



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

**EVALUACION GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE SEDIMENTOS  
FLUVIALES DE HOJA LA SERENA (1:250.000) POR MEDIO DE  
ANÁLISIS DE DATOS COMPOSICIONALES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**GABRIEL IGNACIO FERNÁNDEZ SAAVEDRA**

**PROFESOR GUÍA:**

**JUAN PABLO LACASSIE REYES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**CLAUDIA CANNATELLI**

**XAVIER EMERY**

**SANTIAGO DE CHILE**

**ENERO 2018**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE: Geólogo  
POR: Gabriel Ignacio Fernández Saavedra  
Fecha: 19/01/2018  
PROFESOR GUÍA: Juan Pablo Lacassie**

**EVALUACION GEOQUÍMICA-AMBIENTAL DE SEDIMENTOS FLUVIALES DE  
HOJA LA SERENA (1:250.000) POR MEDIO DE ANÁLISIS DE DATOS  
COMPOSICIONALES**

En este trabajo se analiza, por medio de una metodología multivariable de análisis de datos composicionales (CoDA), la composición química de 58 elementos y compuestos de la fracción fina (<0.18 mm) de 640 muestras de sedimentos fluviales de la Hoja La Serena (1:250.000) en el contexto del Plan Nacional de Cartografía Geoquímica llevada a cabo por el Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.

Los datos composicionales (e.g. concentraciones químicas) se encuentran definidos en un espacio vectorial de características peculiares: el Simplex. Los datos alojados en este espacio presentan complicaciones a la hora de su procesamiento, tal como correlaciones espurias e incoherencias subcomposicionales, lo cual repercute en interpretaciones que pueden ser consideradas erróneas a partir de herramientas estadísticas tradicionales. Es por ello que resulta conveniente aplicar ciertas transformaciones con tal de trasladar los datos desde el Simplex hacia el espacio de los números Reales.

La metodología CoDA empleada, en resumidas palabras, consiste en: (i) la transformación de los datos composicionales a coordenadas log-cocientes, (ii) el análisis estadístico tradicional de los datos transformados en el espacio de los Reales, y (iii) la interpretación de los resultados en las propias coordenadas transformadas y/o expresadas nuevamente en términos composicionales. En el presente estudio se ejecuta y evalúa la metodología de determinación de una línea base geoquímica por medio de una perspectiva CoDA propuesta por Buccianti y colaboradores (2015). En esta metodología se obtienen dos sub sets de datos, siendo uno correspondientes a composiciones (muestras) anómalas, y el otro a composiciones características de líneas base. De este último sub set de datos se obtiene un vector línea base que da cuenta de las composiciones representativas del área de estudio.

Como resultado se obtiene que la línea base geoquímica muestra una marcada relación con procesos endógenos y exógenos conocidos para el área de estudio como lo son la litogénesis regional, mineralización económica, y alteración hipógena y supérgena; o bien dinámica geológica estructural y subsecuentes cambios hidrodinámicos de los cauces, meteorización y erosión; entre otros factores. Además las herramientas estadísticas empleadas, matrices de variación, correlación y biplots, permiten interpretar patrones geoquímicos no identificables por medio de metodologías tradicionales, como por ejemplo la relación existente entre Mg, Sc, Ga y fases silicatadas, diferencias de comportamiento entre el Co y Ni, enriquecimiento diferencial de MnO según litología, metales y metaloides como As, Pb, Zn, Cd ligados estrechamente a arcillas, comportamiento diferencial de elementos propios de fases minerales pesadas, entre otros patrones. Se identifican fuentes de variabilidad del sistema, como mineralización, principalmente del tipo Cu-Hg-Au, alteración hidrotermal, litología y acumulación de material orgánico.

En suma, se estima que la metodología ejecutada es pertinente como herramienta en la determinación de una línea base geoquímica teniendo en consideración las particularidades de los datos composicionales.

*A mi madre*

## AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quisiera agradecer a mi profesor guía, Juan Pablo Lacassie y al Servicio Nacional de Geología y Minería, por hacer posible realizar esta memoria y otorgarme la posibilidad de dar este pasó como profesional. Igualmente agradezco a los profesores Claudia Cannatelli y Xavier Emery por aceptar ser miembros de mi comisión evaluadora y por siempre tener una excelente disposición.

Un especial agradecimiento a la Pancha, Cata y Jimmy de la Unidad de Geoquímica que a lo largo de estos meses me acompañaron, apoyaron y me brindaron valiosísimos consejos y ayuda. Así también a Blanca Baccola, siempre buena onda y diligente ante cualquier situación. Al personal del Depto. de Geología en general, Don Carlos, Rosita, Verónica, etc. siempre dispuestos prestar ayuda amablemente.

Un agradecimiento a todo 'Su Vinchuqueo', Rodri, Marco, Jefe, Eial, Jercko, Poeta, Nico, Pelao Robb, Fonseca, Guille, Fonsi, Timo.... y todos los que alguna vez compartieron conmigo este camino por el depto. de Geología. Sin uds esto no hubiera sido lo mismo. Igualmente, a los cabros pedios de Bachi: Alonchat, Toño, Seba, Orland. Sin todos uds este viaje no hubiera tenido gracia.

A mi familia, que, pese a todos los problemas, a todos los momentos difíciles, han estado ahí para apoyarme. Un especial agradecimiento a mi viejo que siempre tuvo fe en mí y me apoyo en todas mis decisiones. Este título es para ti.

Y a Madeline, mi compañera, mi soporte, mi confidente. Esto te lo debo a ti. Esto nunca hubiera sido posible si no me hubieras motivado a seguir el camino que siempre busqué. Este título es tanto tuyo como mío. Sea lo que sea lo que nos depara el destino, serás siempre mi compañera.

Y un agradecimiento a todo aquel que haya surcado este mar junto a mí.

¡¡ Gracias !!

