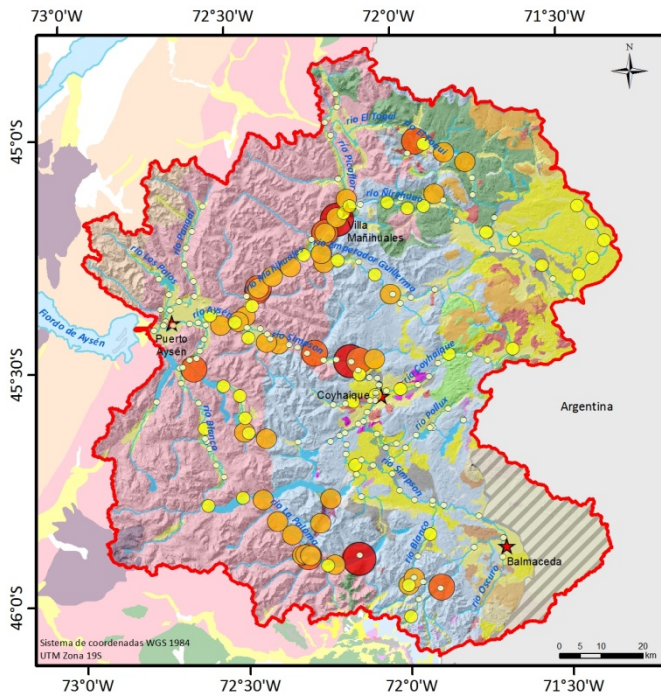
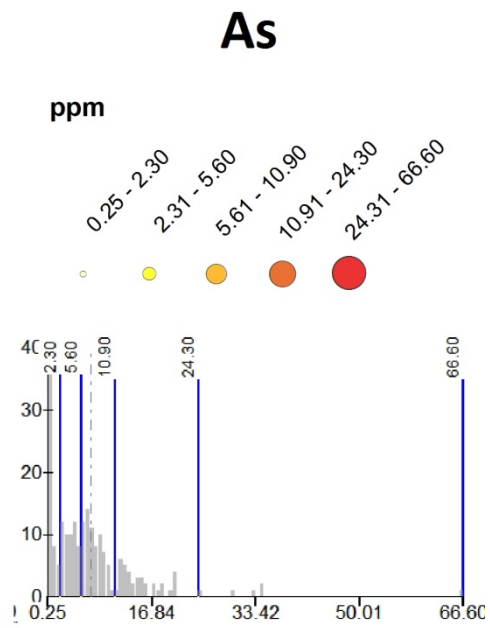
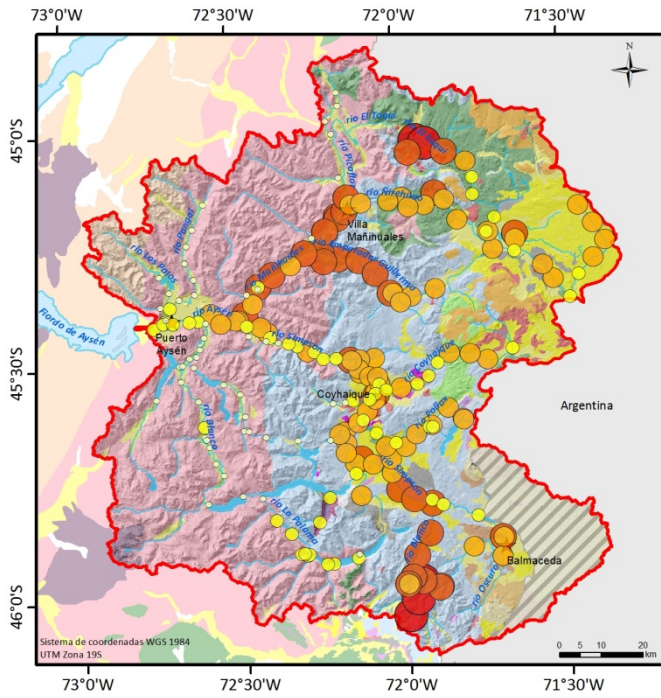


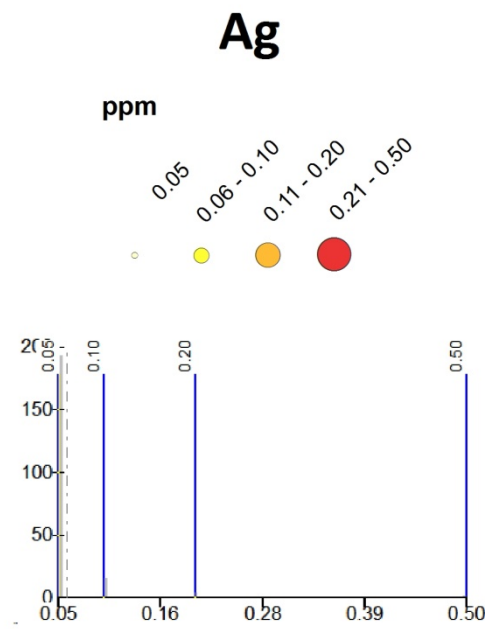
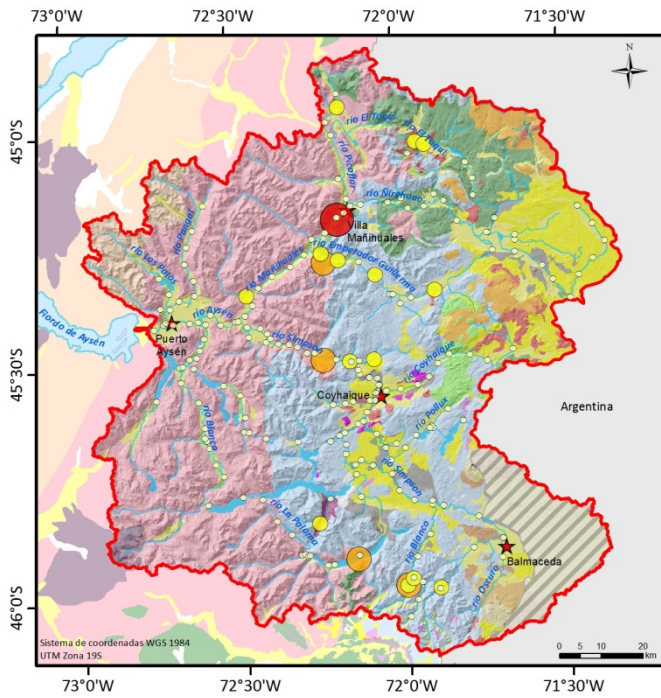
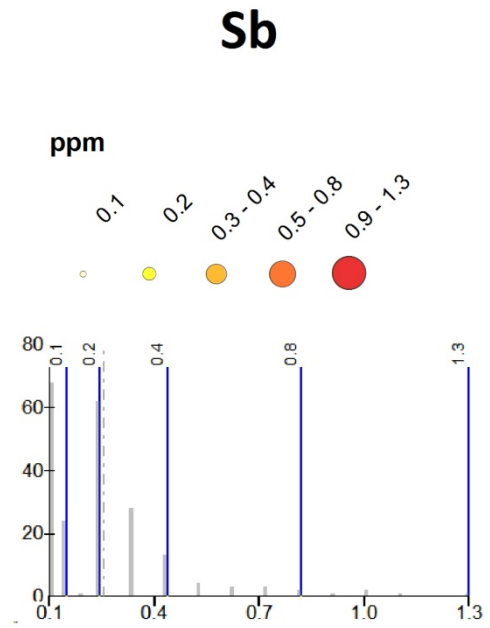
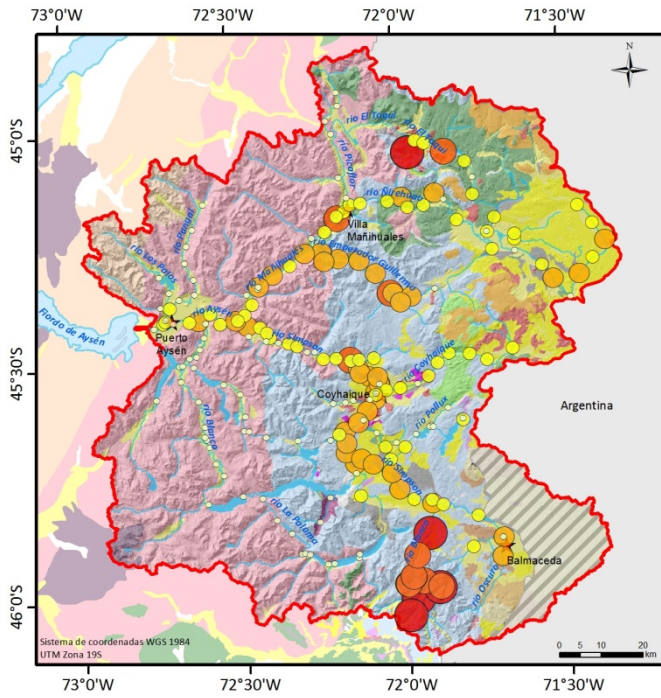




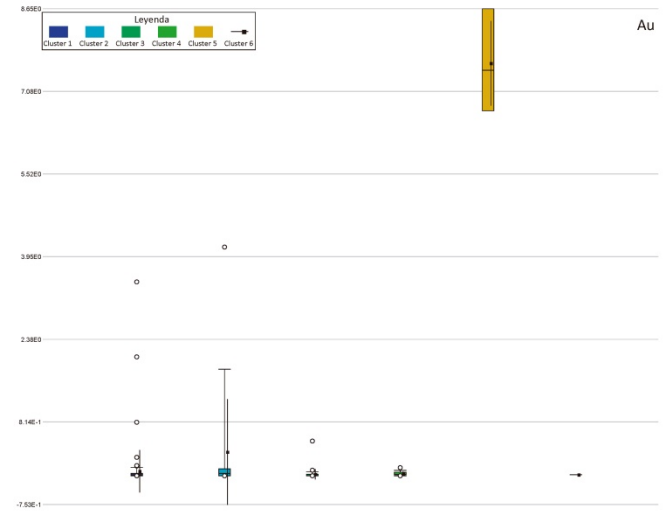
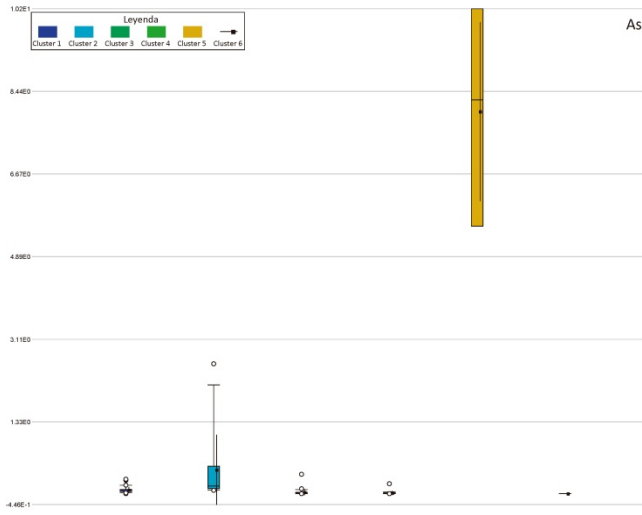
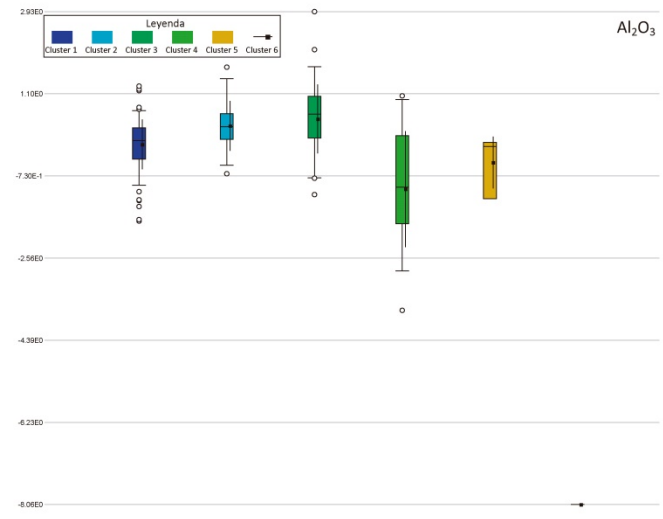
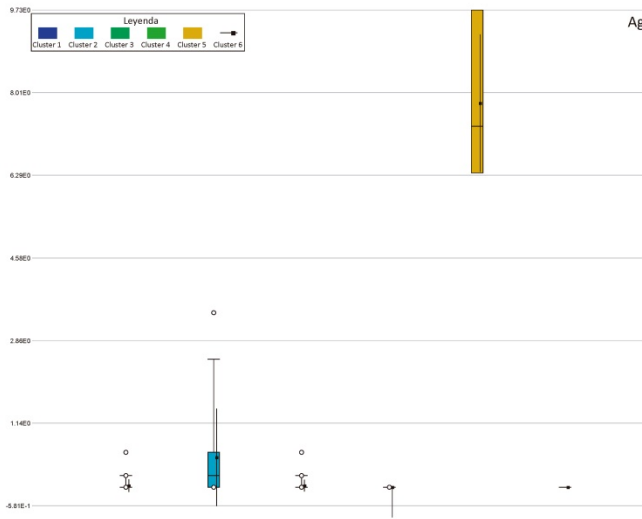


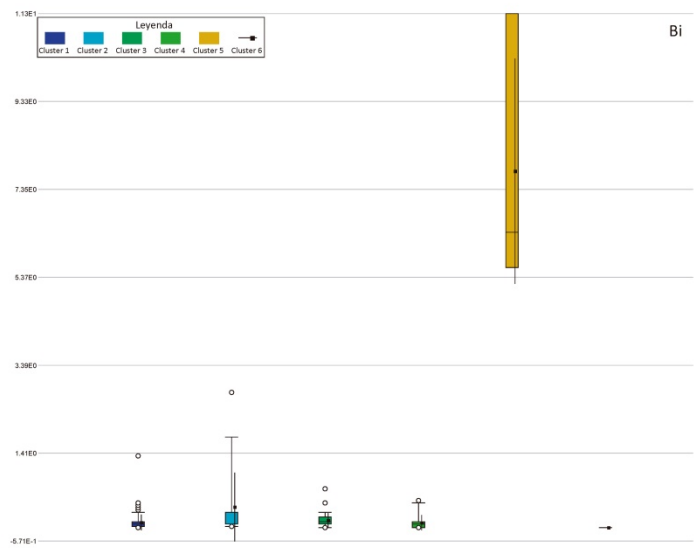
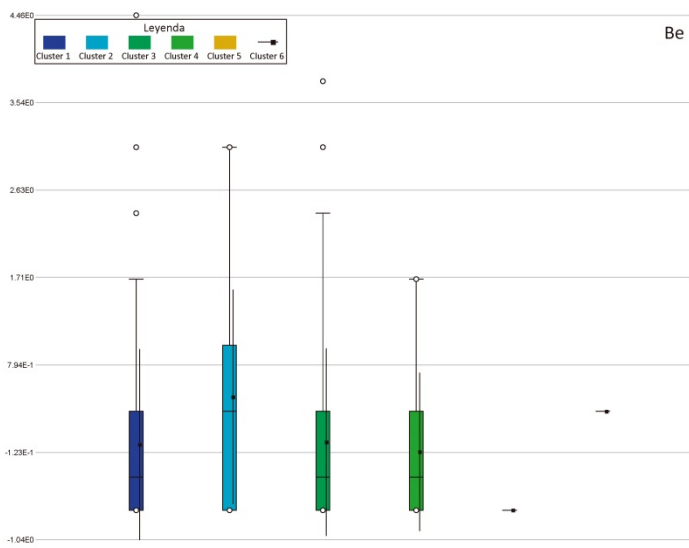
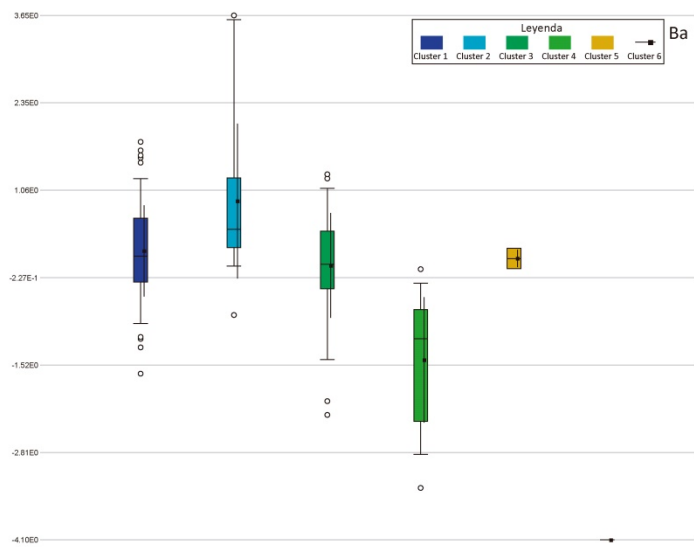
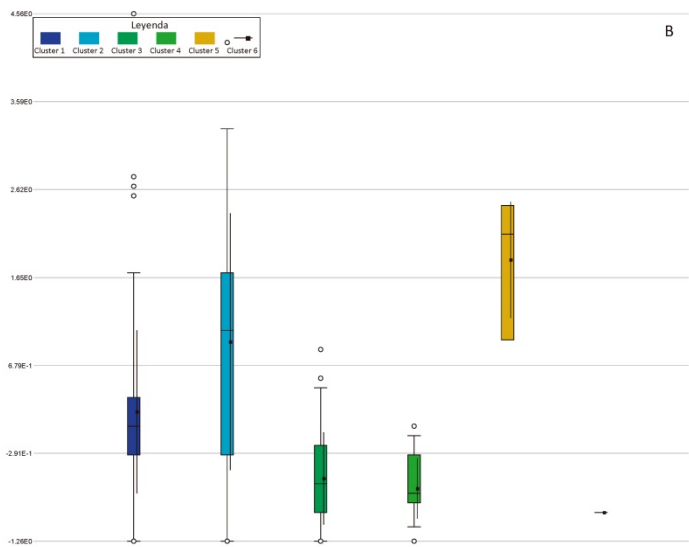


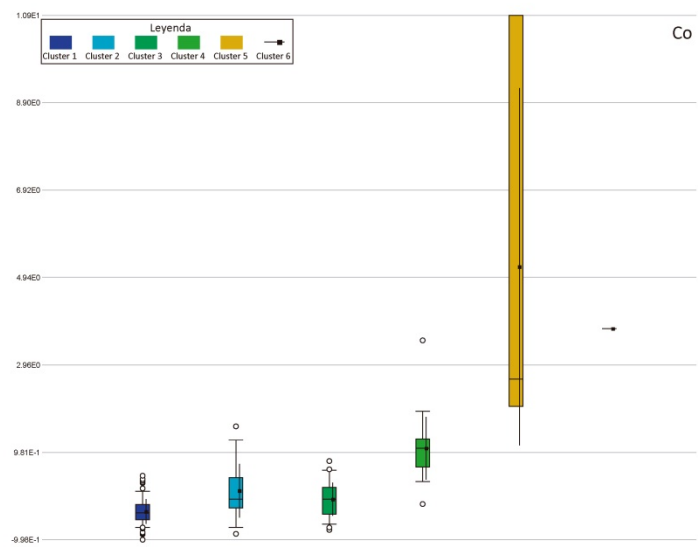
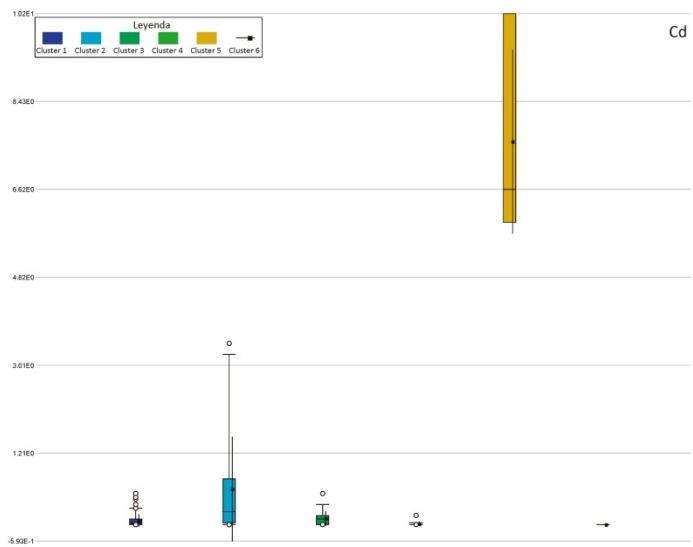
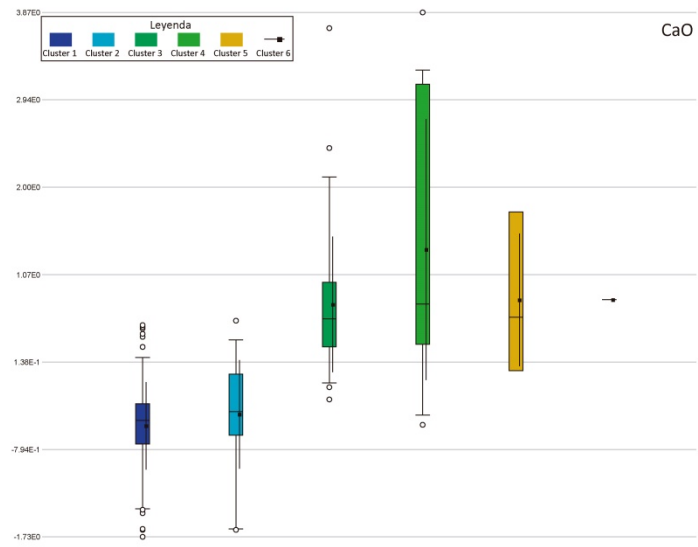
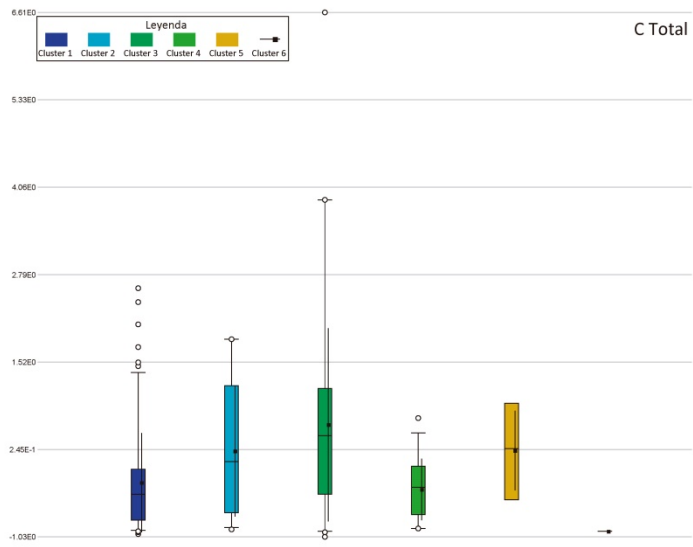


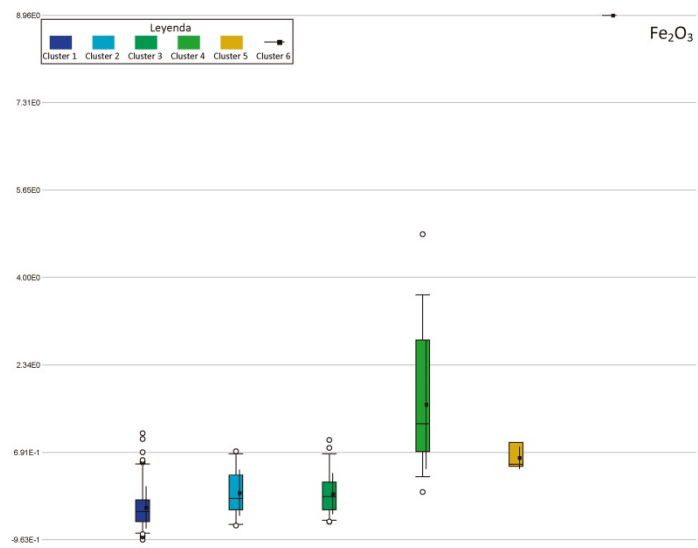
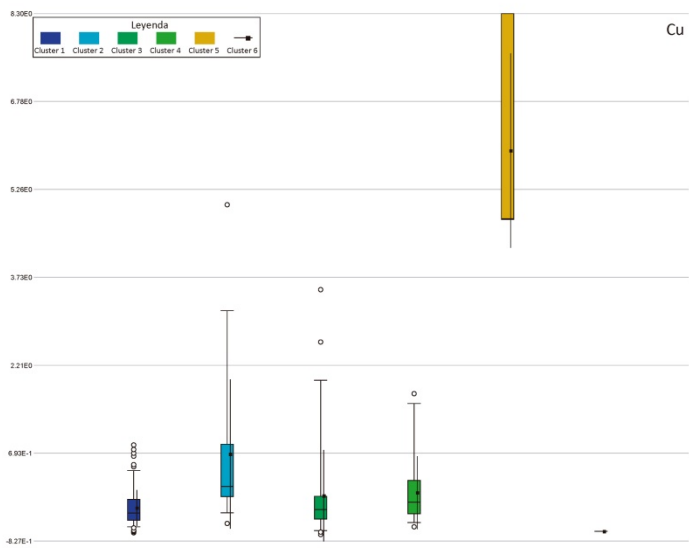
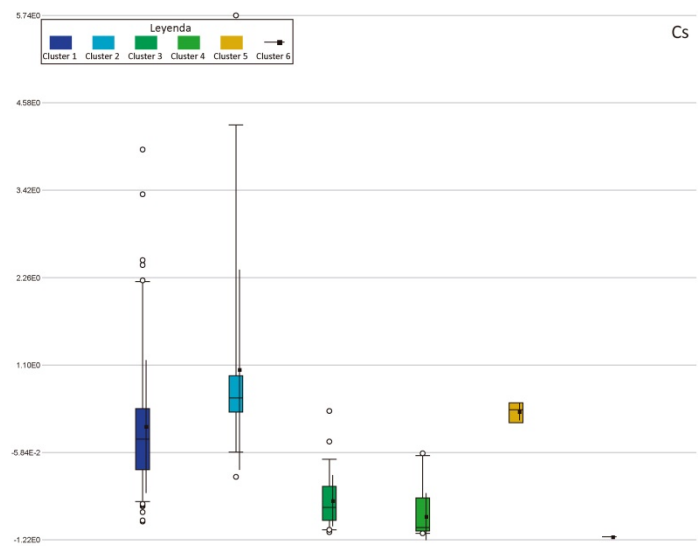
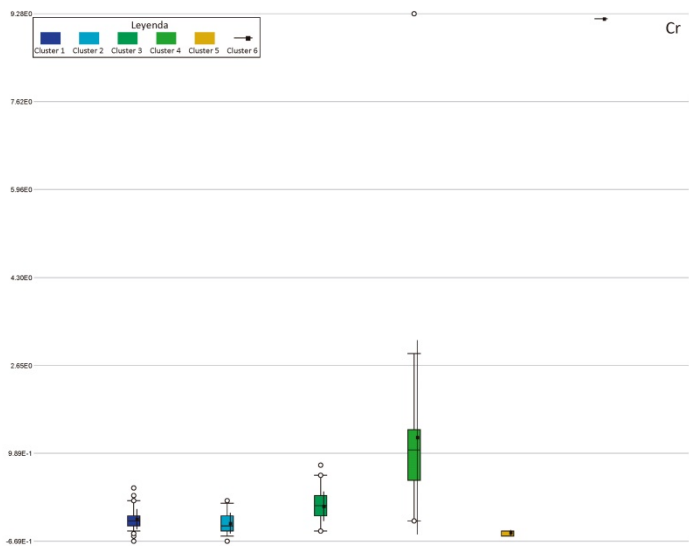


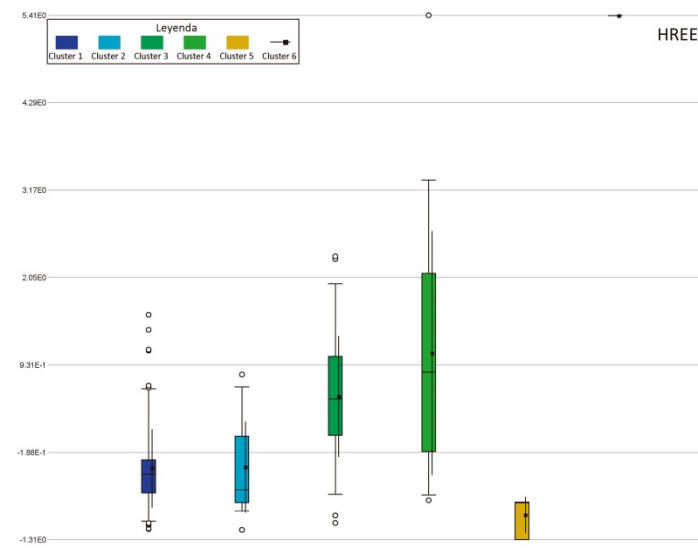
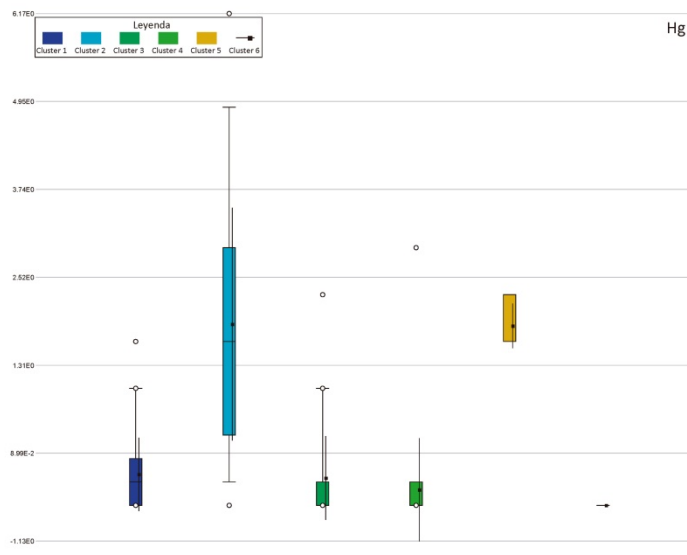
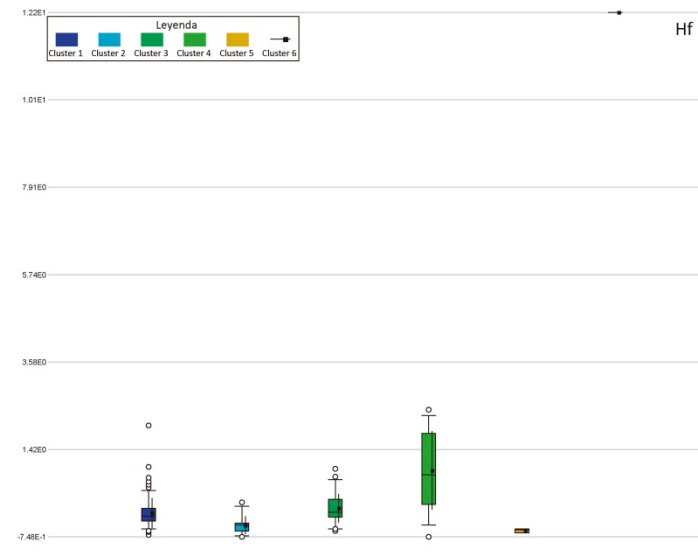
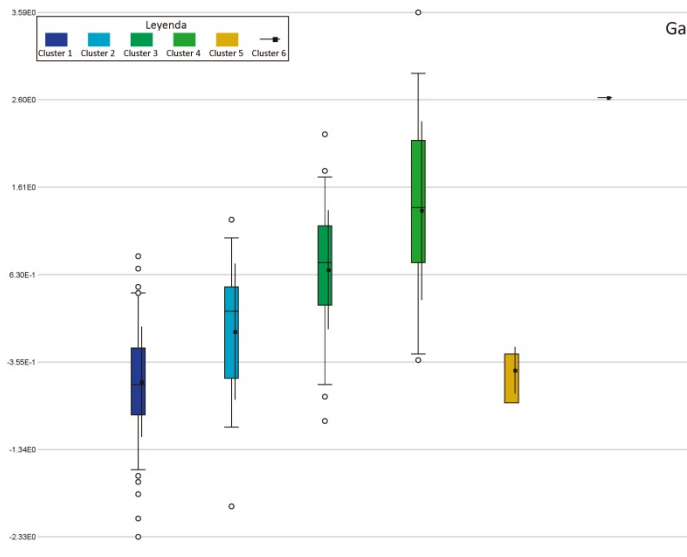
B.5. Análisis multivariable mediante gráfico de caja y bigote

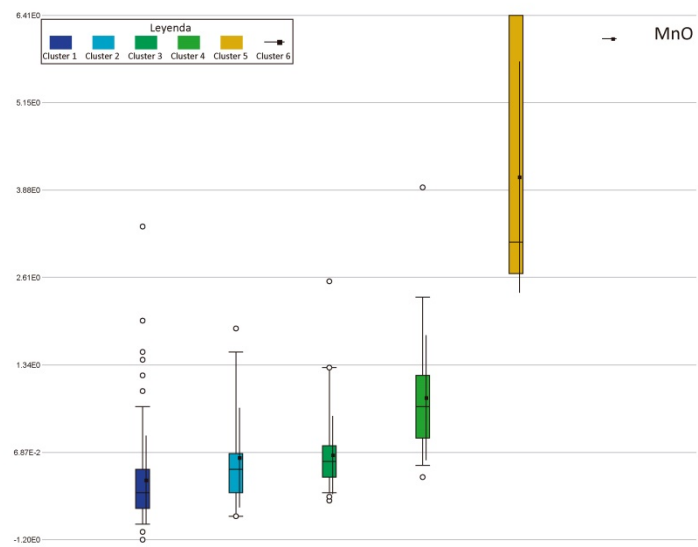
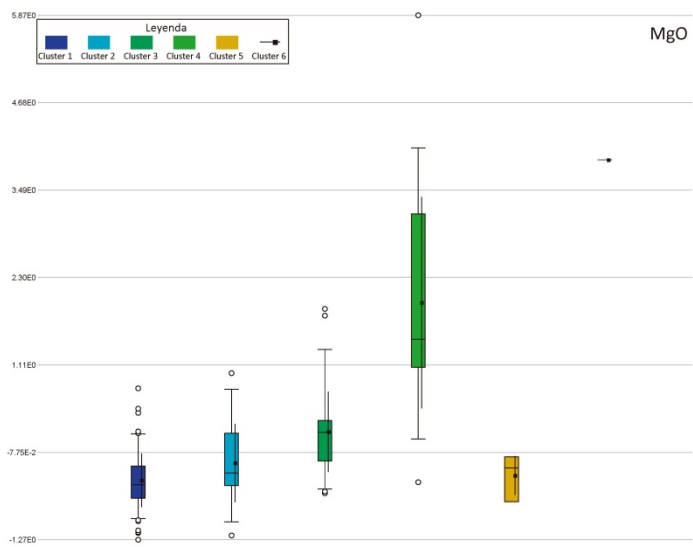
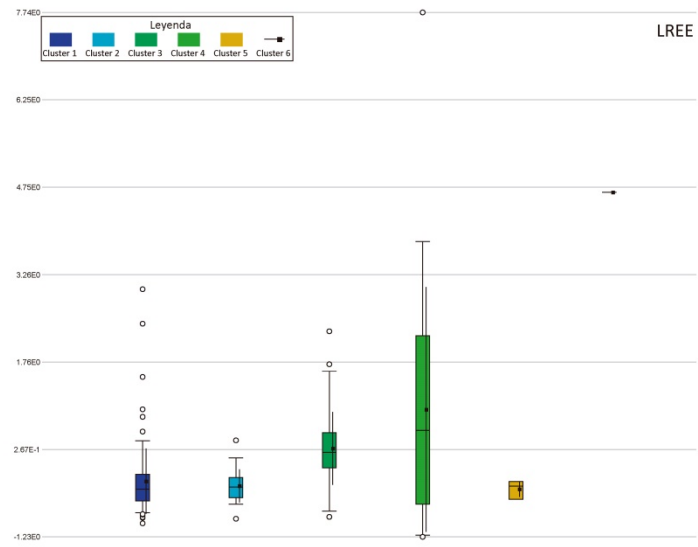
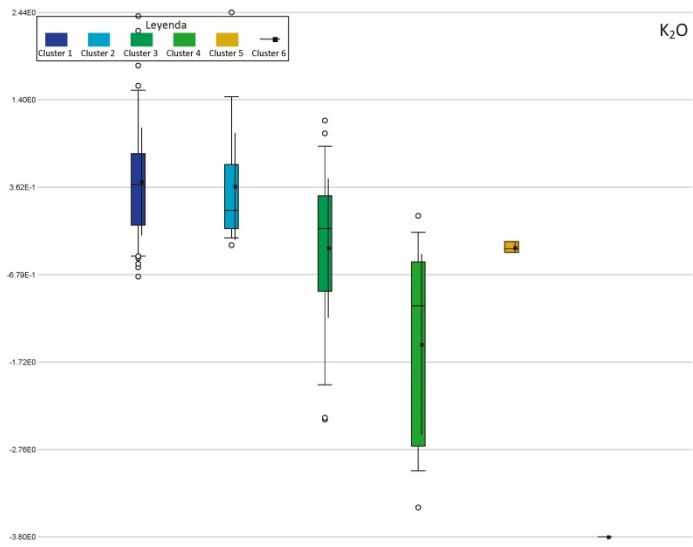


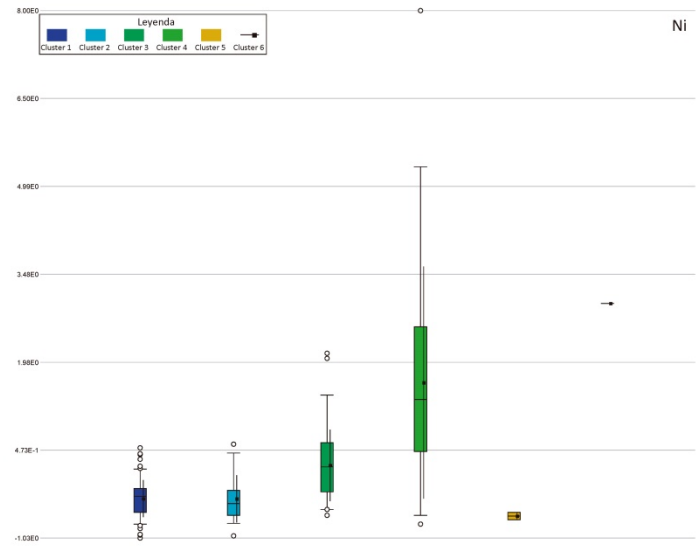
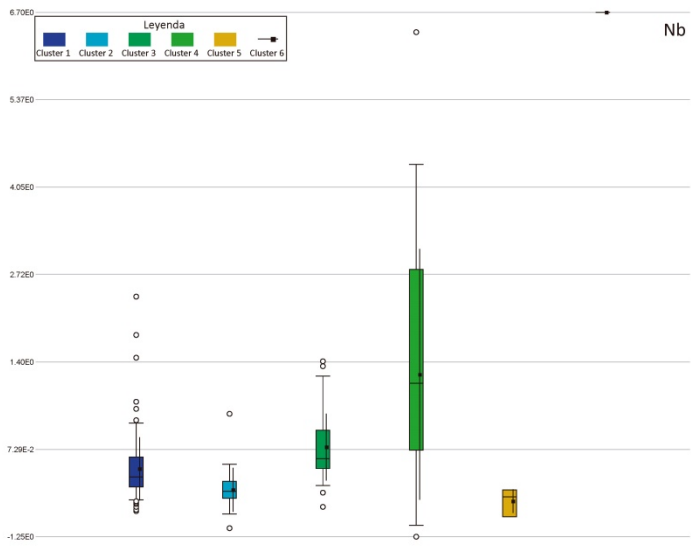
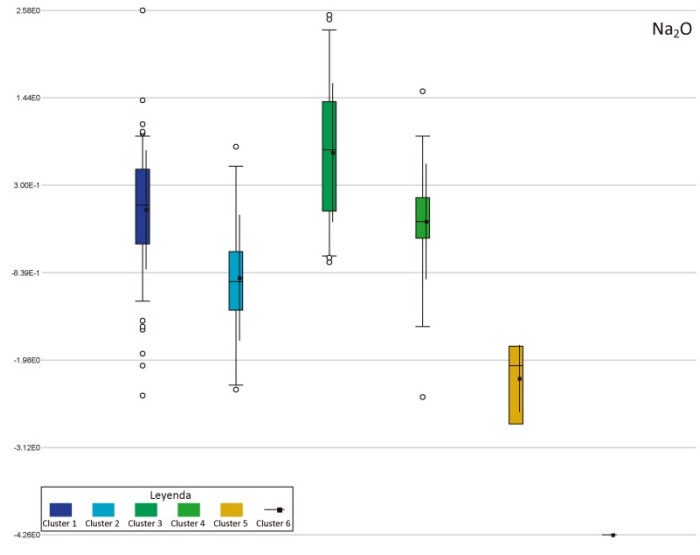
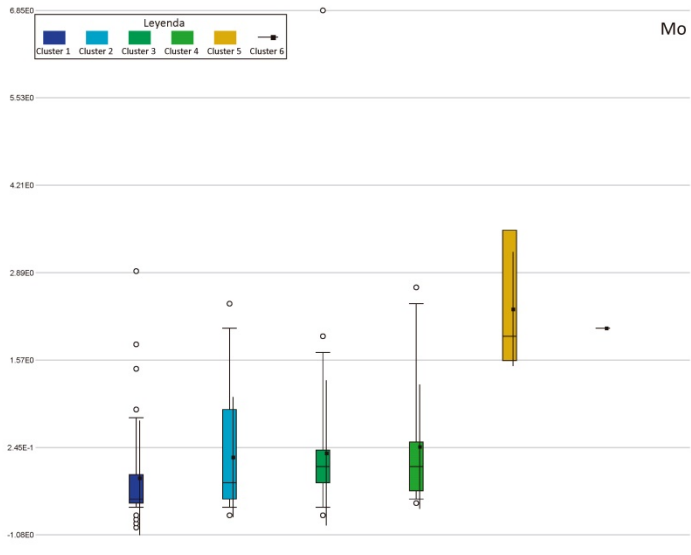


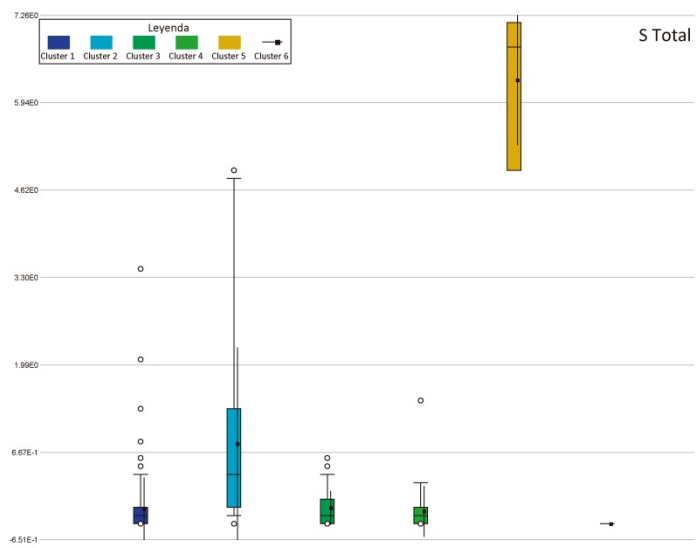
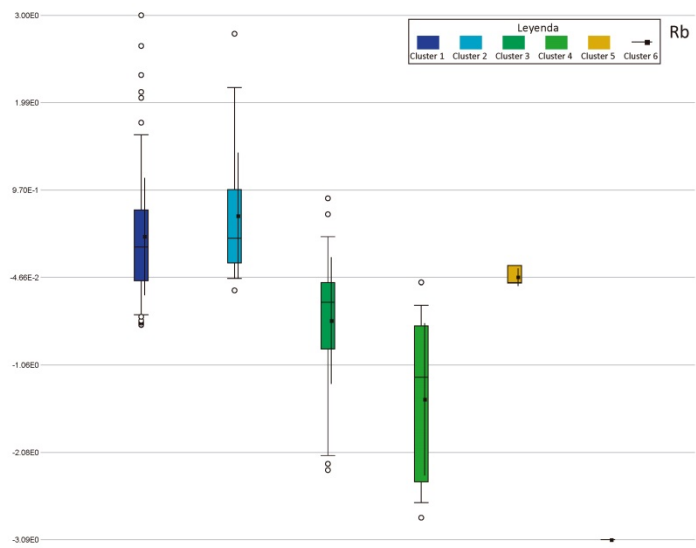
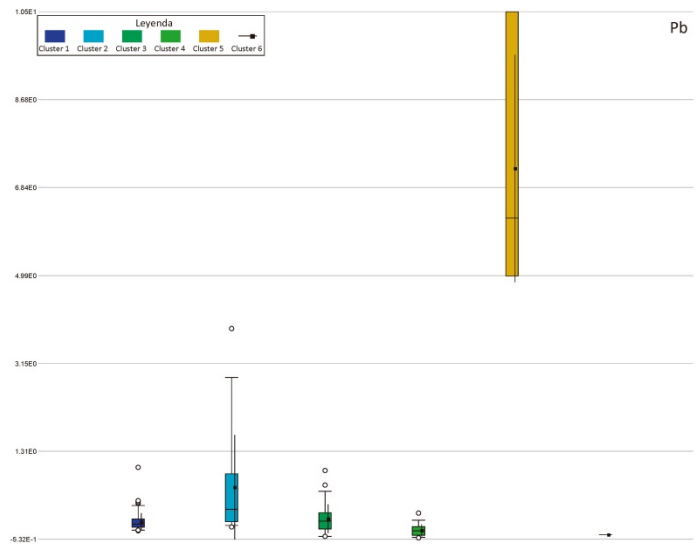
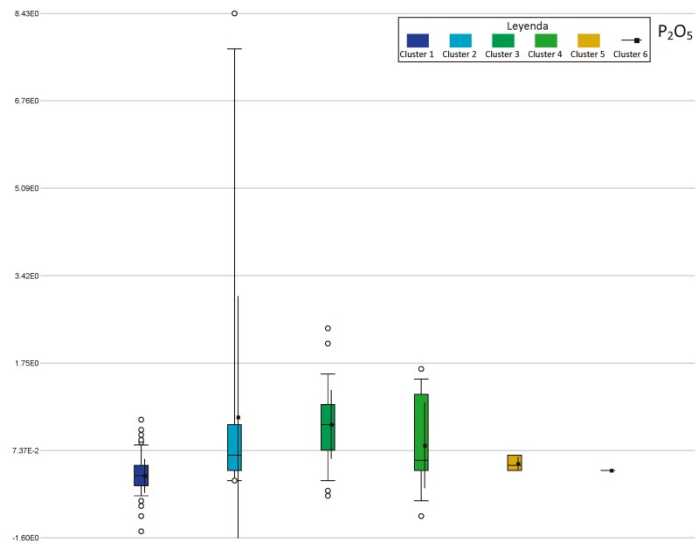


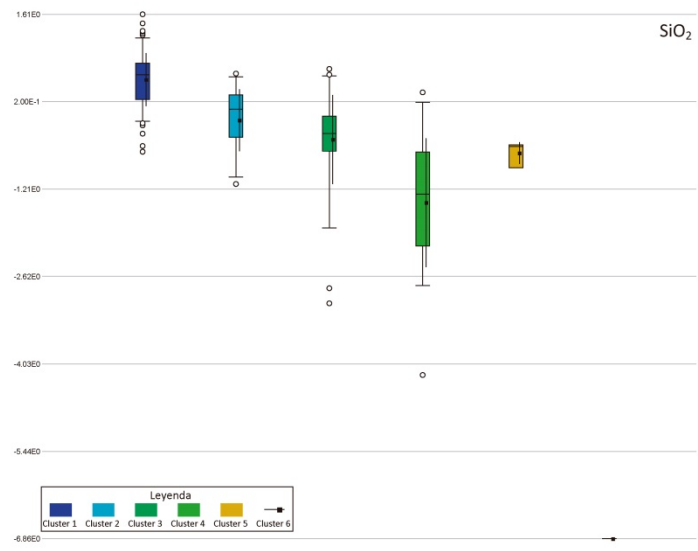
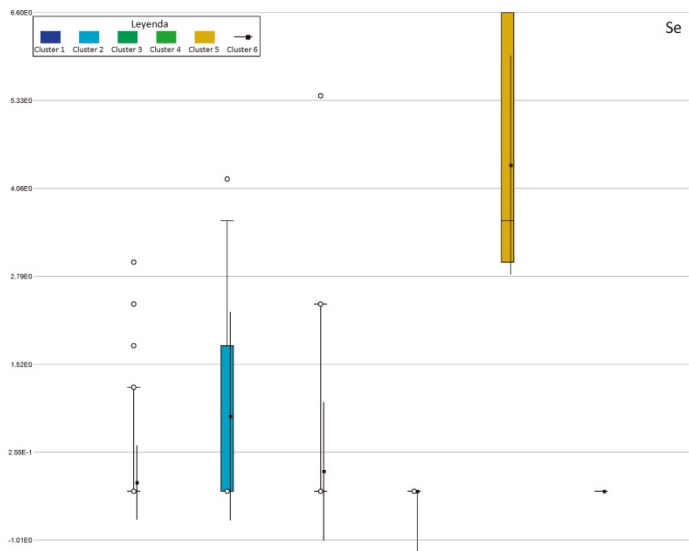
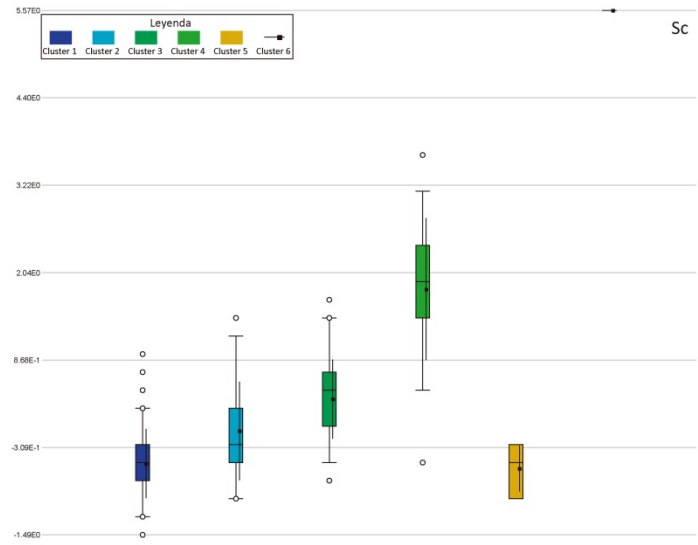
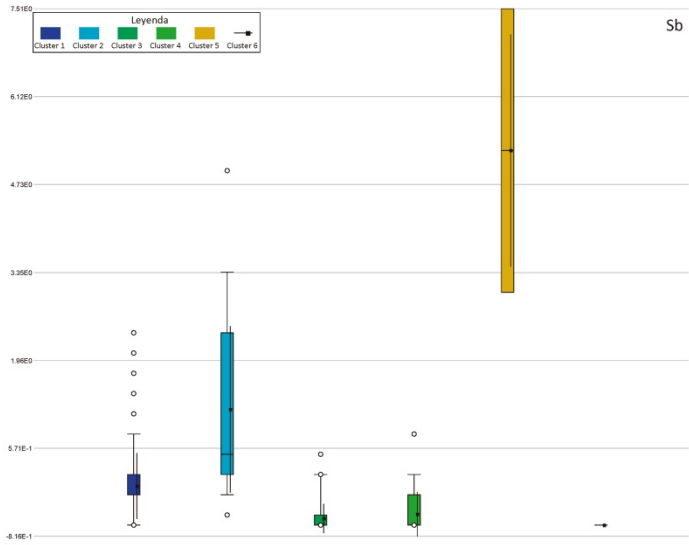


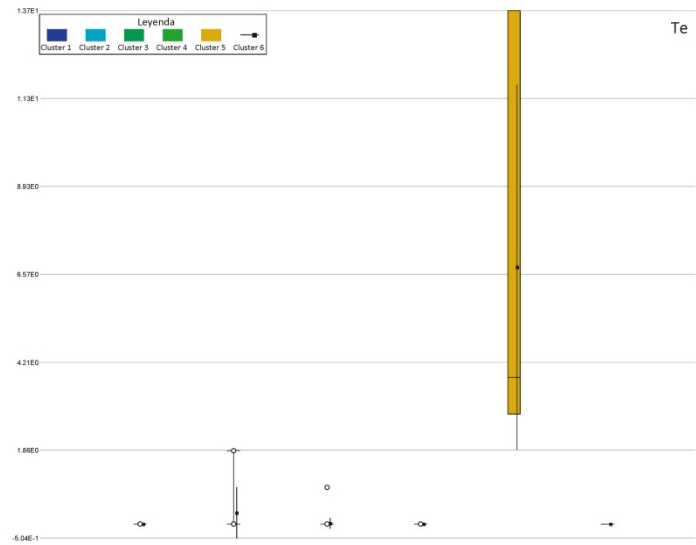
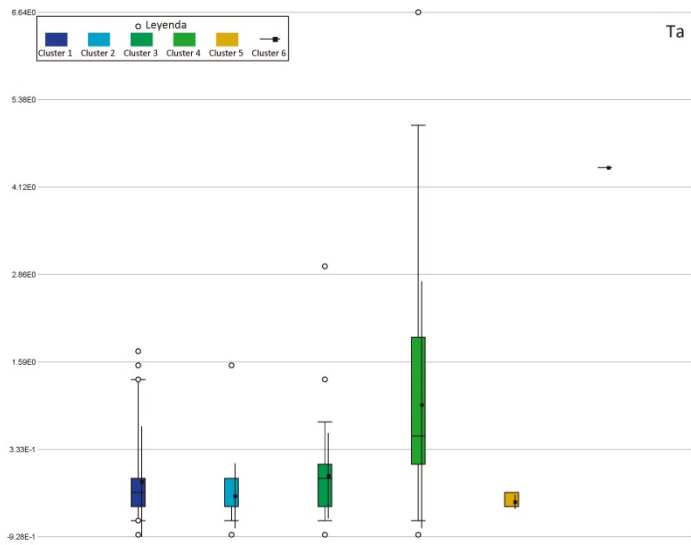
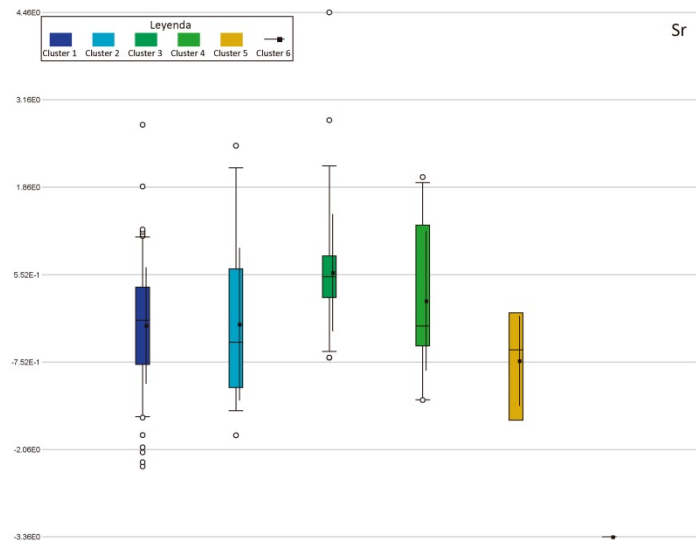
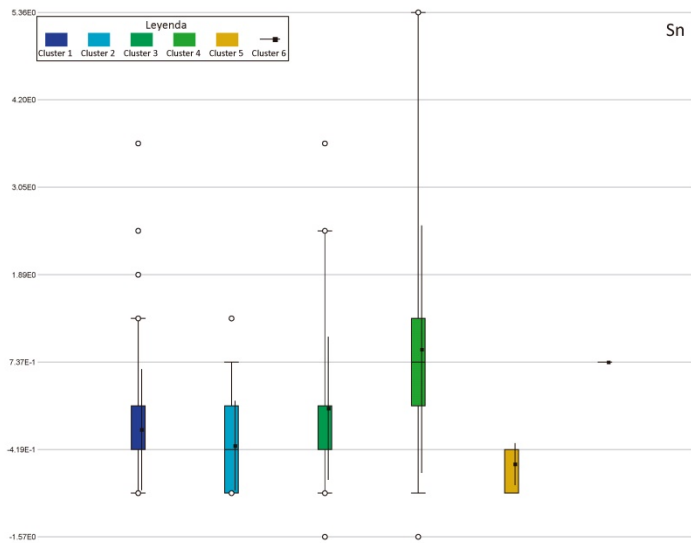


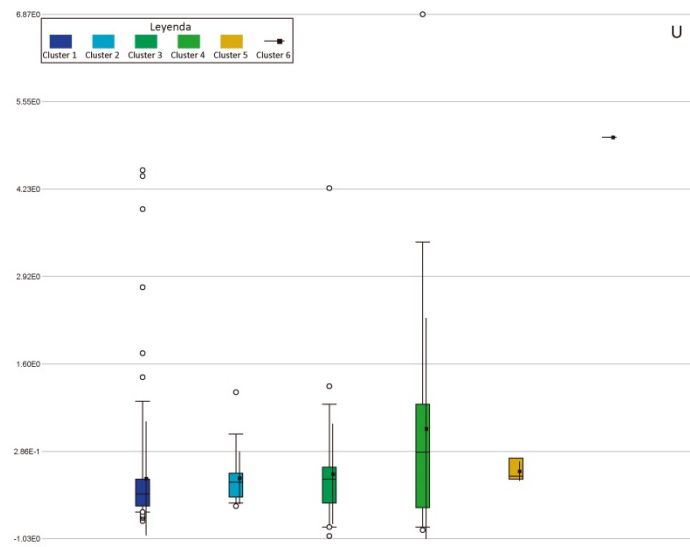
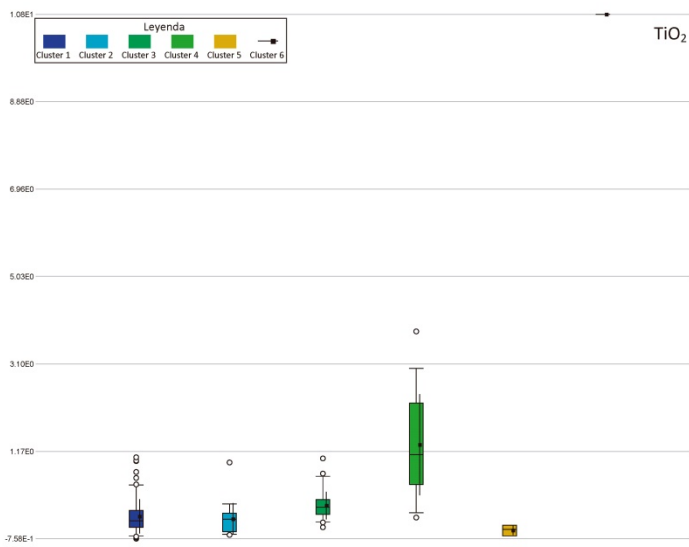
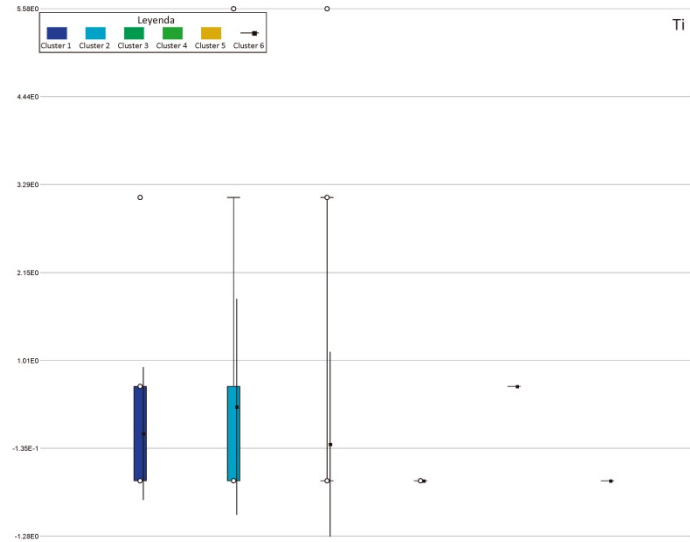
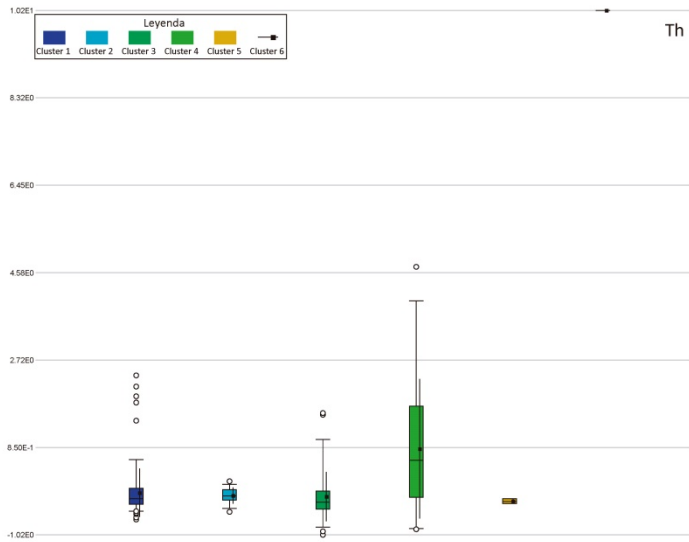


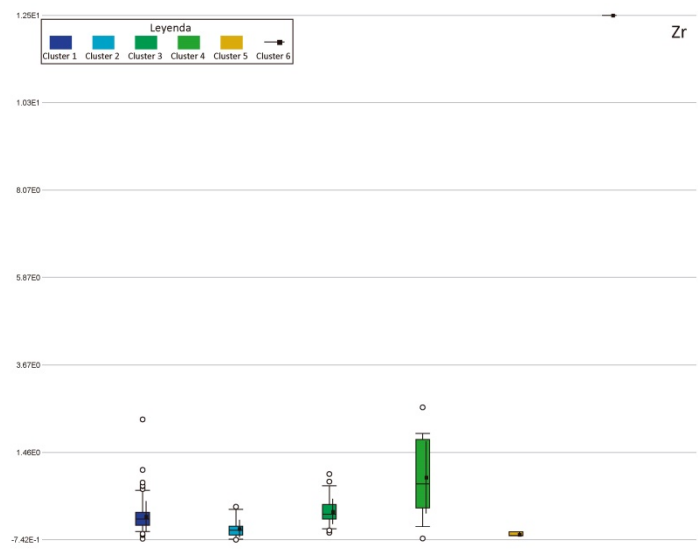
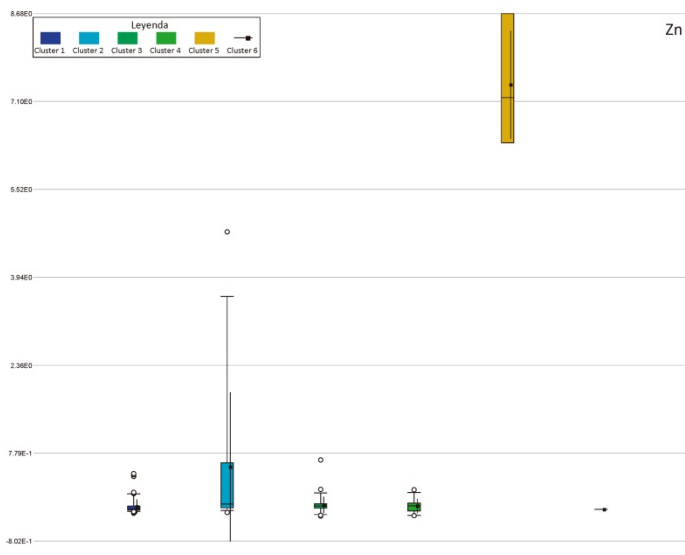
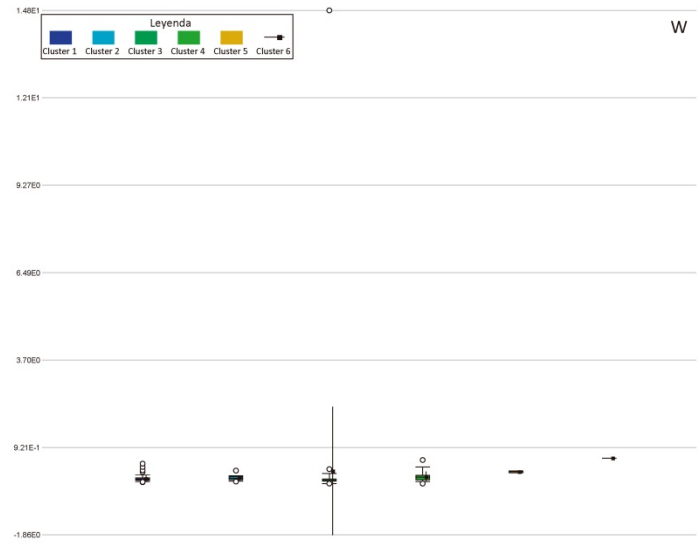
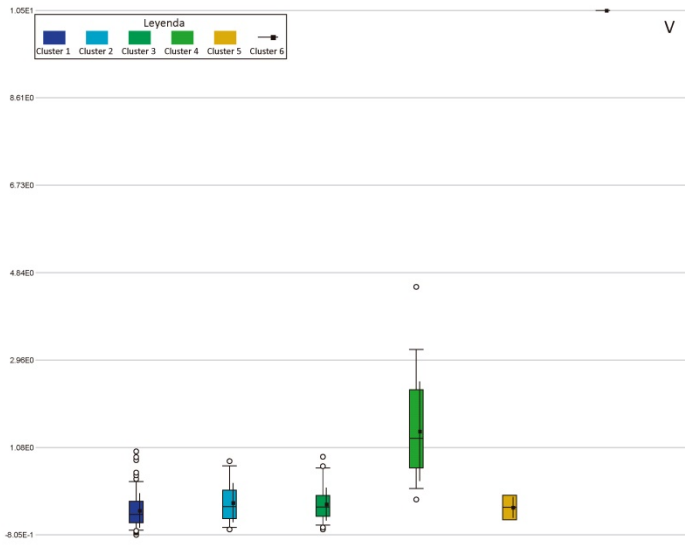






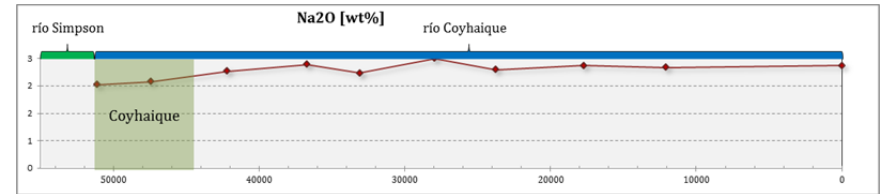
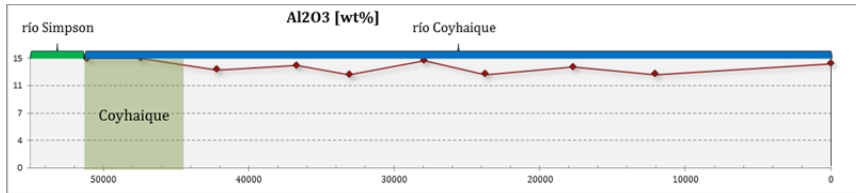
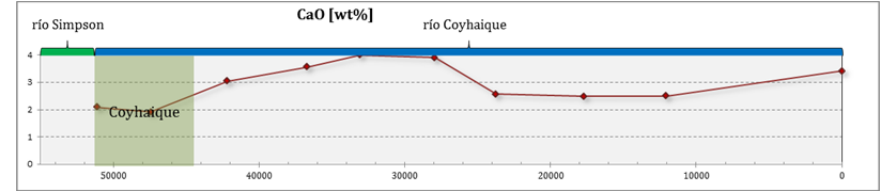
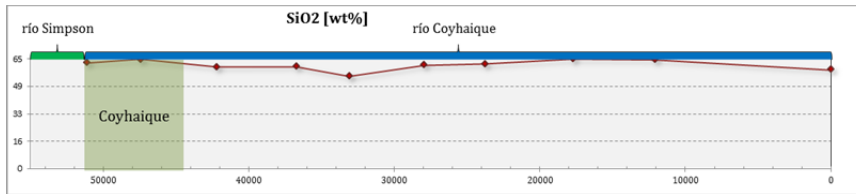
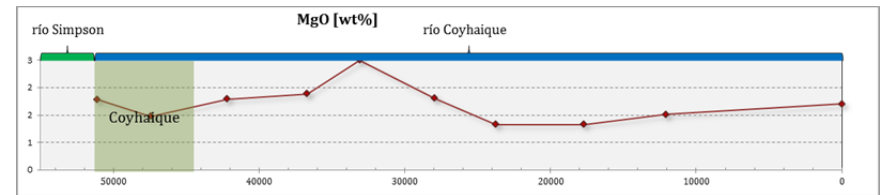
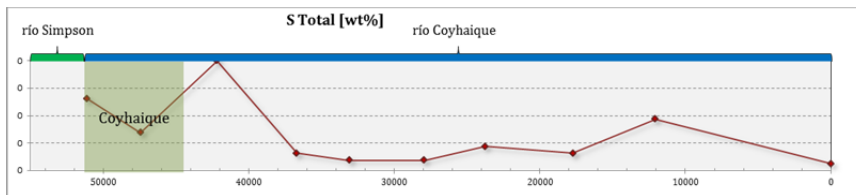
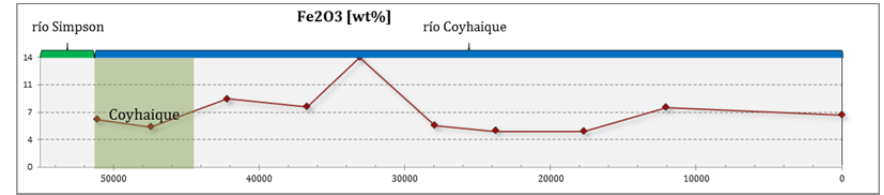
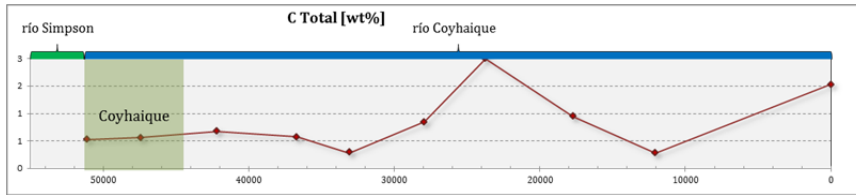


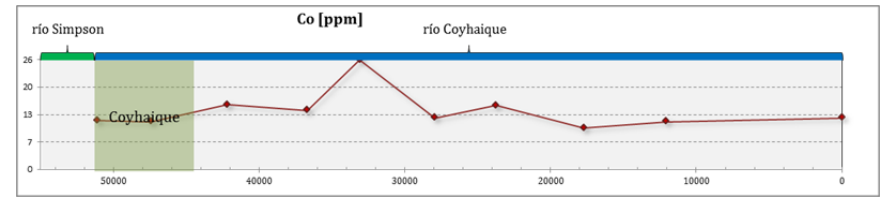
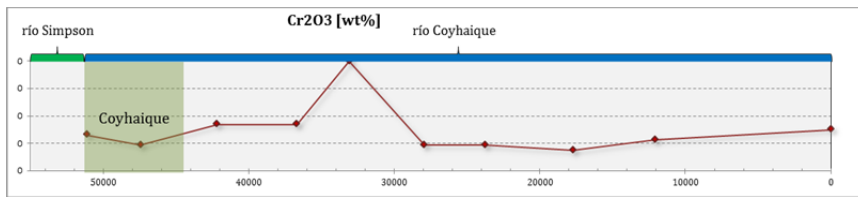
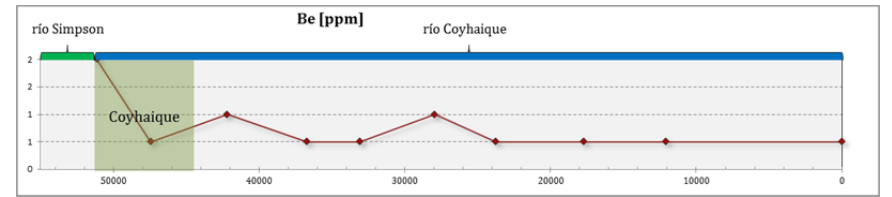
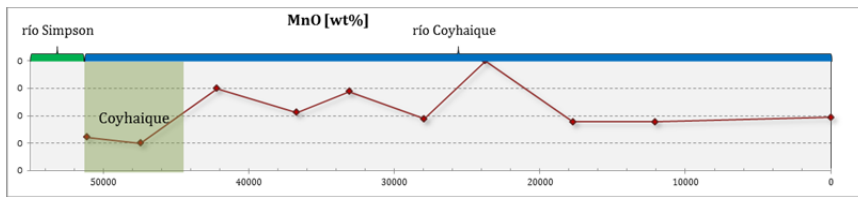
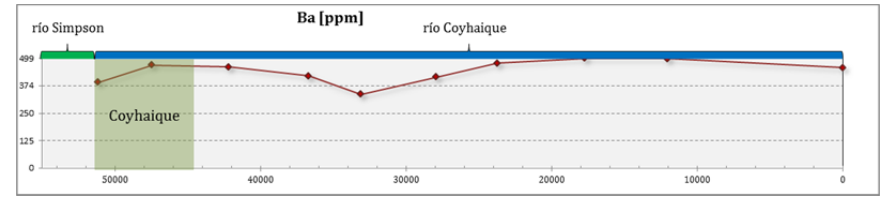
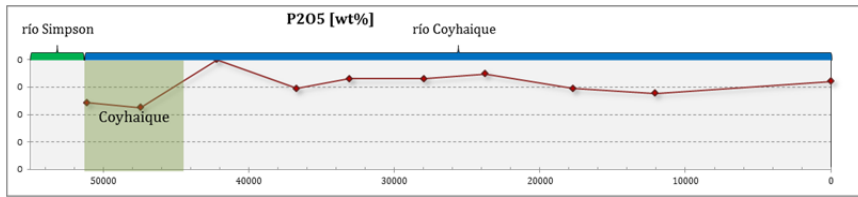
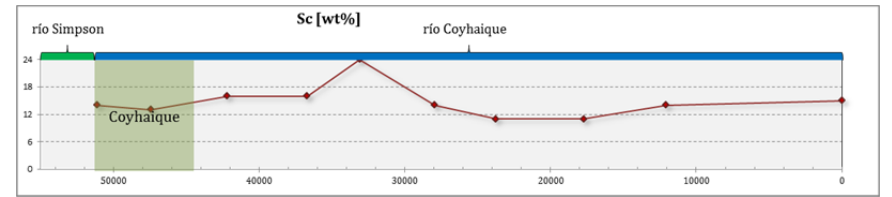
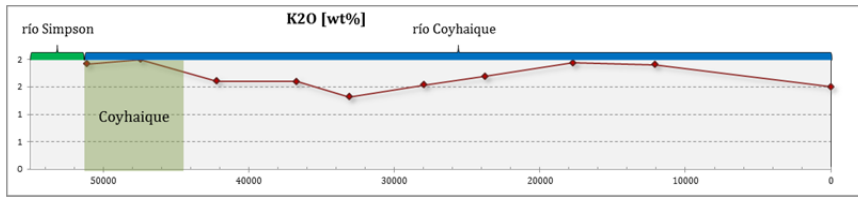
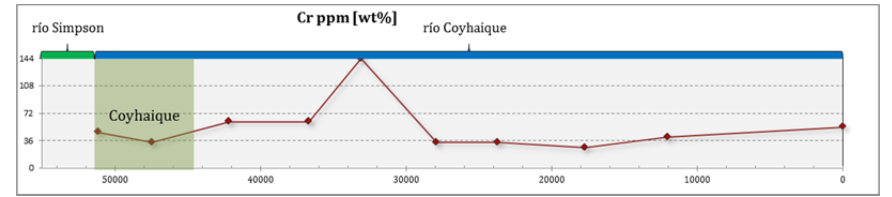
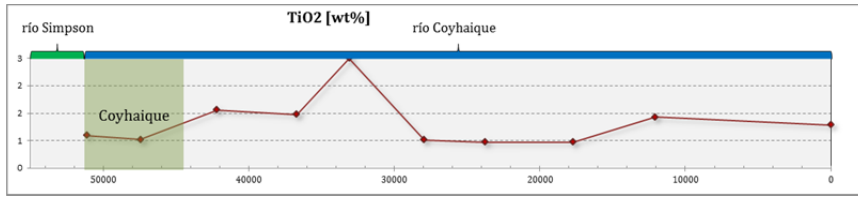


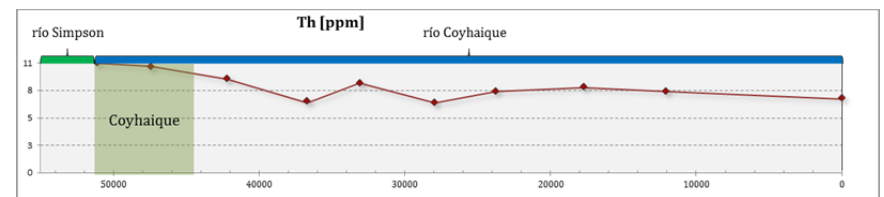
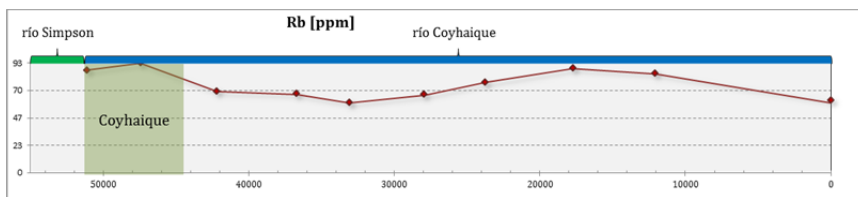
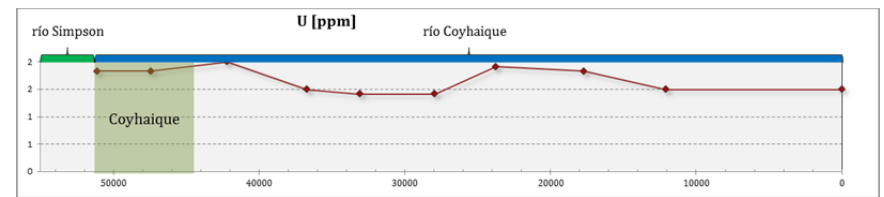
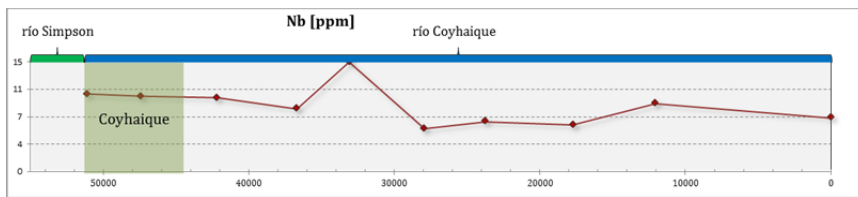
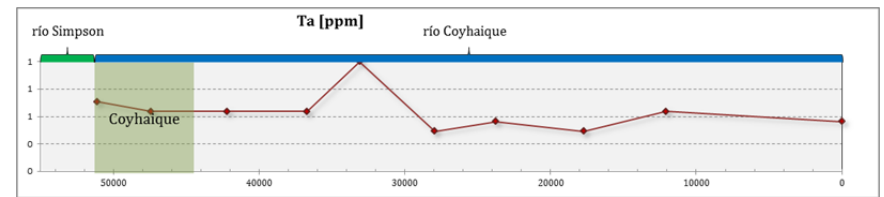
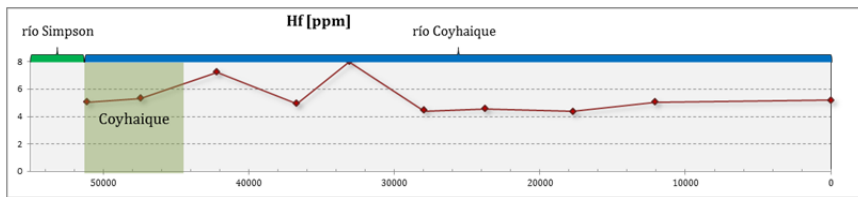
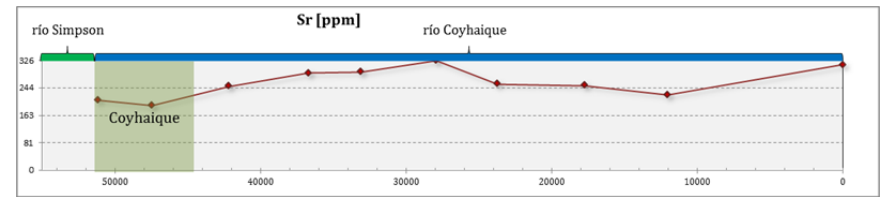
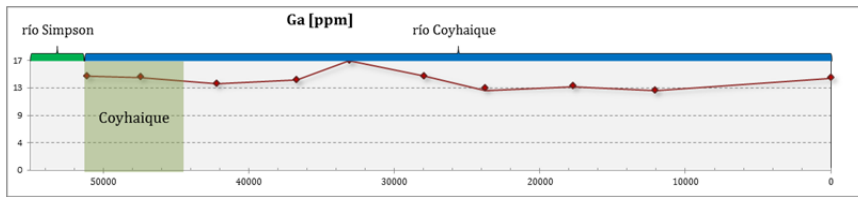
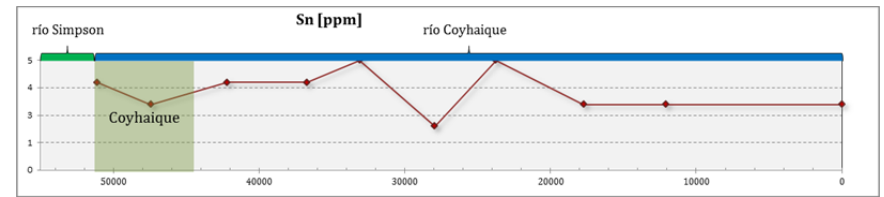
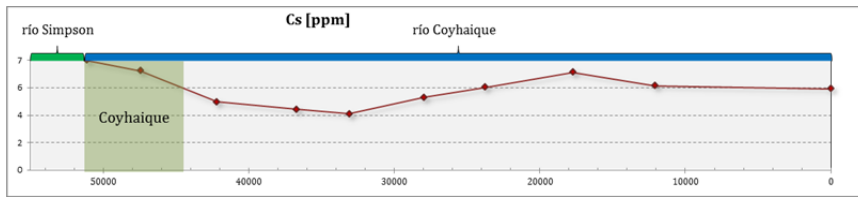


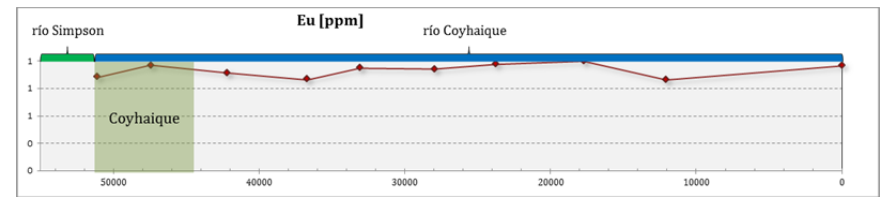
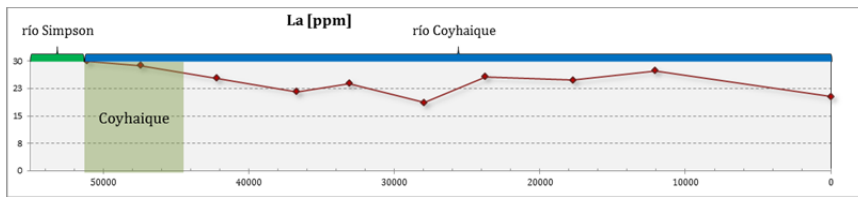
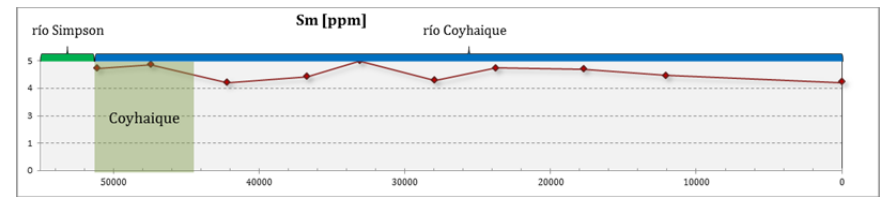
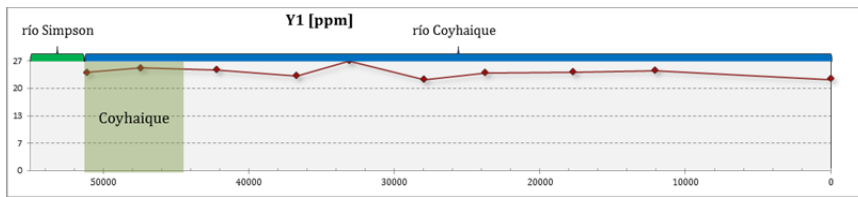
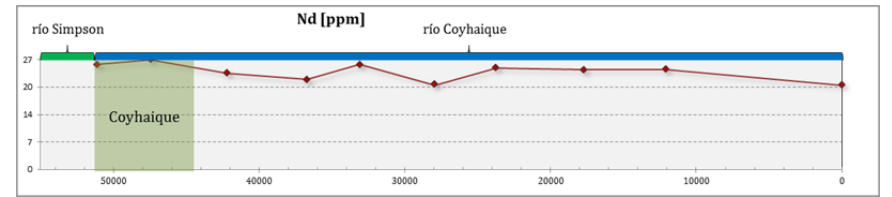
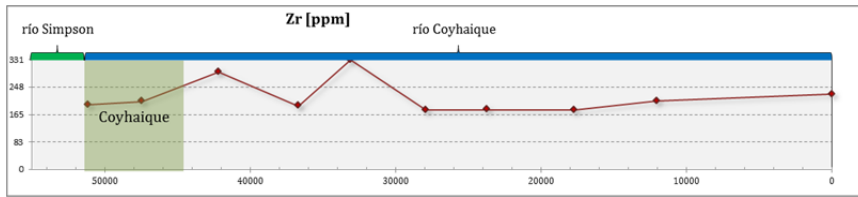
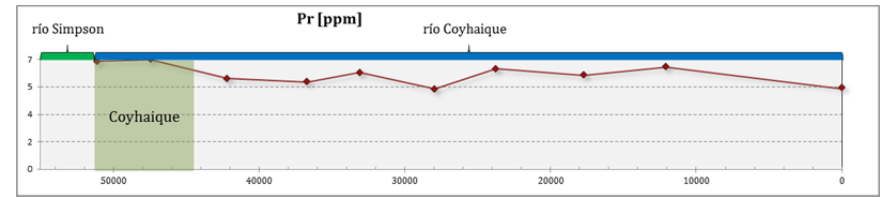
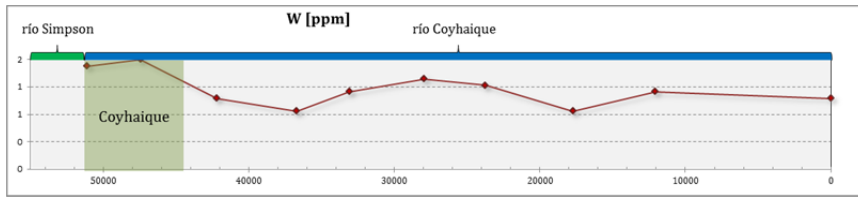
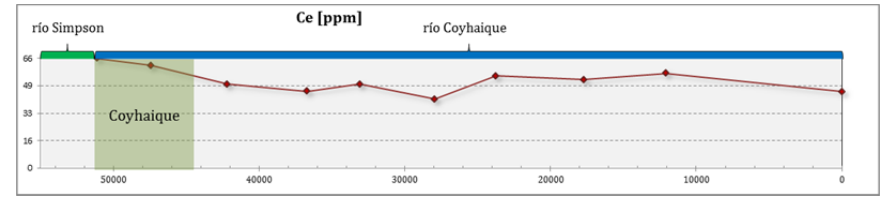
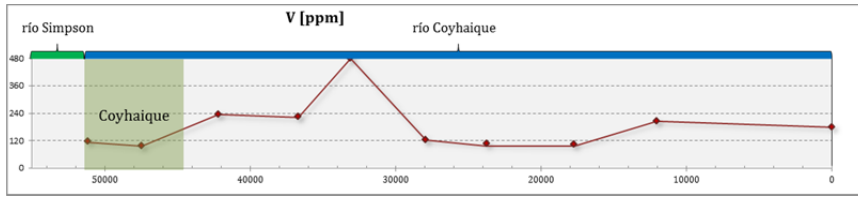
B.6. Diagramas de variación geográfica

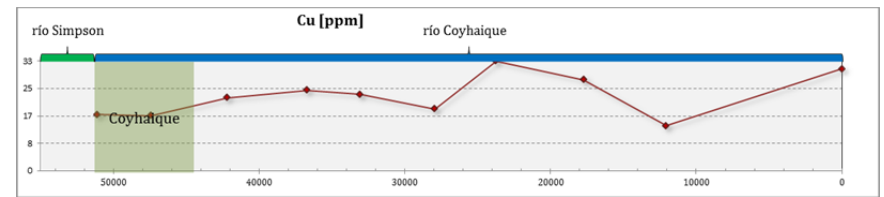
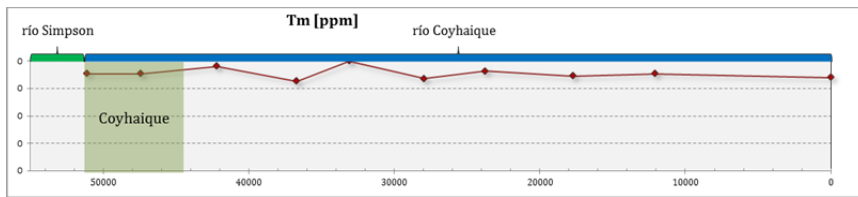
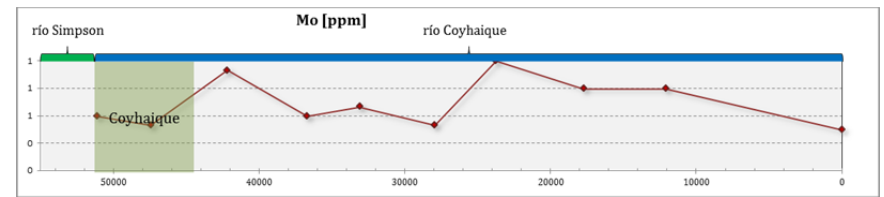
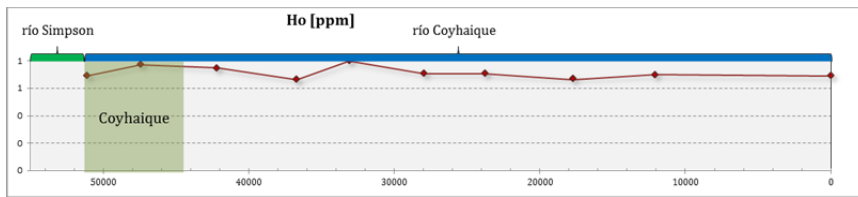
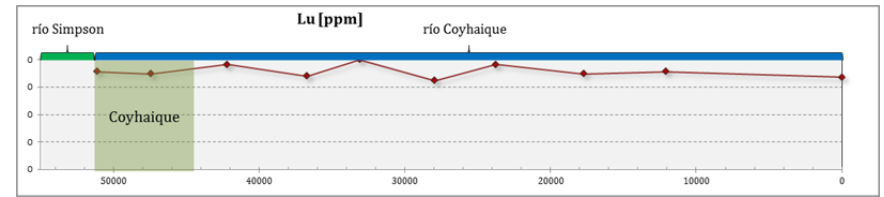
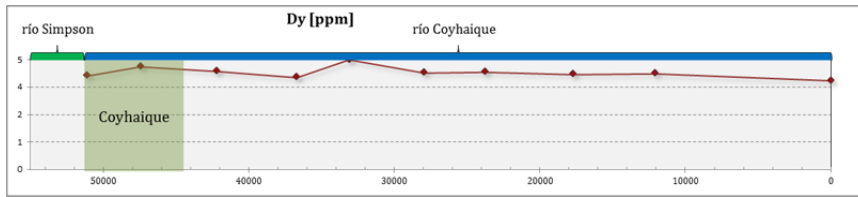
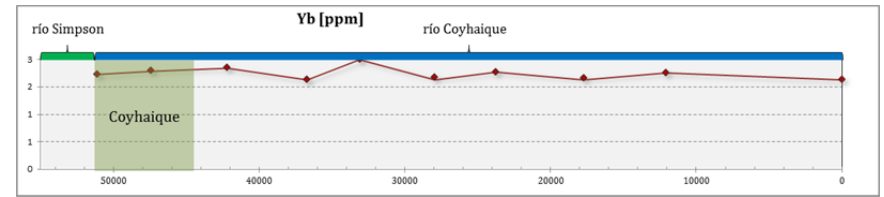
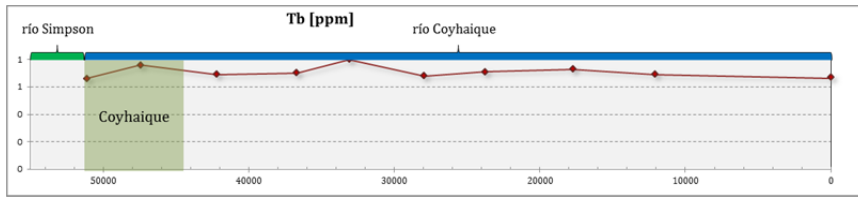
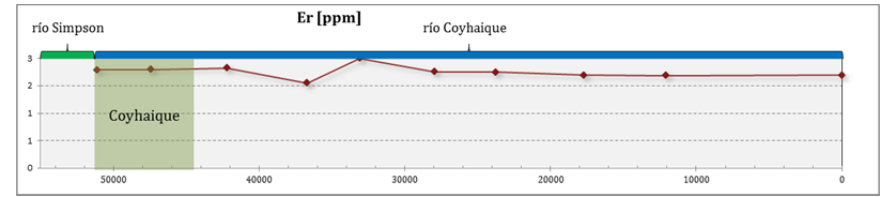
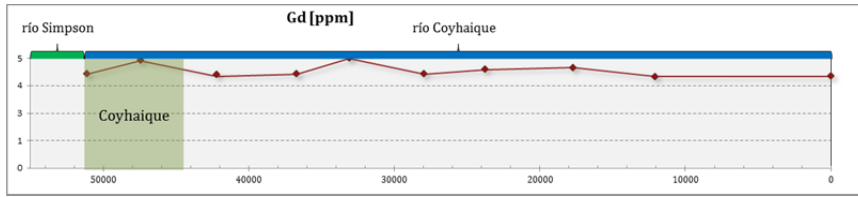
i) Río Coyhaique