## Tabla de Contenido

1	INTRODUCCION .....	- 1 -
1.1	Objetivos .....	- 2 -
1.1.1	Objetivo general .....	- 2 -
1.1.2	Objetivos específicos .....	- 2 -
1.2	Hipótesis .....	- 3 -
2	MARCO TEORICO .....	- 4 -
2.1	Elementos de estadística .....	- 4 -
2.1.1	Valores atípicos (outliers).....	- 4 -
2.1.2	Matriz de Varianza-Covarianza.....	- 5 -
2.2	Bases de analisis de datos composicionales (CoDa).....	- 5 -
2.2.1	Introducción.....	- 5 -
2.2.2	Naturaleza de los datos composicionales .....	- 6 -
2.2.3	Restricciones de la suma constante .....	- 7 -
2.2.4	Operatoria en el Simplex .....	- 9 -
2.2.4.1	Operación Clausura .....	- 9 -
2.2.5	Transformaciones log-cocientes .....	- 10 -
2.2.5.1	Transformación log-cociente aditiva (alr).....	- 10 -
2.2.5.2	Transformación log-cociente centrada (clr) .....	- 11 -
2.2.5.3	Transformación log-cociente isométrica (ilr).....	- 11 -
2.3	Evaluación de agrupamiento.....	- 14 -
2.3.1	Métodos de agrupamiento .....	- 14 -
2.3.1.1	Partición entorno a medoides (K-medoids).....	- 14 -
2.3.2	Índice de silueta .....	- 15 -
2.4	Identificación de datos composicionales anómalos (outliers) .....	- 16 -
2.4.1	Identificación de Outliers por medio de distancias de Mahalanobis .....	- 16 -
2.4.1.1	Metodología clásica.....	- 16 -
2.4.1.2	Metodología robusta (estimador de covarianza de mínimo determinante) .....	- 16 -
2.5	Herramientas de análisis estadístico de datos composicionales .....	- 18 -
2.5.1	Centro .....	- 18 -
2.5.2	Varianza total.....	- 18 -
2.5.3	Matriz de variación.....	- 19 -
2.5.4	Biplot composicional.....	- 19 -
2.5.5	Matriz de covarianza de los datos clr-transformados .....	- 20 -
3	METODOLOGIA .....	- 21 -
3.1	Confección de base de datos .....	- 21 -

3.1.1	Base de datos modificada .....	- 21 -
3.1.1.1	Reducción de numero de muestras .....	- 21 -
3.1.1.2	Consideración de parámetros .....	- 23 -
3.1.1.3	Valores bajo límites de detección.....	- 24 -
3.2	Transformación a datos log-cocientes .....	- 24 -
3.3	Evaluación de agrupamiento.....	- 24 -
3.4	Identificación de outliers y separación de set de datos .....	- 24 -
3.5	Caracterización de Linea Base.....	- 25 -
3.5.1	Vector representativo.....	- 25 -
3.5.2	Análisis estadísticos.....	- 25 -
4	MARCO GEOLOGICO.....	- 26 -
4.1	Síntesis .....	- 27 -
4.2	Geología estructural .....	- 28 -
4.3	Geología económica .....	- 30 -
5	RESULTADOS .....	- 31 -
5.1	Base de datos modificada.....	- 31 -
5.1.1	Reducción número de muestras .....	- 31 -
5.1.2	Consideración de parámetros Fuera de Rango .....	- 31 -
5.1.2.1	Oxido de Cromo, Tantalio, Estaño, Torio, Uranio .....	- 31 -
5.1.2.2	Oro.....	- 32 -
5.1.2.3	Mercurio, Antimonio.....	- 32 -
5.1.2.4	Molibdeno .....	- 32 -
5.1.2.5	Wolframio .....	- 33 -
5.1.2.6	Berilio.....	- 33 -
5.1.2.7	Cadmio .....	- 33 -
5.1.2.8	Carbono total .....	- 33 -
5.1.3	Resultado Base de datos modificada .....	- 34 -
5.2	Estadística clásica .....	- 35 -
5.3	Evaluación de agrupamiento.....	- 37 -
5.4	Identificación de ‘outliers’ y separación de set de datos .....	- 37 -
5.5	Caracterización de línea base.....	- 41 -
5.5.1	Evaluación de agrupamiento .....	- 41 -
5.5.2	Concentraciones representativas.....	- 42 -
5.5.3	Matriz de variación.....	- 44 -
5.5.3.1	Base de datos modificada.....	- 44 -
5.5.3.2	Set de datos A.....	- 48 -

5.5.4	Matriz de correlación.....	- 50 -
5.5.4.1	Base de datos modificada clr-transformada .....	- 51 -
5.5.4.2	Base de datos modificada original.....	- 51 -
5.5.5	Biplots composicionales .....	- 52 -
5.5.5.1	Nube de las variables.....	- 52 -
5.5.5.2	Nube de los individuos.....	- 56 -
6	DISCUSIONES.....	- 59 -
6.1	Determinación de composiciones ‘anómalas’ .....	- 59 -
6.2	Caracterización de Línea Base.....	- 65 -
6.2.1	Análisis exploratorio de datos composicionales.....	- 65 -
6.2.1.1	Matriz de variación y matriz de correlación clr-transformada .....	- 65 -
6.2.1.2	Biplot composicional.....	- 73 -
6.2.2	Composiciones representativas.....	- 73 -
6.2.2.1	Modos de representación.....	- 73 -
6.2.2.2	Comparación con la corteza continental superior .....	- 78 -
6.2.3	Evaluación de metodología CODA versus representaciones tradicionales... -	87 -
7	CONCLUSIONES .....	- 88 -
7.1	Determinación de composiciones anómalas, separación de set de datos y representación de vector línea base.....	- 88 -
7.2	Análisis exploratorios de datos composicionales y sus interpretaciones.....	- 89 -
7.3	Evaluación general de metodología CoDA.....	- 90 -
8	RECOMENDACIONES .....	- 91 -
9	BIBLIOGRAFÍA.....	- 92 -
	ANEXOS .....	- 97 -
	ANEXO A.....	- 102 -
	Elementos teóricos .....	- 102 -
	ANEXO B.....	- 108 -
	Confección de Base de Datos Original .....	- 108 -
	ANEXO C.....	- 115 -
	Unidades Litoestratificadas y Sedimentarias no consolidadas.....	- 115 -
	ANEXO D.....	- 133 -
	Matriz de Partición Binaria .....	- 133 -
	ANEXO E.....	- 141 -
	Matriz de Variación de Base de Datos Modificada.....	- 141 -
	ANEXO F.....	- 149 -
	Matriz de Variación de Set de Datos A.....	- 149 -

ANEXO G.....	- 157 -
Matriz de Correlación de datos clr-transformados, Base de Datos Modificada.....	- 157 -
ANEXO H.....	- 165 -
Matriz de Correlación de datos ‘crudos’, Base de Datos Modificada.....	- 165 -
ANEXO I.....	- 173 -
Mapas de concentración de parámetros Fuera de Rango .....	- 173 -
ANEXO J.....	- 200 -
Box Plot por parámetro de Set de Datos A .....	- 200 -
ANEXO K.....	- 213 -
Histograma y cortes por natural Jenks de mapas de cocientes.....	- 213 -



## Índice de Figuras

- FIGURA 1:** Representación de un diagrama ternario de una muestra de sedimento. (Qt) cuarzo total, (F) feldspatos y (L) líticos. (Alperin 2013)..... - 7 -
- FIGURA 2:** Elipse de tolerancia de datos atípicos (valores externos a la elipse son considerados outliers). Se compara las elipses generadas por distancias de Mahalanobis clásica versus distancias de Mahalanobis robusta por medio de estimador MCD. Ambas elipses de tolerancia son calculadas respecto a una distribución Chi-cuadrado de con valor de corte 0,975 muestras de vino en que se analiza su contenido de prolina (aminoácido) y ácido málico. Se logra distinguir como la elipse de tolerancia robusta resuélvele los efectos de enmascaramiento y empantanamiento generados muestras de alto contenido de ácido málico (extremo inferior derecho) respecto a la elipse de tolerancia clásica, aminorado su área (Hubert y Deruyne, 2010).- 17 -
- FIGURA 3:** Diagrama de flujo que describe, resumidamente, la metodología empleada en el presente trabajo. .... - 22 -
- FIGURA 4:** Fuente de información geológica Hoja La Serena (1:250.000). Trabajos de Emparan y Pineda (1999, 2000) se enmarcan en la Serie Mapas Geológicos, Trabajos Emparan y Pineda (2006), Pineda y Emparan (2006) y Pineda y Calderón (2008) se enmarcan en la Serie Geología Básica. Trabajos de Jorquera et al. (2009a, 2009b, 2011, 2012) y Díaz et al. (2010) corresponden a trabajos de la Serie Recursos Minerales y Energéticos. (\*) Cuadrante correspondiente a Hoja Ovalle - Peña Blanca no presenta un trabajo geológico como tal, Por ello se analiza la información de fuentes más antiguas que comprenden parte de dicho cuadrante (Gana, 1991; Thomas, 1967) correlacionando su información con fuentes de los cuadrantes adyacentes. .... - 26 -
- FIGURA 5:** Resumen geología de Hoja La Serena (1:250.000). Esta figura es elaborada a partir del cruce de información obtenida de las fuentes señaladas en la Figura 4 y del Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2002). .... - 29 -
- FIGURA 6:** Distancias de Malahanobis versus contraparte robustificada. Las líneas horizontales y verticales indican el valor de corte para una distribución chi-cuadrado a 0.975 de riesgo. Para El valor de corte para ambas distancias es de 8.93. Los valores a la derecha de la línea vertical constituyen valores ‘anómalos’ empleando una metodología clásica, y por otro lado los valores sobre la línea horizontal constituyen valores ‘anómalos’ empleando una metodología robusta. La línea diagonal corresponde a la recta identidad. .... - 38 -
- FIGURA 7:** Raíz cuadrada de cuantiles de distribución chi-cuadrado versus distancia robusta. Patrón lineal bajo el valor de corte (8.93) dan cuenta de una distribución normal multivariable. Línea horizontal corresponde al valor de corte. .... - 39 -
- FIGURA 8:** Distinción de set de datos (A y B) en función de su ambiente litológico. Fuente de información geológica indicada en Figura 5..... - 40 -
- FIGURA 9:** Biplot composicional de los 2 primeros factores principales. Este plano contiene el 32.7% de la variabilidad total. Ejes se encuentran truncados a conveniencia para efectos de representación. .... - 55 -
- FIGURA 10:** Observaciones (muestras) graficadas en el plano generado por los 2 primeros ejes factoriales composicionales. Rotulación de variables (vectores) en Figura 9. Ejes se encuentran truncados a conveniencia para efectos de representación. Este plano contiene el 32.7% de la variabilidad total ..... - 56 -