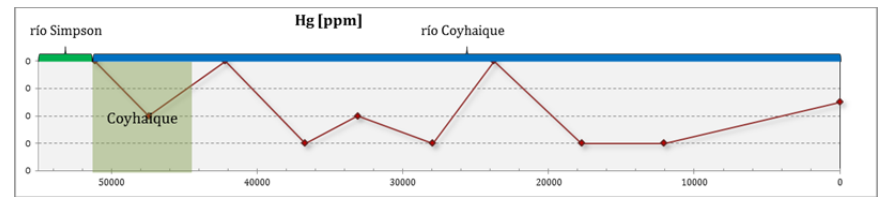
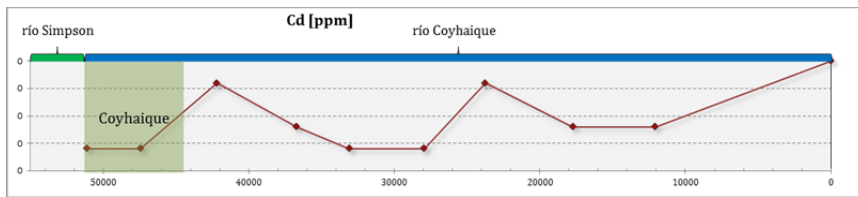
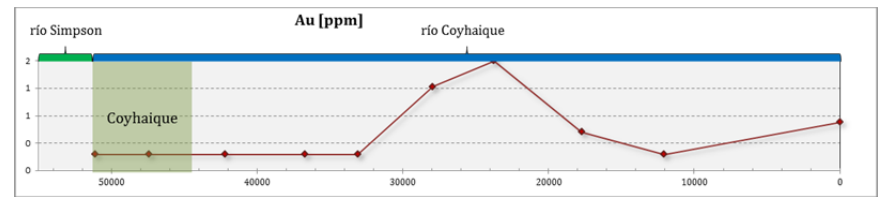
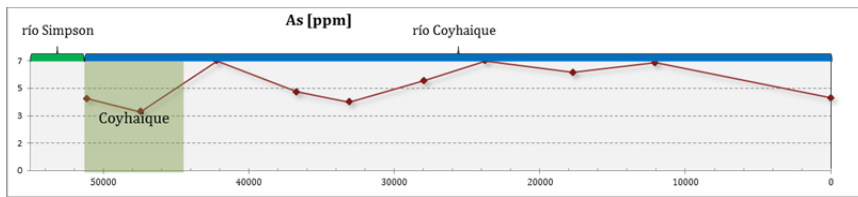
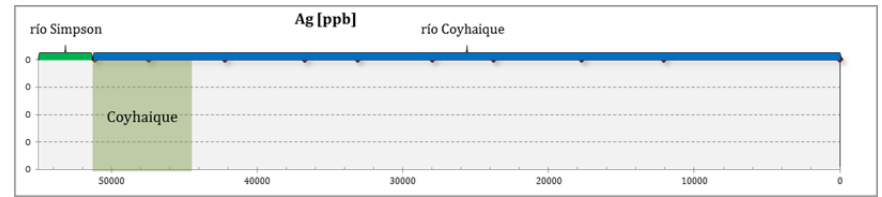
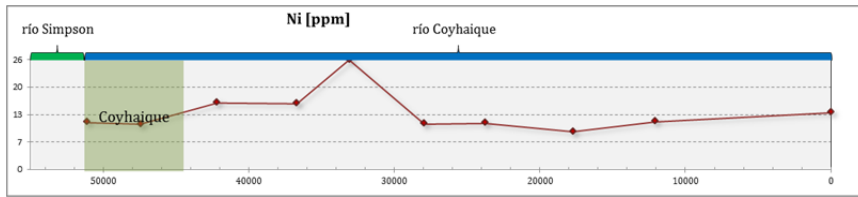
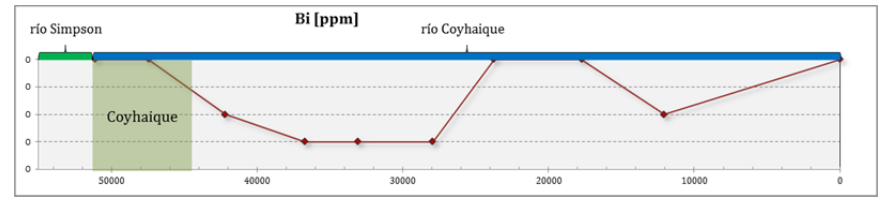
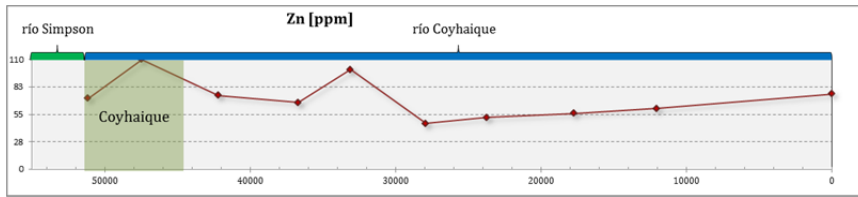
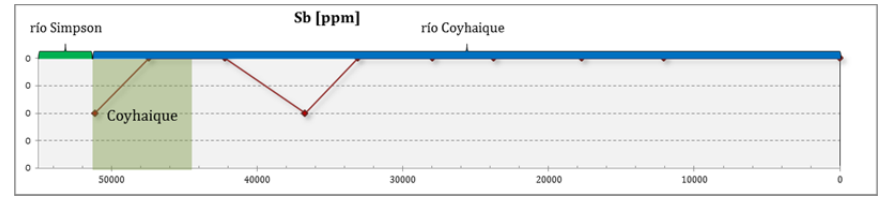
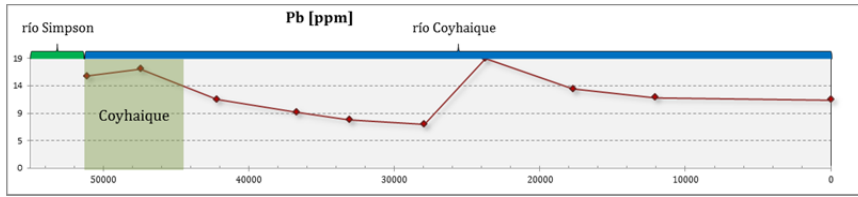


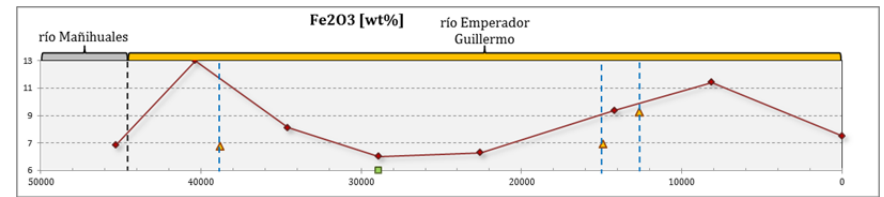
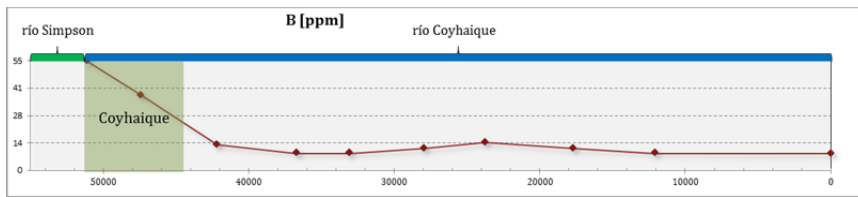
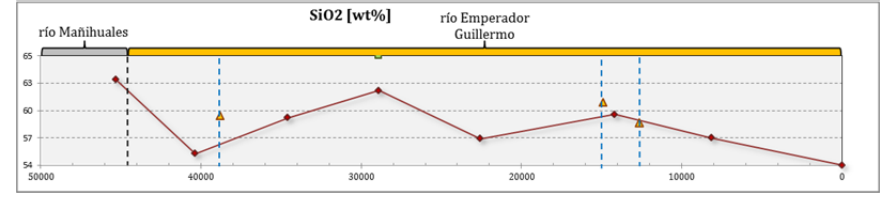
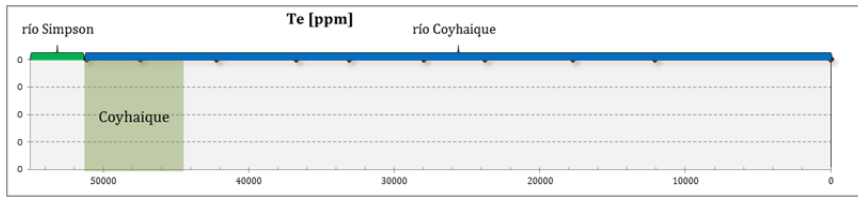
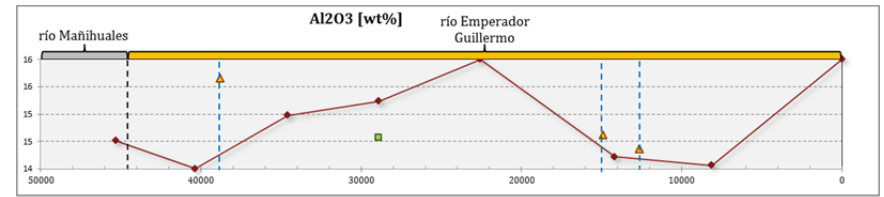
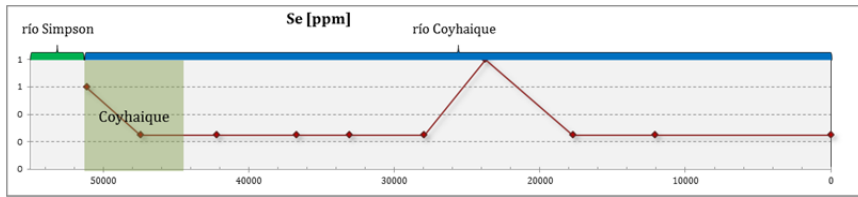
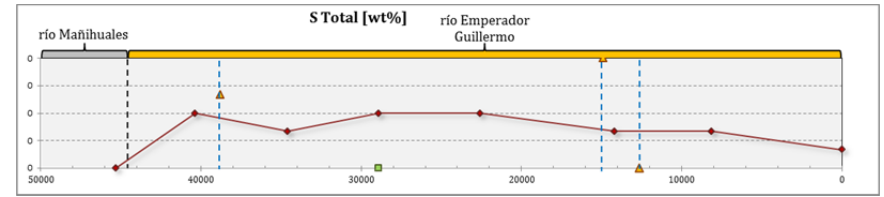
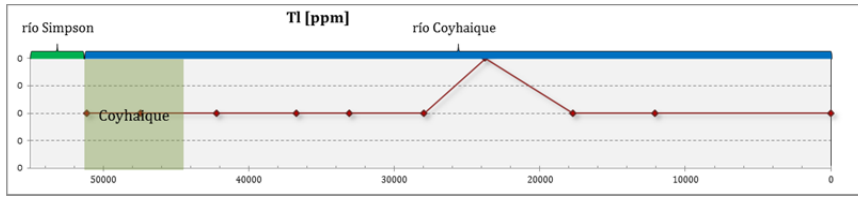




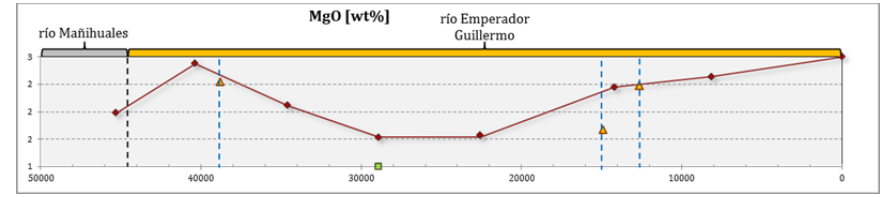
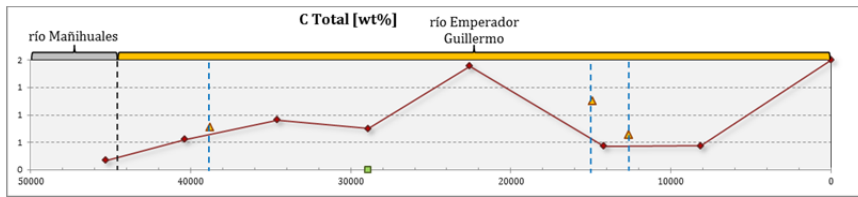


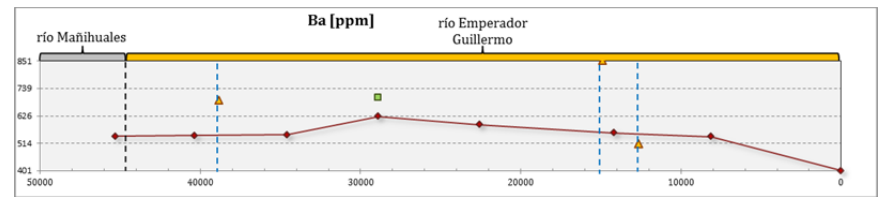
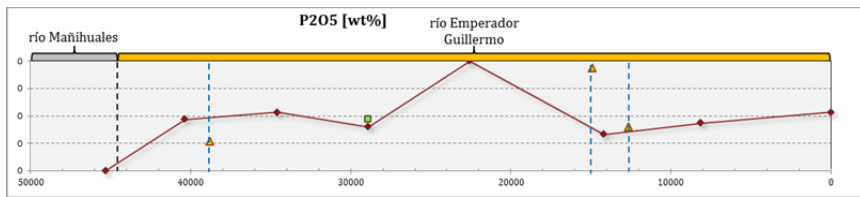
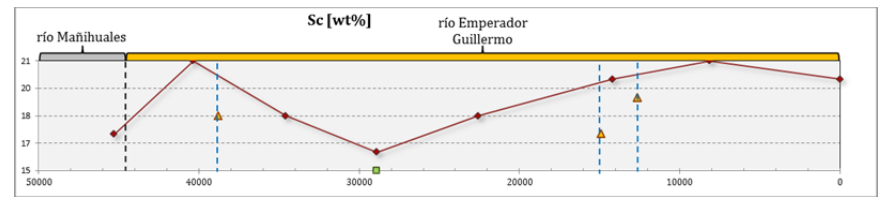
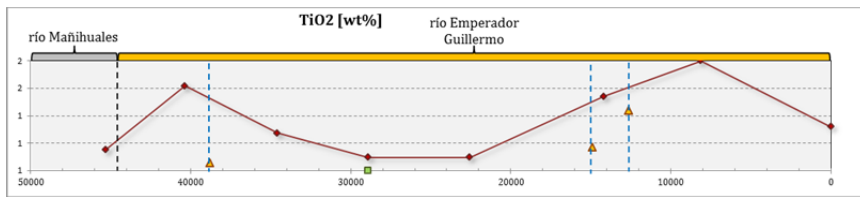
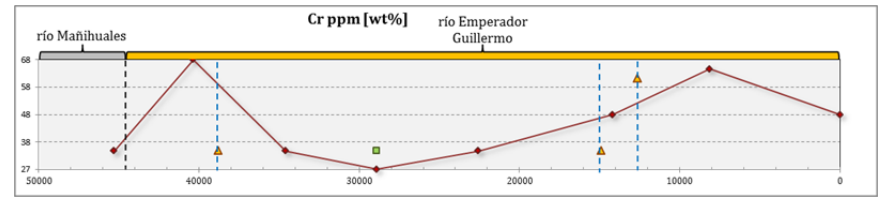
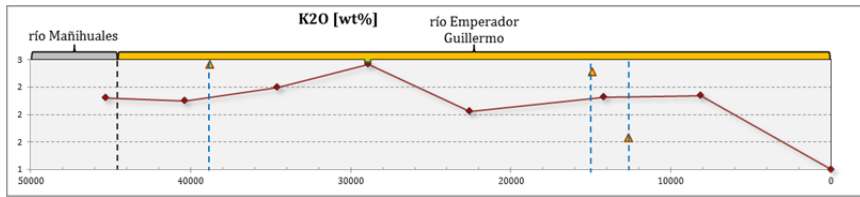
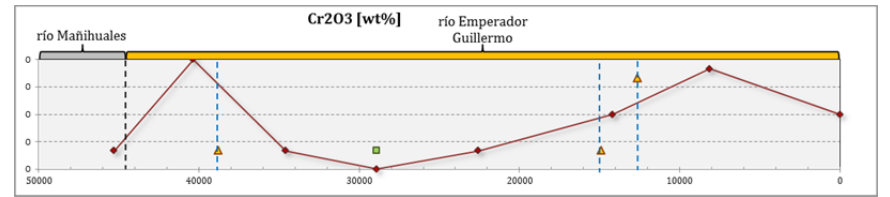
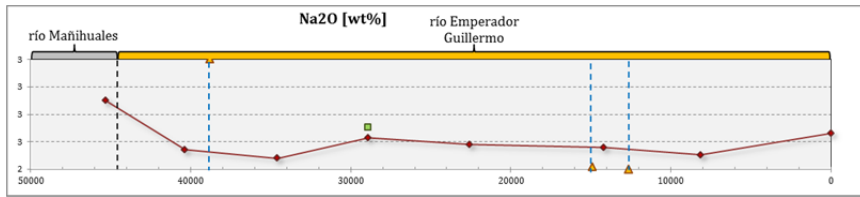
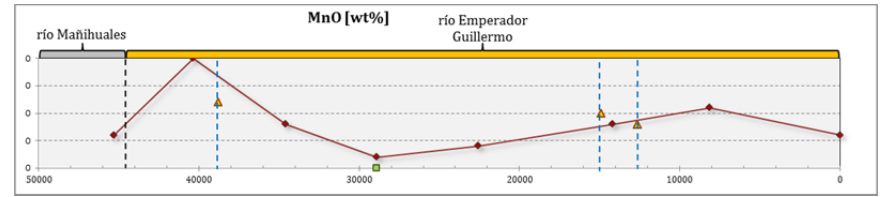
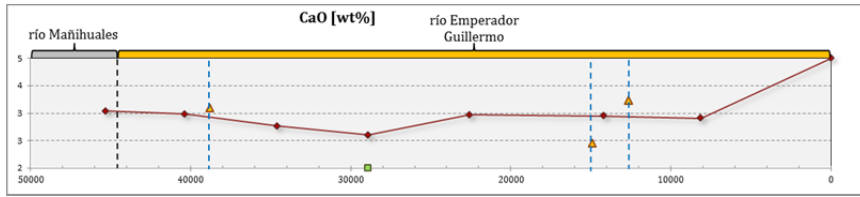


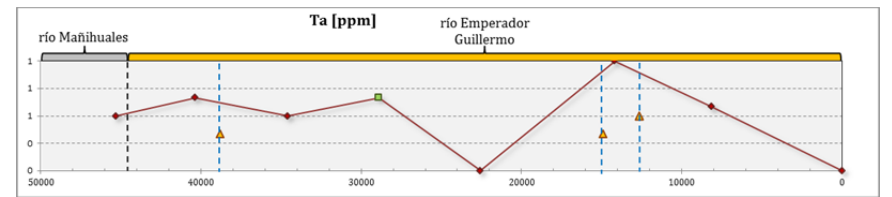
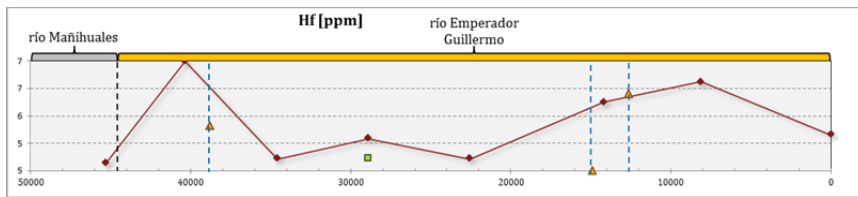
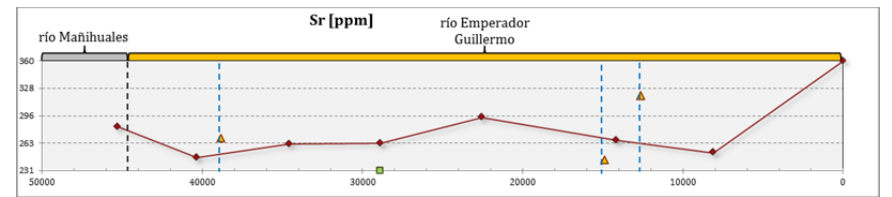
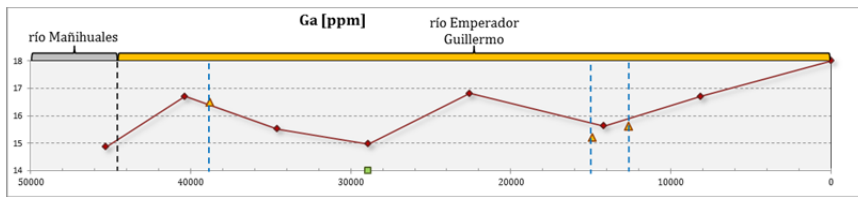
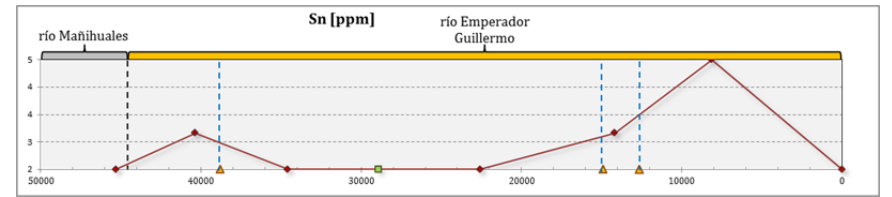
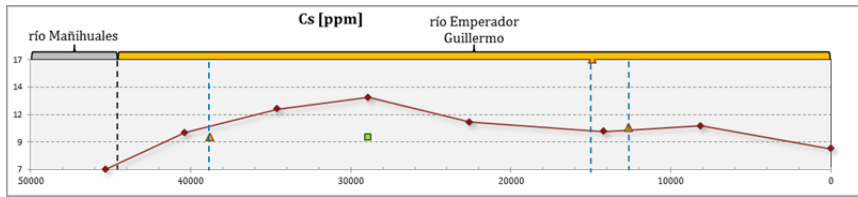
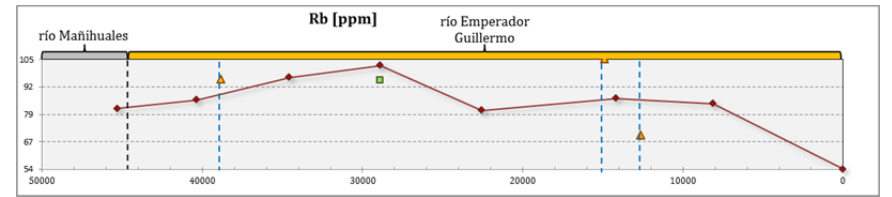
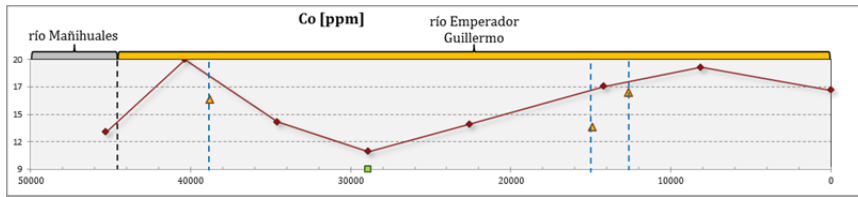
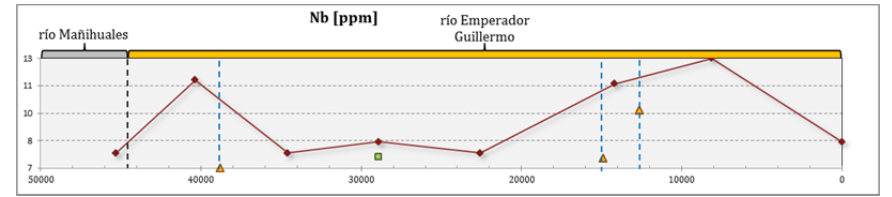
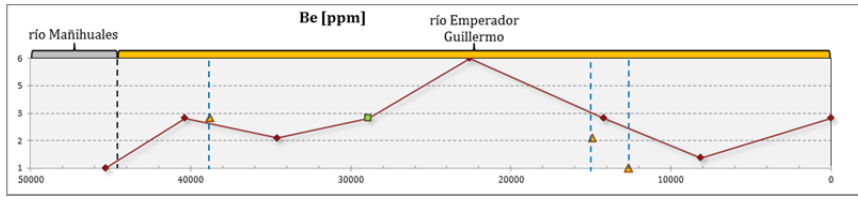


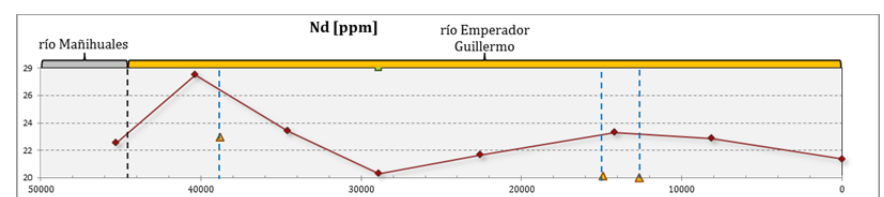
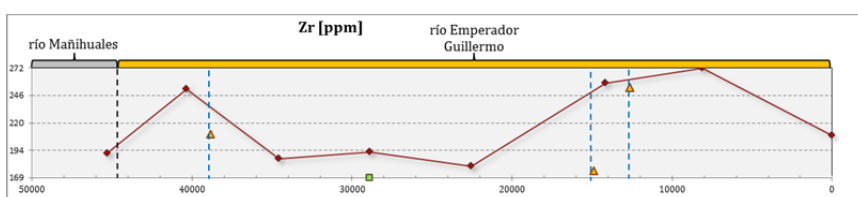
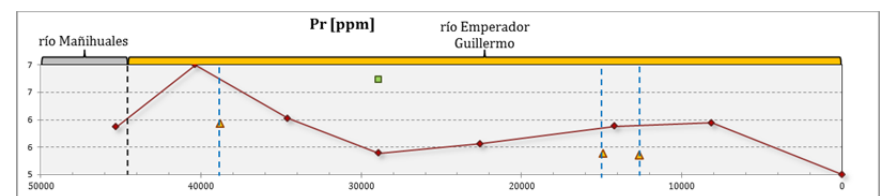
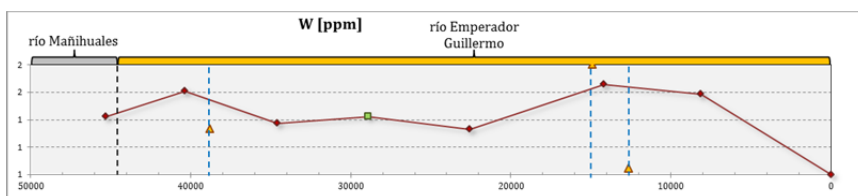
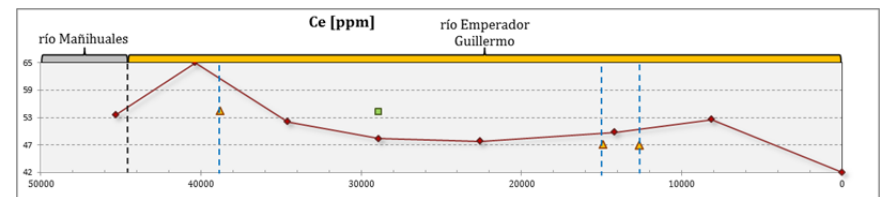
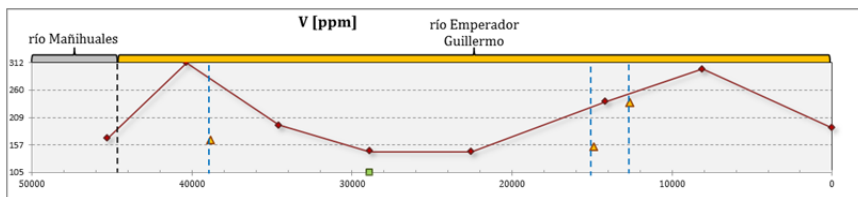
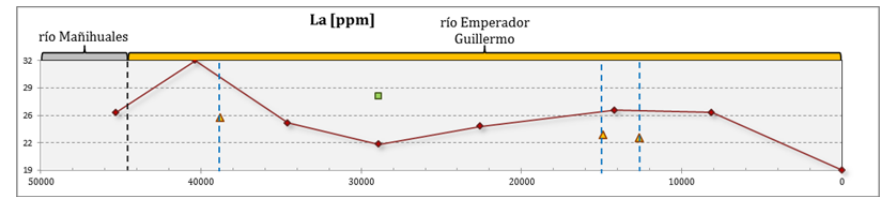
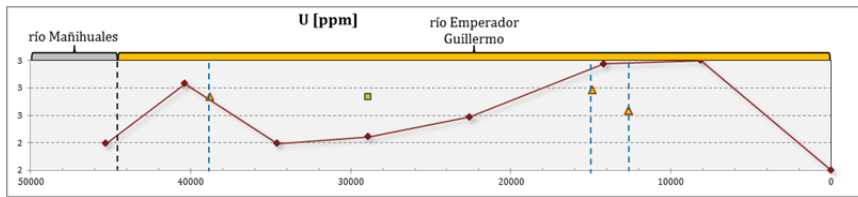
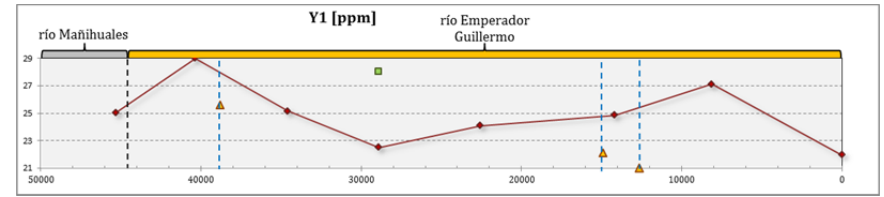
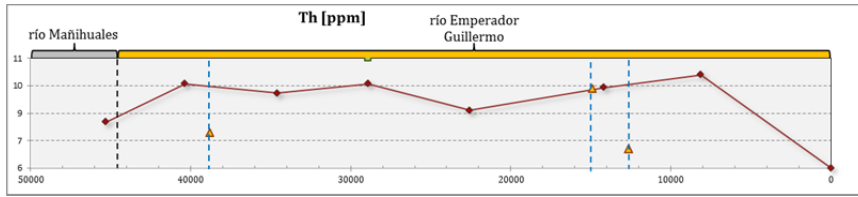


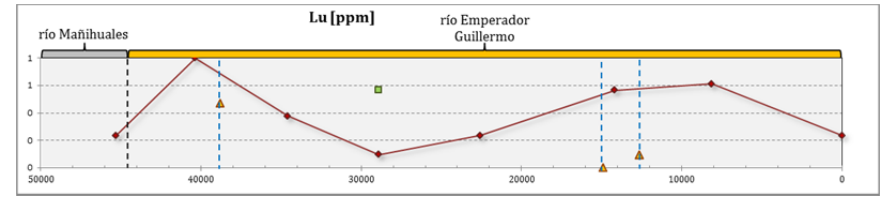
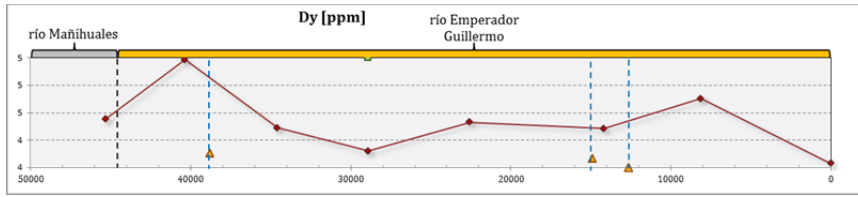
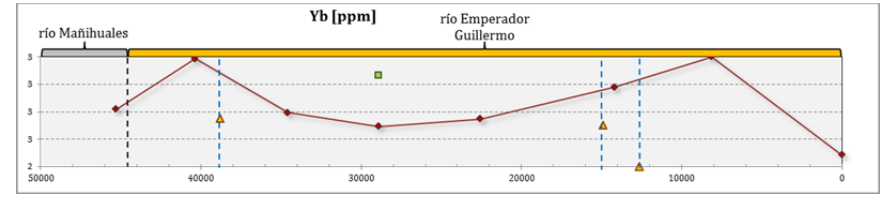
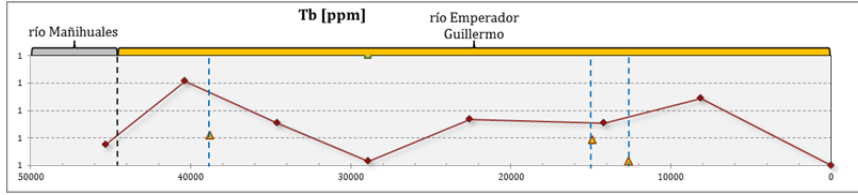
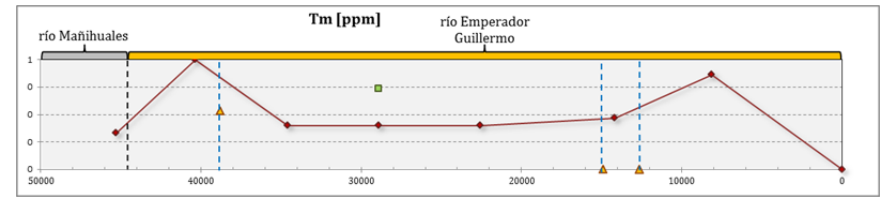
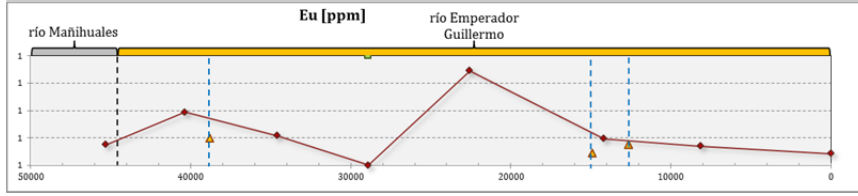
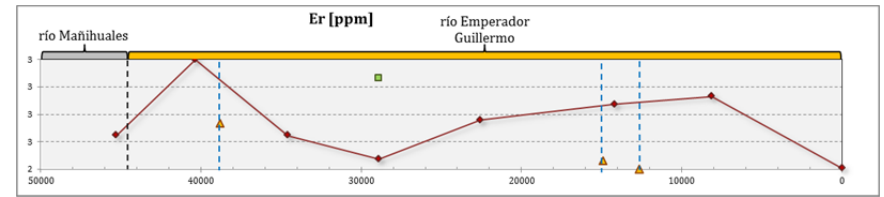
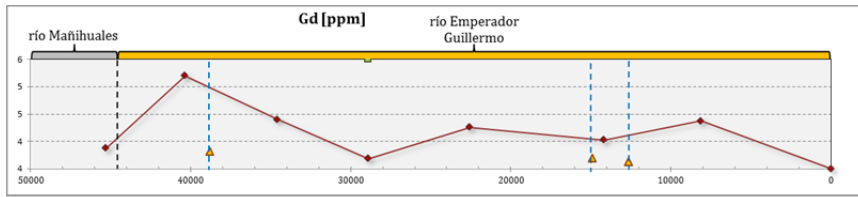
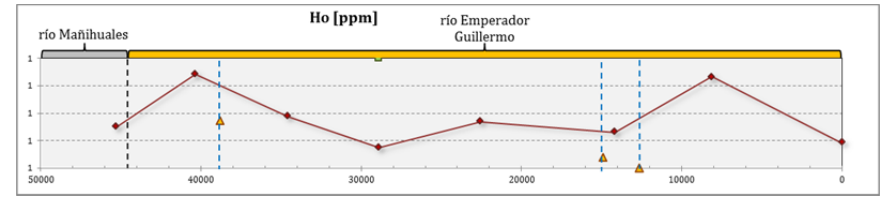
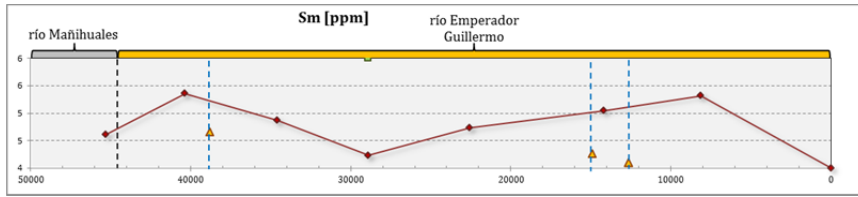
ii) Río Emperador Guillermo

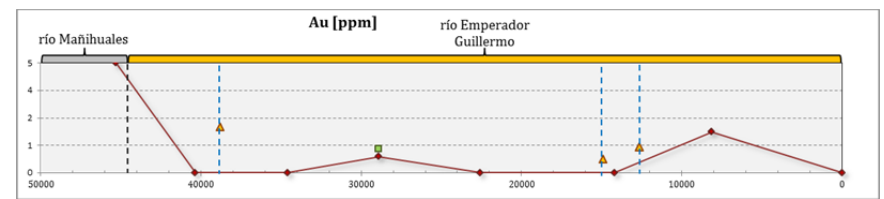
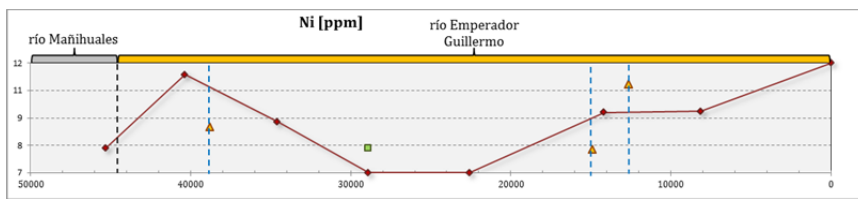
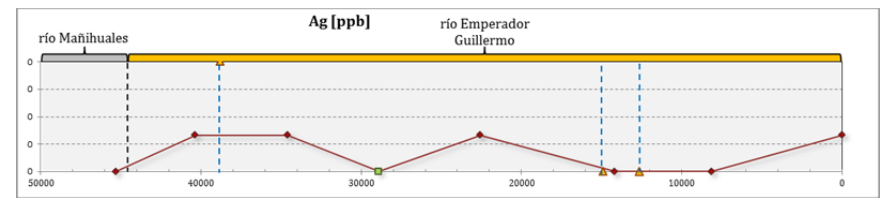
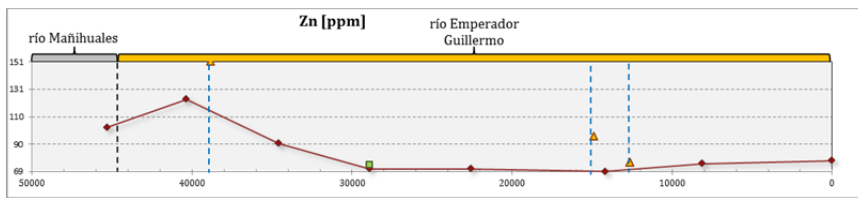
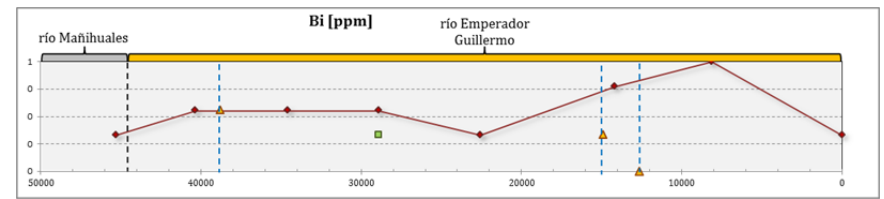
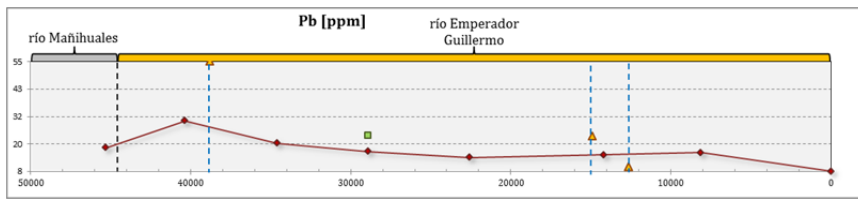
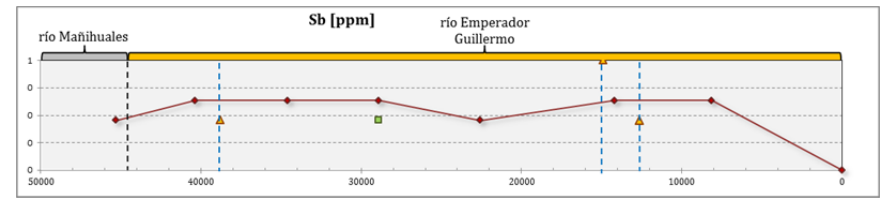
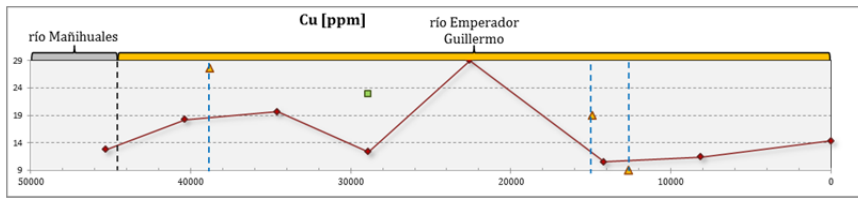
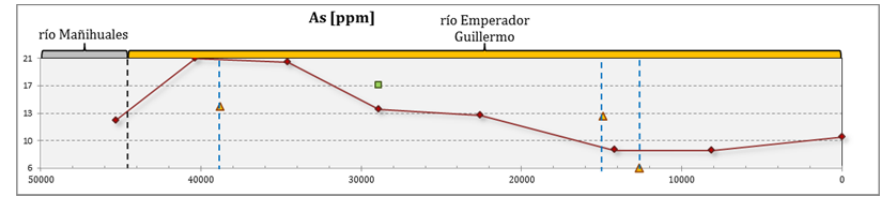
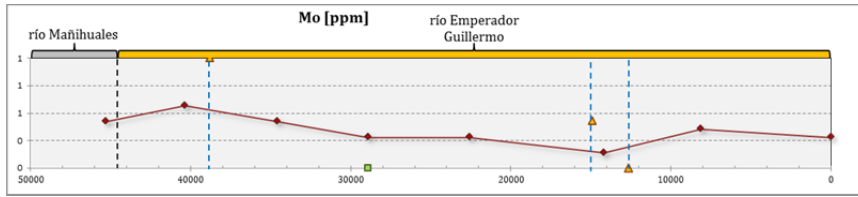


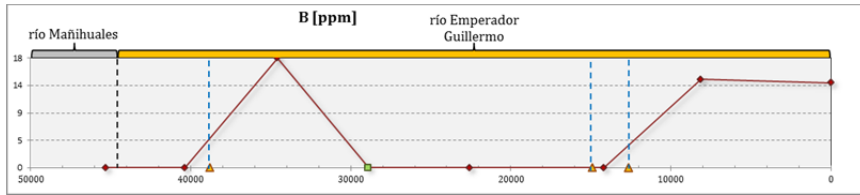
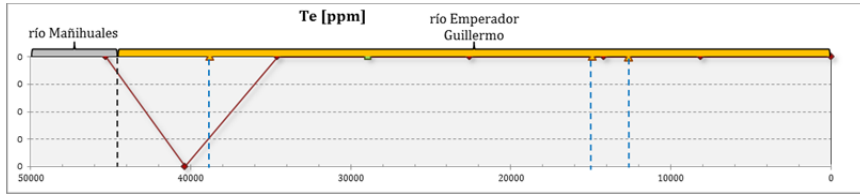
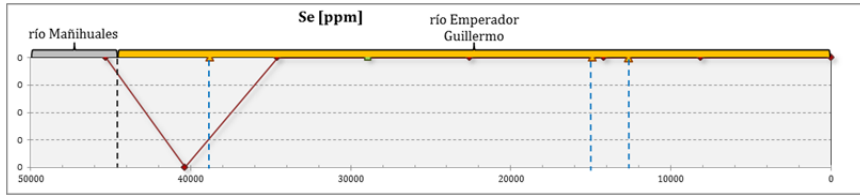
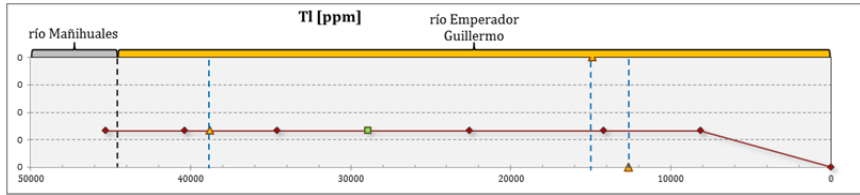
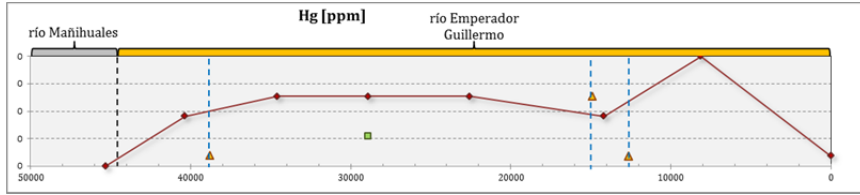




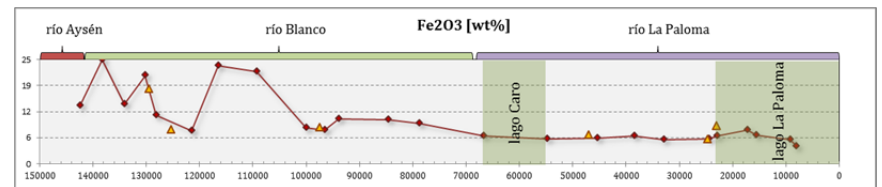
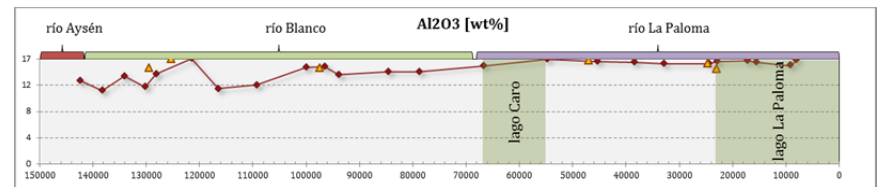
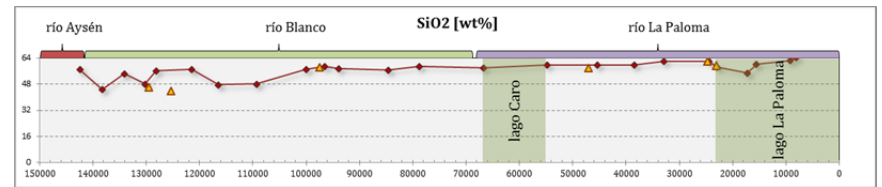
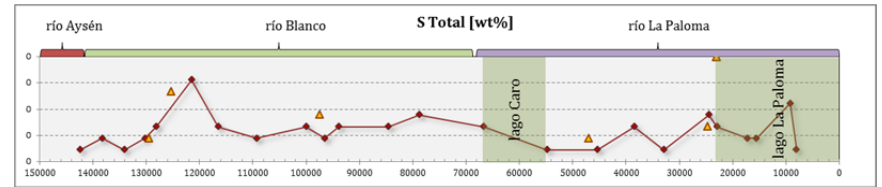
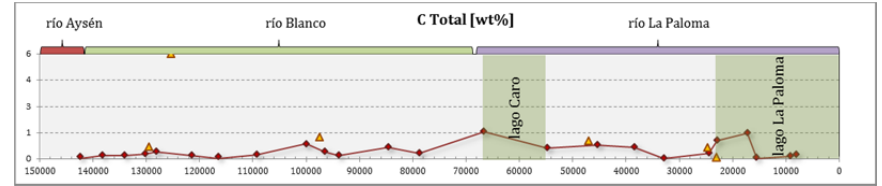


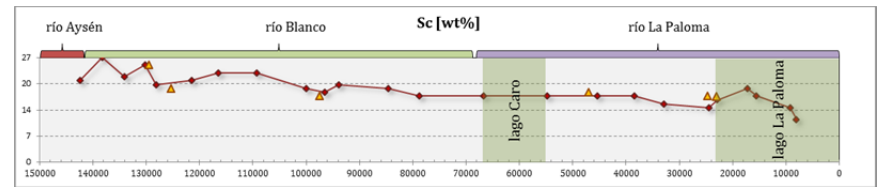
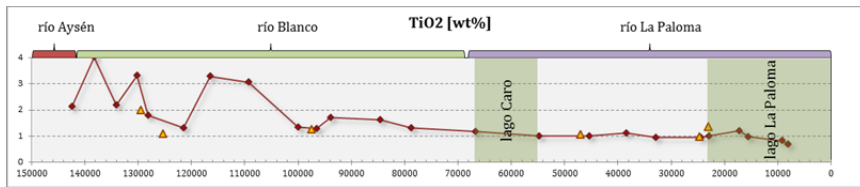
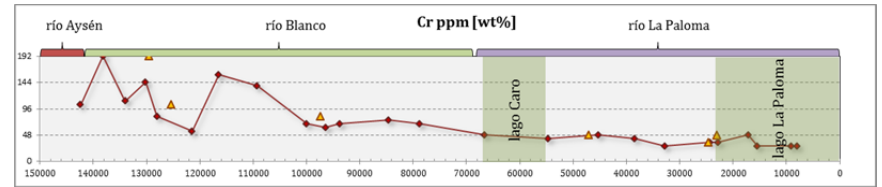
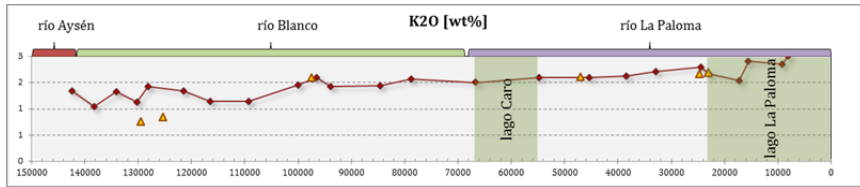
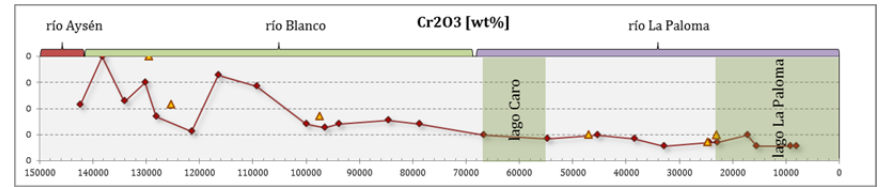
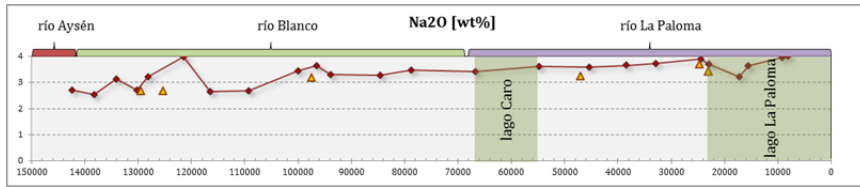
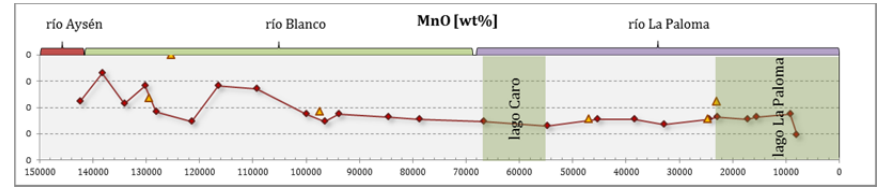
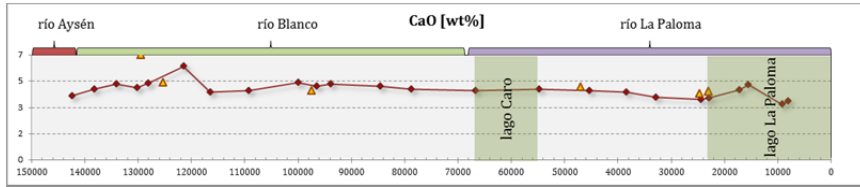
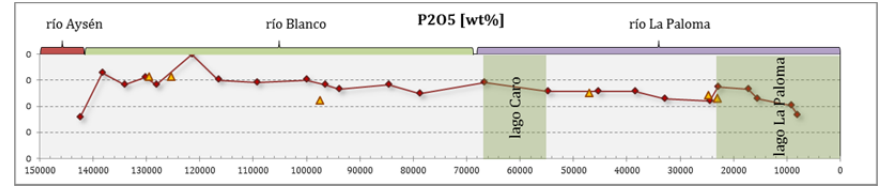
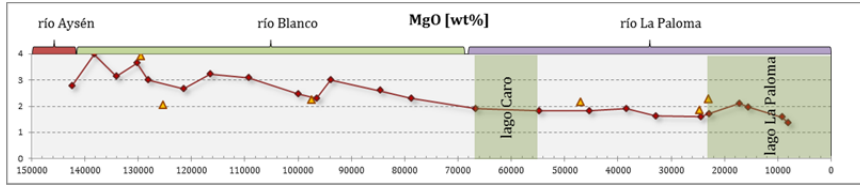


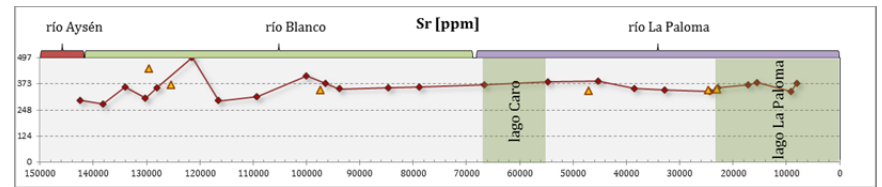
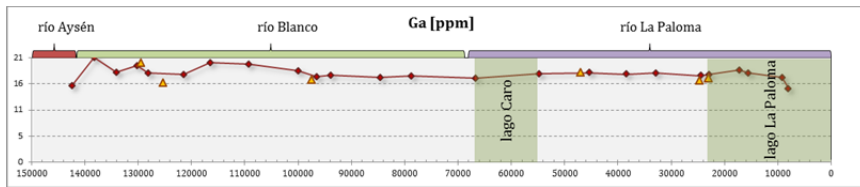
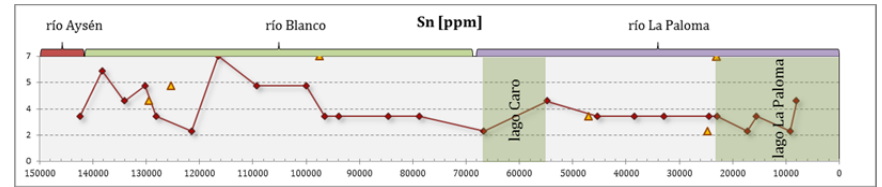
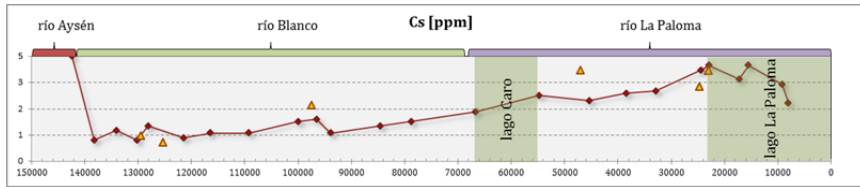
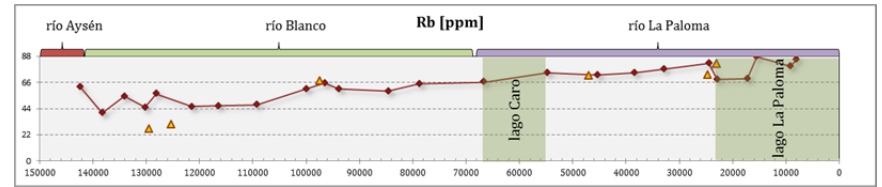
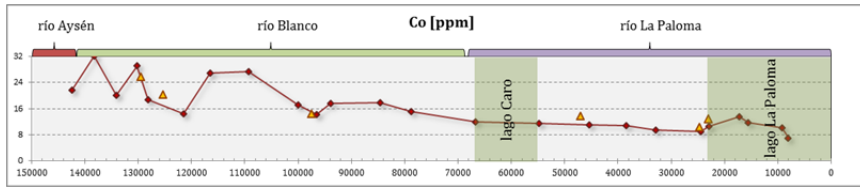
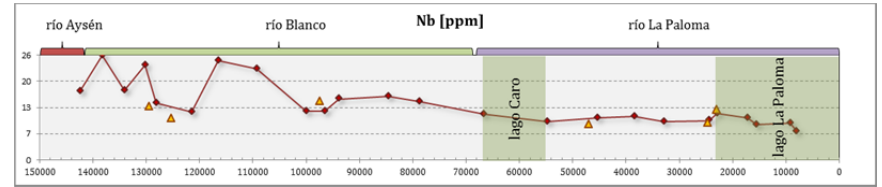
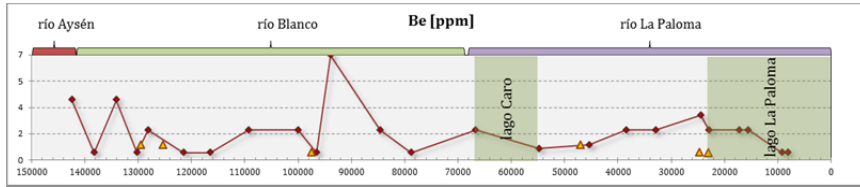
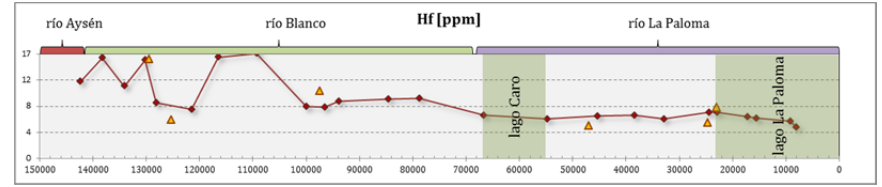
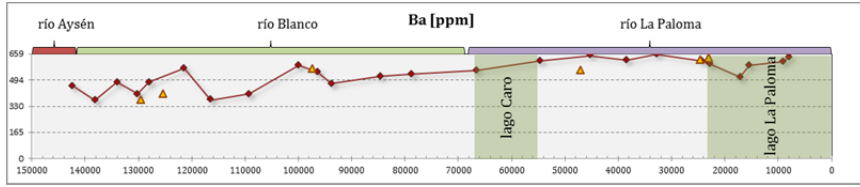


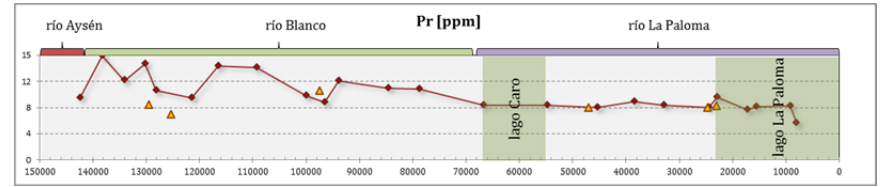
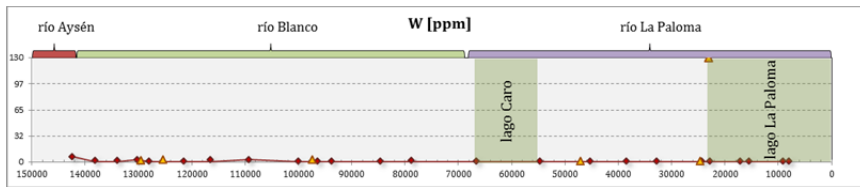
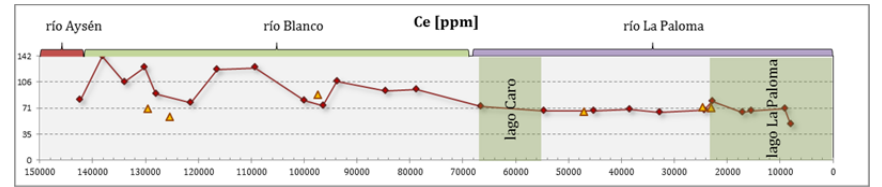
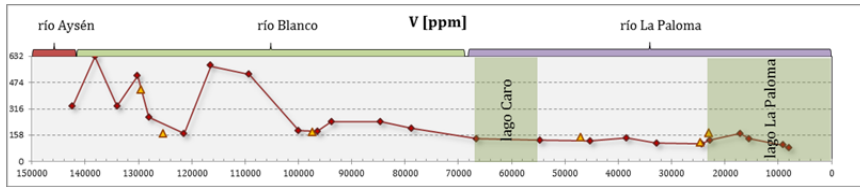
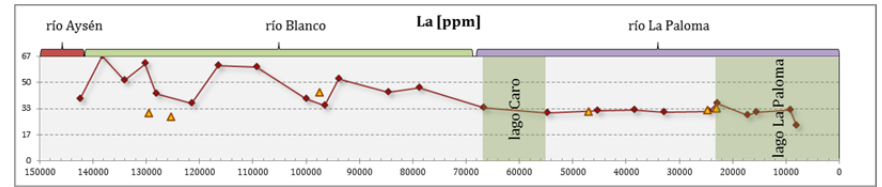
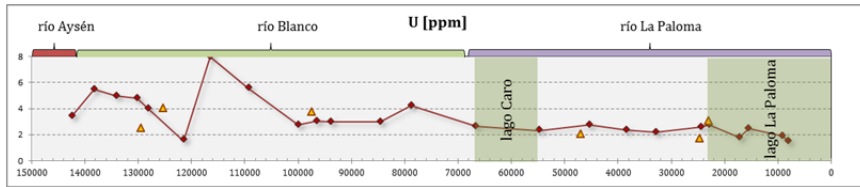
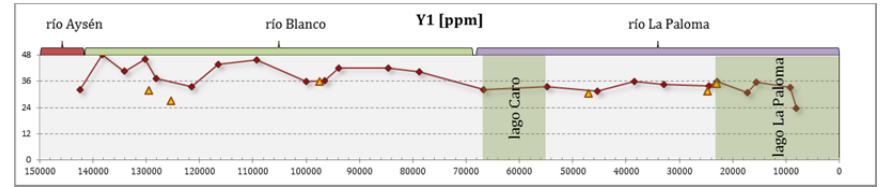
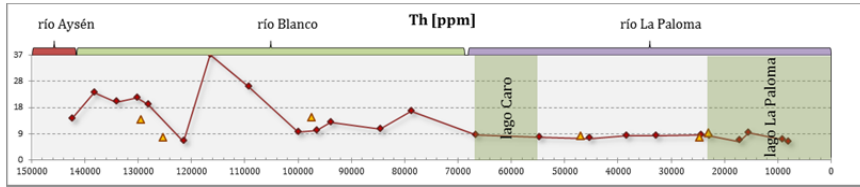
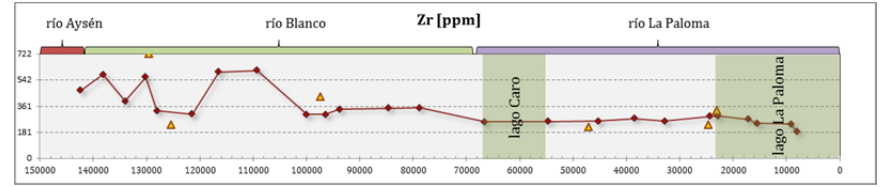
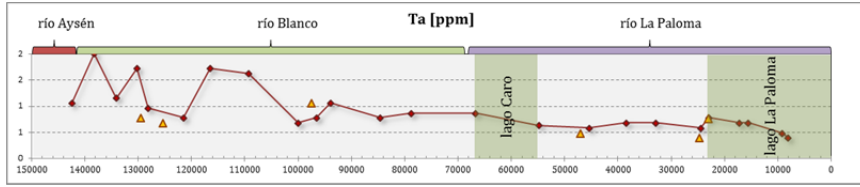


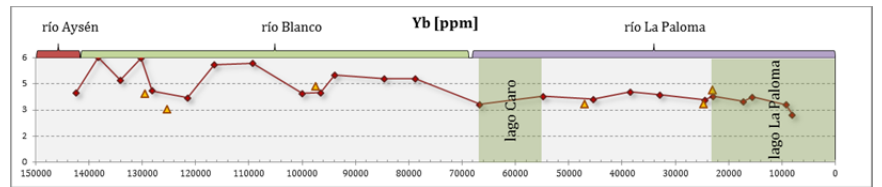
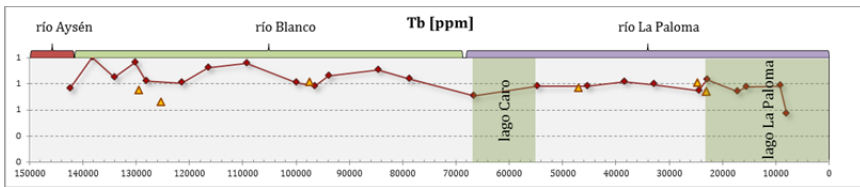
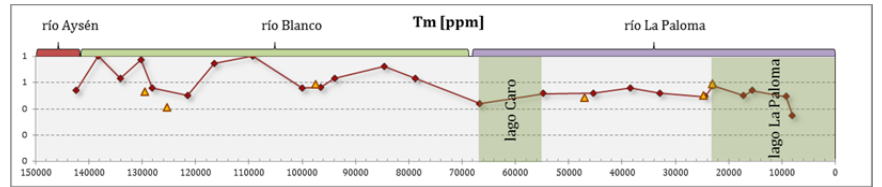
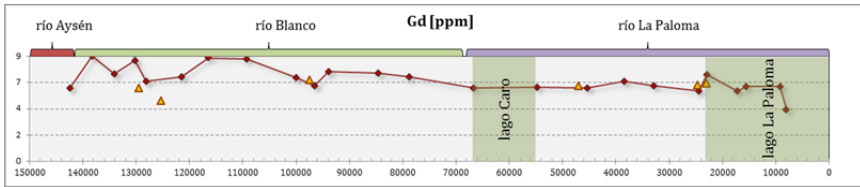
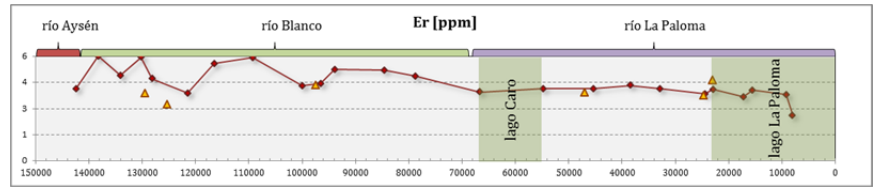
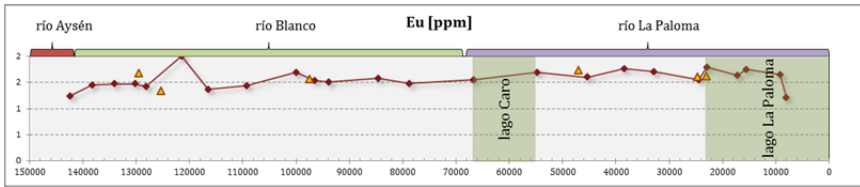
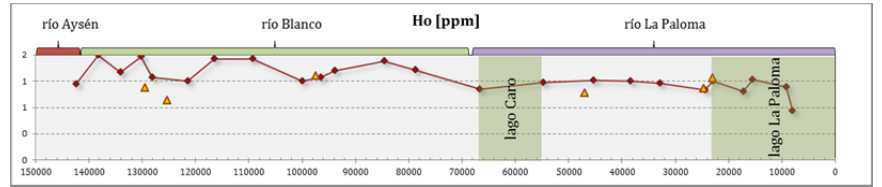
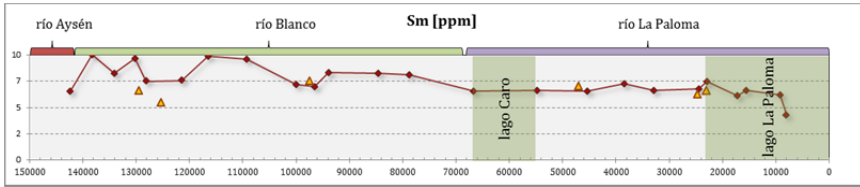
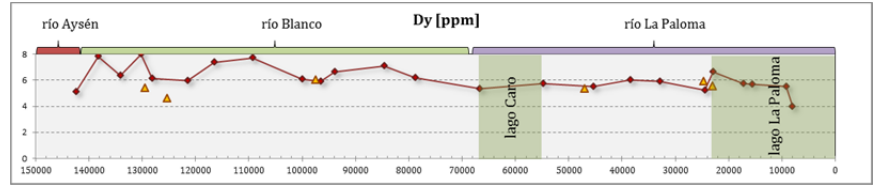
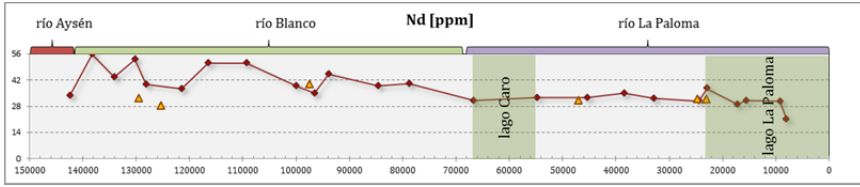
iii) Ríos La Paloma – Blanco

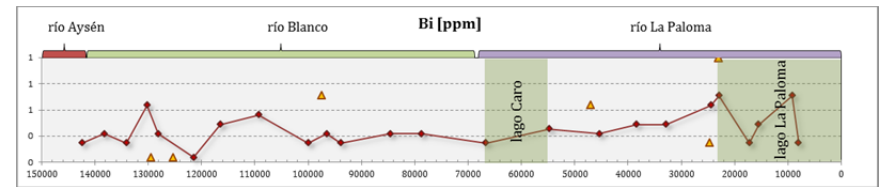
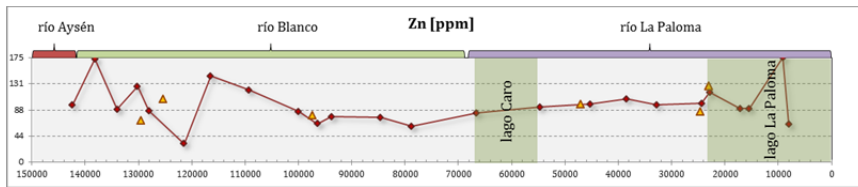
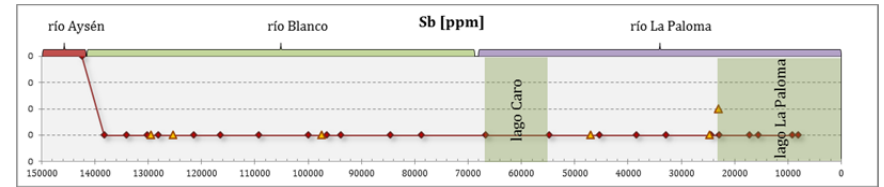
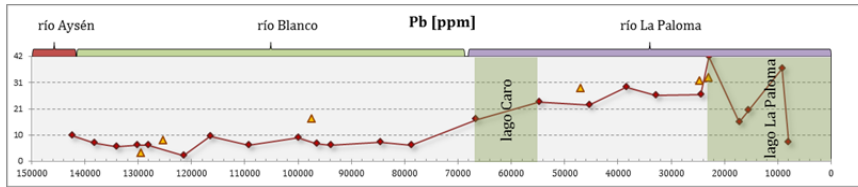
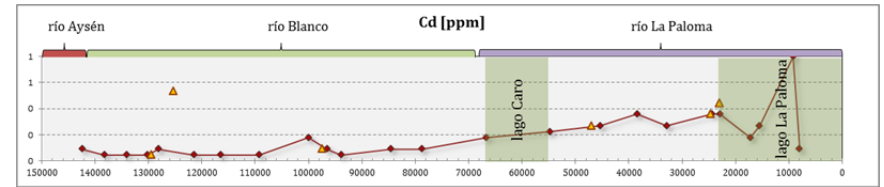
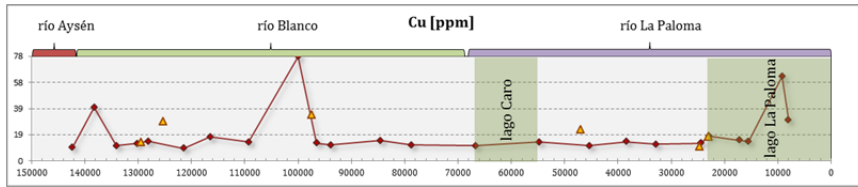
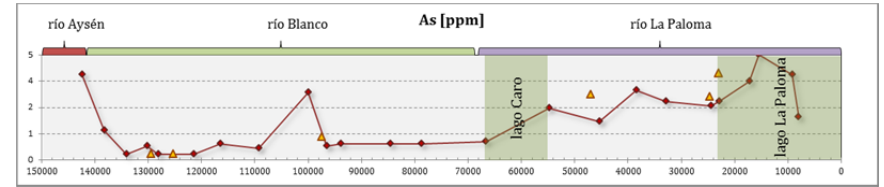
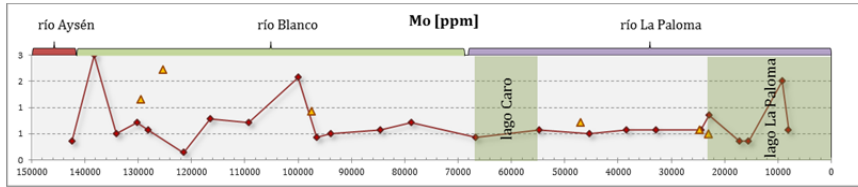
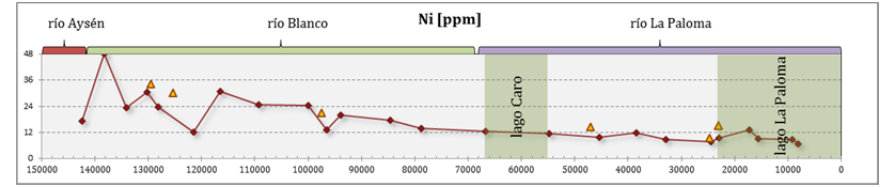
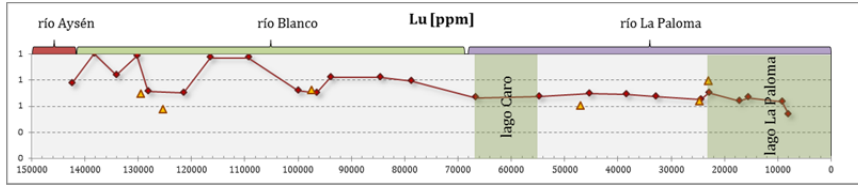


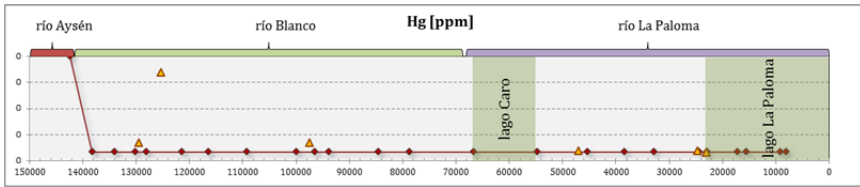
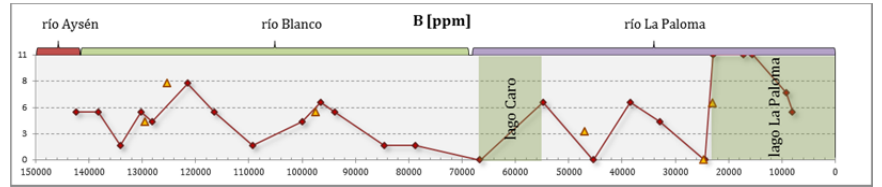
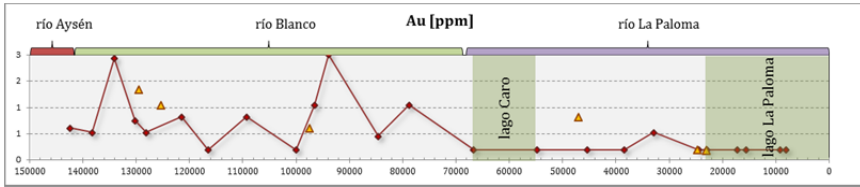
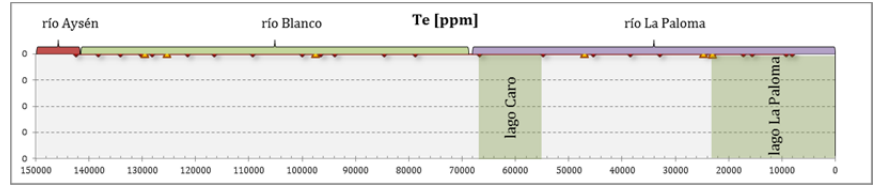
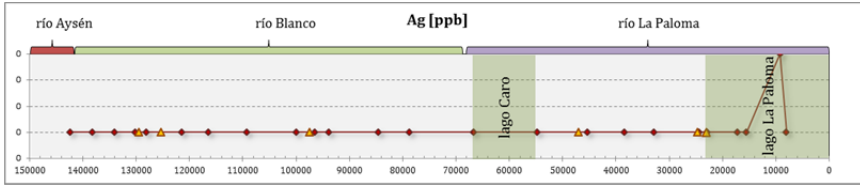




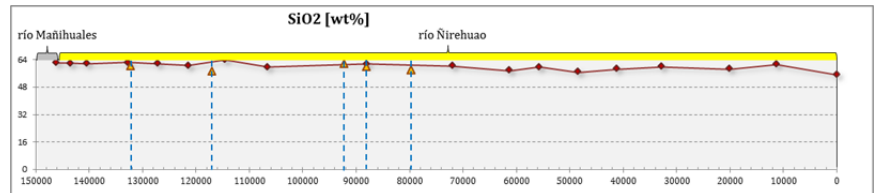
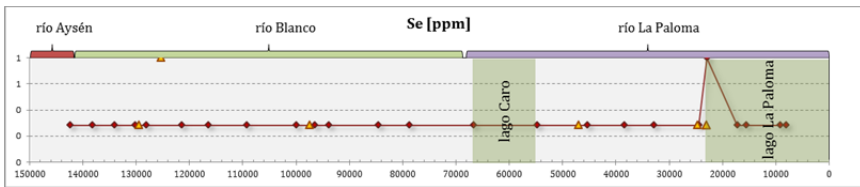
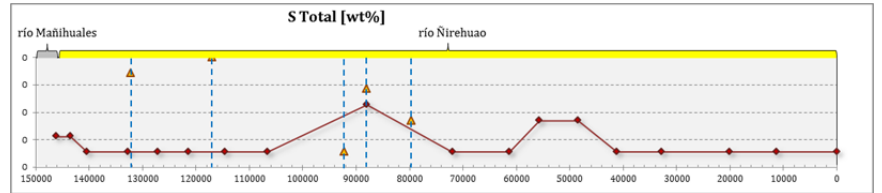
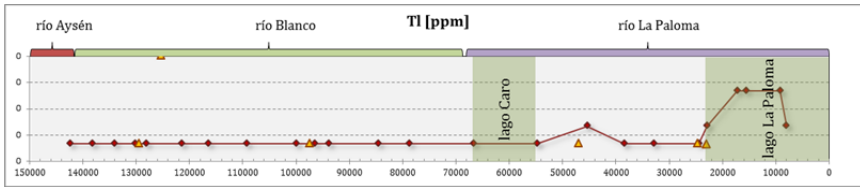
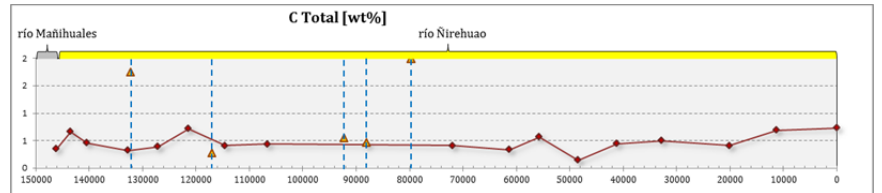


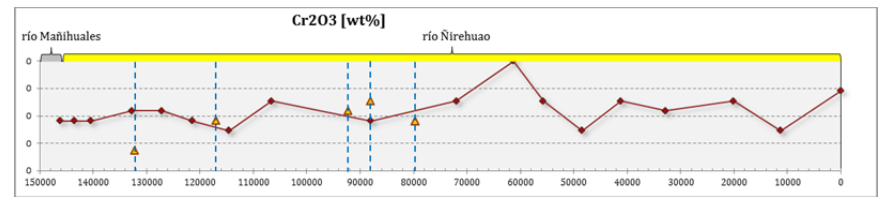
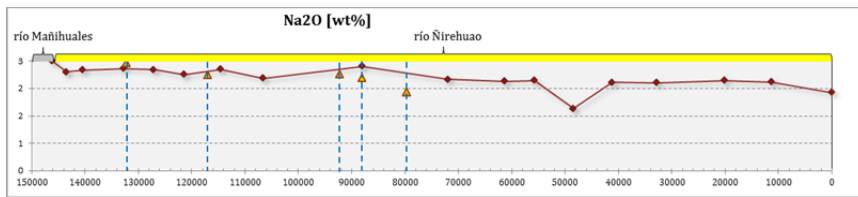
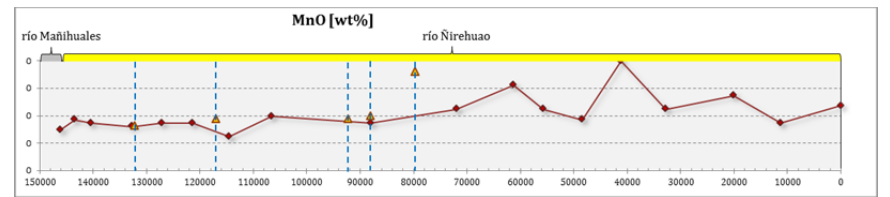
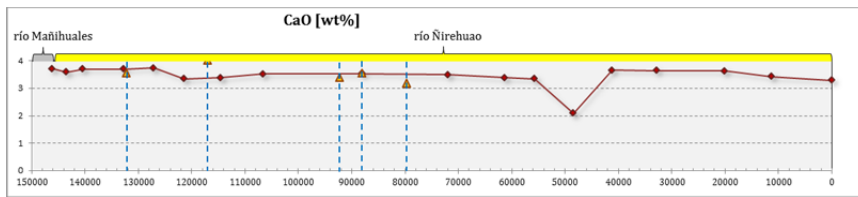
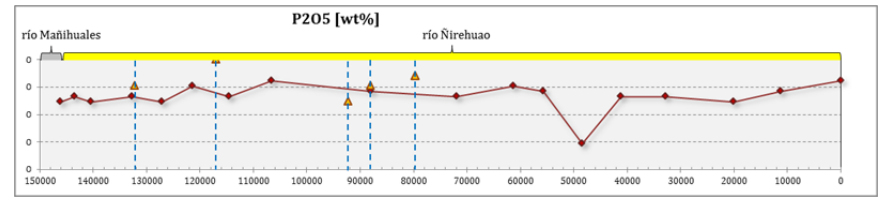
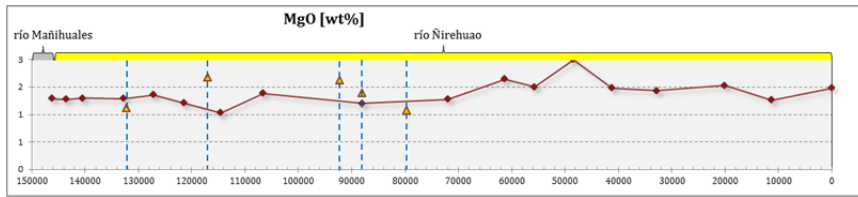
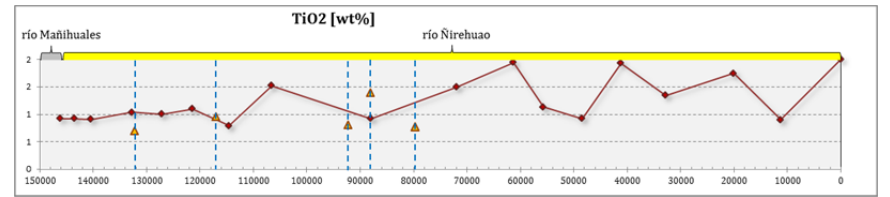
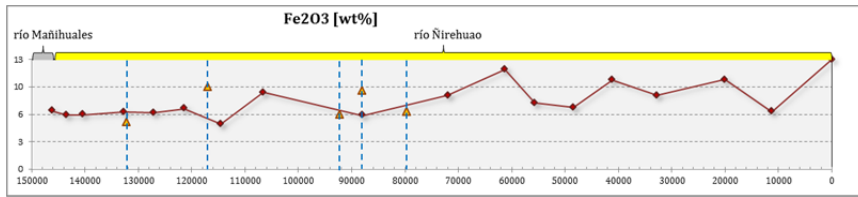
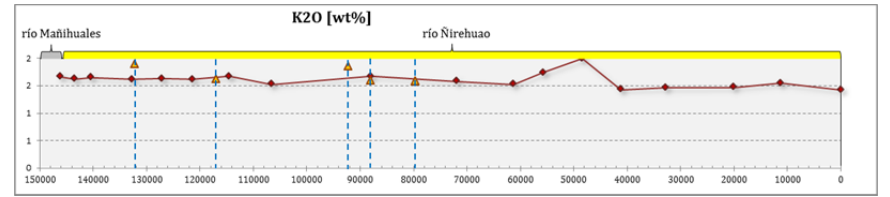
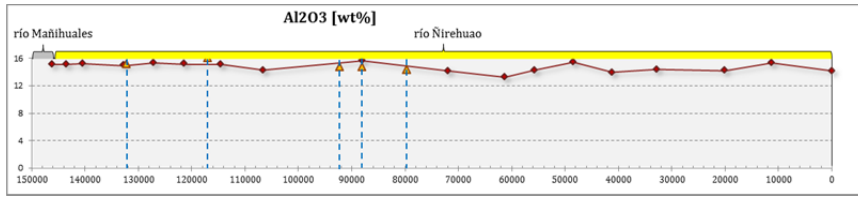


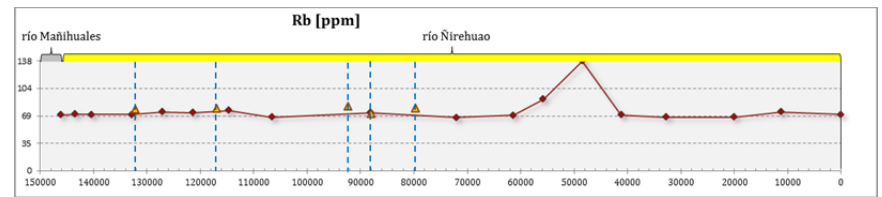
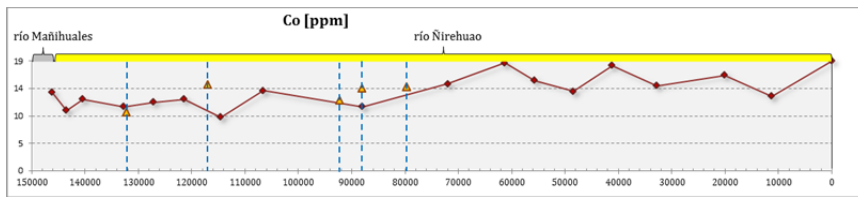
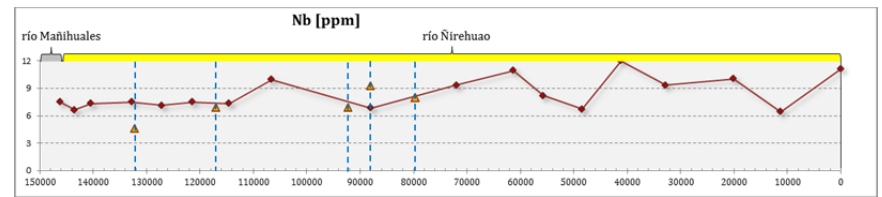
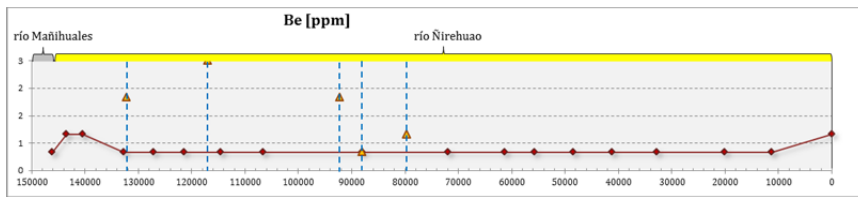
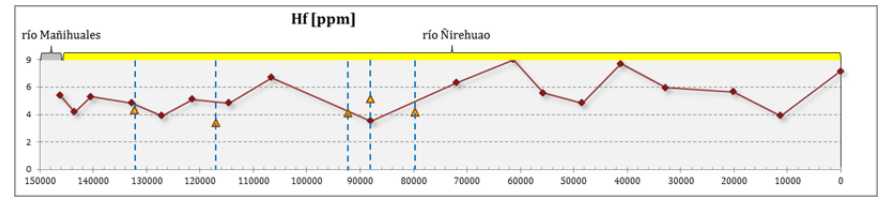
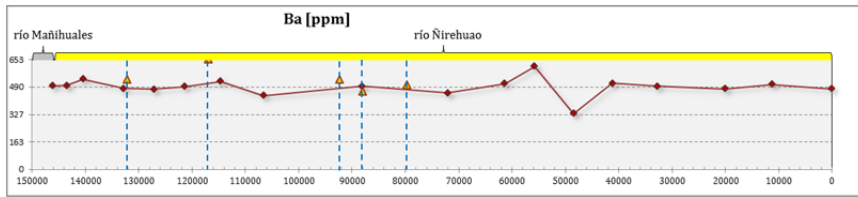
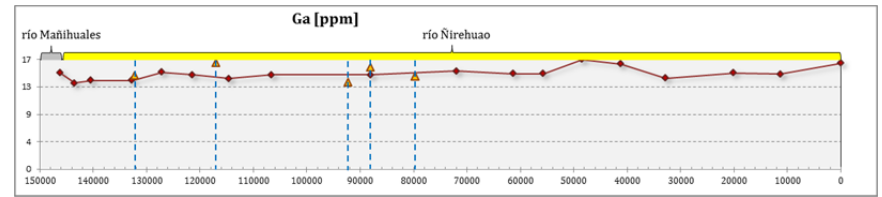
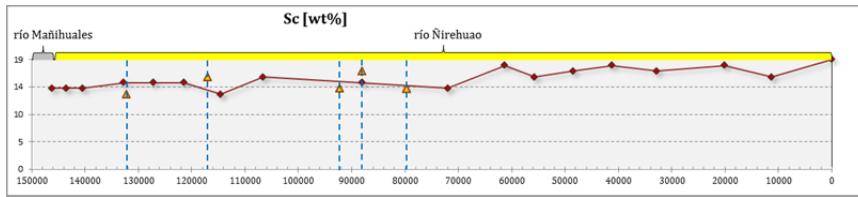
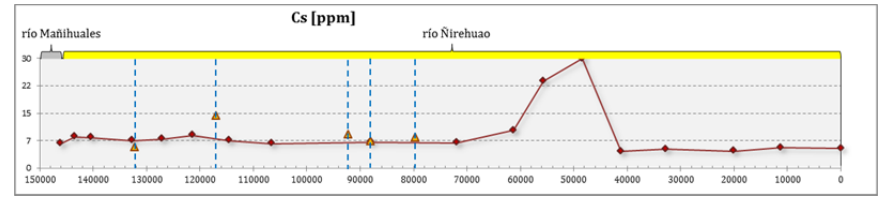
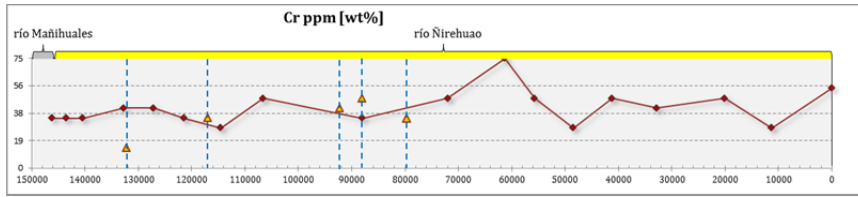