- FIGURA 11:** Biplot composicional del segundo y tercer eje factorial. Este plano contiene el 14.9% de la variabilidad total. Ejes se encuentran truncados a conveniencia para efectos de representación. .... - 57 -
- FIGURA 12:** Observaciones (muestras) graficadas en el plano generado segundo y tercer eje factorial composicional. Rotulación de variables (vectores) en Figura 11. Ejes se encuentran truncados a conveniencia para efectos de representación. Este plano contiene el 14.9% de la variabilidad total..... - 58 -
- FIGURA 13:** Puntos de muestreos seleccionados par análisis de en sectores de ‘Altos de Talinay’ y planicie Litoral al sur de bahía de Guanaqueros (Formación Coquimbo). Fuente de información geológica referenciada en Figura 4. .... - 62 -
- FIGURA 14:** (A):  $(1/2)\log[MnO/(Zr + Hf + Ta + Nb)]$ ; (B):  $(1/2)\log[MnO/(Fe_2O_3 + TiO_2 + Cr_2O_3 + V)]$ . Clasificación realizada por método de natural Jenks, histogramas en anexo H. Leyenda de unidades litológicas en Figura 16..... - 67 -
- FIGURA 15:** (A):  $(1/2)\log[(Cr_2O_3 + TiO_2 + V)/(Zr + Hf + Ta + Nb)]$ ; (B):  $(1/2)\log[V/VLinea Base]$ . Clasificación realizada por método de natural Jenks, histogramas en anexo H. Leyenda de unidades litológicas en Figura 16..... - 69 -
- FIGURA 16:** A):  $(1/2)\log[Ni/Co]$ ;. Clasificación realizada por método de natural Jenks, histogramas en anexo H. Leyenda de unidades litológicas en Figura 16. .... - 70 -
- FIGURA 17:** (A):  $(1/2)\log[Au/Ga]$ ; (B):  $(1/2)\log[Hg/Ga]$ . Clasificación realizada por método de natural Jenks, histogramas en anexo K. Leyenda de unidades litológicas en Figura 13. 1-Dto. La Higuera, 2- Dto. Santa Gracia, 3- Dtos. Alte. Latorre y Condoriaco, 4- Dto. La Corina, 5-Dto. El Sauce, 6-Dtos. Brillados, Lambert y San Antonio, 7-Dto. Pajonales, 8- Dto. Andacollo, 9-Dto. Pichilingo, 10- Dtos. Mantos de Punitaqui, La Laja y Huilmo Bajo, 11.- Mineral de Talca. .... - 71 -
- FIGURA 18:** 'Box plot' de  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  de set de datos A, se las cajas azules representan el 50% de las datos, (primer y tercer cuartil) línea roja representa el valor de línea base en base a media geométrica, y línea anaranjada representa el valor de línea base de vector clausurado. .... - 77 -
- FIGURA 19** Diagrama TAS de muestras del set de datos A (SDA), se grafica valores de línea base (LB) (Le Bas et al. 1986)..... - 78 -
- FIGURA 20:** Clasificación e rocas volcánicas según contenido de potasio y sílice (Ewart, 1982), de muestras del Set de Datos A (SDA). Se grafica valor de Línea Base (LB) ..... - 79 -
- FIGURA 21:** Diagrama La-Y-Nb de set de datos A (Cabanis et al. 1990) ..... - 80 -
- FIGURA 22:** Patrones de tierras raras (REE) normalizas al condrito tipo CI ((McDonough, y Sun, 1995)), para concentraciones de línea base (LB) y cortea continental superior (CCS) propuesto por Rudnick y Gao (2003). Se grafica también en un eje secundario (derecho) las razones de REE entre LB y CCS..... - 81 -
- FIGURA 23:** Box plot de las razones (La/Lu) y (La/Yb) normalizadas al condrito Tipo CI (McDonough, y Sun, 1995), de muestras correspondiente al Set de Datos A. Se anexa datos estadísticos: Mínimo, primer cuartil, segundo cuartil (mediana), promedio, tercer cuartil y máximo..... - 81 -
- FIGURA 24:** Cambios porcentuales en volumen de mineralogía mayoritaria en función de intensidad de la meteorización (CIA) (extraído de Nesbitt y Young, 1989) .. - 85 -

<b>FIGURA 25:</b> Interpretación de un biplot composicional (biplot de covarianza) (Aitchinson, 1986).....	- 107 -
<b>FIGURA 26:</b> Diagrama esquemático explicativo de los ambientes sedimentarios muestreados: cauce fluvial activo (1), planicie de inundación (2), terraza fluvial (3) y cauce fluvial intermitente (4) (Espinoza et al, 2016).....	- 110 -
<b>FIGURA 27:</b> Diagramas de dispersión para el MnO. El diagrama de la izquierda corresponde a muestras gemelas y el diagrama de la derecha a duplicados de pulpa. Los rombos azules indican las concentraciones de cada par de muestras. Las rectas son los límites de aceptación para un ER + 20% y ER - 20%. El parámetro FR indica el porcentaje de pares de muestras que se encuentran fuera del rango de aceptación (Espinoza et al., 2016). .....	- 112 -

## Índice de Tablas

<b>TABLA 1:</b> Potencia de estratos A y B para sitios de medición de 1 a 6, tanto en metros así como en porcentaje del total (A+B). (r) coeficiente de correlación entre A y B. (Alperin 2013). .....	- 8 -
<b>TABLA 2:</b> (A) Composición original (animal, vegetal, mineral, agua). (B) Subcomposición (animal, vegetal, mineral). Partes como fracción del total. (Alperin 2013). ....	- 8 -
<b>TABLA 3:</b> Transformación log-cociente aditiva de una muestra de gneis tonalítico. Sílice es escogido como divisor. ....	- 10 -
<b>TABLA 4:</b> Ejemplo de matriz de partición binaria secuencial de matriz de datos composicionales, $x_i$ ; $i = 1, \dots, D$ son componentes (variables, e.g. elementos y compuestos químicos) de la matriz de composiciones, $D = 6$ en este ejemplo. Notar que el último orden (paso de partición) es $D - 1$ . Por su parte $r$ es el número elementos asignado a el grupo “+1” por paso, y $s$ es el número elementos asignado a el grupo “-1” por paso. (Pawlowsky-Glahn et al., 2011A).....	- 12 -
<b>TABLA 5:</b> Matriz de coeficientes de balances a partir de ejemplo de matriz de partición binaria secuencial de TABLA 4. (Pawlowsky-Glahn et al., 2011A).....	- 13 -
<b>TABLA 6:</b> Interpretación de índice de silueta. (Struyf et al., 1997) .....	- 15 -
<b>TABLA 7:</b> Estadística clásica de datos crudos correspondiente a la base de datos final. Se incluye referencialmente composición media de la corteza continental superior. Min: mínimo; 1 <sup>er</sup> : primer cuartil; $G$ : Media geométrica; $X$ : media aritmética; 2 <sup>do</sup> : segundo cuartil (mediana); 3 <sup>er</sup> : tercer cuartil; Max: máximo; $s$ desviación estándar; CCS: composición de la corteza continental superior. se resaltan estimadores de tendencia central. ....	- 35 -
<b>TABLA 8:</b> Resultados de evaluación de agrupamiento por medio de método k-medoids de la base de datos final en coordenadas clr-transformadas. Consistencia del agrupamiento es estimado por medio de índice de silueta.....	- 37 -
<b>TABLA 9:</b> Resultados de evaluación de agrupamiento por medio de método k-medoids de set de datos A en coordenadas clr-transformadas. Consistencia del agrupamiento es estimado por medio de índice de silueta. ....	- 41 -
<b>TABLA 10:</b> Concentraciones representativas de línea Base ambiental. Se presenta también las características reportadas para la corteza continental superior propuestas por	

Rudnick y Gao (2003), así como media y mediana, por parámetro, de base de datos modificada (sin separación de set de datos ni transformaciones log-cocientes). .....	- 42 -
<b>TABLA 11:</b> Varianzas totales por parámetro en coordenadas clr y varianza total de la base de datos modificada (sin separación de sub set de datos). Parámetros son ordenados de menor a mayor porcentaje de varianza respecto al total. ....	- 45 -
<b>TABLA 12:</b> Varianzas totales, por parámetro, en coordenadas clr y varianza total de la set de datos A (sin considerar composiciones ‘anómalas’ asignadas a set de datos B ). Parámetros ordenados de menor a mayor porcentaje de varianza respecto al total de Set de Datos A (SDA). %BDM: porcentaje respecto varianza de mismo parámetro en Base de Datos Modificada (Tabla 14). Contribución reducción varianza BDM – SDA (%): porcentaje de aporte a la reducción de la varianza total entre Base de Datos Modificada (BDM) y Set de Datos A (SDA), se calcula según Ecuación 36 .....	- 49 -
<b>TABLA 13:</b> Agrupaciones de variables a partir de Biplot composicional de Figuras 12 y 14. Parámetros en rojo son los que definen cada grupo. Parámetros entre paracentesis no son fácilmente agrupables y/o pueden estar asociados a más de un grupo.-	54 -
<b>TABLA 14:</b> Media geométricas de parámetros de sedimentos de corriente directamente influenciados por unidades intrusivas y metamórficas de ‘Altos de Talinay’ así como alojados sobre sedimentos derivados de la Formación Coquimbo en planicie litoral al sur de bahía de Guanaqueros. Se compara con vector Línea Base (sección 5.5.2 - Tabla 13) y se calcula cociente entre línea base y muestras de sectores señalados. Casilleros en rojo presentan un valor 40% por sobre el respectivo valor de línea base. Casilleros de color azul presentan un valor 40% por debajo del respectivo valor de línea base. LREE: <i>Light Rare Eath Elemenets</i> . MREE: <i>Middle Rare Eath Elemenets</i> , HREE: <i>Heavy Rare Eath Elemenets</i> . .....	- 64 -
<b>TABLA 15:</b> Vectores de línea base, tanto clausurado o media geométrica y media por parámetro de Set de Datos A (SDA).....	- 75 -
<b>TABLA 16:</b> Composiciones representativas de línea base (LB) respecto a composición de Corteza Continental Superior (CCS). Parametros ordenads de mayor a emnor en funcion de su factor de enriquecimeinto en Linea Base respecto a CCS. se destacan en azul los parameque preenten un enrequicimeinto en la Hoja La Serena. ....	- 82 -
<b>TABLA 17:</b> Resultados CIA muestras set de datos A. ....	- 84 -
<b>TABLA 18:</b> Fracción estequiometria aproximada de molécula $SiO_2$ en feldspatos y arcillas.-	85 -
<b>TABLA 19:</b> Ejercicio de estimación de pérdida de sílice por alteración de arcillas de feldspatos. Porcentaje de disminución estequiométrica de $SiO_2$ calculado a partir de Tabla 21. ....	- 86 -
<b>TABLA 20:</b> Método de análisis y límite de detección de cada compuesto y elemento químico, reportado por AcmeLabs, para la metodología de análisis utilizada (Espinoza et al., 2016). ....	- 111 -
<b>TABLA 21:</b> Resultados del control de calidad mediante el análisis de muestras gemelas (extradio de Espinoza et al, 2016). ....	- 113 -
<b>TABLA 22:</b> Resultados del control de calidad mediante el análisis de duplicados de pulpa (extradio de Espinoza et al, 2016). ....	- 114 -

# 1 INTRODUCCION

En 1988 nace el proyecto de Mapeo Geoquímico Internacional (IMG: international Geochemical Project) potenciado por UNESCO y IUGS (International Union of Geological Sciences) con el objetivo de crear una red de científicos y organizaciones con el propósito de aunar y trabajar en la confección sistemática de mapas geoquímicos del globo. Esto se ve motivado ante la gran utilidad que implica conocer la composición de la corteza terrestre y la variabilidad en los territorios en base a diversos procesos naturales o antropogénicos. Este conocimiento es útil para una mayor comprensión del medio en que las comunidades habitan, desarrollar investigación científica de modo de comprender los procesos que condicionan la composición terrestre tanto puntualmente como a gran escala, y como insumo fundamental en la toma de decisiones de carácter público para el manejo consciente y responsable de los recursos naturales. En definitiva, el conocimiento geoquímico entrega valor económico y social a los territorios (Darnley et al, 1995; Darnley, 1990; Buccianti et al, 2015; Ramirez, 2012)

En aquella línea el Servicio Nacional de Geología y Minería ha impulsado el proyecto de Cartografía Geoquímica de Chile el cual bajo estándares internacionales pretende obtener la composición química de 59 elementos en sedimentos fluviales a lo largo de las diferentes cuencas del país. A partir de aquel proyecto se pretende definir una línea base geoquímica por cuenca o cuadrante cartográfico, producto útil para fines económicos tales como exploración de yacimientos minerales, así como medio-ambientales como la determinación de la condición natural de los sedimentos fluviales para la formulación de políticas públicas de ordenamiento territorial, salud pública, etc. (Espinoza et al, 2016).

Sin embargo, la formulación de una ‘línea base geoquímica’ no se encuentra exenta de complicaciones. De partida no existe aún un consenso claro de qué significa una línea base, o background, geoquímico. Hawkes y Webb (1962) entienden este concepto como “la concentración típica de cada compuesto en la superficie terrestre”. No obstante, este concepto sería más adecuado en términos de rangos de concentraciones (Ramírez, 2012). Además, la química terrestre se encuentra sujeta a gran variabilidad, y con ello lo que entendemos como ‘un valor típico’ o ‘normal’ de los diferentes compuestos se encuentra condicionado a la escala en la cual se trabajan los datos, los métodos de recolección y analíticos, así como también a la metodología y criterios de interpretación empleados. Ello supone un desafío a la hora de adoptar metodologías que permitan hacer comparables los datos obtenidos, así como las interpretaciones a partir de estos (Darnley et al, 1995; Salminen y Gregorauskien, 2000; Buccianti et al, 2015).