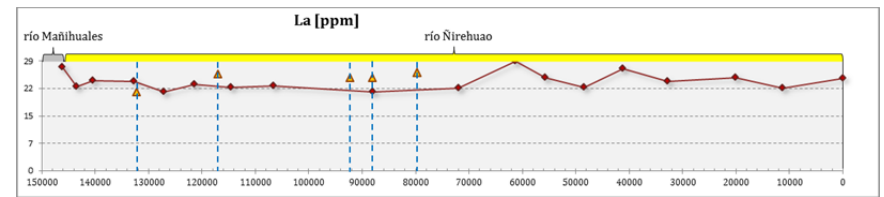
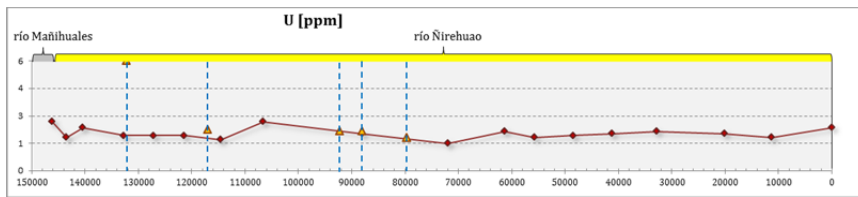
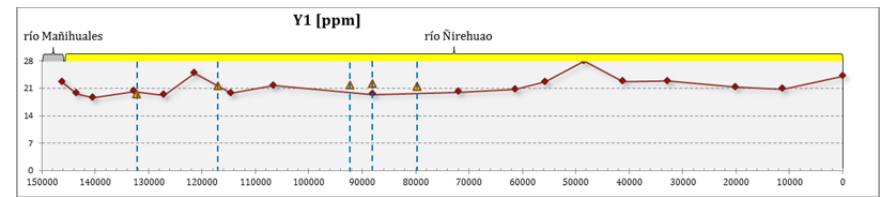
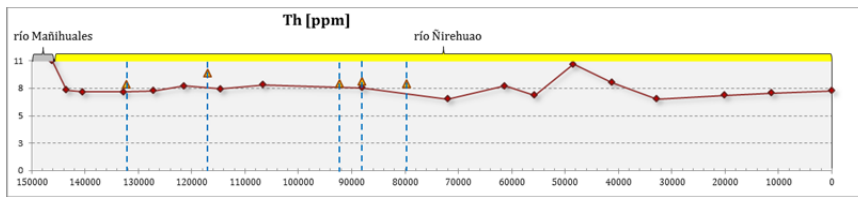
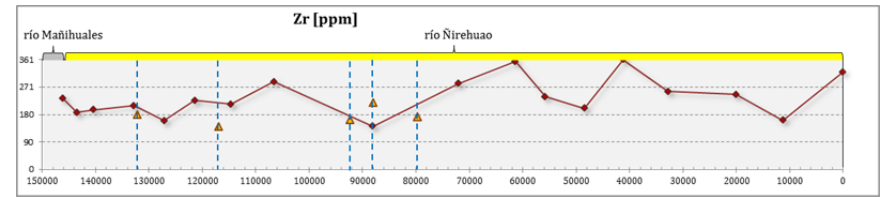
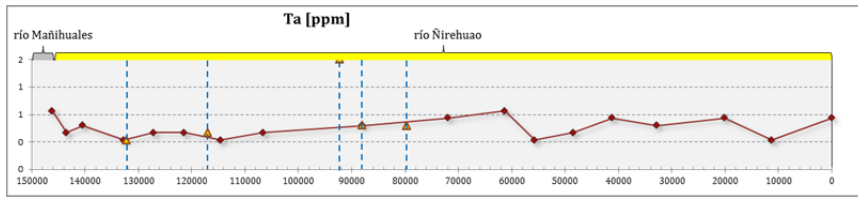
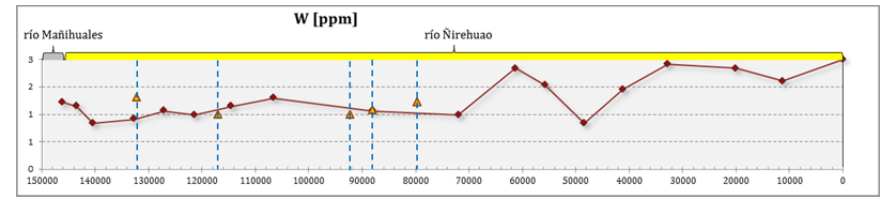
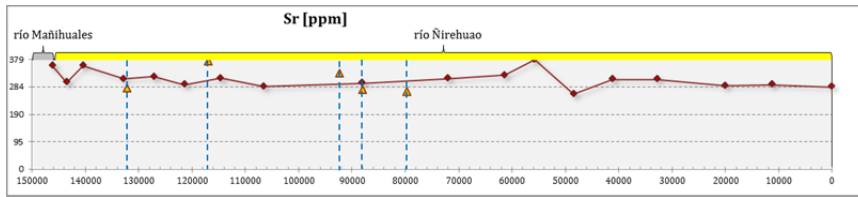
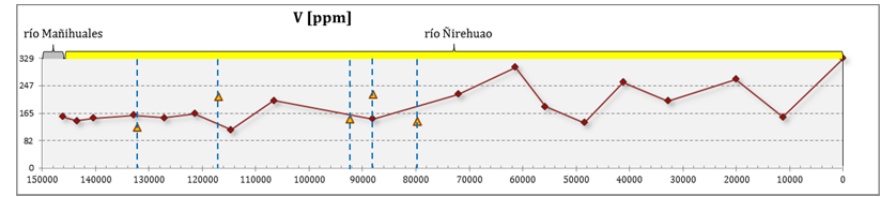
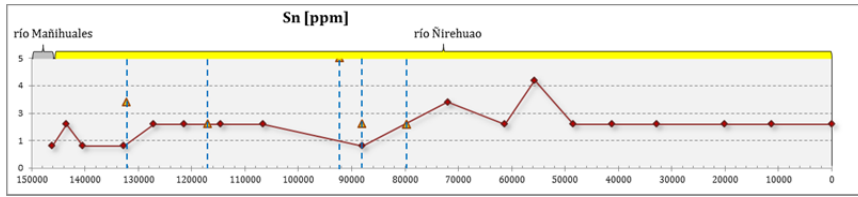


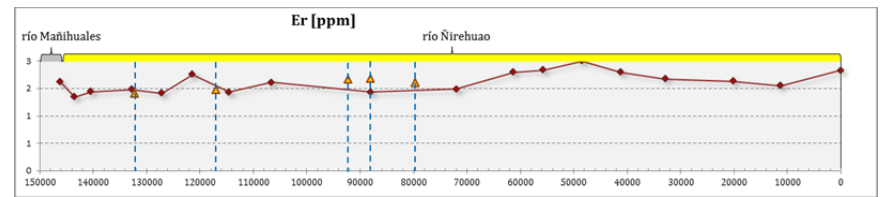
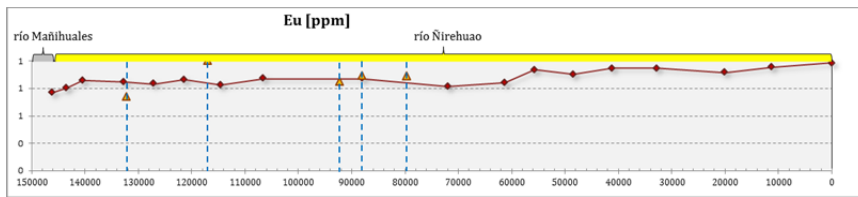
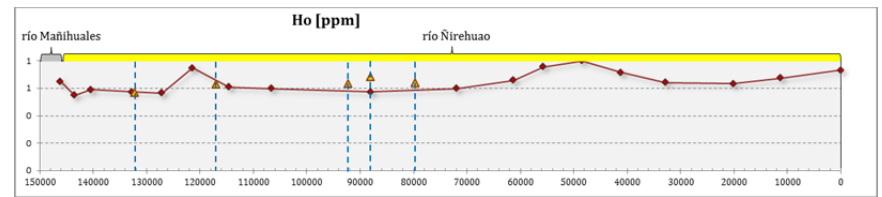
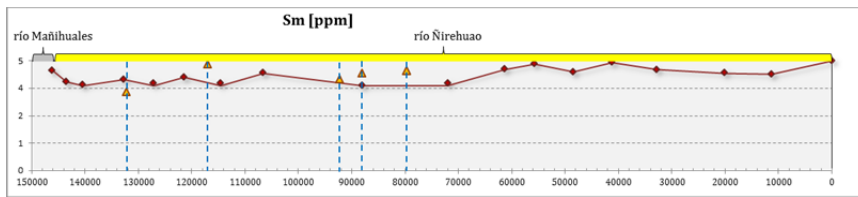
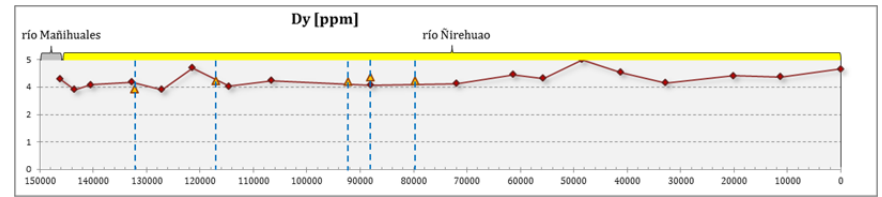
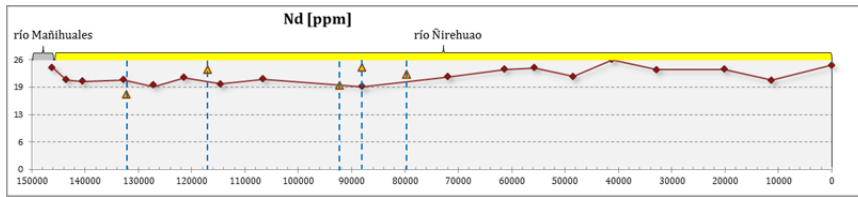
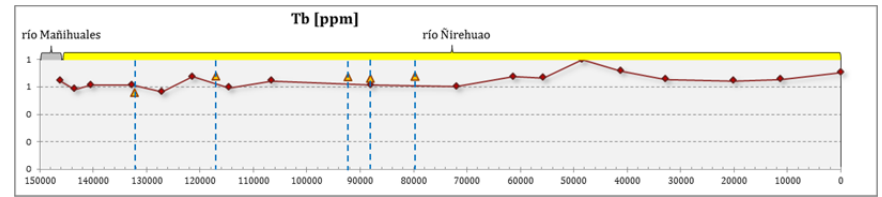
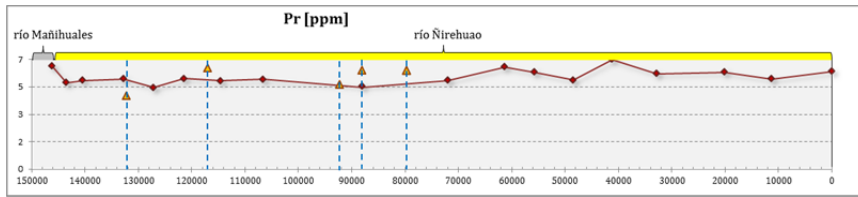
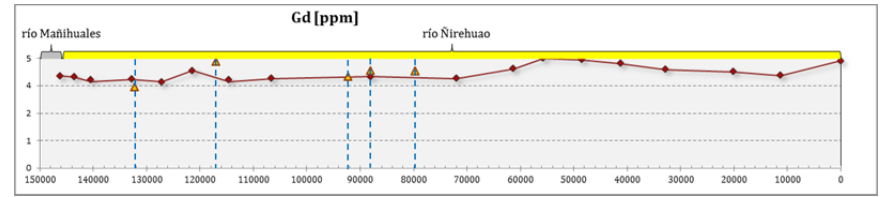
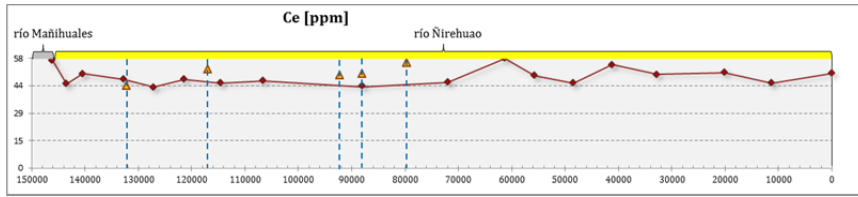
iv) Río Ñirehuao

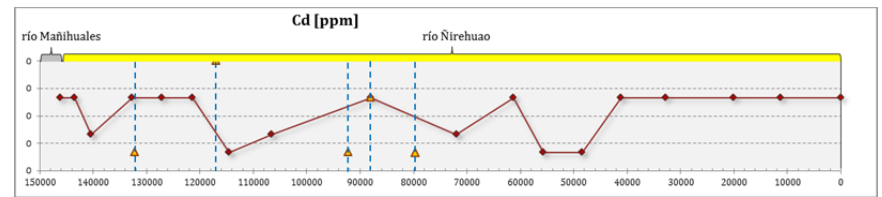
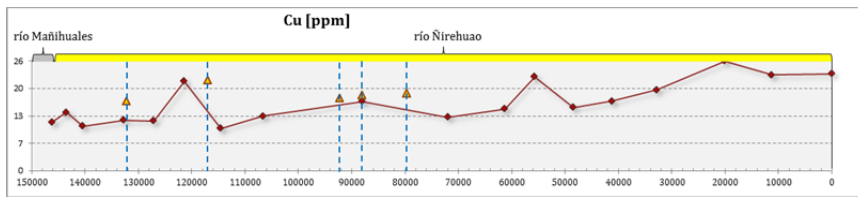
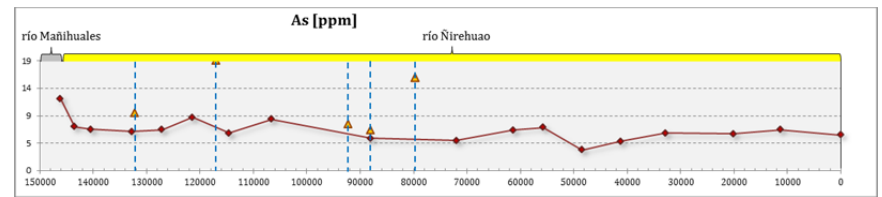
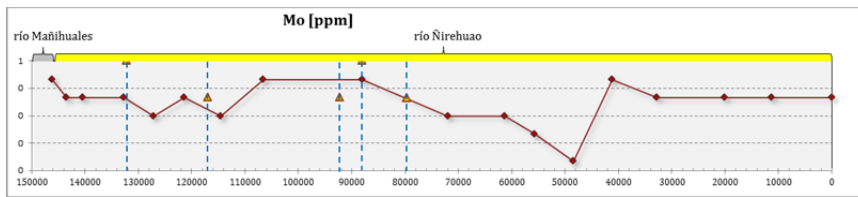
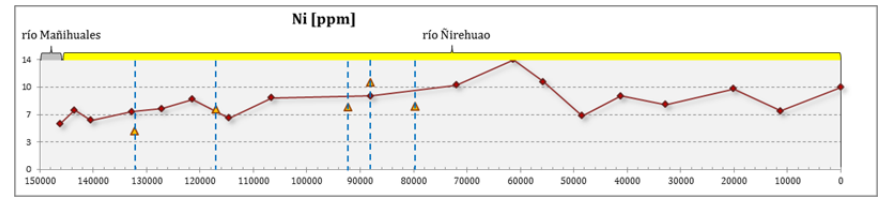
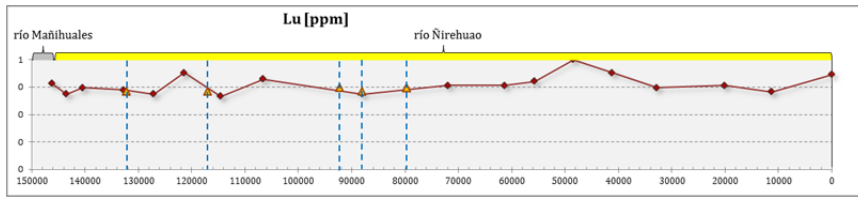
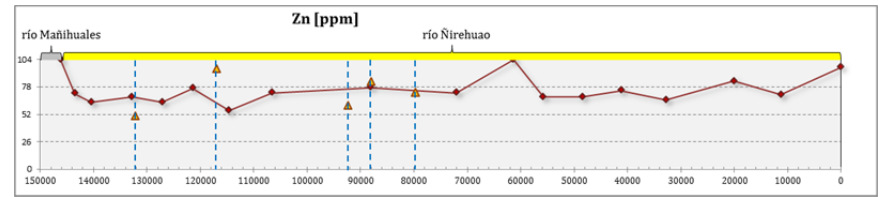
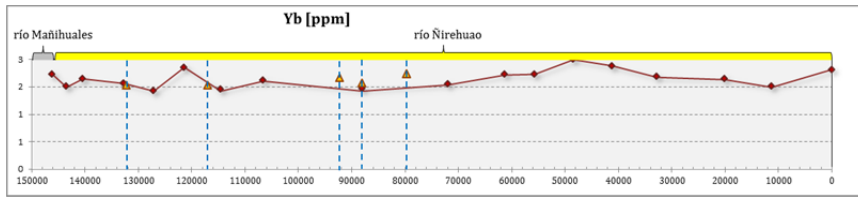
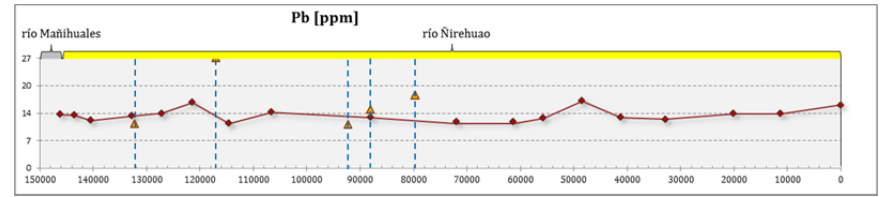
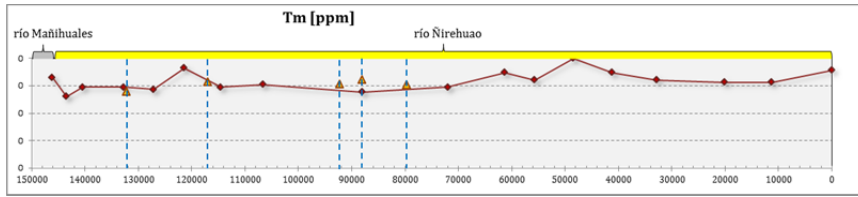


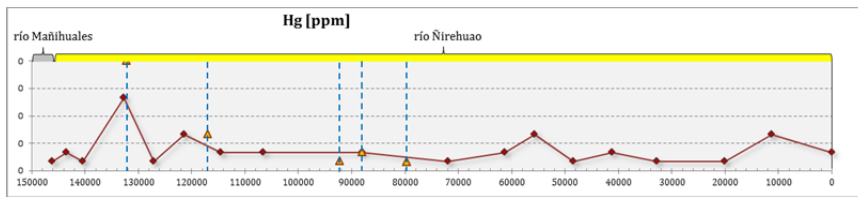
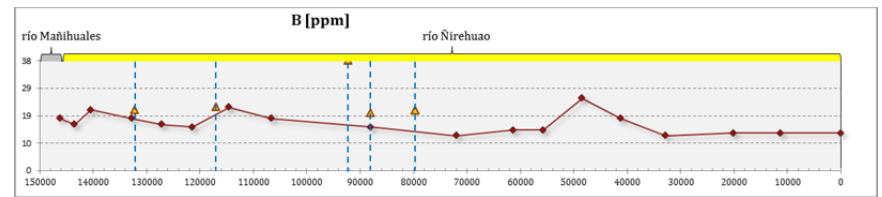
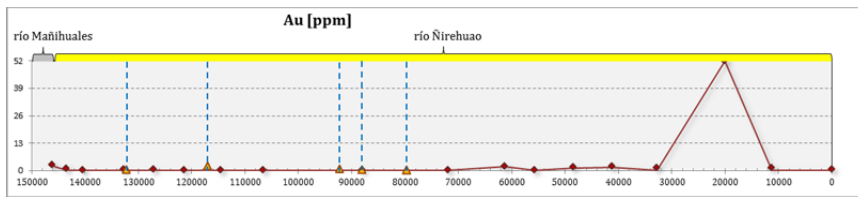
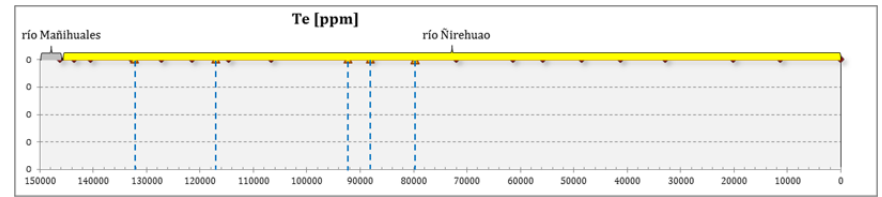
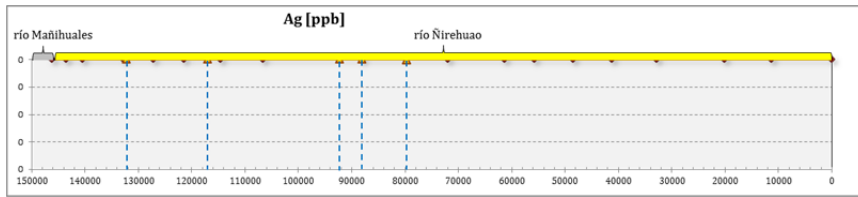
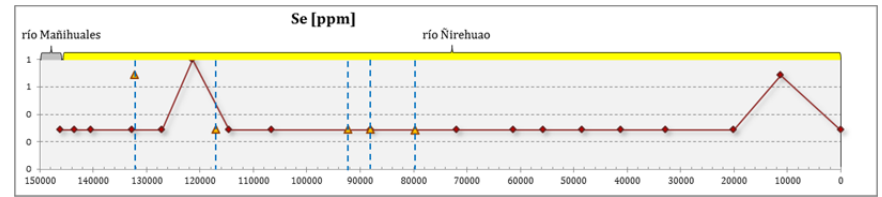
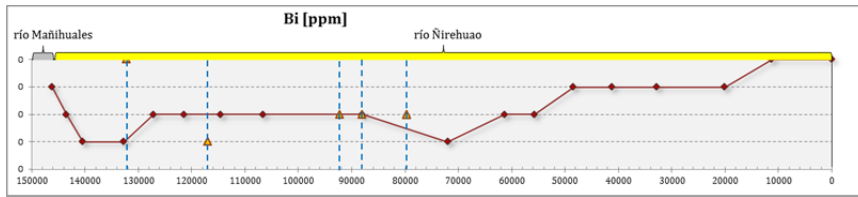
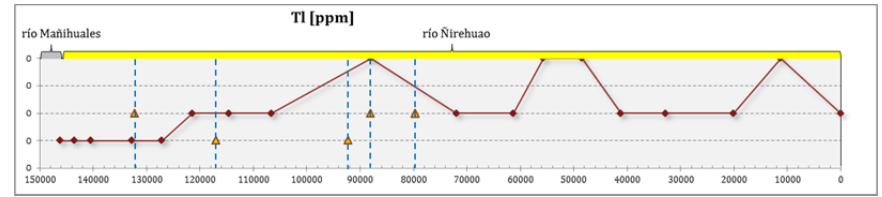
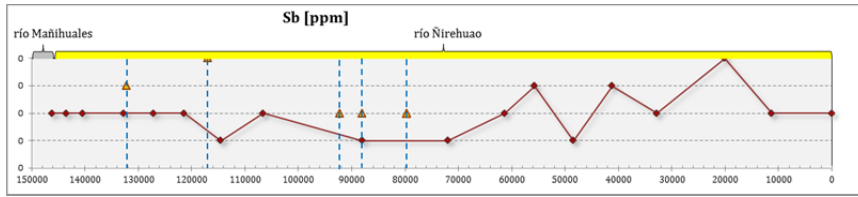




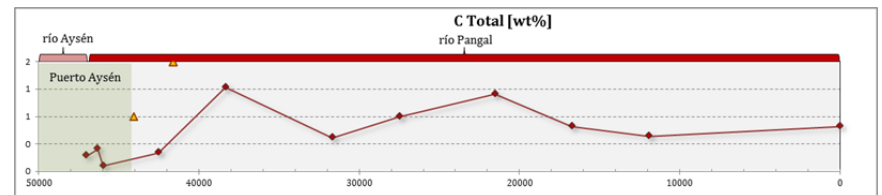


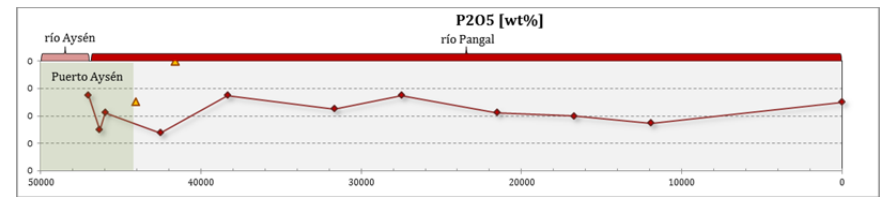
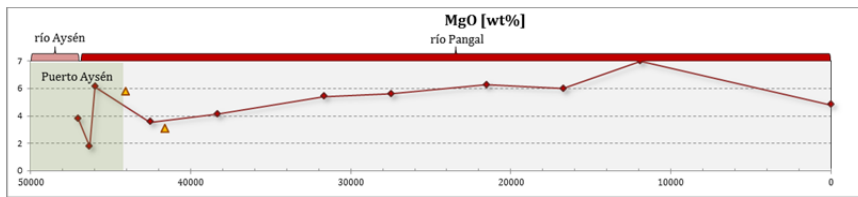
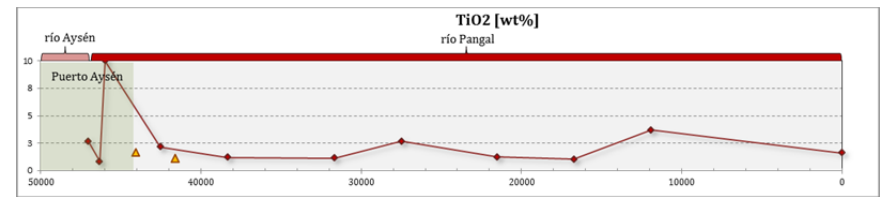
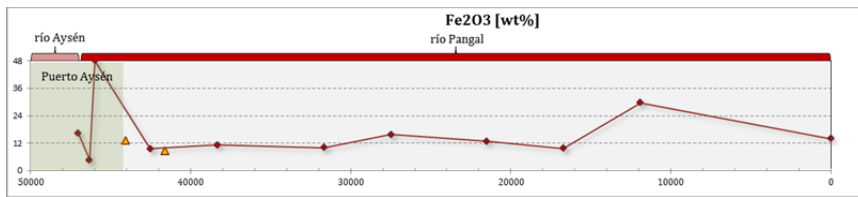
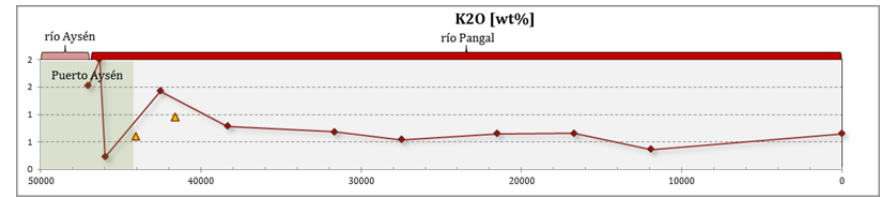
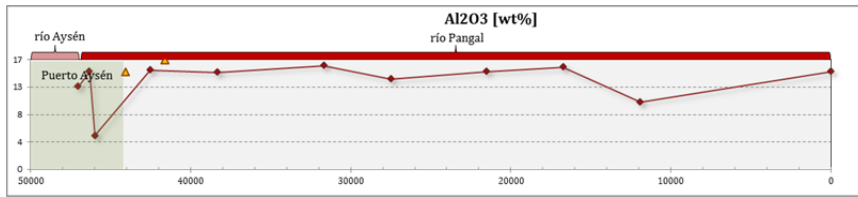
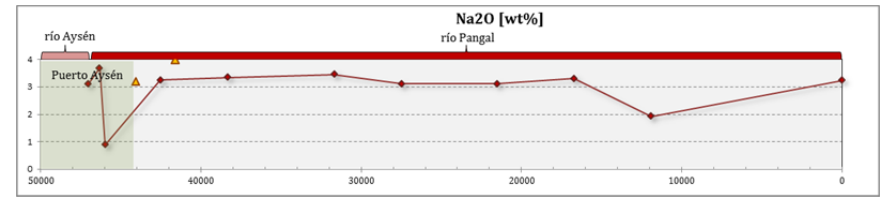
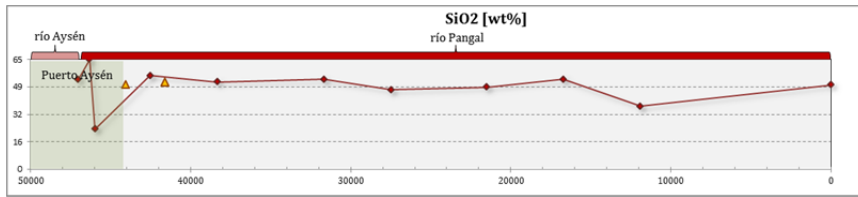
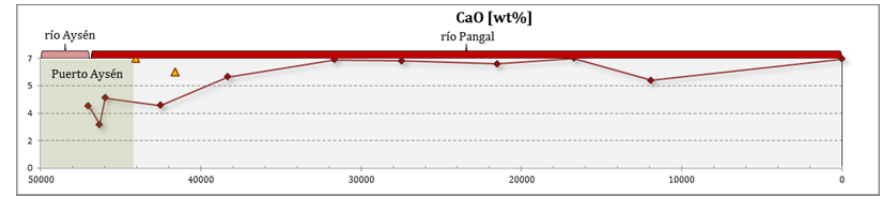
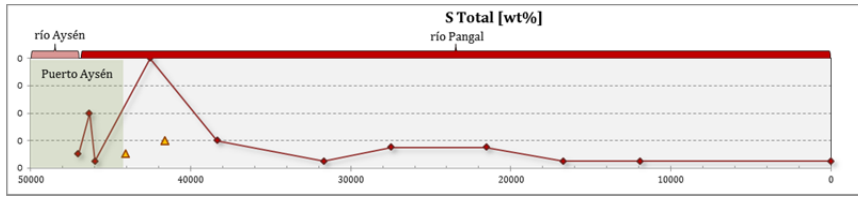


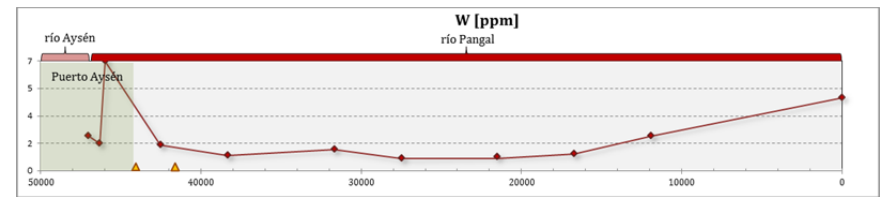
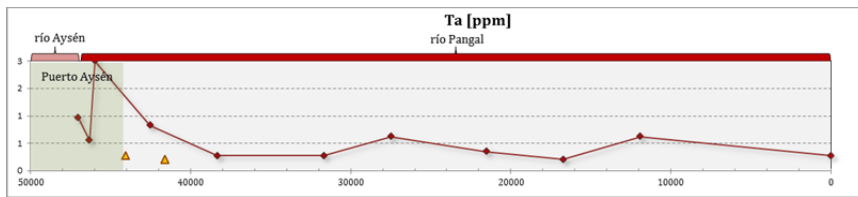
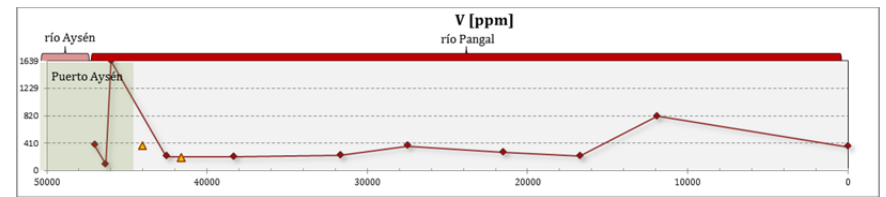
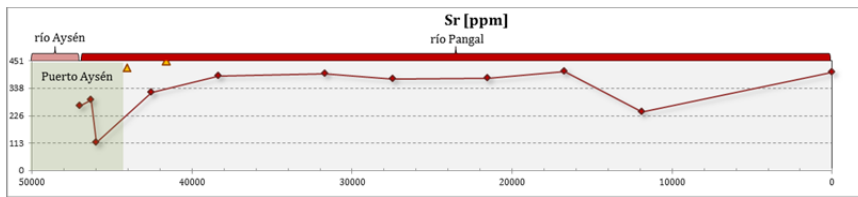
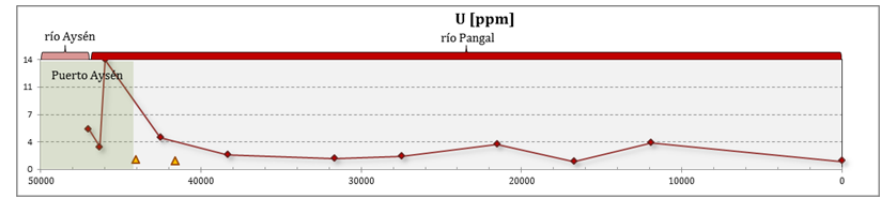
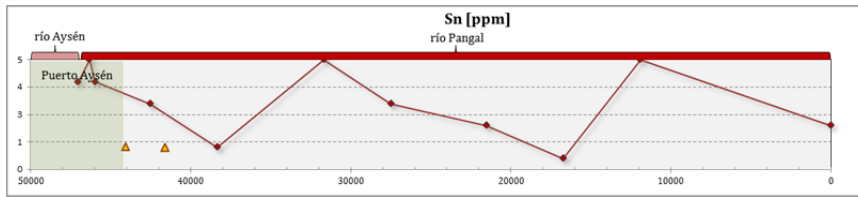
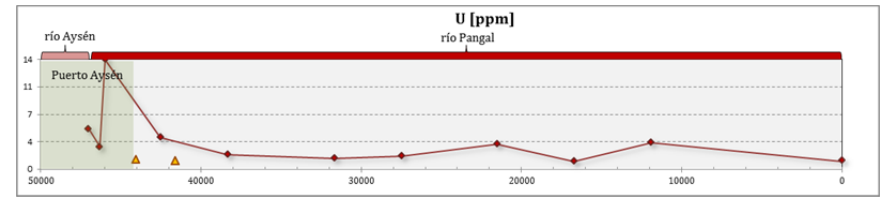
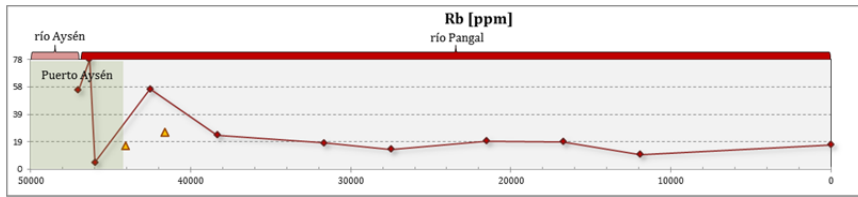
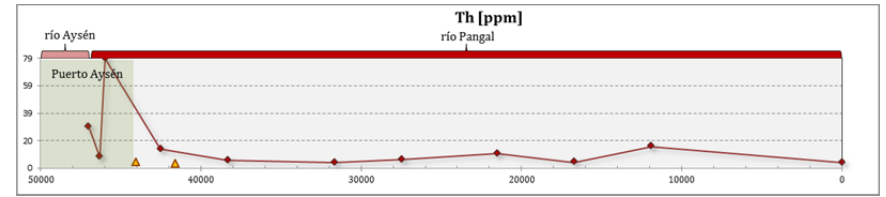
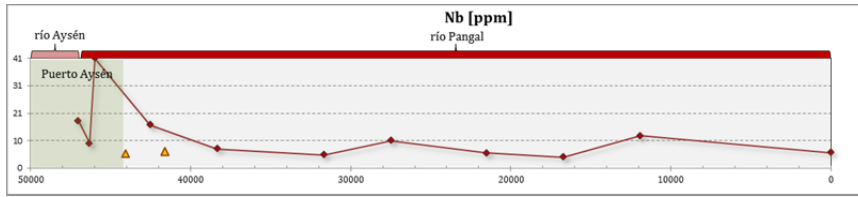


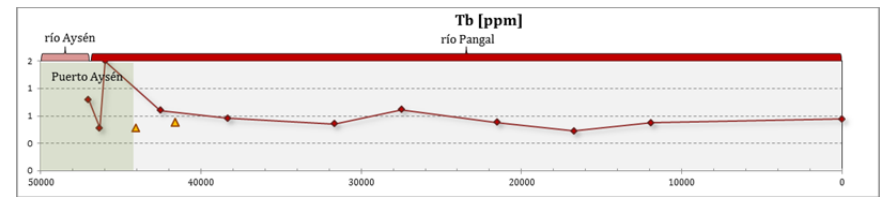
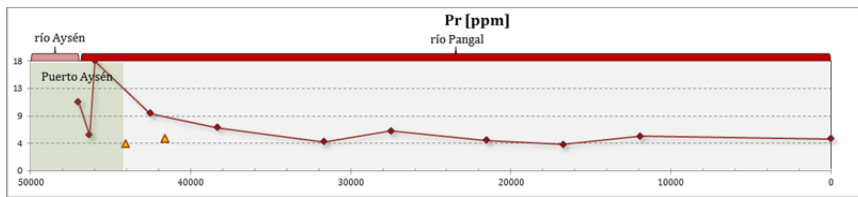
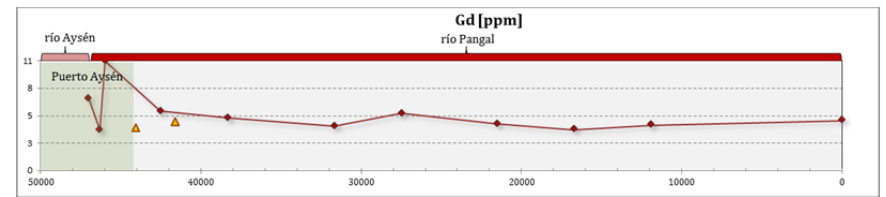
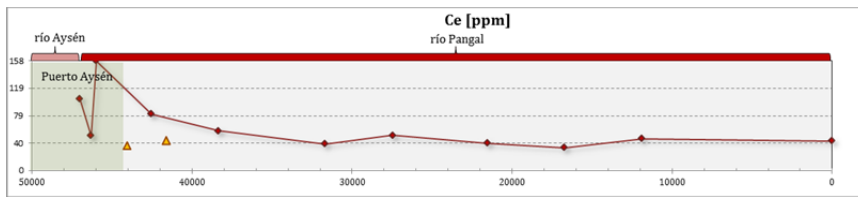
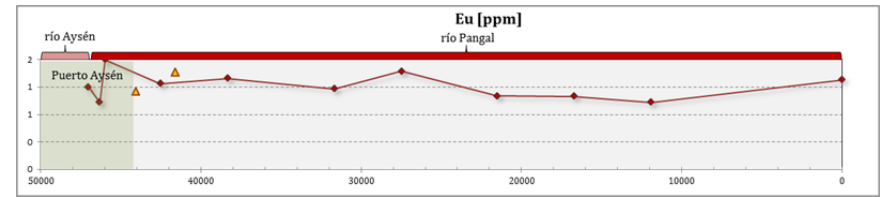
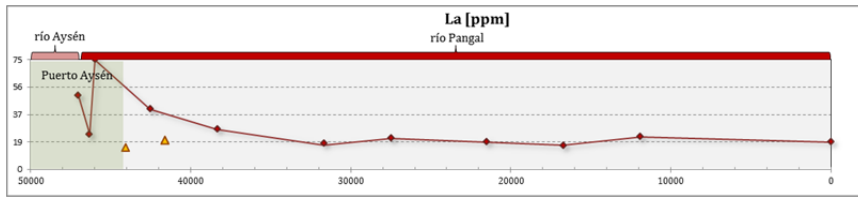
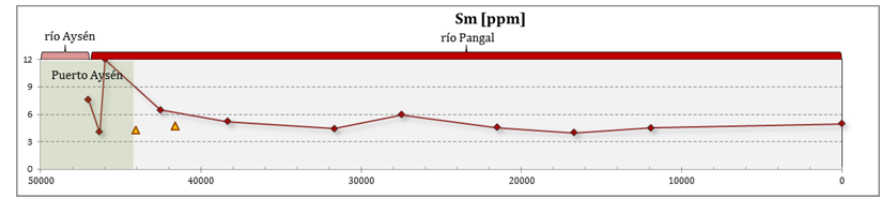
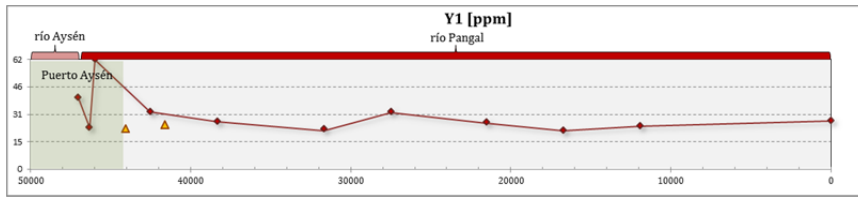
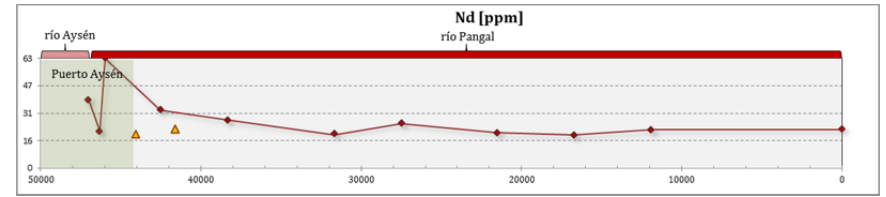
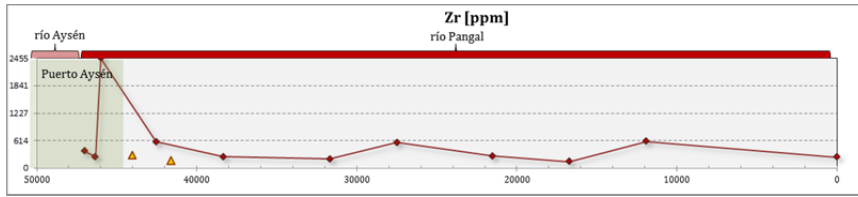


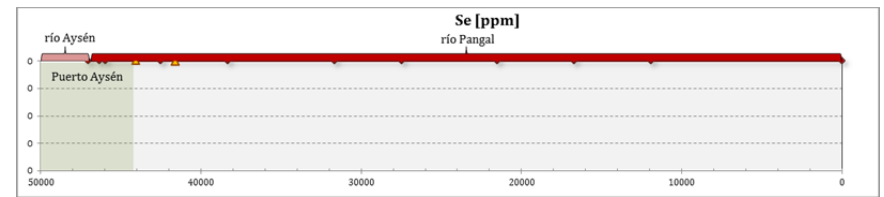
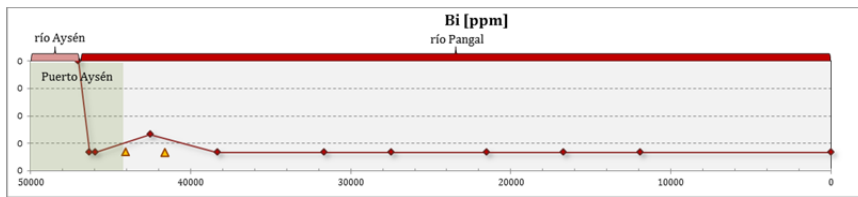
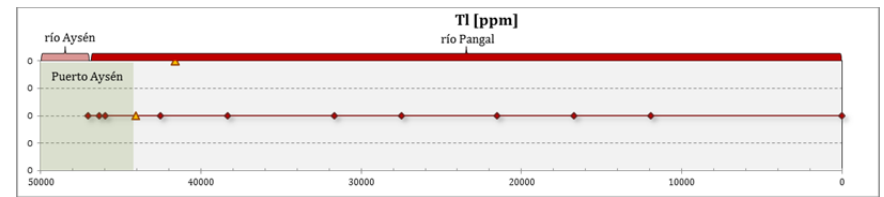
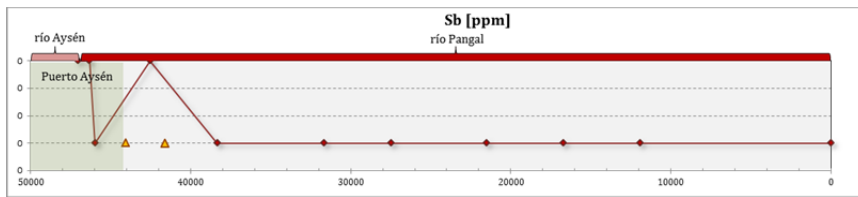
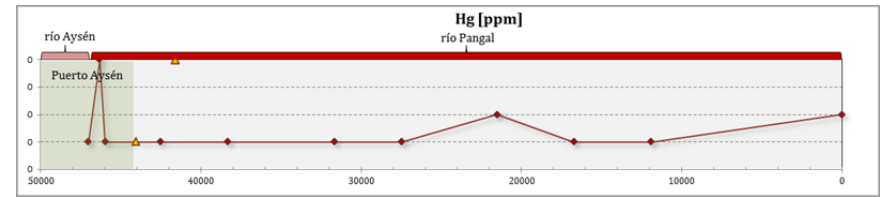
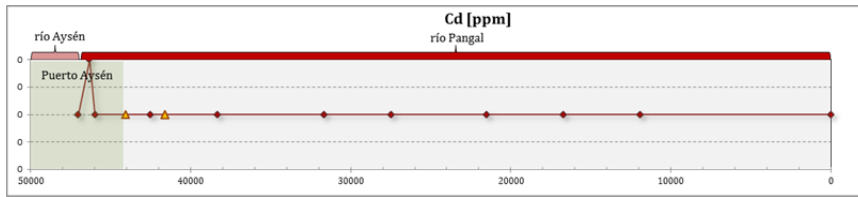
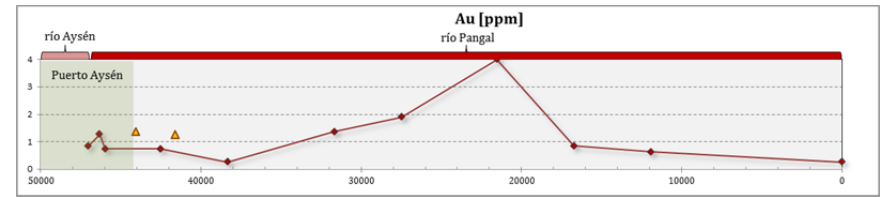
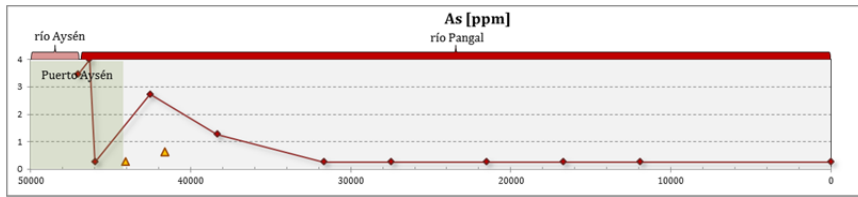
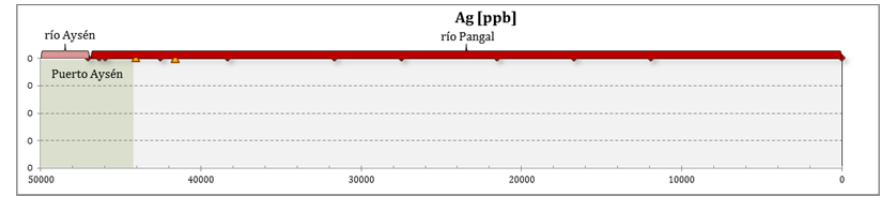
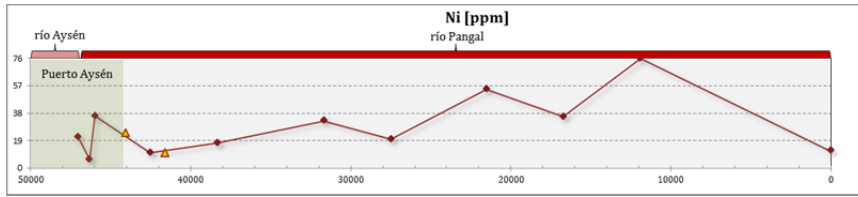
v) Río Pangal