Por otro lado, el concepto de línea base geoquímica, o valor de fondo (background), está sujeto a la consideración de los efectos de la actividad humana y/o procesos exógenos (Buccianti et al, 2015). En ese sentido es necesario explicitar si al momento de hablar de línea base son considerados los efectos de la actividad antrópica y cómo es posible dilucidar las señales geoquímicas de aquel tipo. Desafío no menor ante relaciones difusas que se encuentran entre contaminación antrópica y fuentes naturales anomalías de similares características (e.g. minería metálica versus alteración hidrotermal)

Tradicionalmente se han procesado los datos geoquímicos desde una perspectiva univariable, es decir, los diferentes compuestos y elementos químicos son estudiados uno por uno como entes individuales. Esto implicaría ignorar la naturaleza interdependiente de los elementos. En ese sentido la determinación de composiciones anómalas por medios de estimadores univariados, como el bien conocido método de media  $\pm 2$  veces desviación estándar, pueden ser considerados métodos arbitrarios y sesgados, así como también las herramientas matemáticas

pueden no ser las más adecuadas a la hora de interpretar los fenómenos naturales a través de los datos (Reimann et al, 2005; Buccianti et al, 2015).

Es por ello que la idea de analizar los sets de datos geoquímicos por medios de metodologías multivariantes parece ser razonable con tal de aminorar los sesgos metodológicos y visualizar relaciones entre variables que den cuenta de fenómenos naturales plausibles. Es así como en Buccianti y colaboradores (2015) se propone una metodología de determinación y caracterización de línea base mediante análisis de datos composicionales (CoDA: Compositional Data Analysis), teoría matemática que se hace cargo de dificultades a la hora de trabajar con datos expresados en unidades ‘porcentuales’ (e.g. porcentaje en peso, partes por millos, mg/L, etc.). Trabajar desde una perspectiva de datos composicionales implica necesariamente trabajar desde una perspectiva multivariable dado que aquella teoría se basa en procesar los datos en tanto la magnitud relativa entre sus partes como parte de un todo, ello a partir de procedimientos que interrelacionan las variables entre ellas antes de ser procesadas por herramientas estadísticas tradicionales (Egozcue y Pawlowsky-Glahn, 2011)

En el trabajo de Buccianti y colaboradores (2015) se propone definir un “vector línea base” capaz de representar procesos frecuentes y organizados espacialmente condicionantes de la geoquímica particular de la región estudiada: muestras suelos de superficie (topsoil) de la región de Campania, sur de Italia. En ese sentido, se adopta el concepto de ‘línea base’ como la concentración de cierto elemento o compuesto en un punto específico del tiempo, definición usada por el Foro Europeo de Servicios Geológicos (FOREGS), con lo cual se desliga del concepto de línea base pre-operacional, es decir no necesariamente determina el impacto de la actividad antrópica sobre la geoquímica del medio recolectado. Este vector es obtenido por una suma de procedimientos estadísticos multivariantes abordados desde una perspectiva CoDA.

En el presente trabajo se pretende aplicar la metodología descrita por Buccianti y colaboradores (2015) sobre la Base de Datos geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena (Espinoza et al, 2016) con el objetivo de evaluar dicha metodología contrastando sus resultados con otros trabajos en el área y con respecto a los antecedentes del medio físico de la región. Cabe resaltar que las interpretaciones realizadas son consecuencia directa de la recopilación de información y análisis acabados del área de estudio, u otras luego, de trabajo sistemático de la Unidad de Geoquímica del Servicio Nacional de Geología y Minería llevado a cabo en los últimos años. Información y análisis sin los cuales las discusiones y conclusiones del presente trabajo no hubieran podido ser concretadas.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo general**

Identificar factores y procesos determinantes de la geoquímica de sedimentos fluviales de la Hoja la Serena y posibles fuentes de contaminación antropogénica por medio de una metodología multivariable de análisis de datos composicionales.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Confeccionar una línea base empleando la metodología propuesta por Buccianti y colaboradores (2015)
- Contrastar los valores de línea base con respecto geología y antecedentes del medio físico del área de estudio, así como respecto a los valores medios de la Corteza Continental Superior.
- Evaluar posibles fuentes antrópicas de contaminación de sedimentos fluviales por medio de interpretación de herramientas estadísticas multivariantes y recolección de antecedentes del medio físico.

## **1.2 HIPÓTESIS**

El cuadrante comprendido por la Hoja la Serena presenta contaminación antropogénica reconocible en la geoquímica de sedimentos fluviales en contraste a valores de línea base robustos.

## 2 MARCO TEORICO

### 2.1 ELEMENTOS DE ESTADÍSTICA

En este apartado se introducirán algunos conceptos estadísticos que son considerados y empleados a lo largo del presente trabajo.

#### 2.1.1 Valores atípicos (outliers)

Los datos atípicos, u outliers, pueden ser entendidos como datos cuyos valores se distancian significativamente respecto a la media de nube de datos. Estos tipos de datos tienen un importante efecto sobre estimadores estadísticos, como la media, al distorsionar la nube de datos. Queda en discusión cual es la real causa de dicho valor atípico. En muchas ocasiones son consecuencia errores de medición, análisis o transcripción de datos, no obstante, estos también pueden ser producto de particularidades de los objetos analizados (e.g. efecto pepita en concentración de oro, contaminación natural de sedimentos, etc.) (Alperin, 2013, Emery 2013).

Por lo anterior, al definir un outlier es importante identificar su causa, al identificar datos atípicos dados por errores de diversa índole, es admisible la eliminación de los mismos con tal de evitar la distorsión provocada por estos. Por otro lado, cuando no se logra identificar la causa de los valores atípicos queda analizar si estos son causados por efectos naturales o artificiales, e idear una manera de analizar la base de datos sin ser descartados. De manera general no es recomendable eliminar outliers si es que no se evidencia su condición de dato erróneo (Alperin 2013, Emery 2013).