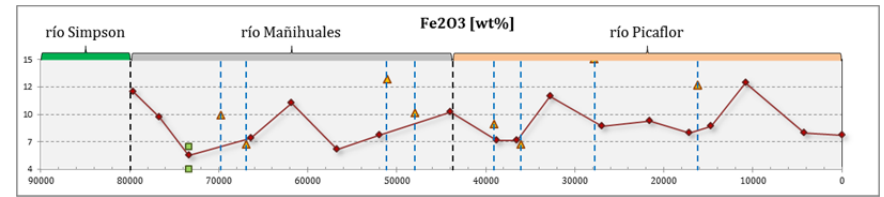
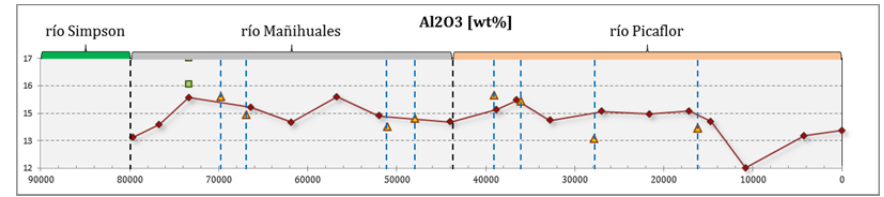
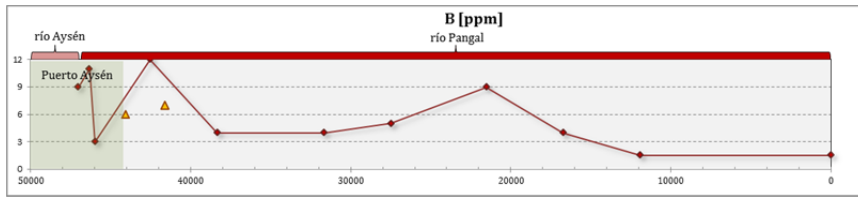
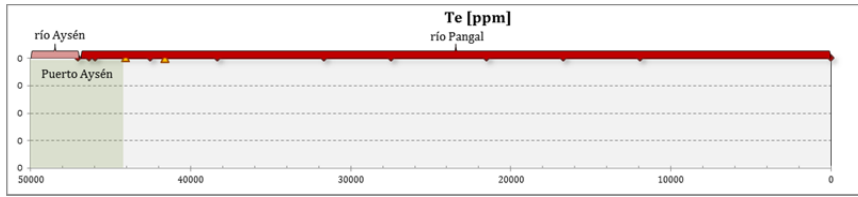




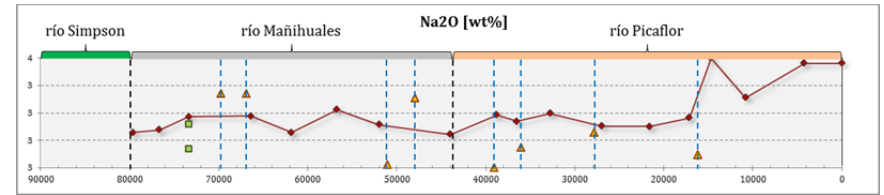
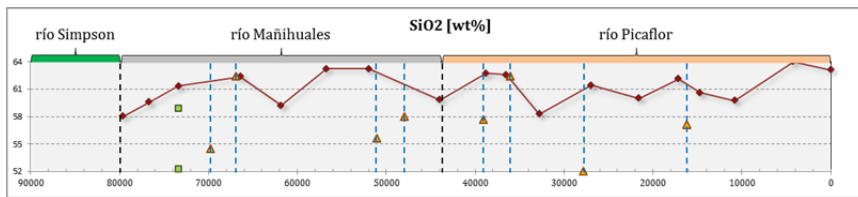
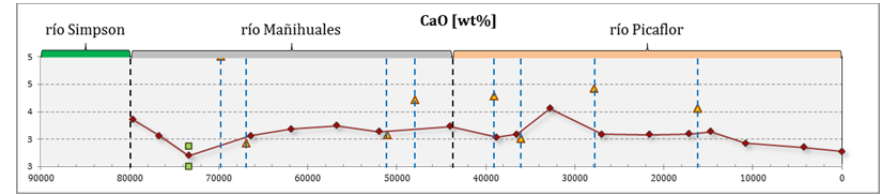
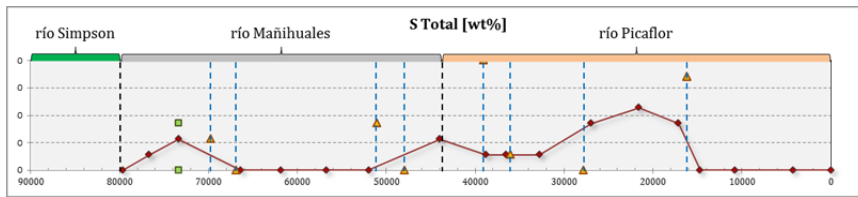
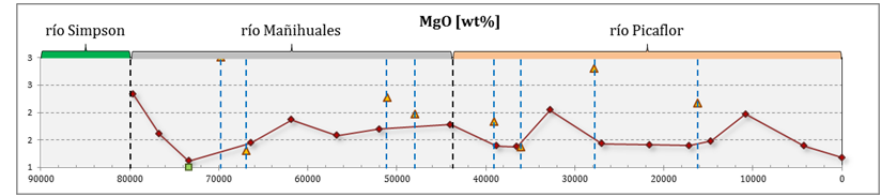
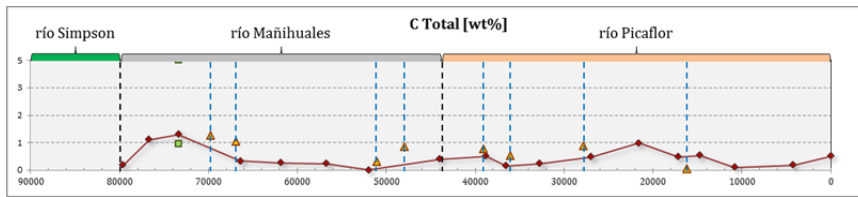


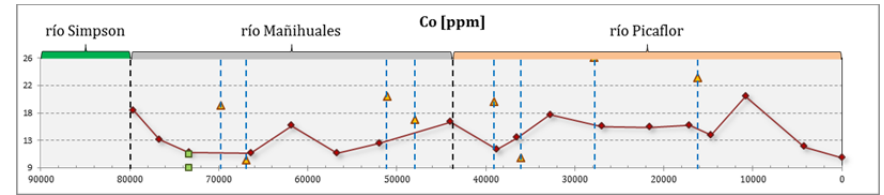
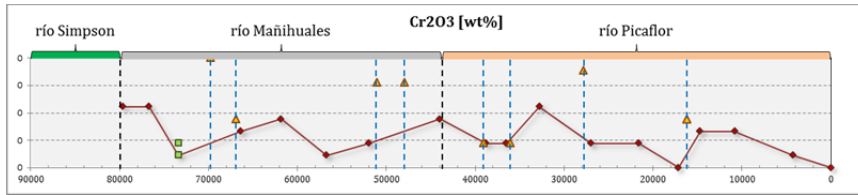
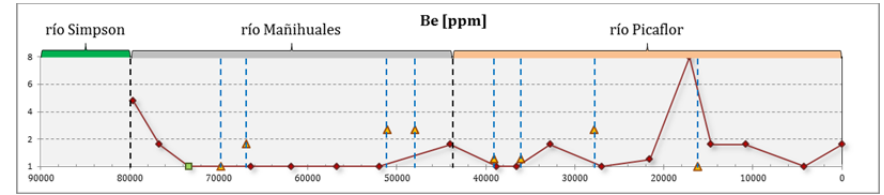
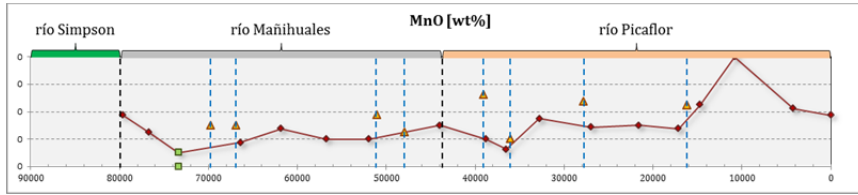
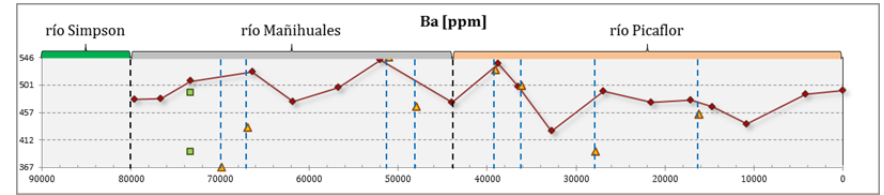
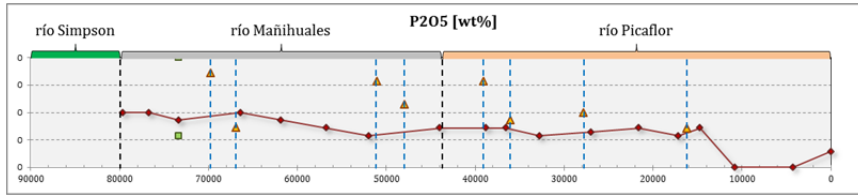
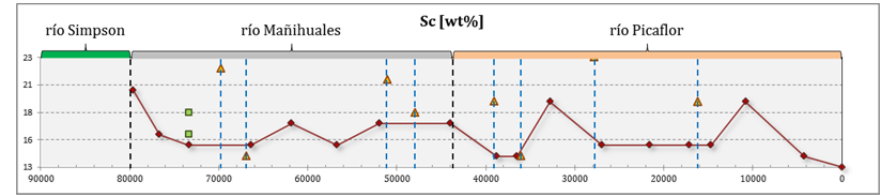
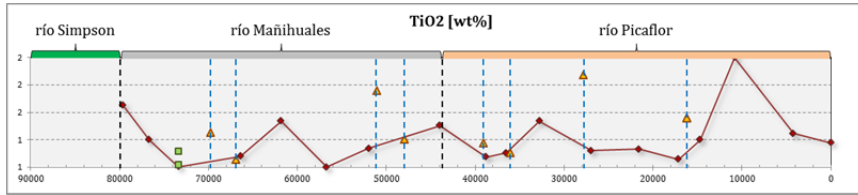
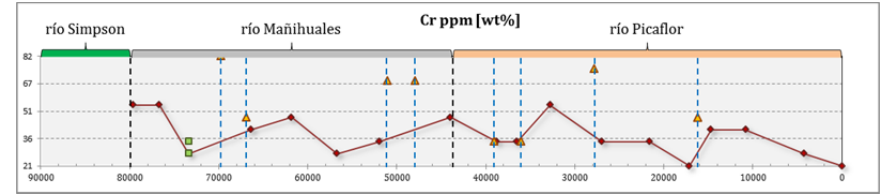
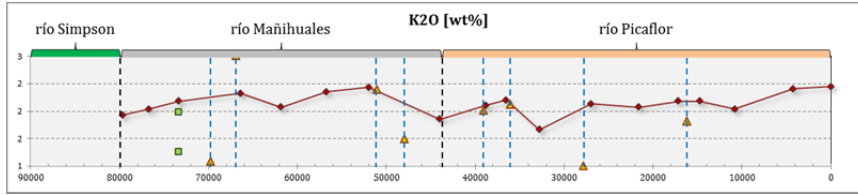


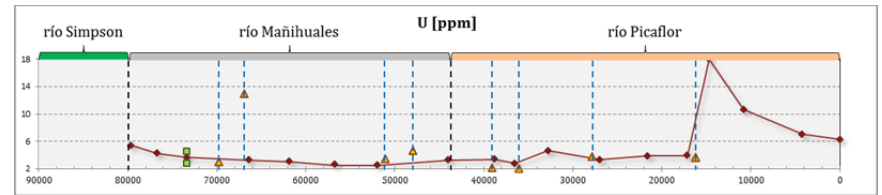
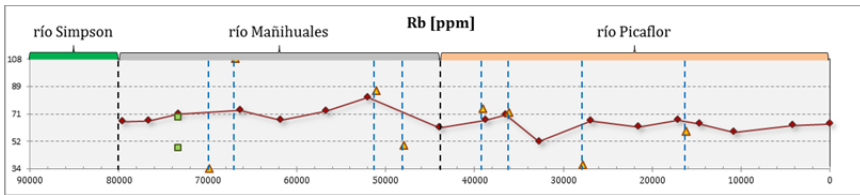
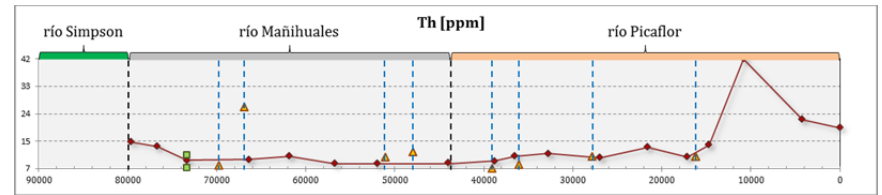
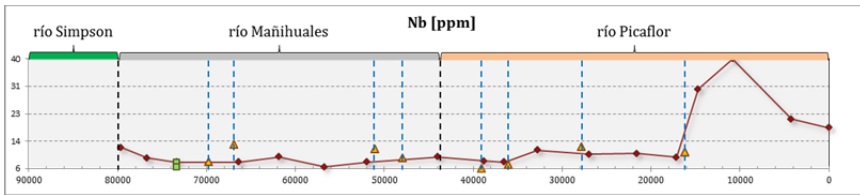
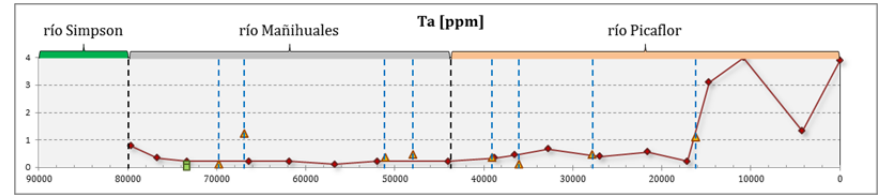
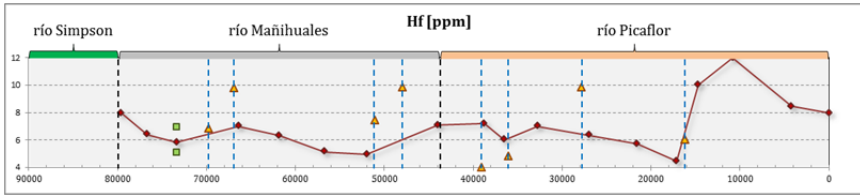
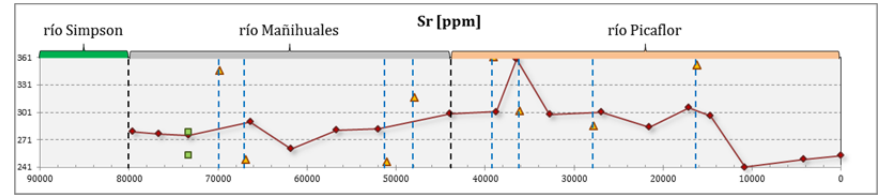
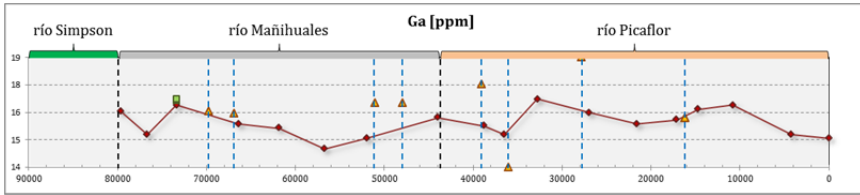
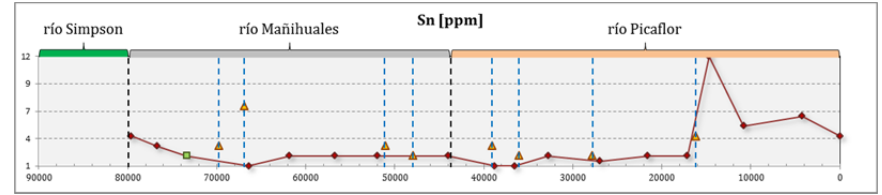
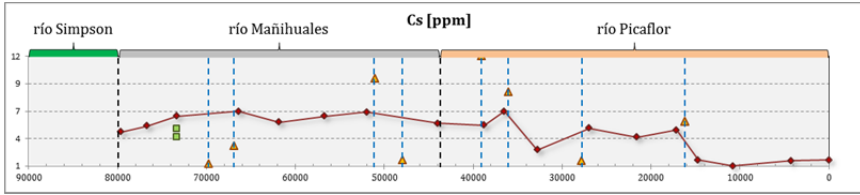


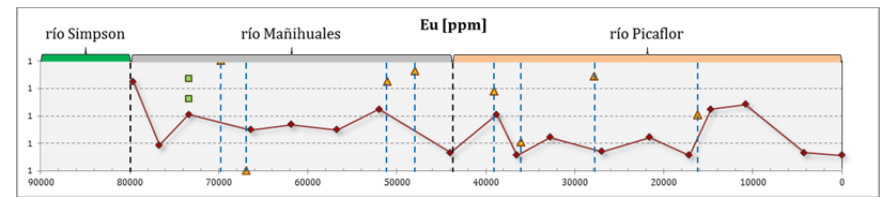
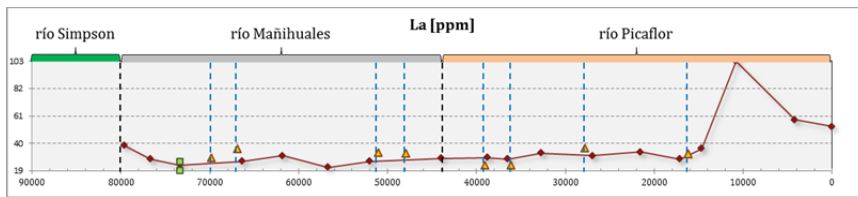
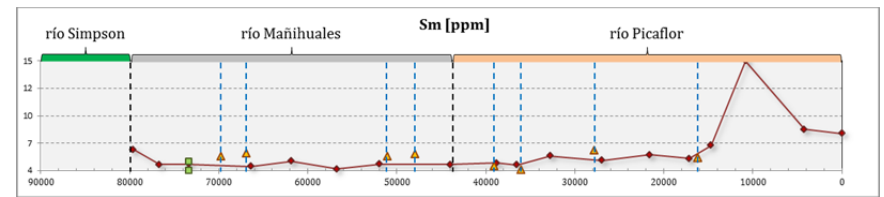
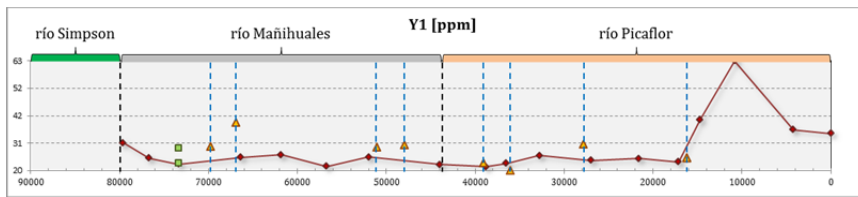
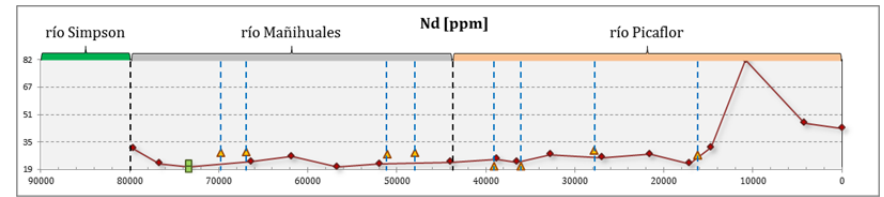
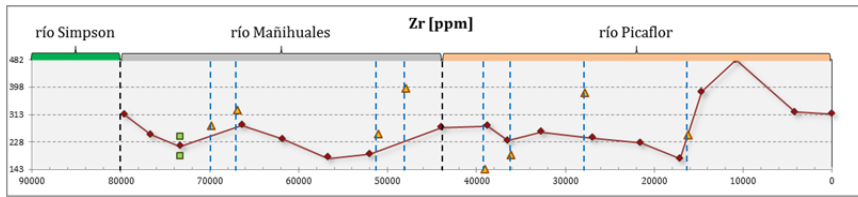
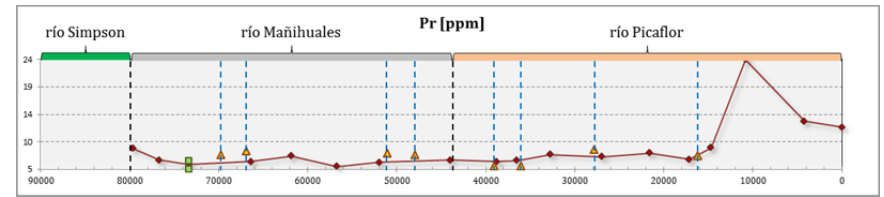
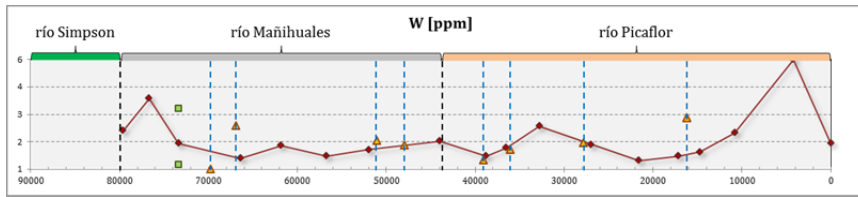
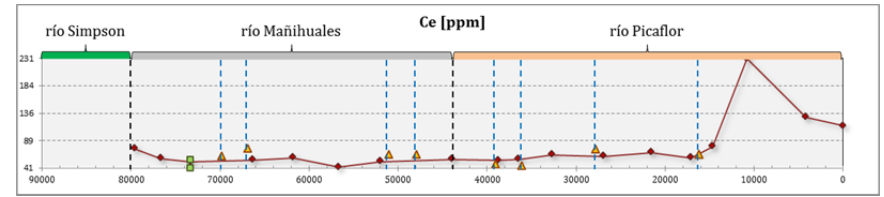
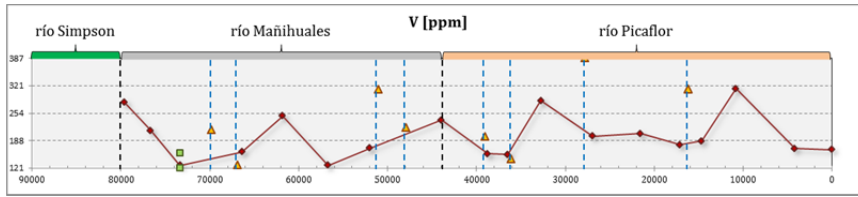


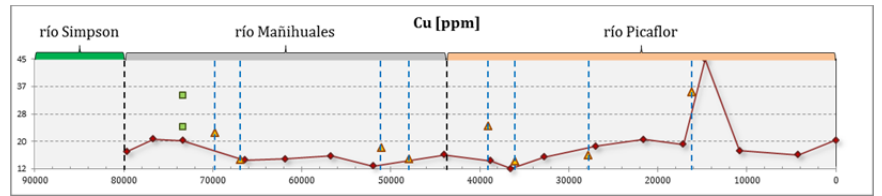
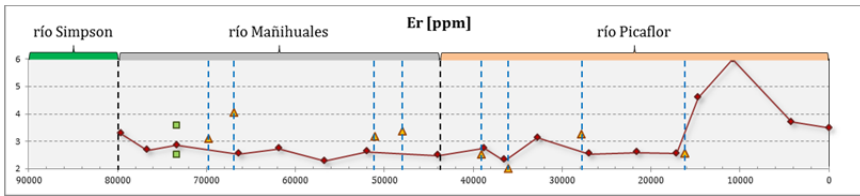
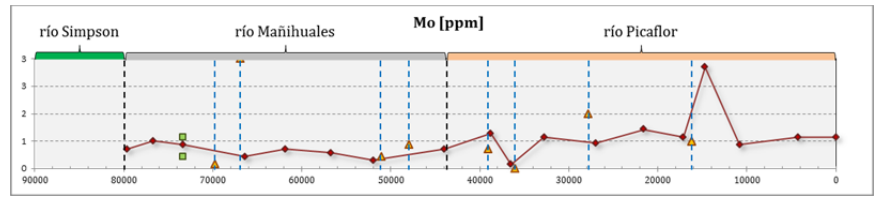
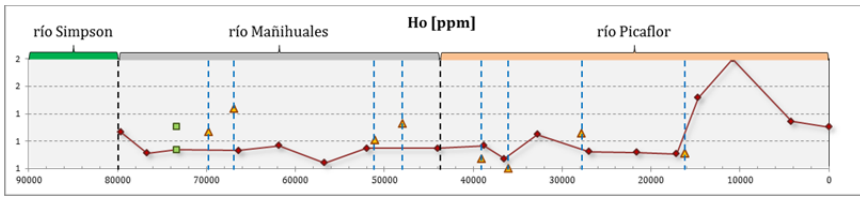
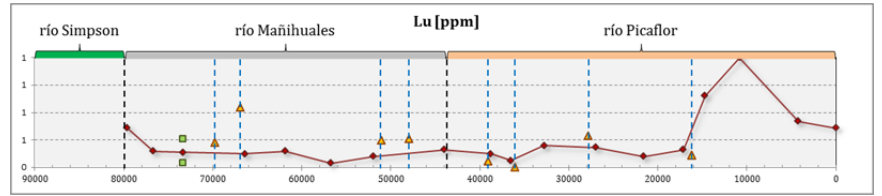
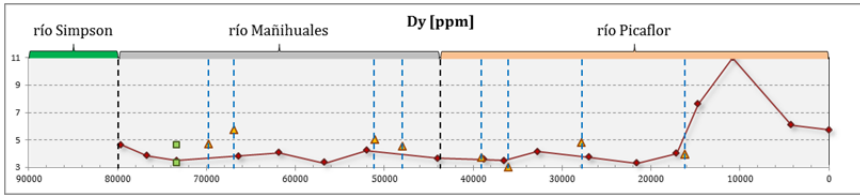
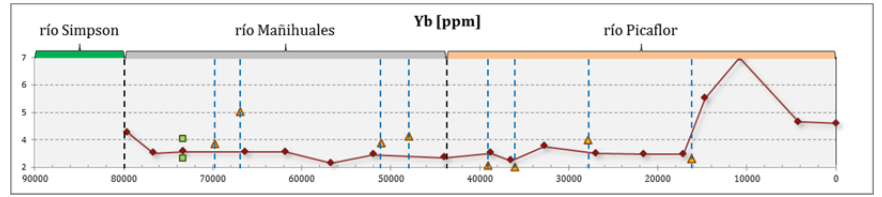
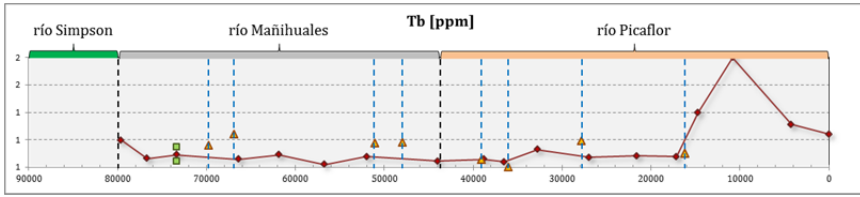
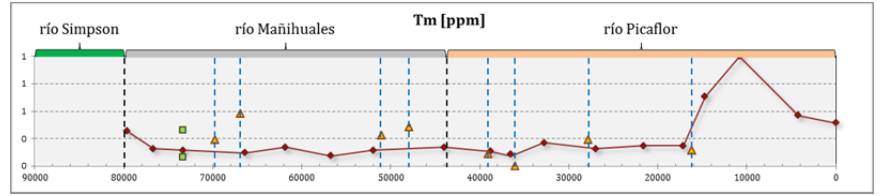
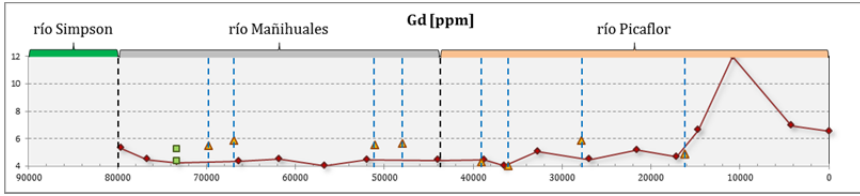
i) Ríos Picaflor – Mañihuales

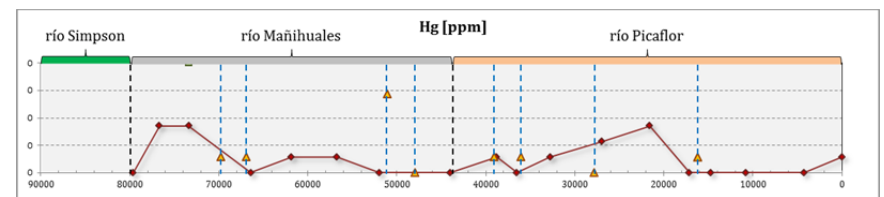
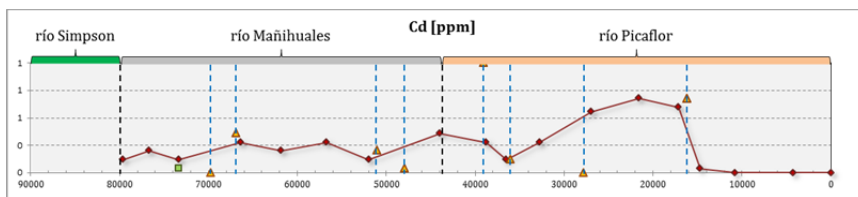
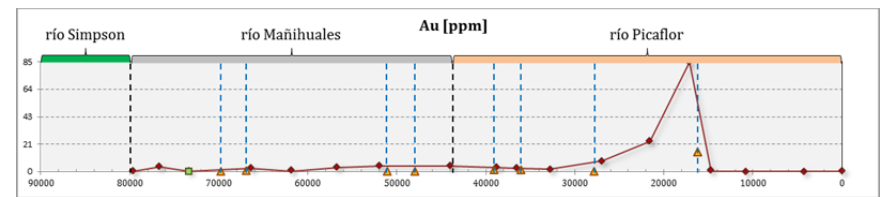
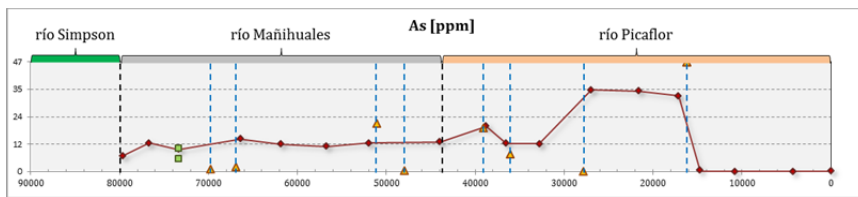
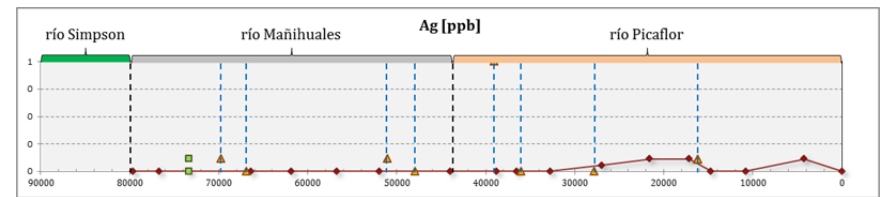
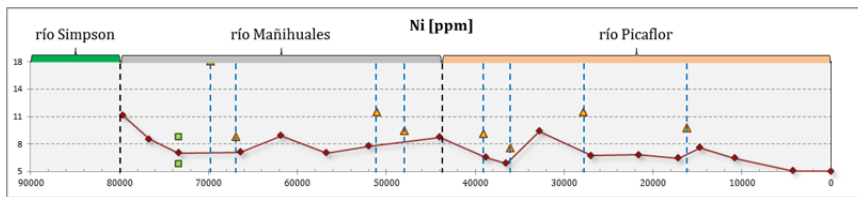
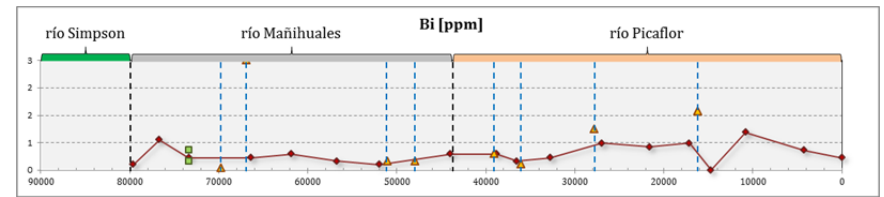
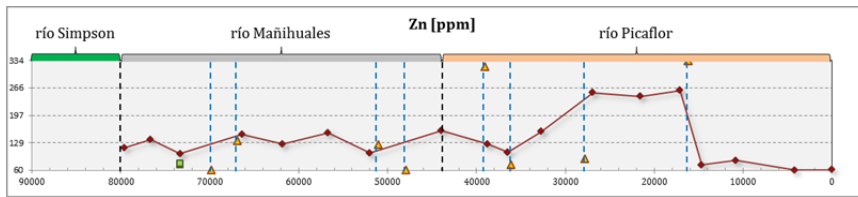
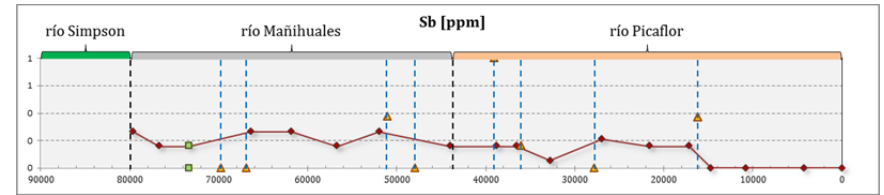
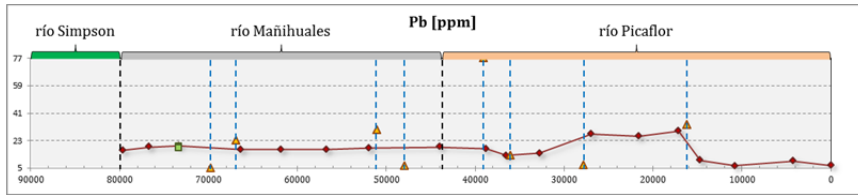


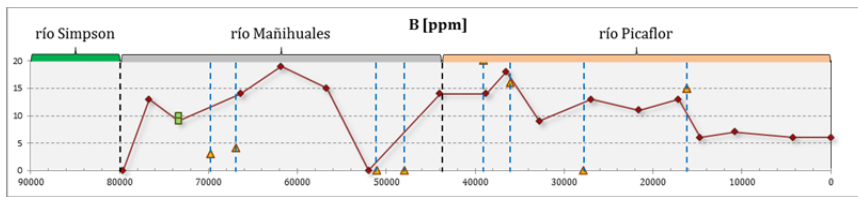
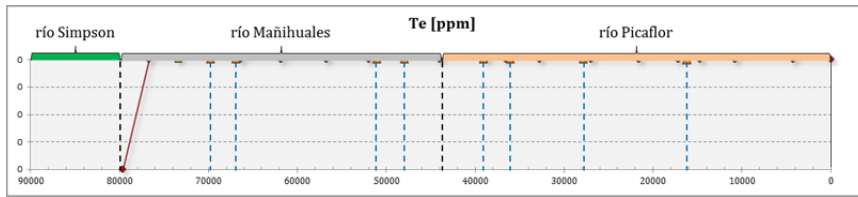
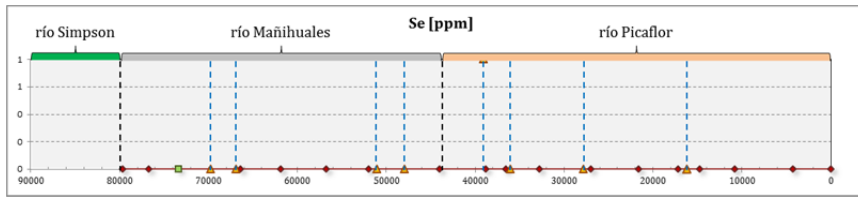
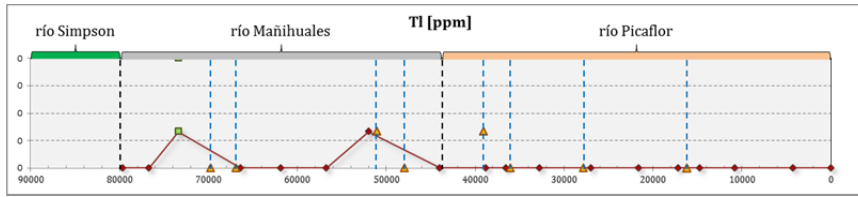




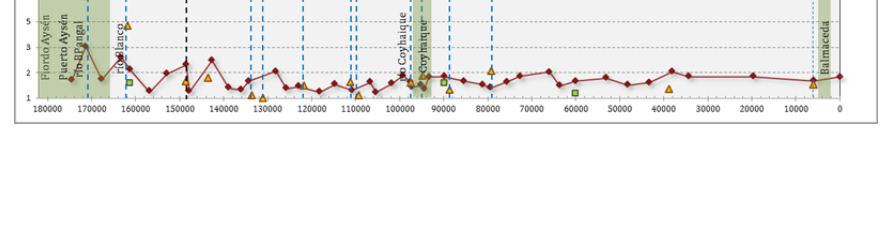
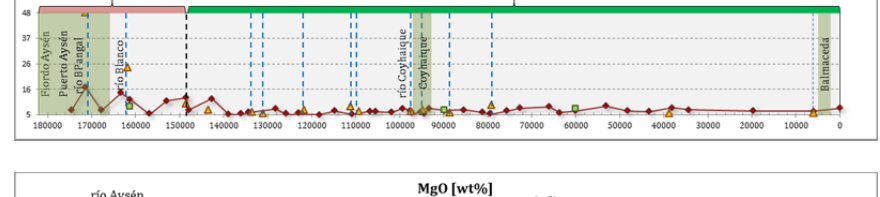
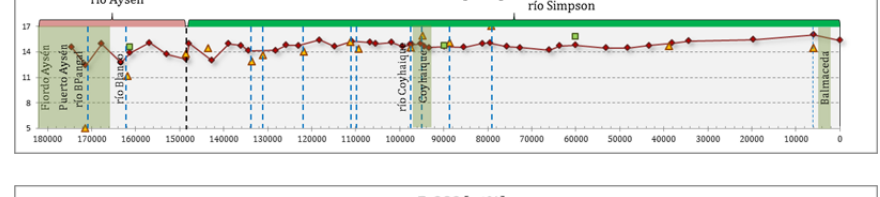
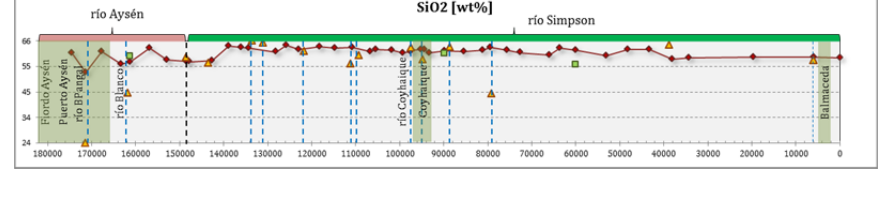
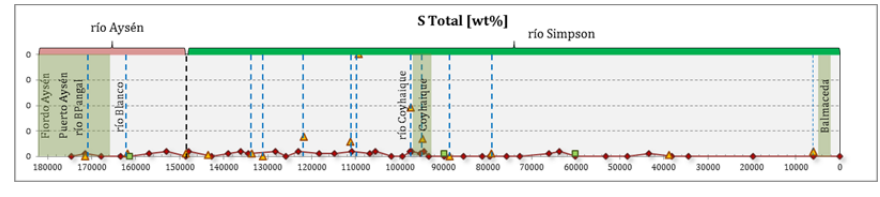
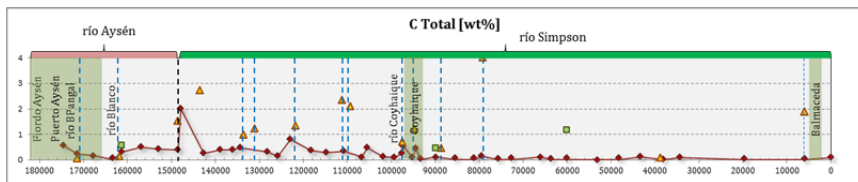


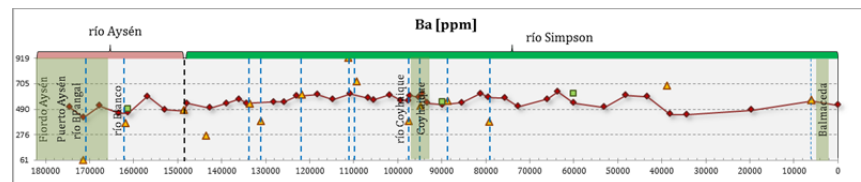
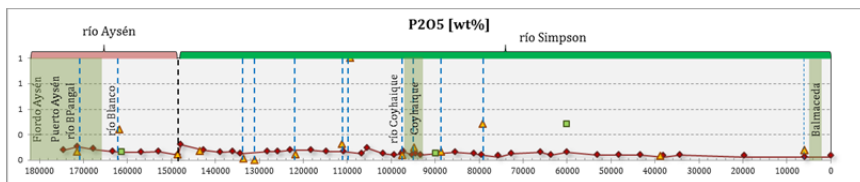
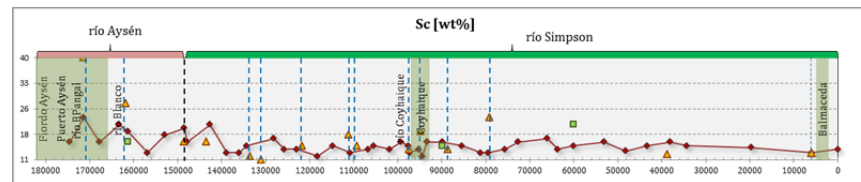
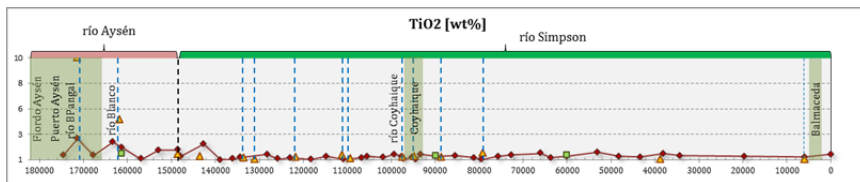
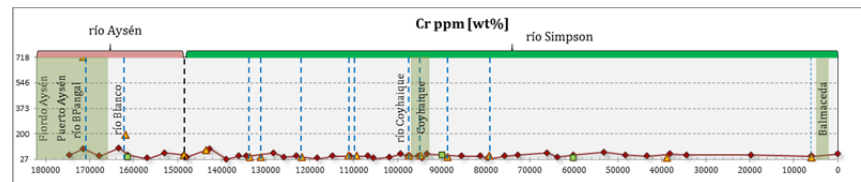
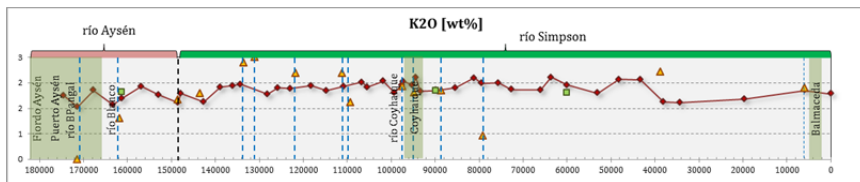
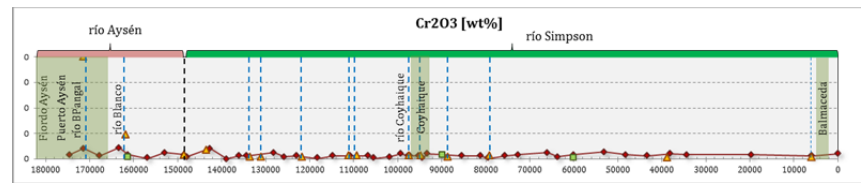
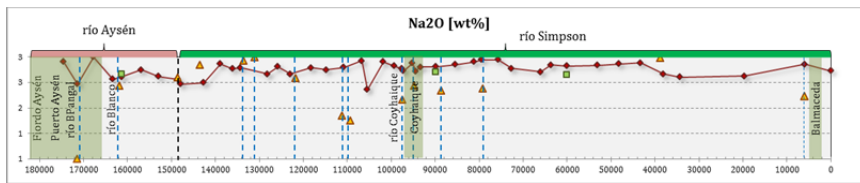
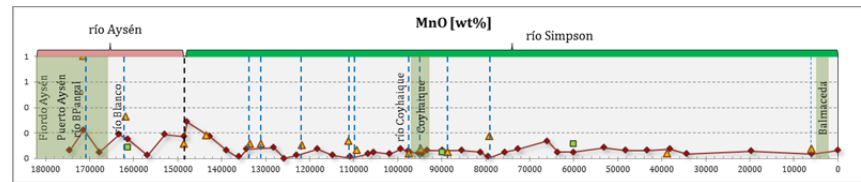
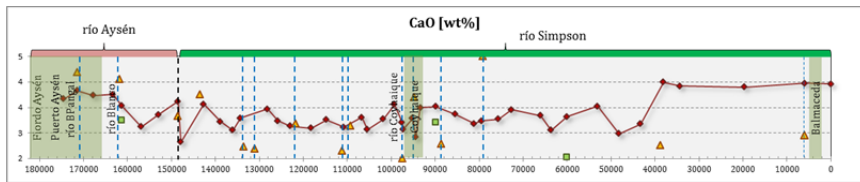


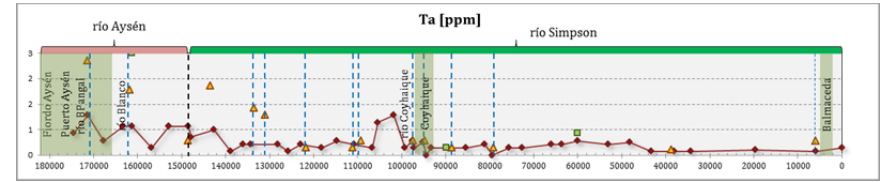
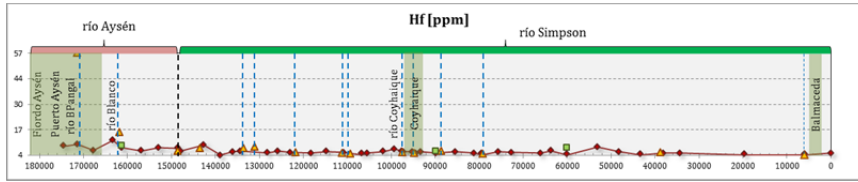
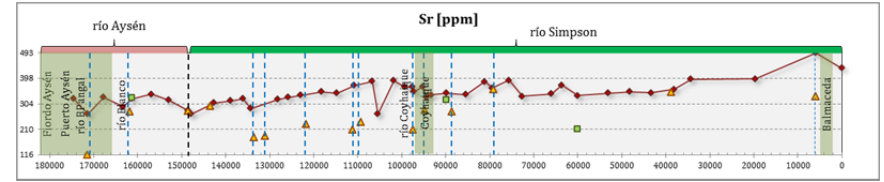
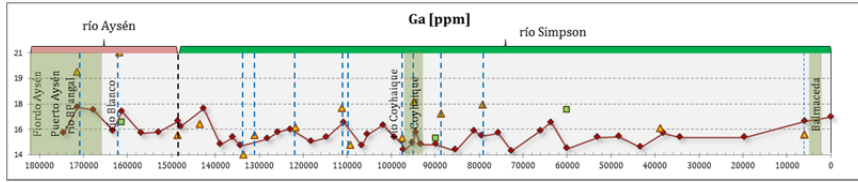
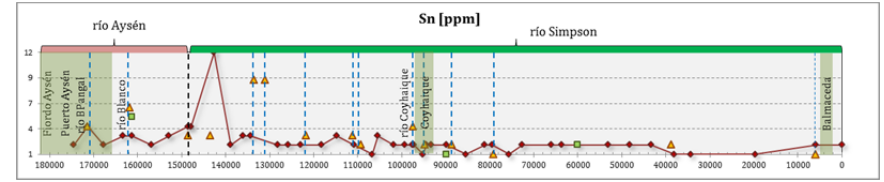
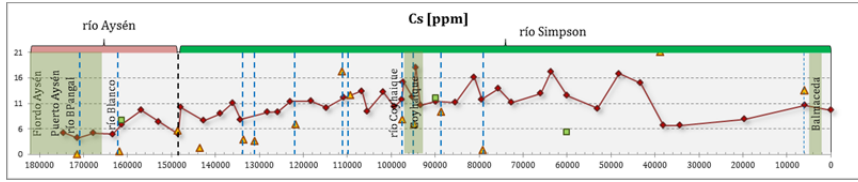
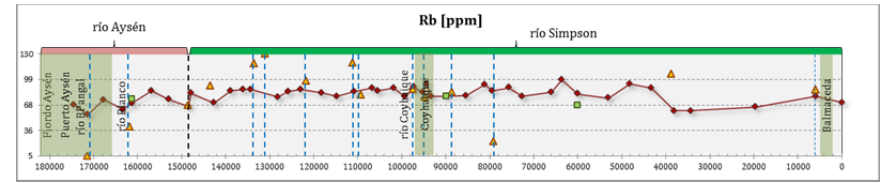
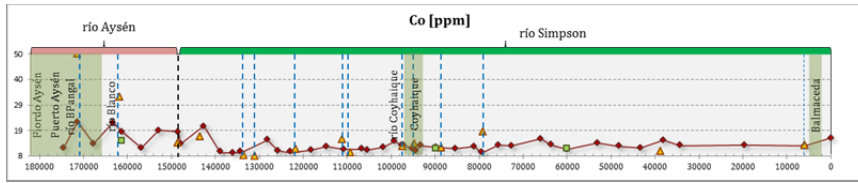
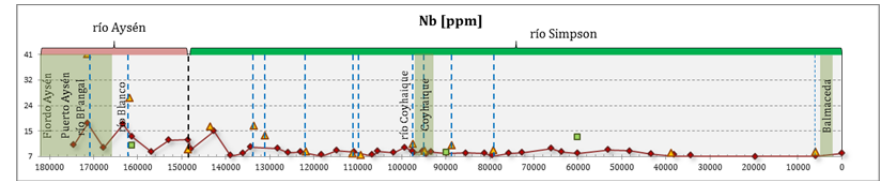
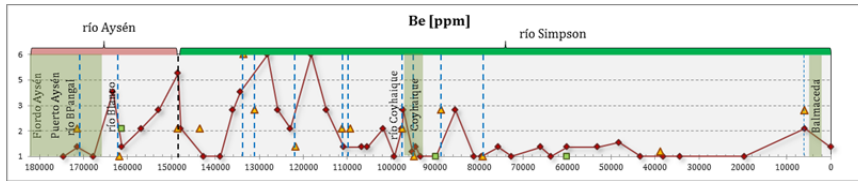


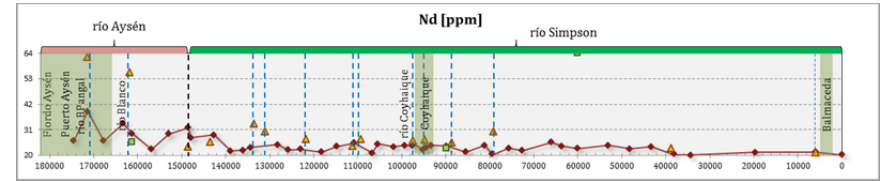
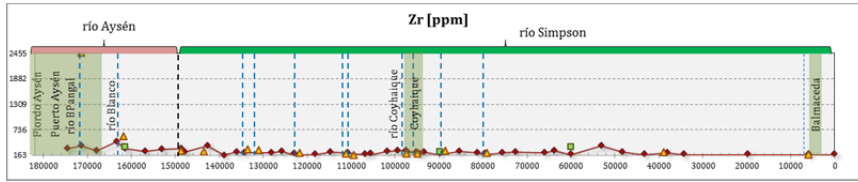
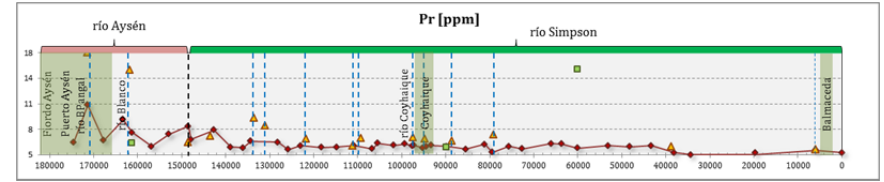
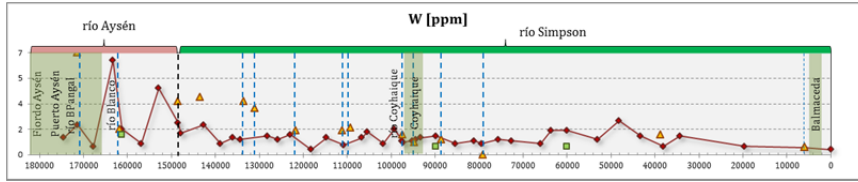
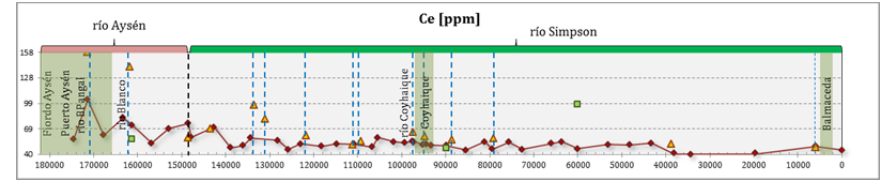
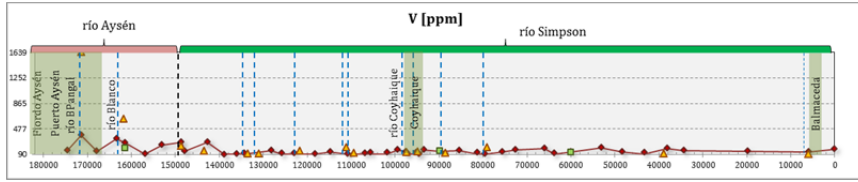
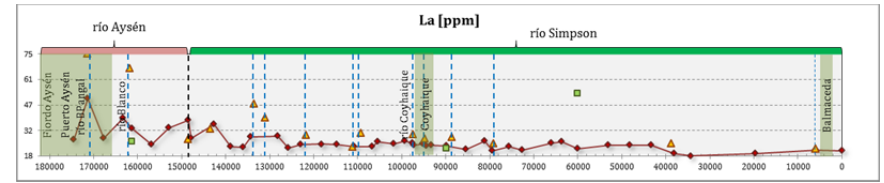
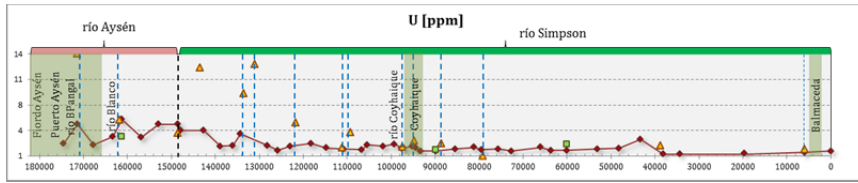
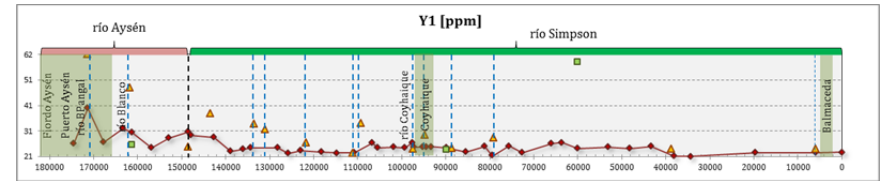
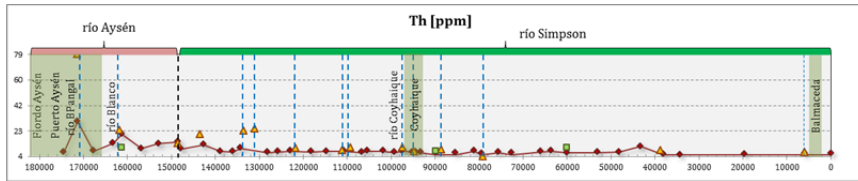


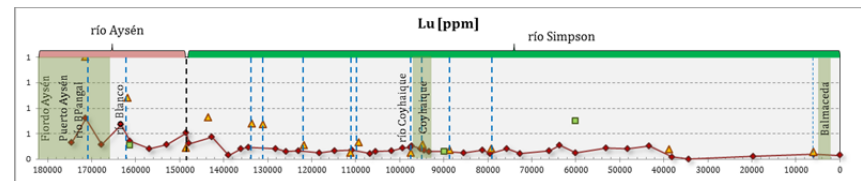
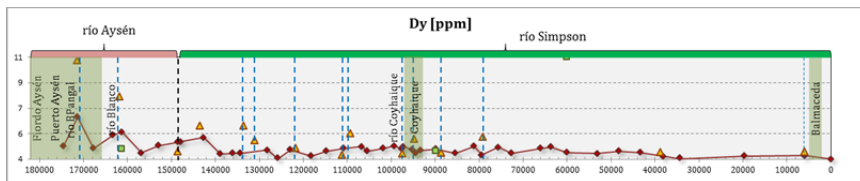
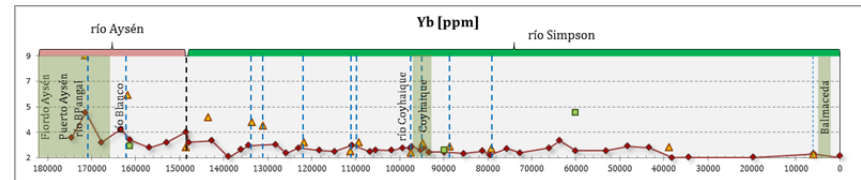
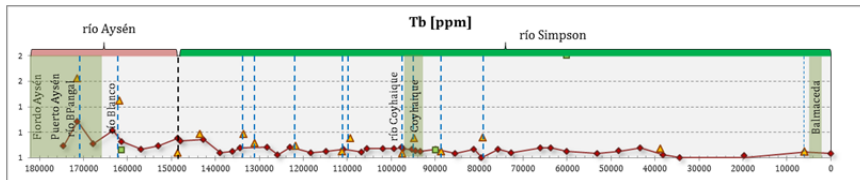
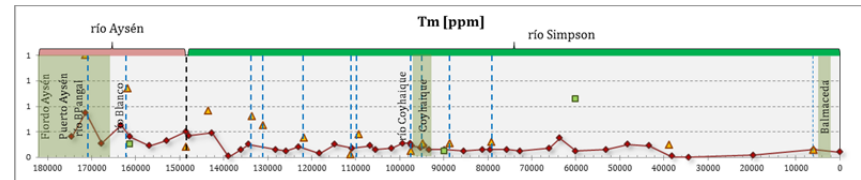
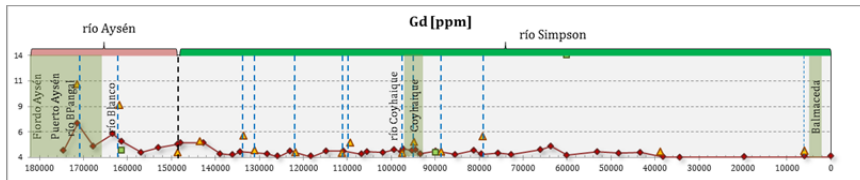
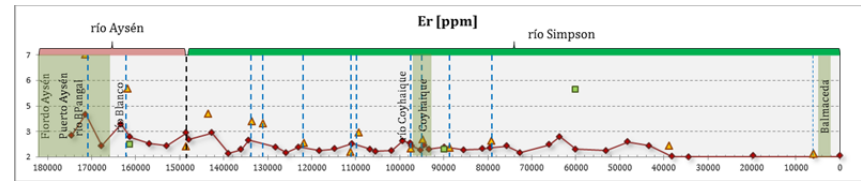
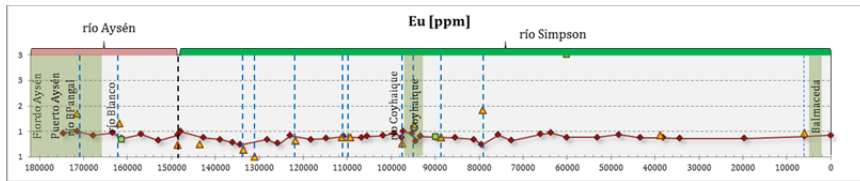
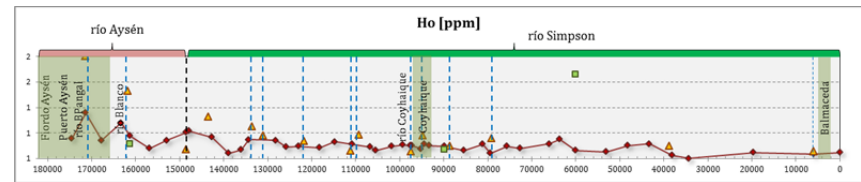
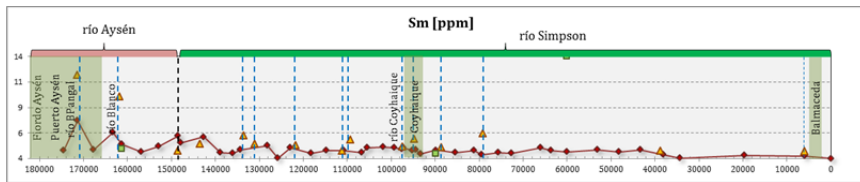
vii) Ríos Simpson Aysén

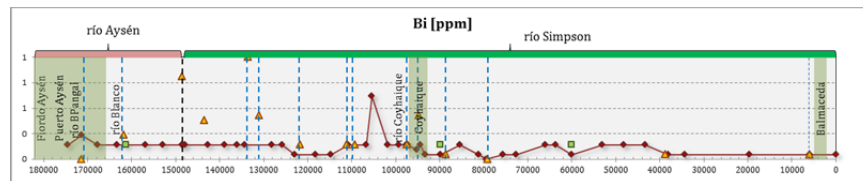
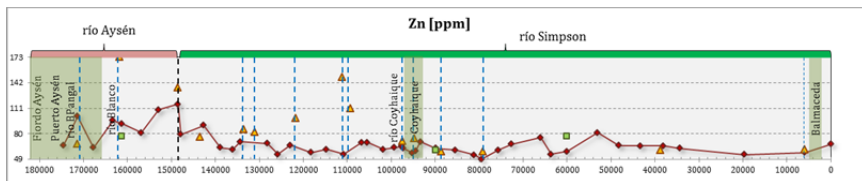
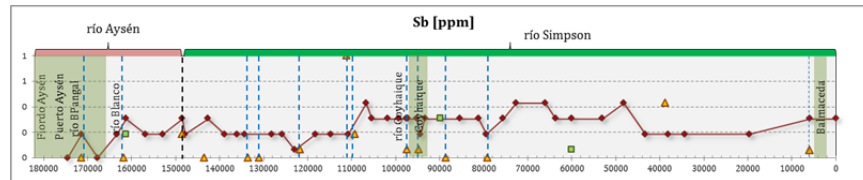
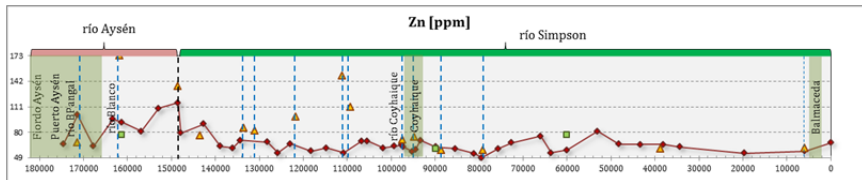
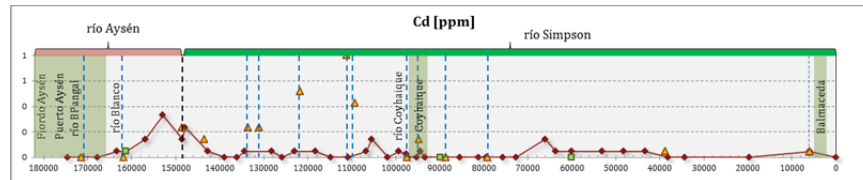
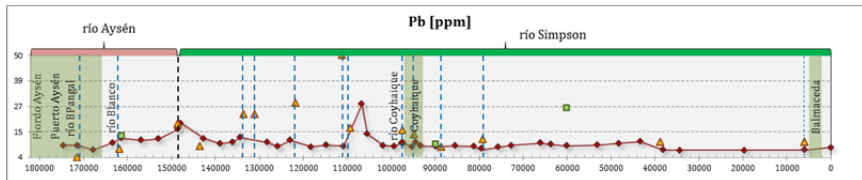
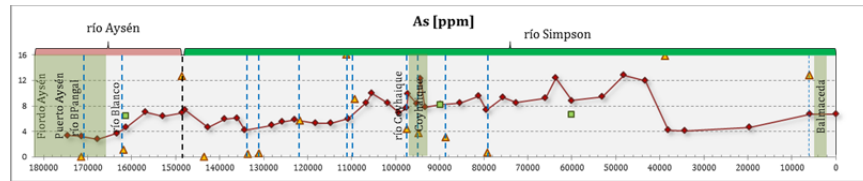
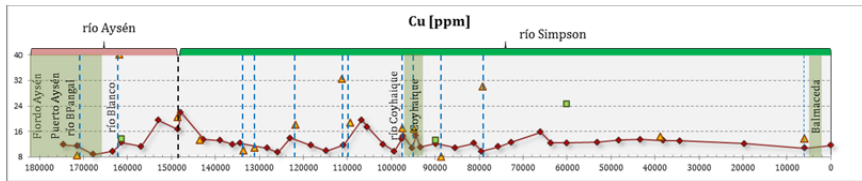
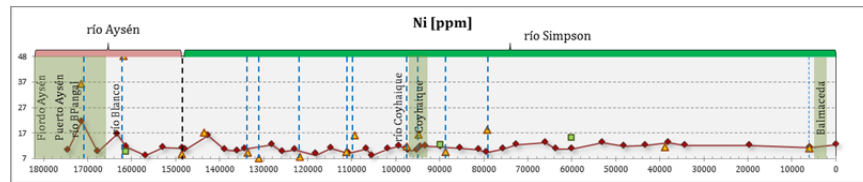
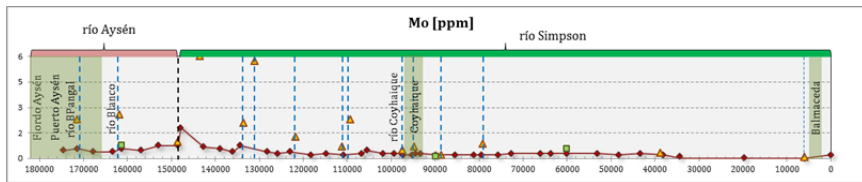


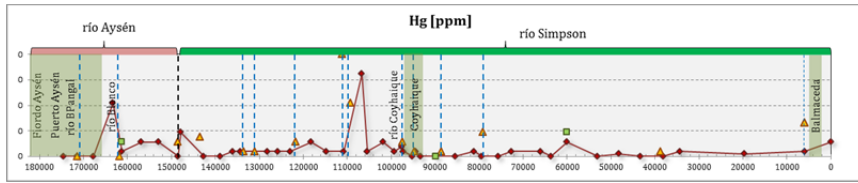
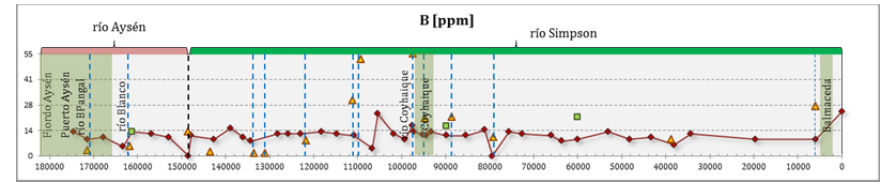
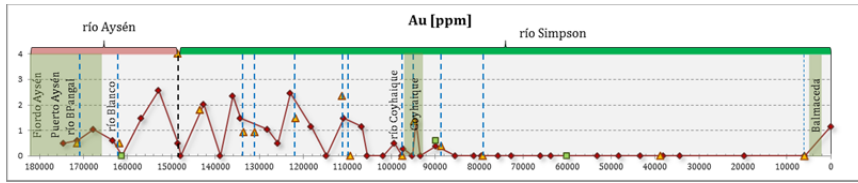
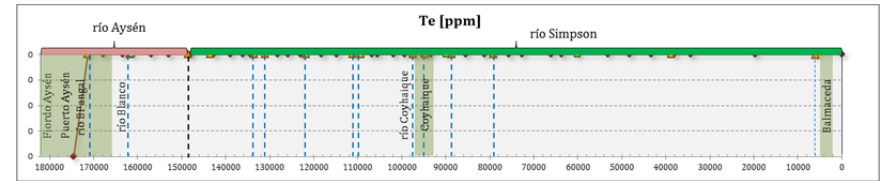
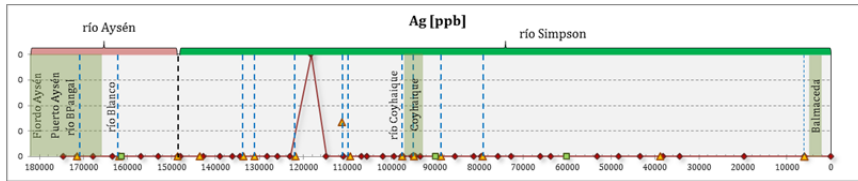




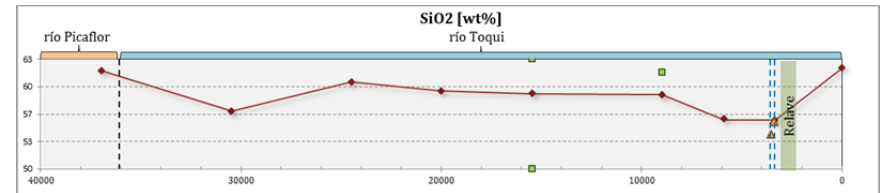
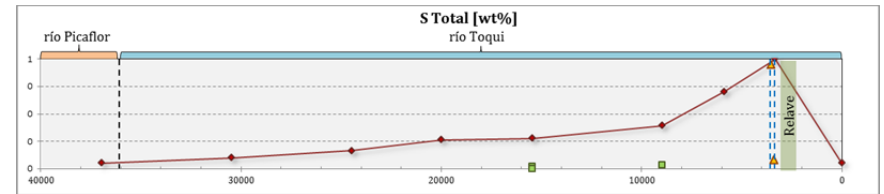
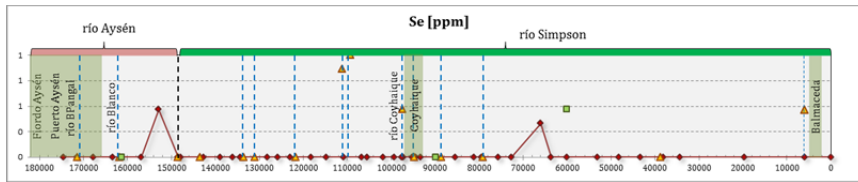
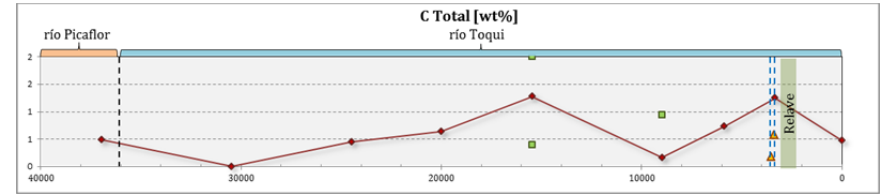
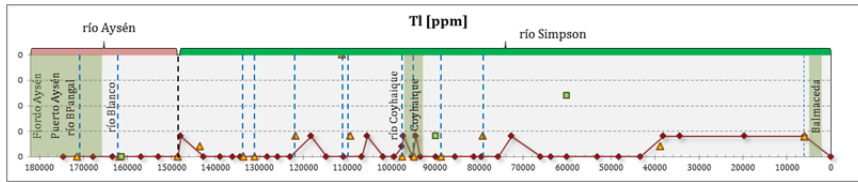


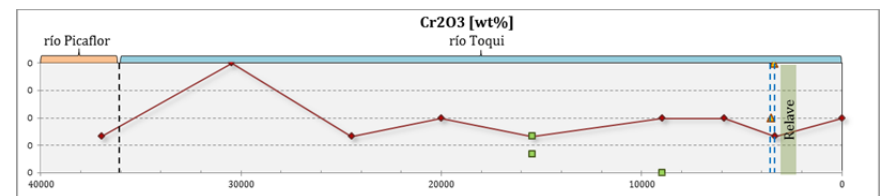
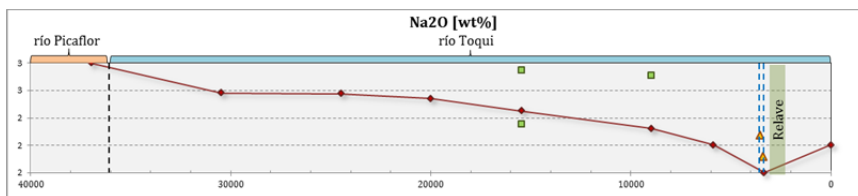
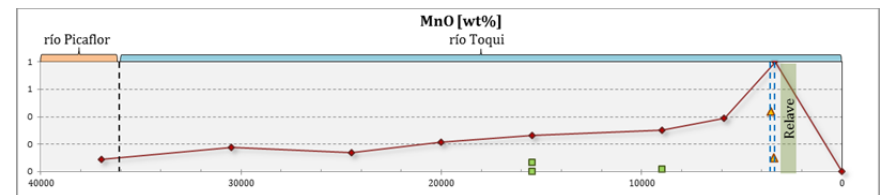
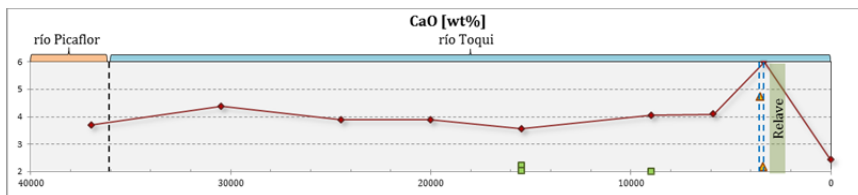
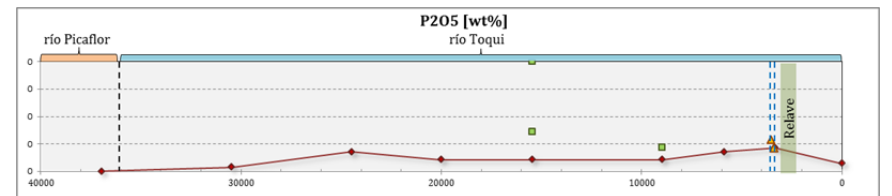
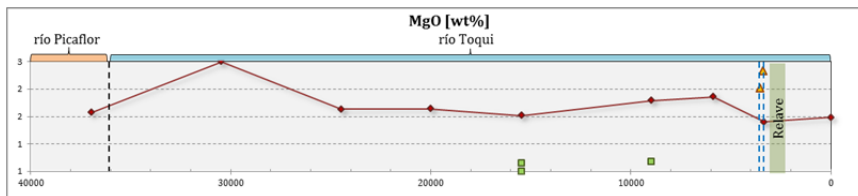
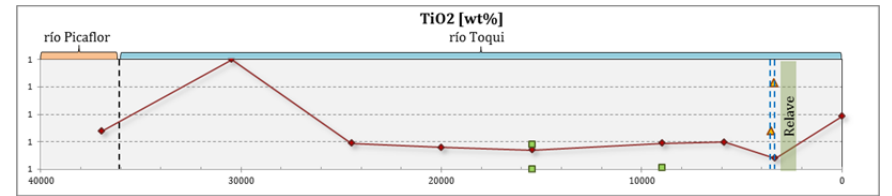
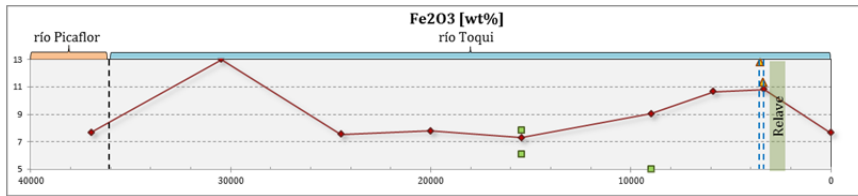
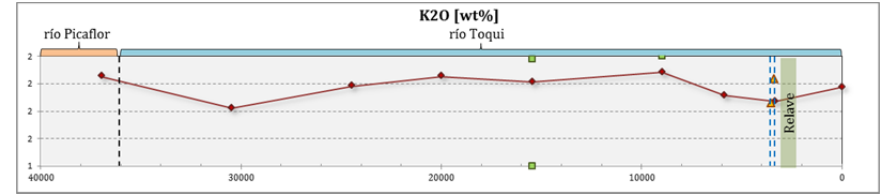
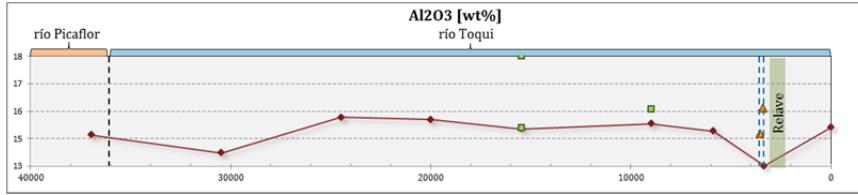


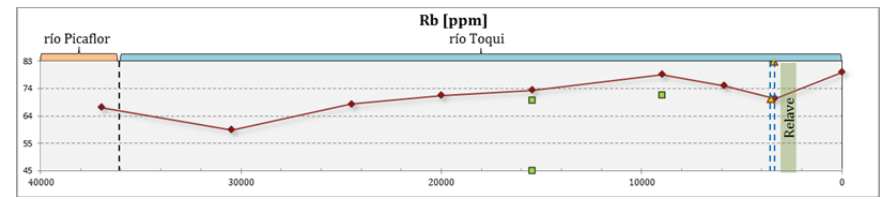
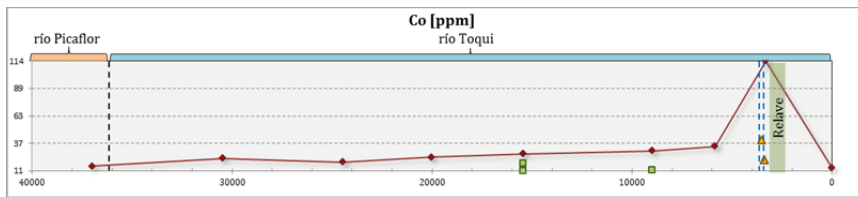
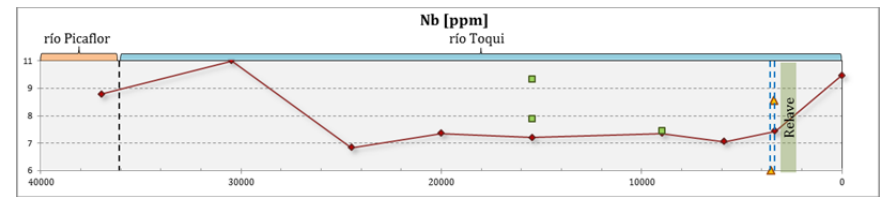
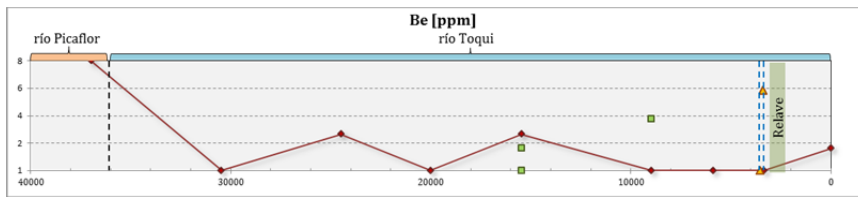
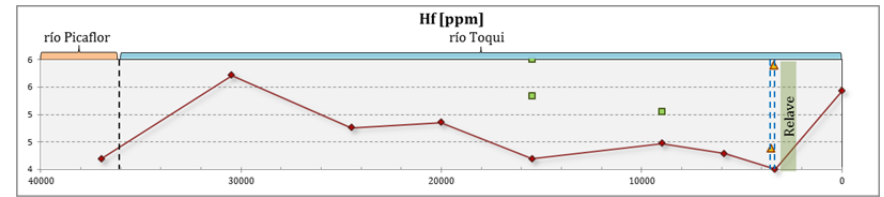
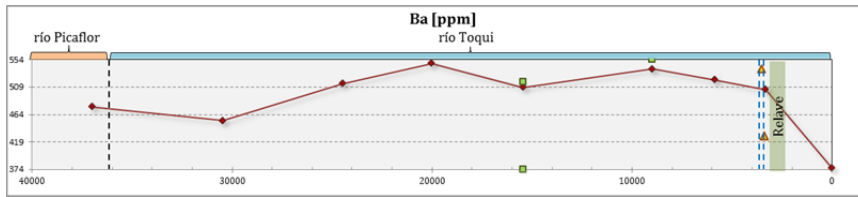
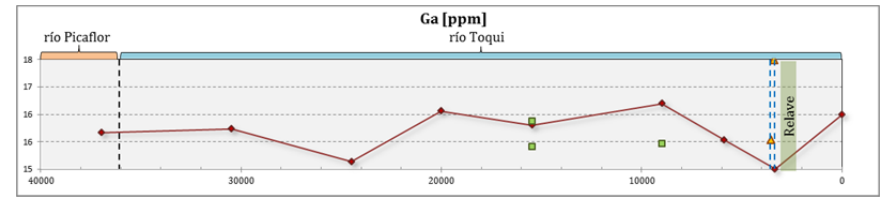
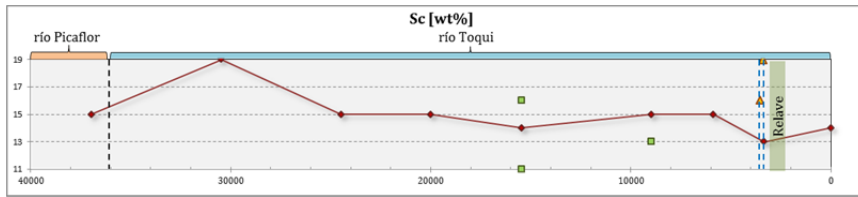
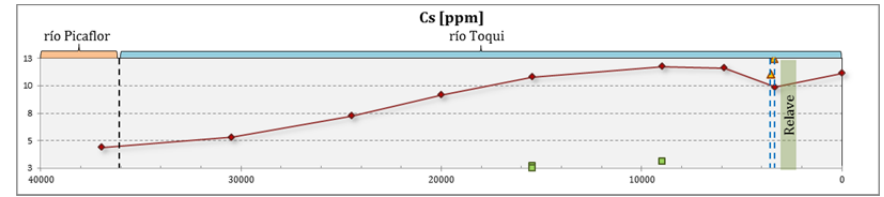
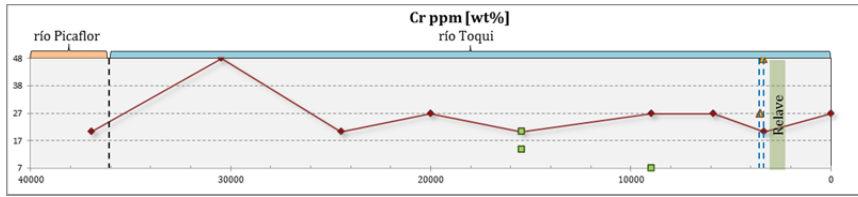


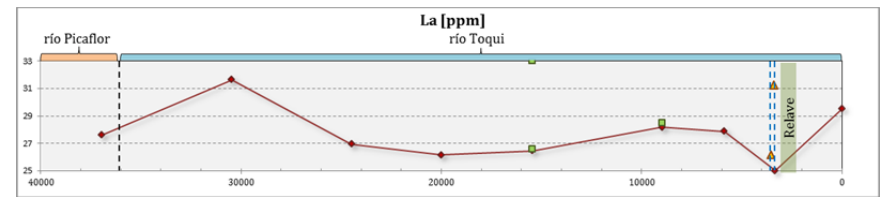
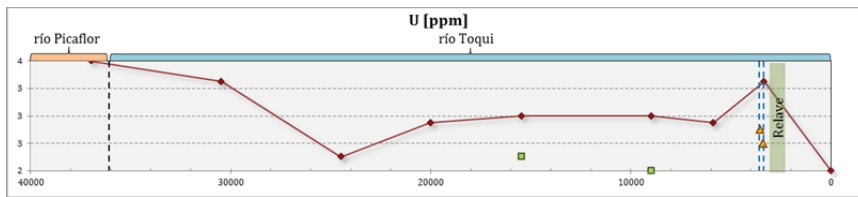
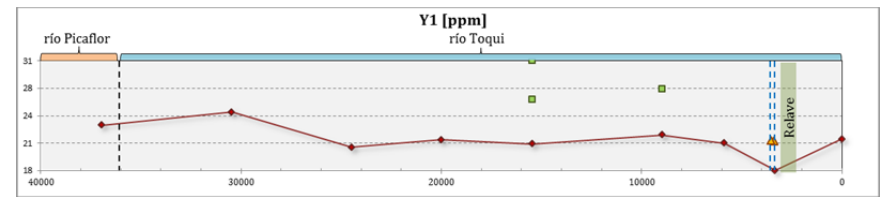
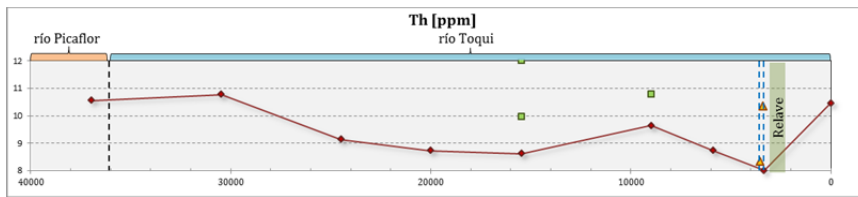
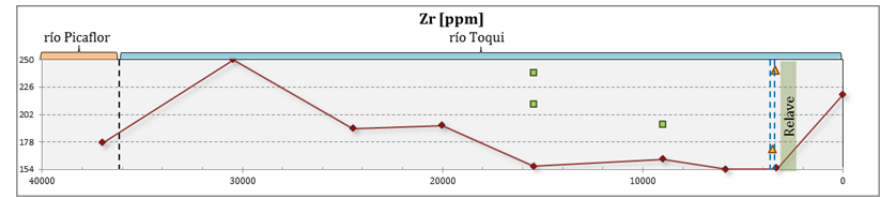
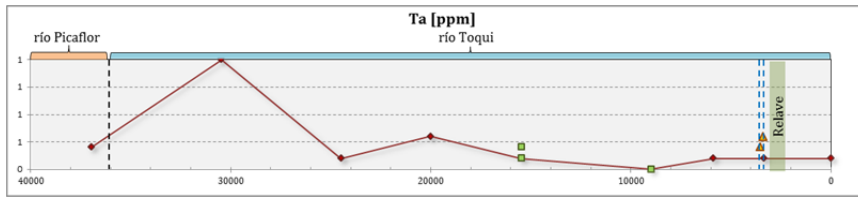
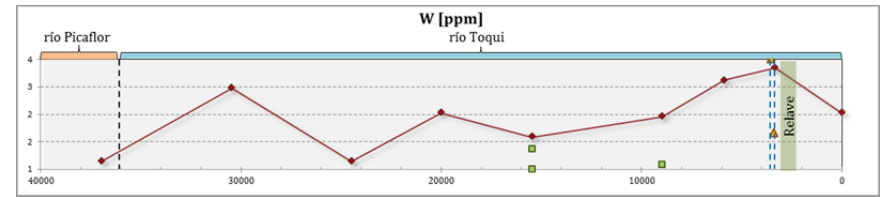
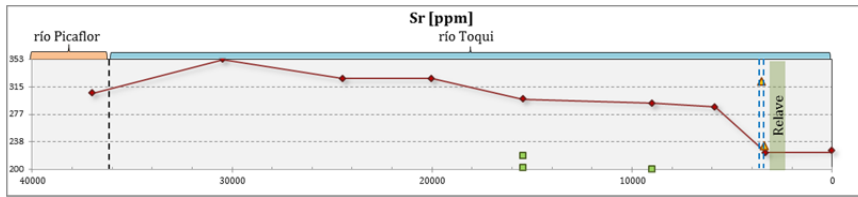
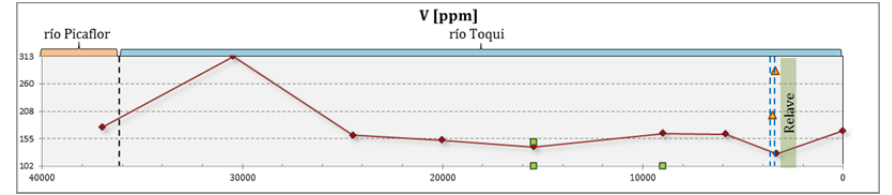
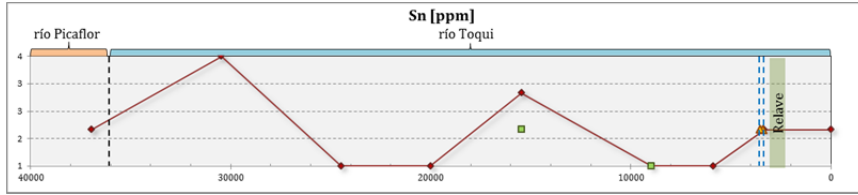


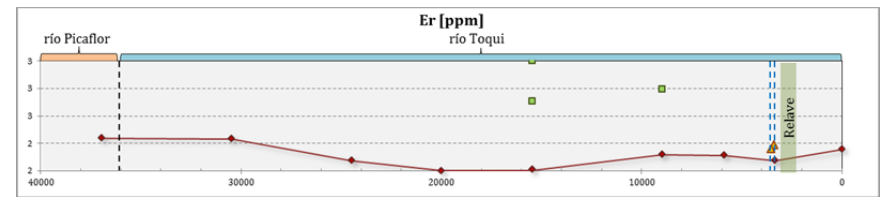
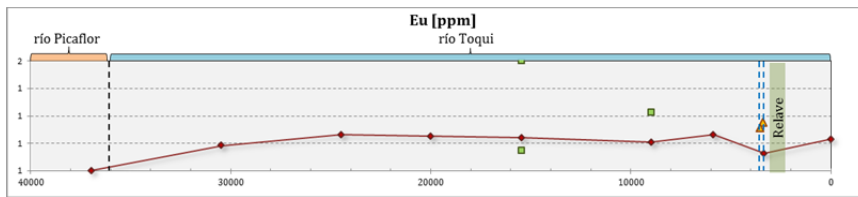
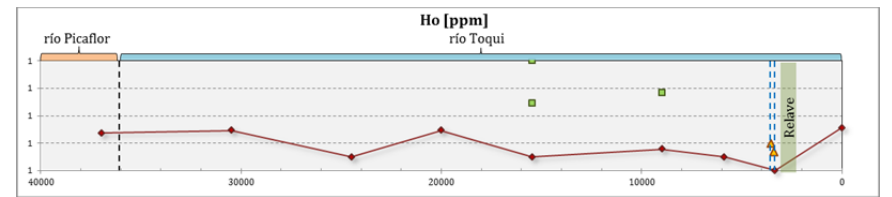
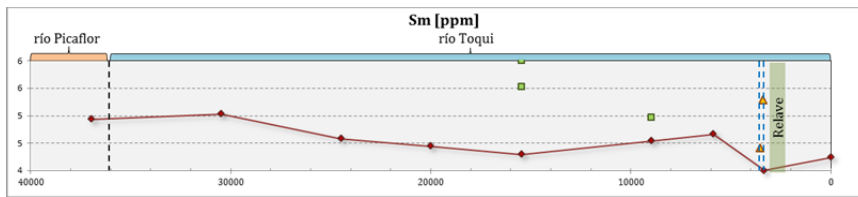
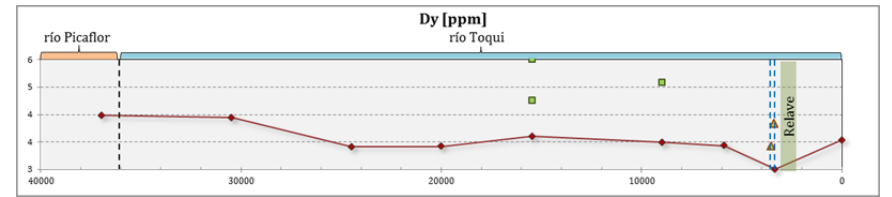
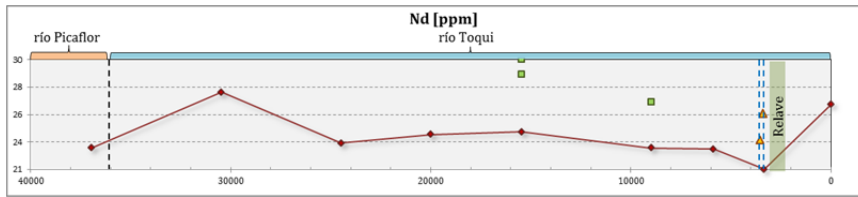
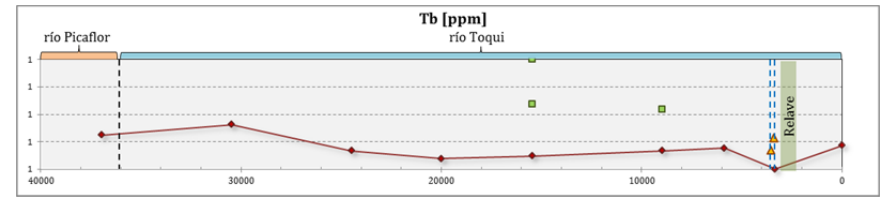
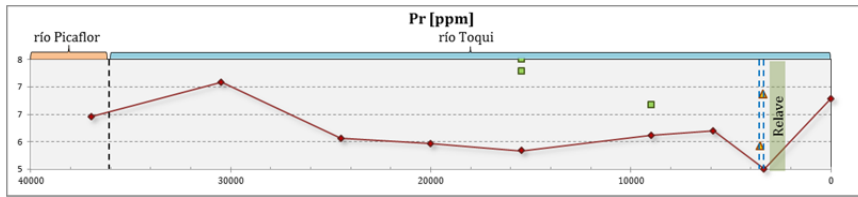
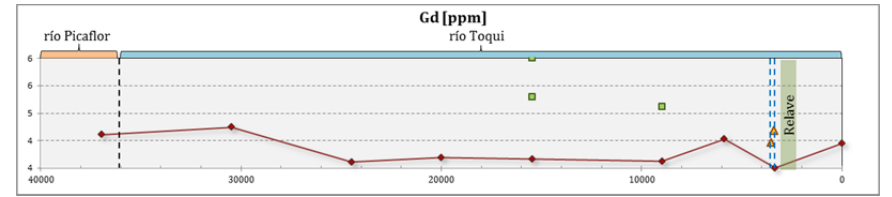
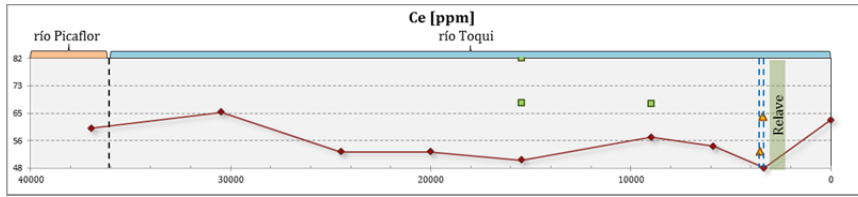
viii) Río El Toqui