Maneras tradicionales para identificar outliers univariantes son, por ejemplo, por medio del método de los cuartiles en donde se consideran datos anómalos aquellos que escapan a un factor en base al valor tomado por el máximo y mínimo cuartil (Alperin 2013), o bien por medio de test de Grubbs (test de residuo de máxima norma) en que dada una distribución normal de los datos se asignan como datos anómalos a los que se encuentran en la cola de la distribución dado un riesgo asumido (Emery 2013). Estadísticamente un outlier puede ser entendido como observaciones de una distribución cuyos valores extremos se encuentran alejados del centro, pero que siguen perteneciendo a la misma distribución (Filzmoser et al., 2005)

Cabe señalar que todo procedimiento en la identificación de outliers es fundamentalmente subjetivo, por lo cual el conocimiento extra-estadístico y el juicio del analista es primordial (Emery 2013).

En particular, en geoquímica, un outlier puede ser el resultado de procesos secundarios (e.g. mineralización o mecanismos mecánicos de concentración), por lo cual no pueden ser inmediatamente considerados como valores extremos de una posible línea base (Filzmoser et al., 2005). Por ello es plausible separar un grupo de datos con valores de fondo robustos, como una línea base, respecto a otro grupo de datos con valores atípicos (bajo algún criterio) que pueda ser resultado de procesos secundarios puntuales (Buccianti et al., 2015).

Prácticamente en su totalidad los datos empleados en geoquímica son, típicamente, de carácter composicional (ver sección 2.2), y con ello multivariantes, por lo cual es deseable realizar una identificación de outliers desde una perspectiva multivariable igualmente. Desde esta perspectiva es posible asignar el carácter de atípico a observaciones (vectores) cuya combinación de valores individuales (variables) puede ser considerada como anómalo. Así una observación que puede llegar a ser considerado atípica desde una perspectiva univariante, puede no serlo desde una perspectiva multivariable, y viceversa (ver sección 2.4).



### 2.1.2 Matriz de Varianza-Covarianza

La covarianza es un estimador de momento que cuantifica el grado de correlación de la variación entre dos variables. Esta está definida por:

$$Cov(x, y) = \sigma_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N - 1} \quad (1)$$

Donde  $x$  e  $y$  son variables cualesquiera y  $N$  el número de observaciones

La covarianza entrega una medida del grado de dependencia entre las variables. El signo de la covarianza indica si las variables se encuentran directamente correlacionadas para valores positivos, esto es para valores altos de  $x$  se tienen valores altos de  $y$ , o bien se encuentran inversamente correlacionadas para valores negativos, esto es para valores altos de  $x$  se tienen valores bajos de  $y$  o viceversa. Además, si la covarianza entre las variables es cero indica que estas son estadísticamente independientes, y valores absolutos (negativos o positivos) elevados indican, progresivamente mayor dependencia (inversa o directa respectivamente) (Sabadías, 1995).

En caso de datos multivariantes, la covarianza entre todas las variables puede ser representado en la matriz de covarianzas ( $\Sigma$ ) definida como:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{1,2} & \cdots & \sigma_{1,D} \\ \sigma_{1,2} & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_{2,D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1,D} & \sigma_{2,D} & \cdots & \sigma_D^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde  $\sigma_{i,j}$  con  $i \neq j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, D$ ) es la covarianza entre las variables  $i$  y  $j$ , con  $D$  el número total de variables. Cabe notar esta matriz es simétrica y la diagonal corresponde a la varianza de cada variable, por lo cual esta matriz es también usualmente llamada matriz de Varianza-covarianza.

## 2.2 BASES DE ANALISIS DE DATOS COMPOSICIONALES (CODA)

### 2.2.1 Introducción

En ciencias de la tierra, ambientales, ingenieriles, entre otras, es común encontrar datos que se expresan cuantitativamente como fracciones de un todo, como lo son concentraciones (e.g. ppm, porcentaje en peso, etc.), frecuencias absolutas o relativas, proporciones, etc. En todos estos casos la suma de todas las partes que representan una entidad (muestra) es una constante (1, 100 o  $10^6$  según corresponda). Por ejemplo, los datos geoquímicos son tradicionalmente mostrados como porcentaje en peso para elementos mayoritarios y en partes por millón para elementos minoritarios y trazas.

En ese sentido se puede definir matemáticamente a una *composición* como un vector  $X = [x_1, x_2, \dots, x_D]$  de  $D$  componentes de números positivos (variables, parámetros) que suman, entre ellos, una constante  $k$  dada por la unidad de medida empleada. (Alperin 2013; Egozcue y Pawlowsky-Glahn, 2011; Van den Boogaart y Tolosana-Delgado, 2013)

Históricamente el análisis de datos composicionales (CoDA por sus siglas en inglés) nace en 1897 cuando Karl Pearson muestra la inadecuación de los datos composicionales al ser empleados en métodos estadísticos clásicos. En aquel momento, Pearson revela a sus coetáneos la existencia de falsa correlación, o correlación espuria, entre las partes de una composición, la

cual se manifiesta en la imposibilidad de interpretar correctamente las covarianzas y coeficientes de correlación de esta clase de datos. Ya en 1960 F. Chayes formaliza las dificultades de la suma constate, para luego de casi un siglo, recién en 1982, John Aitchinson, a través de su monografía “*The statistical analysis of compositional data*”, desarrolla las bases para el análisis de datos composicionales definiendo el *espacio del Simplex* (espacio vectorial en el que alojan los datos composicionales) y las transformaciones vectoriales necesaria para llevar estos datos al espacio de los números Reales en donde pueden ser analizados por medio de estadística multivariable (análisis de componentes principales, análisis de agrupamiento, etc.). Desde aquel avance las líneas de investigación en el área se han diversificado ampliando el rango de aplicabilidad del análisis de datos desde una perspectiva composicional a diferentes áreas de las ciencias (Alperin 2013; Mateu-Figueras et al., 2003).

En la actualidad en análisis de datos composicionales puede ser resumido en 3 pasos: (i) transformación de los datos crudos (en el simplex) a variables log-cocientes (reales), (ii) análisis estadístico de las variables transformadas, (iii) interpretación de los modelos obtenidos tanto en su forma log-cociente o bien expresados nuevamente como datos composicionales (Egozcue y Pawlowsky-Glahn, 2011).