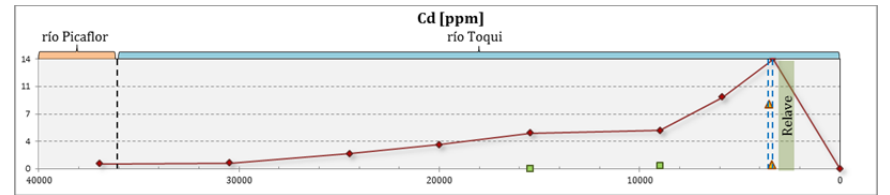
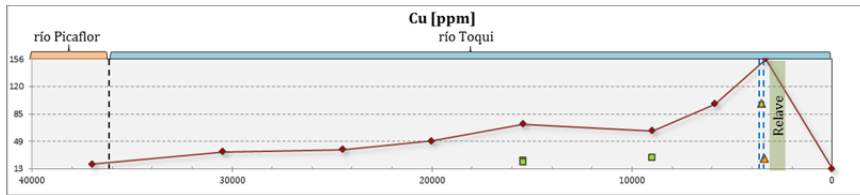
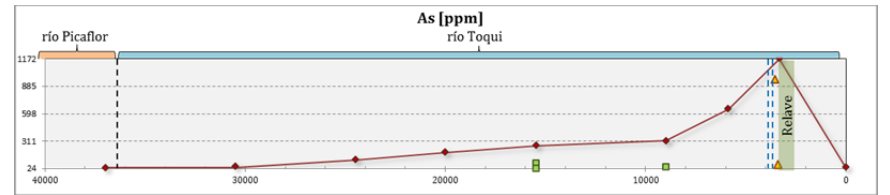
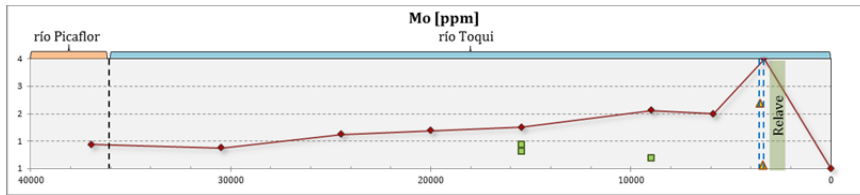
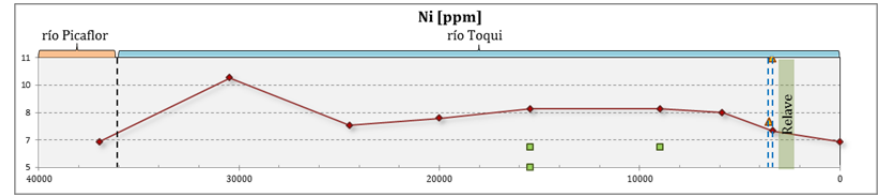
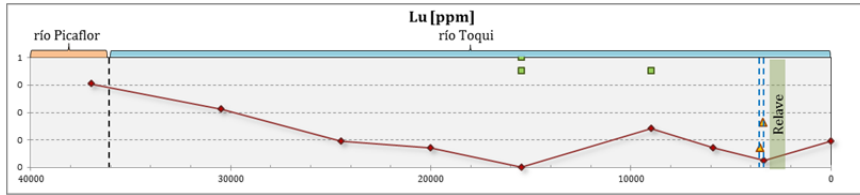
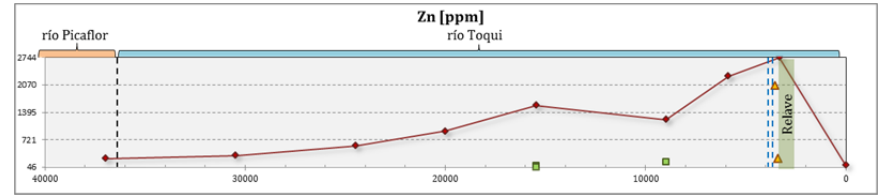
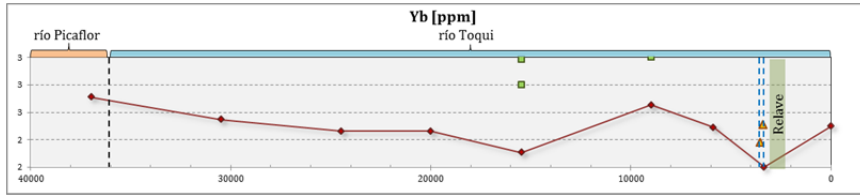
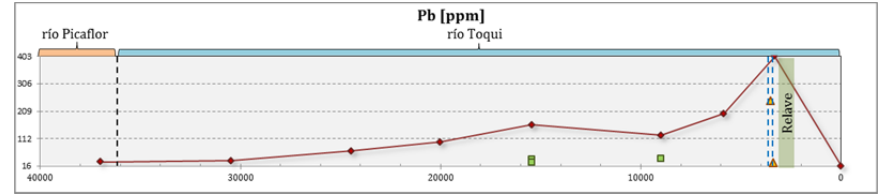
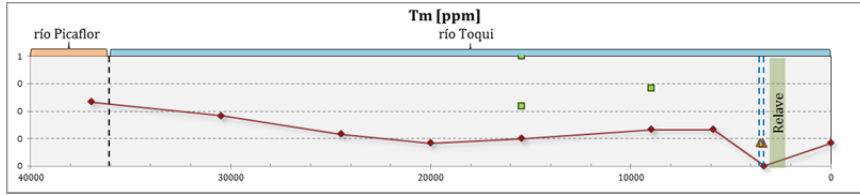


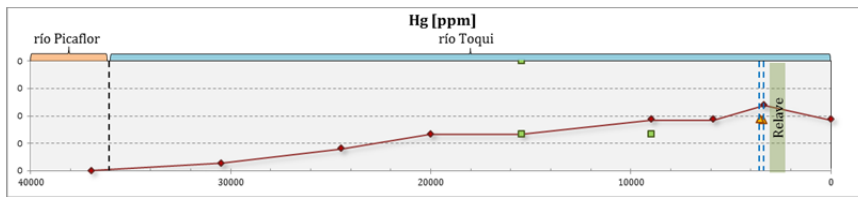
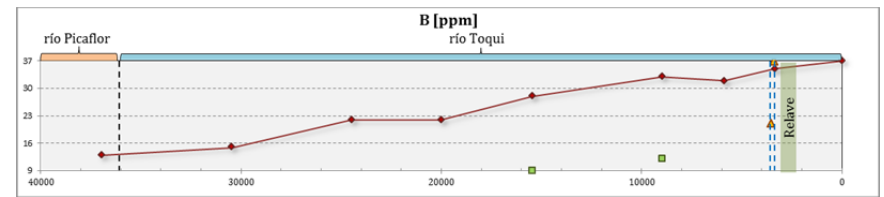
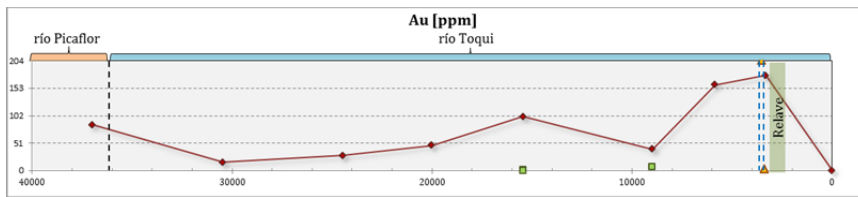
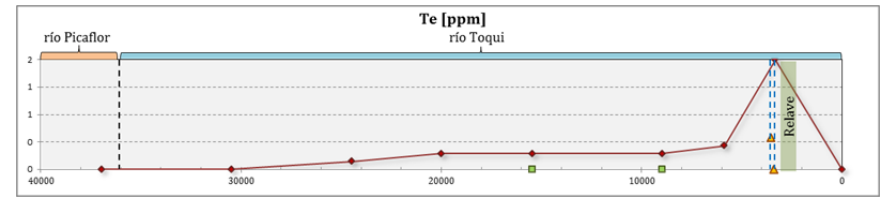
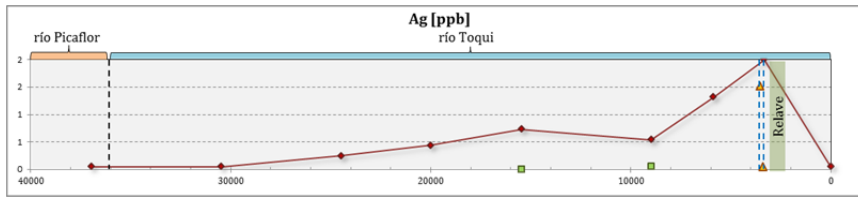
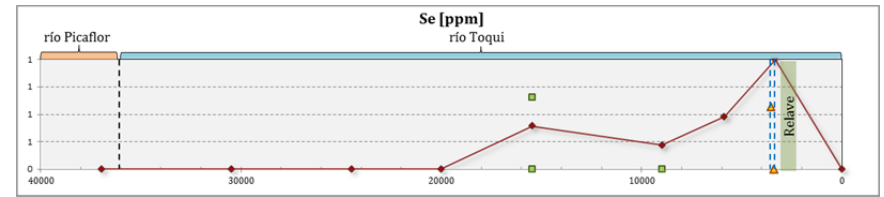
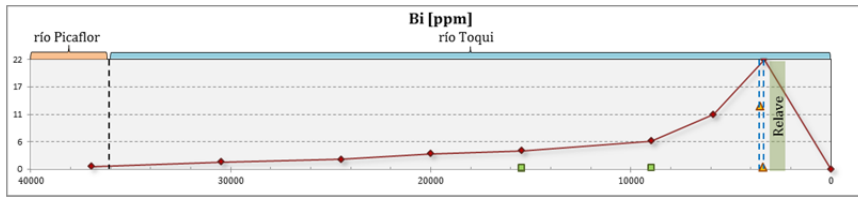
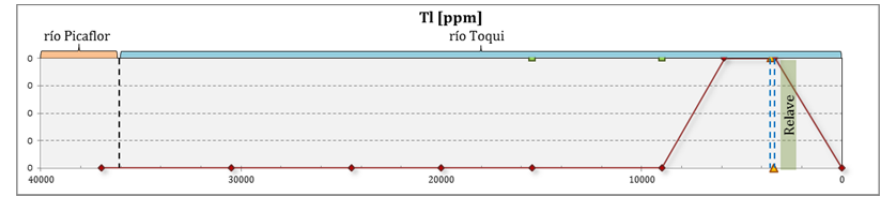
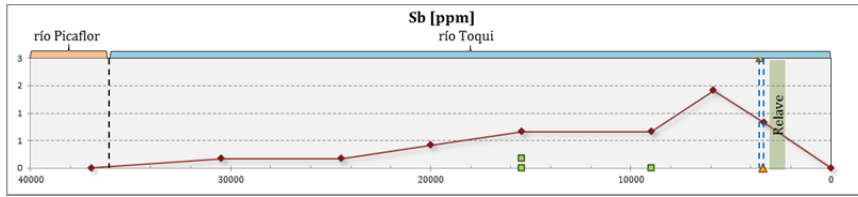








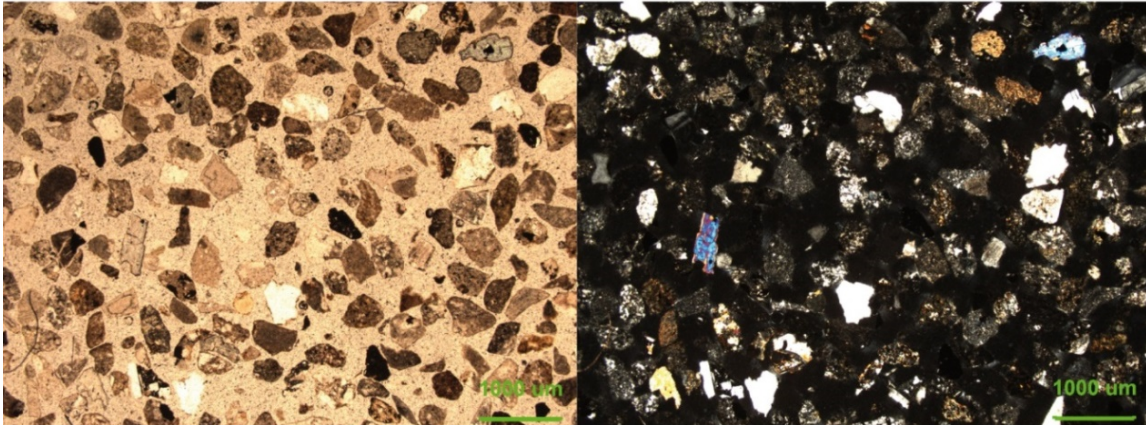




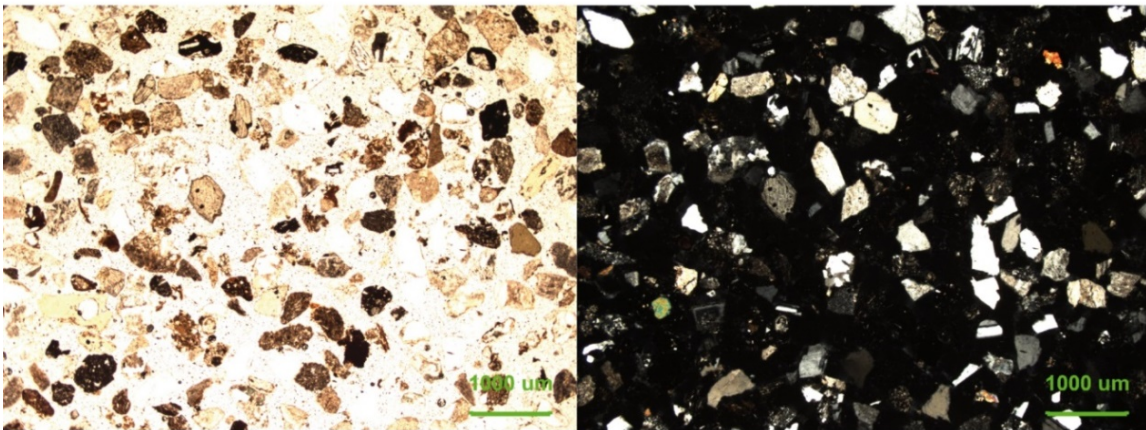
ANEXO C Datos Mineralógicos

NP

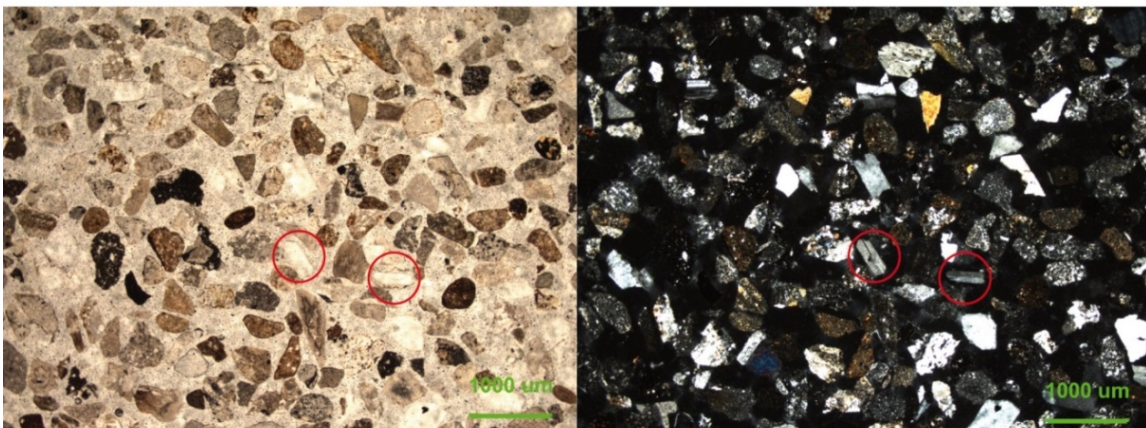
NX



GQ-15-CR-010. Se observan piroxenos (clino y ortopiroxenos), cuarzo, plagioclasa, feldespatos, epidota y biotita (la mayoría oxidadas).



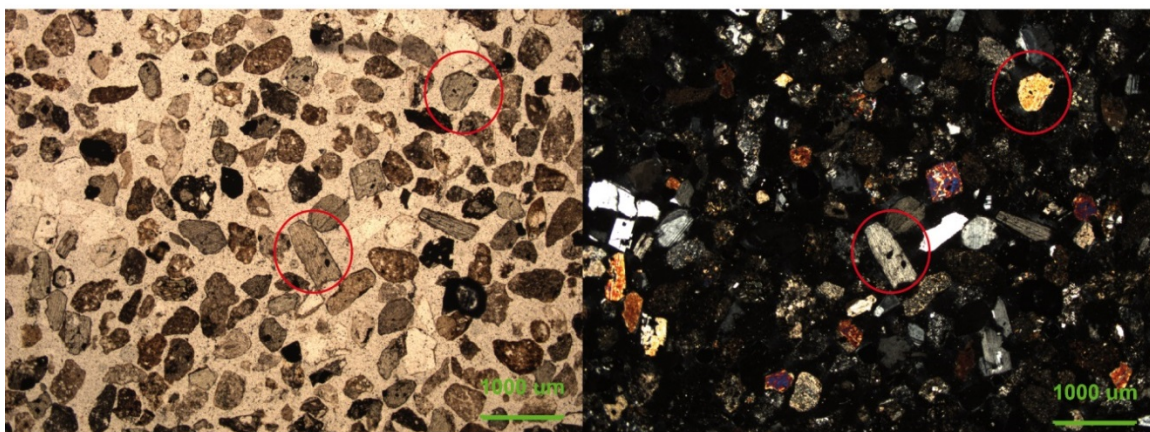
GQ-15-TR-036. Se observan principalmente, plagioclasas, cuarzo, ortopiroxenos y hornblenda.



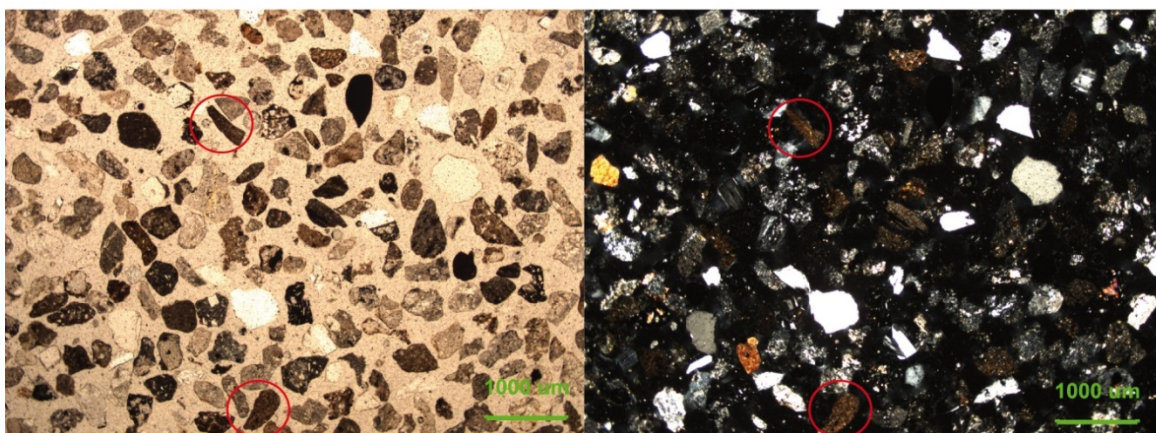
GQ-15-JB-004. Se observan plagioclasas, cuarzo, feldespatos, biotitas (oxidadas en su mayoría), epidota y piroxenos. Se muestran cristales de plagioclasa encerrados en un círculo rojo, a modo de ejemplo.

NP

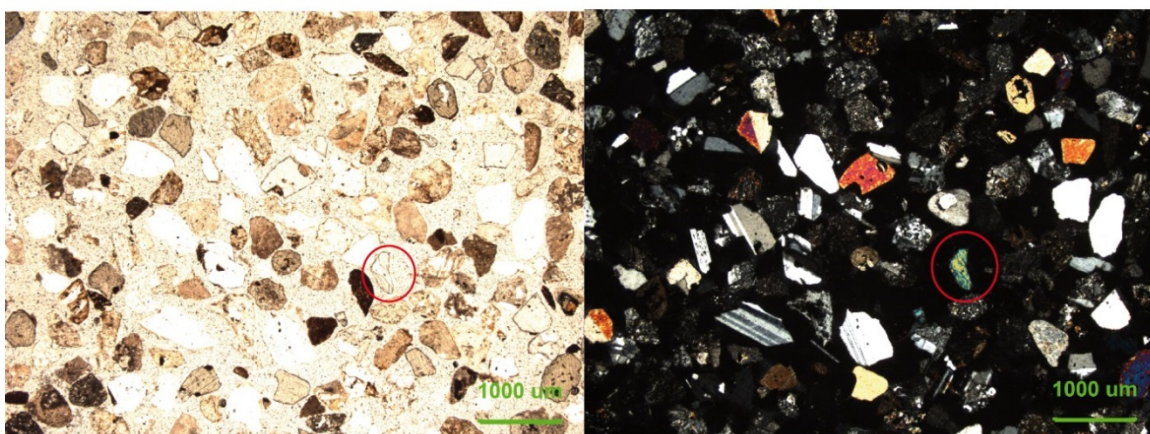
NX



GQ-15-TR-057. Se observan ortopiroxenos, algunos clinopiroxenos, plagioclasa, cuarzo y epidota. Se muestran ortopiroxenos encerrados en círculos rojos, a modo de ejemplo.



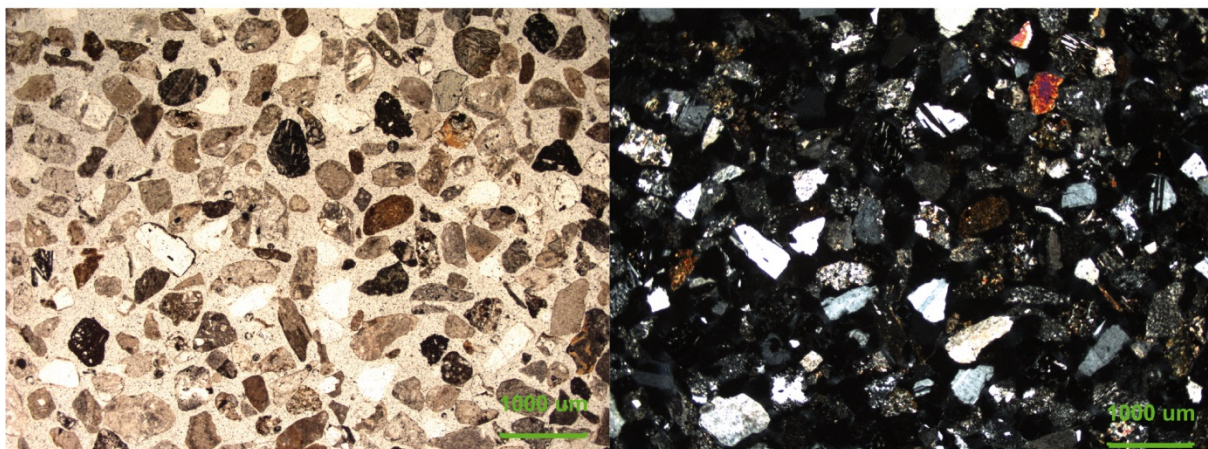
GQ-15-TR-051. Se observa cuarzo, plagioclasa, ortopiroxeno, biotita (la mayoría oxidadas) y epidota. Se muestran biotitas alteradas encerradas en círculos rojos, a modo de ejemplo.



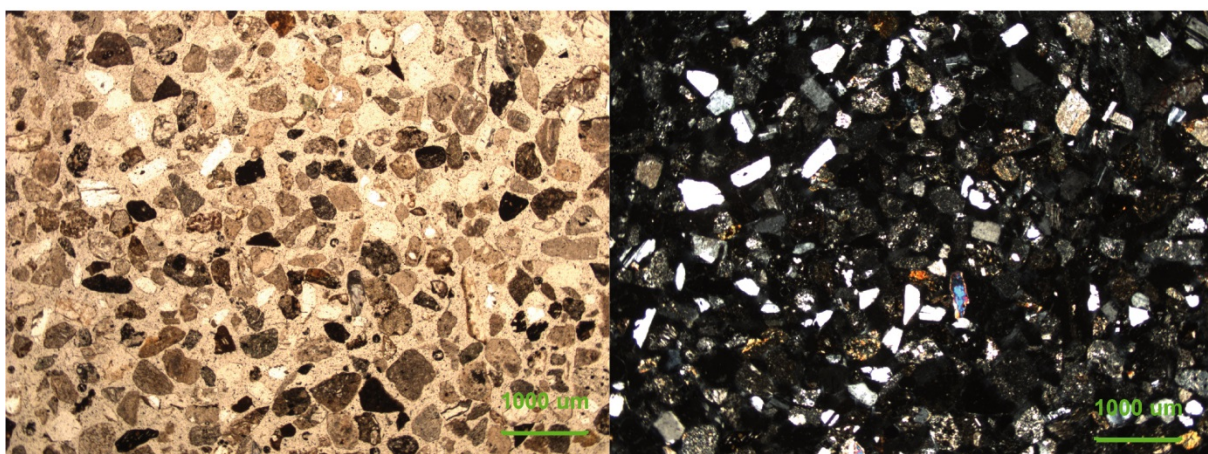
GQ-15-FC-009. Se observan principalmente, piroxenos (clino y ortopiroxenos), plagioclasa, cuarzo, epidota y olivino. Se muestran un cristal de olivino encerrado en un círculo rojo, a modo de ejemplo.

NP

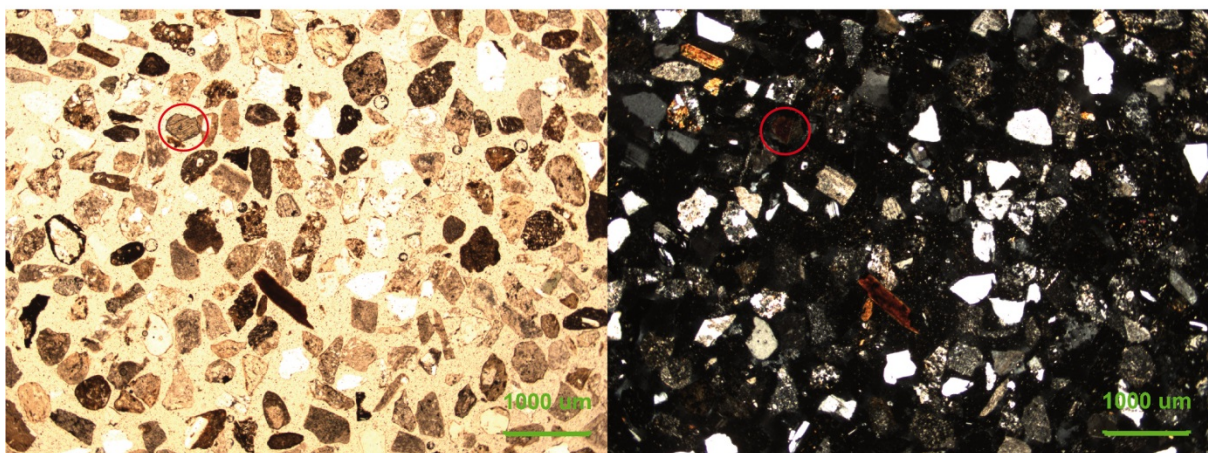
NX



GQ-15-TR-010. Se observa principalmente plagioclasa, cuarzo, feldespato, piroxenos y biotita.



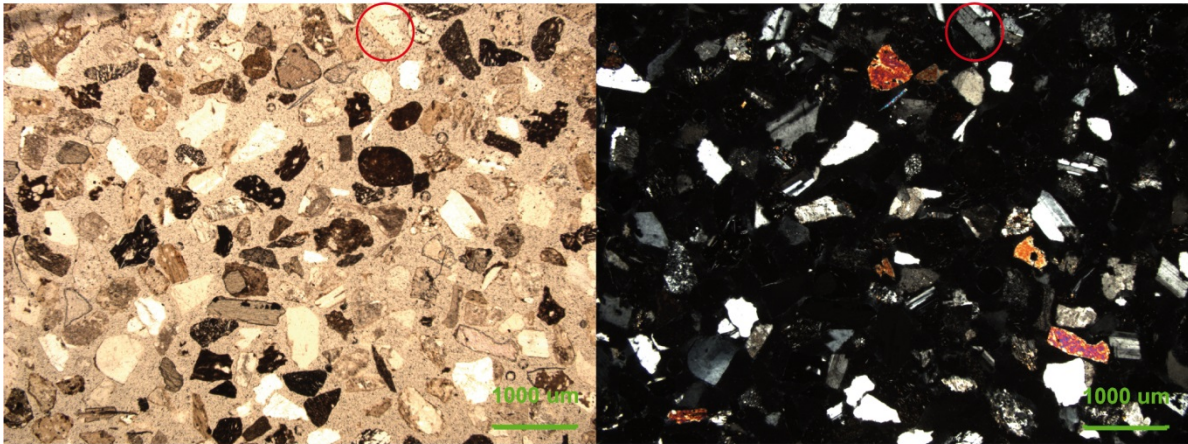
GQ-15-TR-066. Se observan plagioclasas, cuarzo, clinopiroxenos, epidota, clorita y biotita.



GQ-15-TR-084. Se observa biotita (bastante oxidadas), cuarzo, feldespato, plagioclasa, piroxeno y anfíboles. Se muestra un piroxeno maclado encerrado en un círculo rojo.

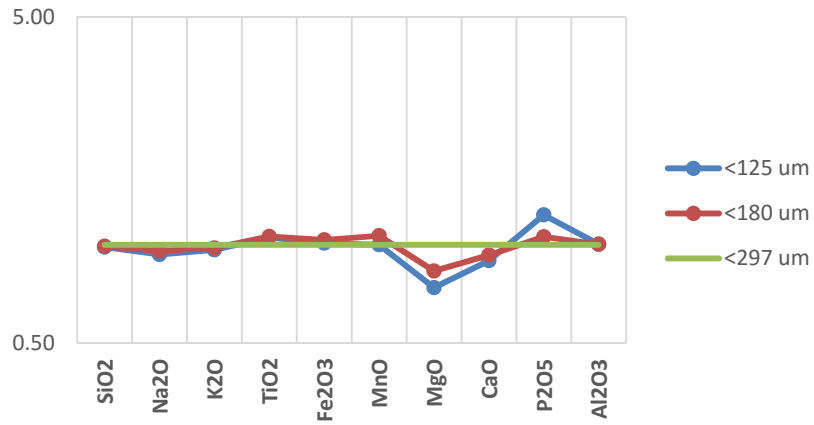
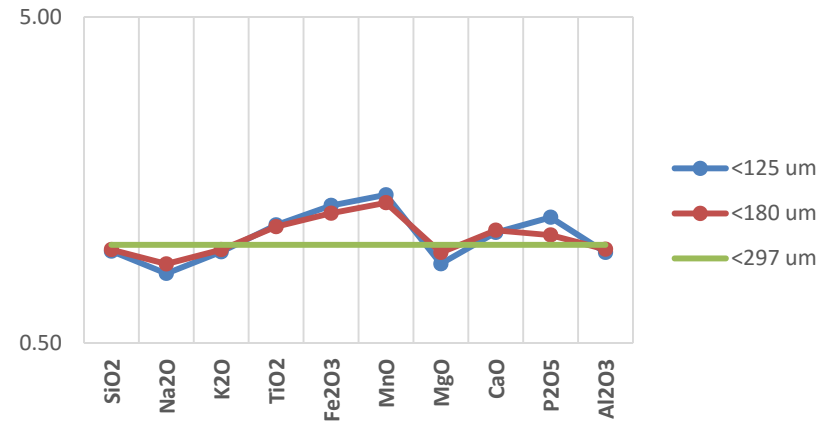
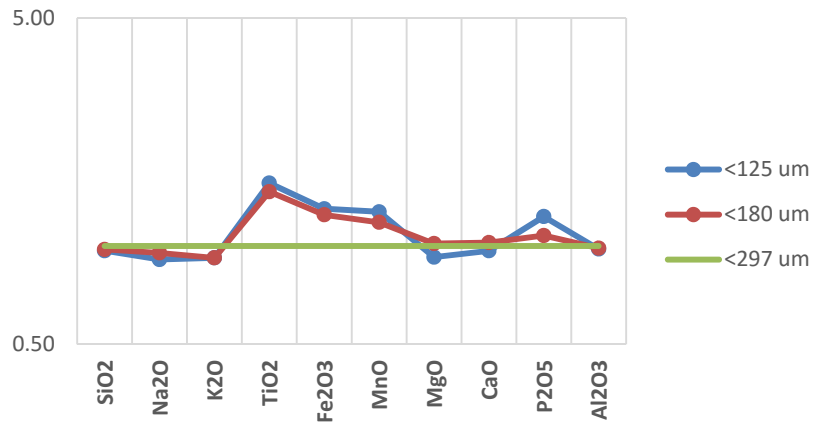
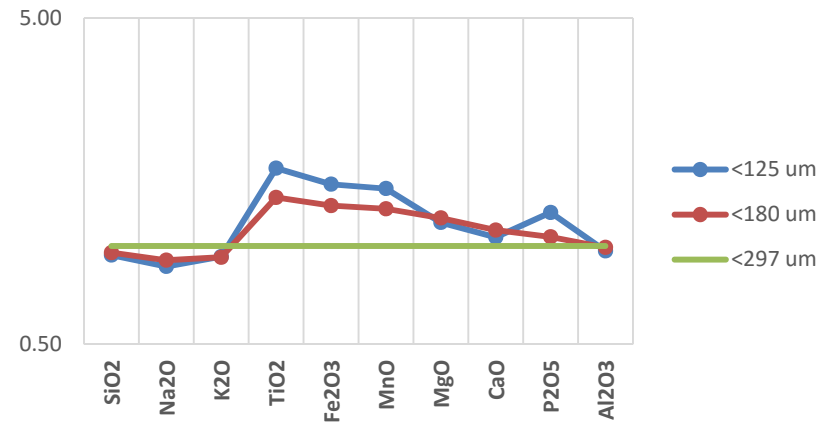
NP

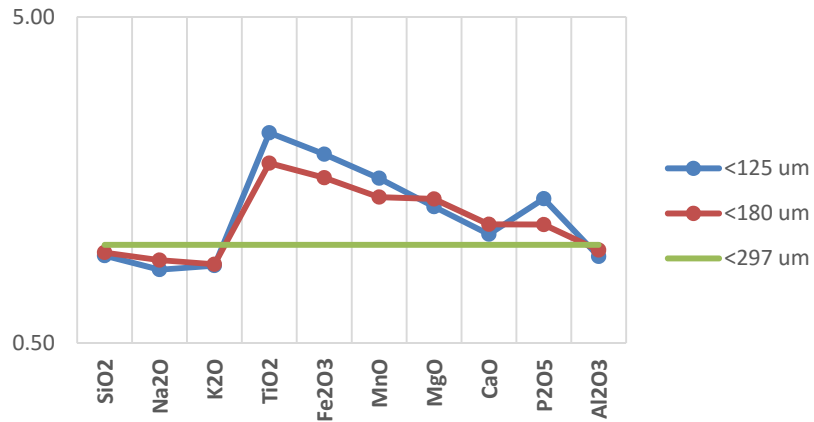
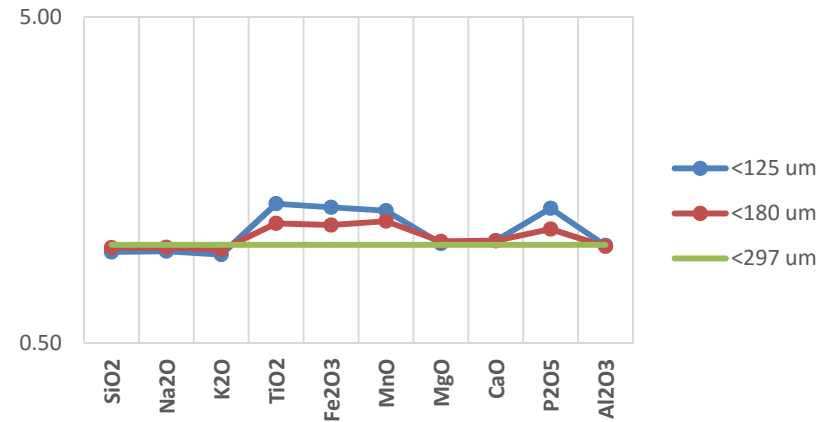
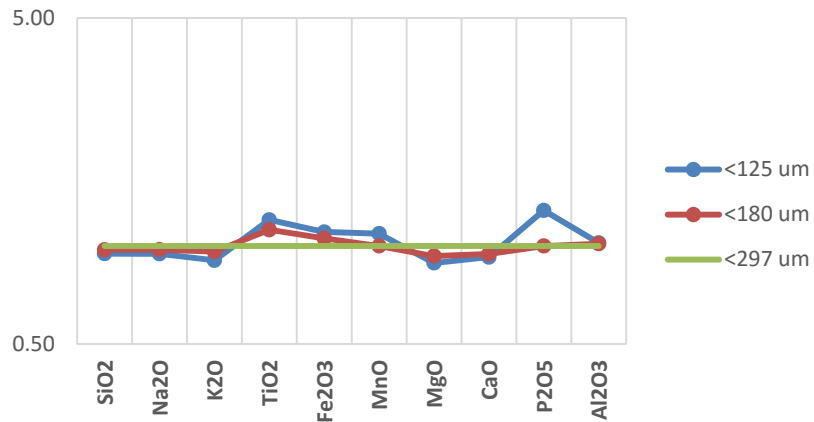
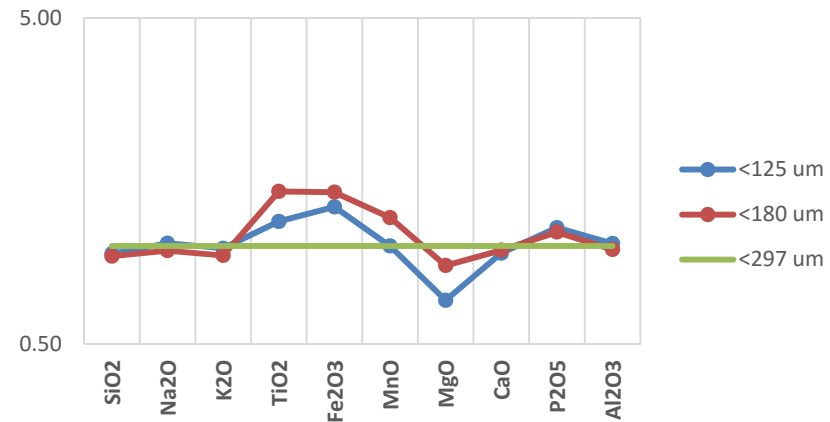
NX

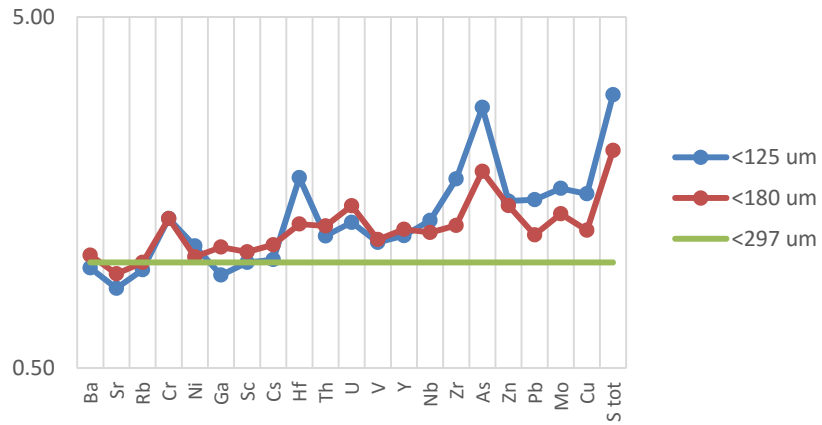
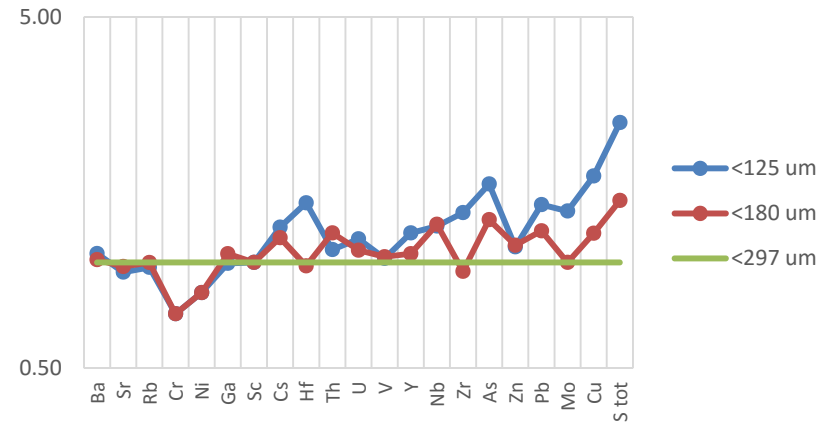
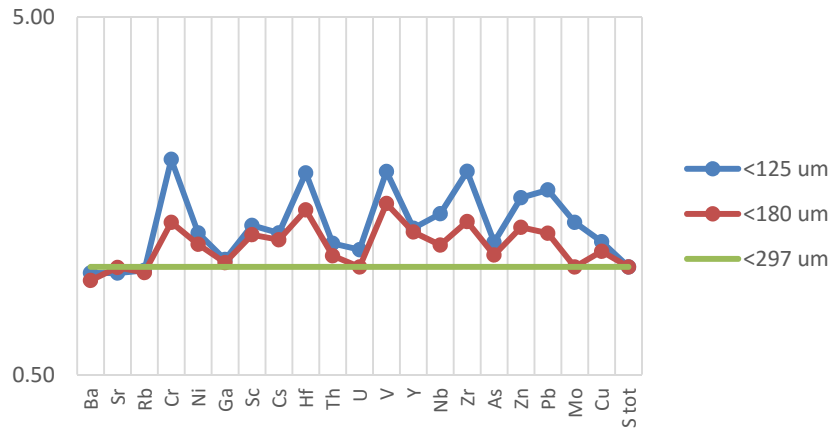
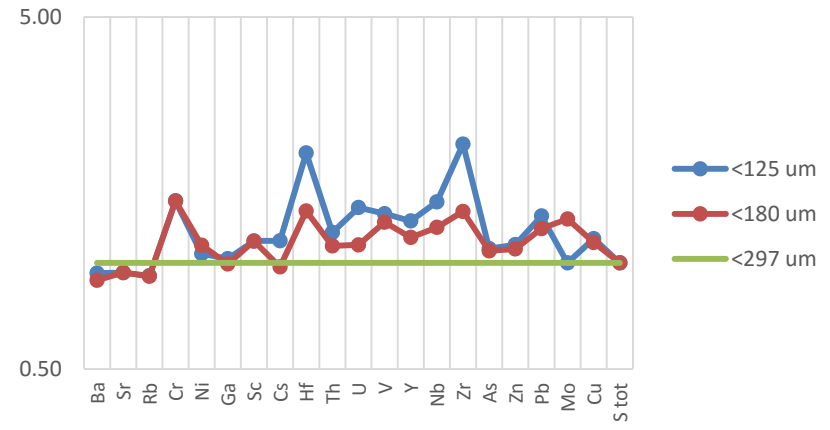


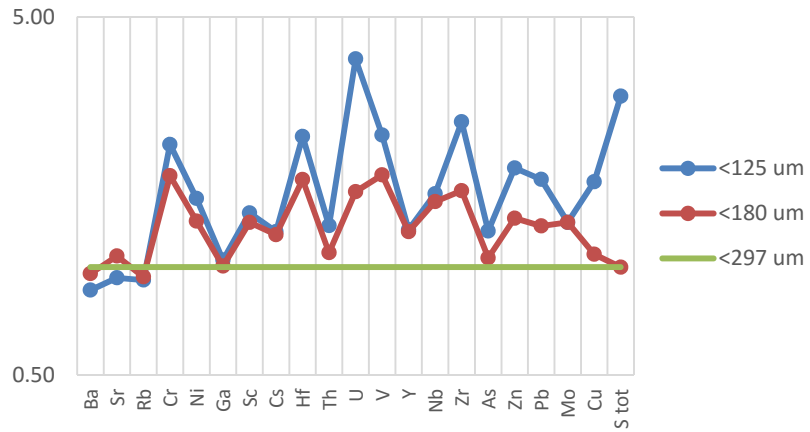
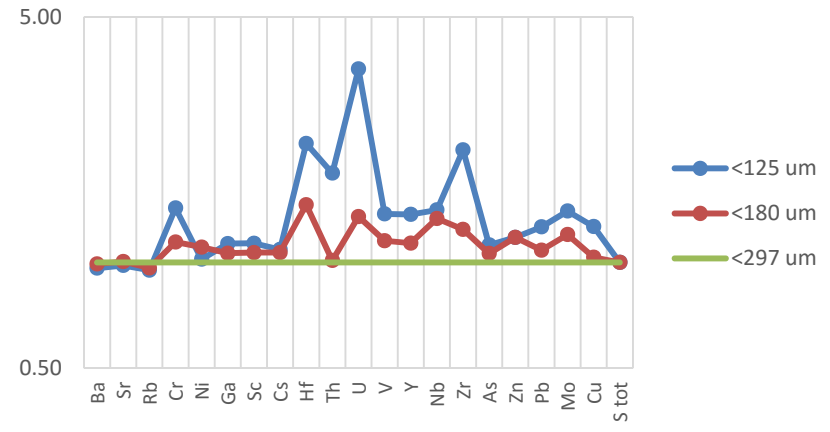
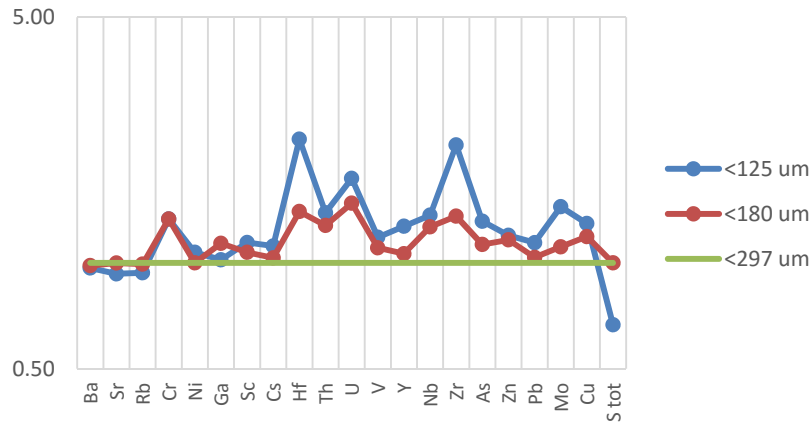
GQ-15-FA-019. Se observa principalmente plagioclasas, cuarzo, feldespatos y piroxenos. Se muestra un cristal de plagioclasa, encerrada en un círculo rojo a modo de ejemplo.

ANEXO D Estudio granulométrico

CR-10**TR-51****JB-04****TR-10**

TR-66**TR-84****TR-36****FA-19**

TR-51**CR-10****TR-10****JB-04**

TR-66**TR-84****TR-36****FA-19**