### 2.2.2 Naturaleza de los datos composicionales

Como ya se ha mencionado, se puede definir una *composición* como un vector  $X = [x_1, x_2, \dots, x_D]$  de  $D$  componentes de números positivos (variables, parámetros) que suman, entre ellos, una constante  $k$  dada ( $10^0, 10^3, 10^6$ ). A modo de ejemplo, la suma aproximada de concentraciones de todos los elementos analizados de 1 gramo de muestra debe sumar 1 gramo, o de otro modo, la suma de todas las concentraciones de todos elementos analizados, expresados en ppm, debe sumar  $10^6$ . Esto es lógico, un todo objeto es la suma de todas sus partes, por ellos se puede decir que los datos composicionales son *clausurados* sobre su suma.

Es así como el *Simplex D-dimensional* ( $S^D$ ) de suma constante  $k$  es definido por:

$$S^D = \{[x_1, x_2, \dots, x_D]: x_i > 0 (i = 1, 2, \dots, D), x_1 + x_2 + \dots + x_D = k\} \quad (3)$$

Una representación de datos composicionales para diversas entidades (muestras) puede ser presentada por una matriz de datos composicionales como:

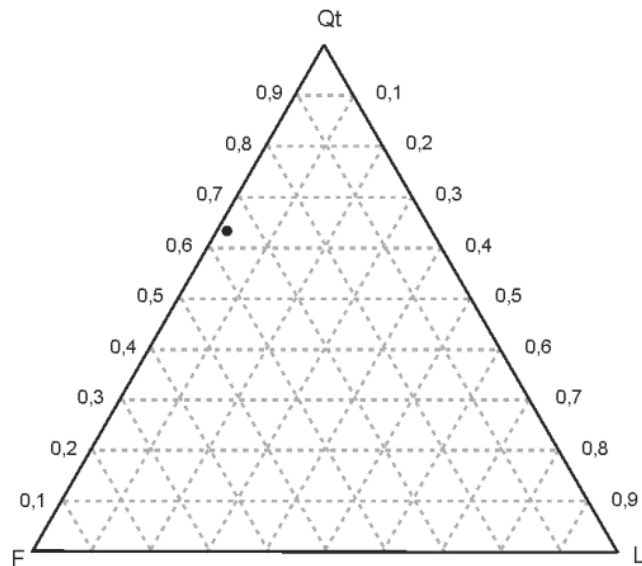
$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & \dots & x_{iD} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dónde:

$D$ : Partes de una composición. Esto es: elementos, compuestos, etc.

$i$ : Realizaciones o entidades (muestras).

Un ejemplo ilustrativo de la representación de datos composicionales son los diagramas ternarios comúnmente usados en ciencias geológicas. En este caso se tiene una dimensión  $D=3$ , es decir la composición pertenece a  $S^3$ . Considere una muestra de sedimento en la cual se han analizado tres componentes: cuarzo total (Qt), feldspatos (F) y líticos (L), como proporciones de la unidad. Si los porcentajes de cada variable son 63, 35 y 2% respectivamente, el vector que los representan en  $S^3$  está dado por  $[0,63; 0,35; 0,02]$  cuya suma constante es  $k=1$  (Figura 1).



**FIGURA 1:** Representación de un diagrama ternario de una muestra de sedimento. (Qt) cuarzo total, (F) feldespatos y (L) líticos. (Alperin 2013)

### 2.2.3 Restricciones de la suma constante

Algunos problemas surgen al intentar aplicar métodos estadísticos a series de datos composicionales, y estos problemas están dados por las restricciones que emergen de la condición de suma constante. Dos razones principales pueden ser mencionadas: las (i) correlaciones espurias, (ii) incoherencias subcomposicionales.

#### (i) Correlaciones Espurias

Una correlación espuria, o falsa, puede ser entendida como una correlación que enmascara el real comportamiento de las variables analizadas cuando éstas son tratadas en su forma composicional (clausurada). En otras palabras, el comportamiento estadístico de las variables puede ser diferente cuando éstas son expresadas en unidades absolutas de medida respecto a si estas son expresadas en alguna unidad de medida proporcional. “Pearson calificó estas correlaciones como espurias ya que falsean la imagen de las relaciones de dependencia y pueden conducir a interpretaciones erróneas” (Mateu-Figueras et al., 2003). Esta restricción se traduce en una matriz de correlación que presenta necesariamente correlaciones negativas no nulas

A modo de ejemplo se puede considerar la siguiente situación. Se dispone de las potencias de estratos de dos secuencias, A y B, en metros, tomadas en diferentes sitios de medición (1, 2, ..., 6), y a su vez se expresan estas mismas potencias como porcentaje. Puede resultar de interés analizar la correlación de estas mediciones entre ambas secuencias a medida que varía el sitio de medición, por ejemplo, considerando una dirección geográfica. En la Tabla 1 se presentan los valores medidos, tanto en su unidad absoluta (metros), así como en su unidad clausurada (porcentaje). También se presentan los coeficientes de correlación ( $r$ ) entre A y B para ambos casos.

**TABLA 1:** Potencia de estratos A y B para sitios de medición de 1 a 6, tanto en metros así como en porcentaje del total (A+B). (r) coeficiente de correlación entre A y B. (Alperin 2013).

	<i>Espesor (m)</i>		<i>Espesor (%)</i>	
	A	B	A	B
1	50	50	50,0	50,0
2	60	85	41,4	58,6
3	70	110	38,9	61,1
4	75	140	34,9	65,1
5	80	170	32,0	68,0
6	90	200	31,0	69,0
<i>r</i>	0,99		-1,00	

Como se puede apreciar en la Tabla 1 la correlación de los espesores entre los estratos A y B, expresados en forma clausurada, es diametralmente opuesta a la correlación de los datos expresados en unidades absolutas. De este ejemplo se puede constatar como los datos composicionales enmascaran el verdadero comportamiento de las variables. (Alperin 2013).

En este caso particular en simple apreciar esta correlación espuria, ya que se tiene acceso a una unidad de medida absoluta, como es la longitud. No obstante, en ciencias medioambientales, las unidades de medidas son presentadas en forma de concentraciones o proporciones (mg/L, ppm, %) ya que la naturaleza de los métodos analíticos entrega ese tipo unidades (Alperin 2013).

(ii) Incoherencias subcomposicionales

Se entiende por una *subcomposición* como un subconjunto de una composición la cual preserva la condición de suma constante de sus partes. Ambas, composición original y subcomposición, pertenecen al Simplex, salvo que una subcomposición se aloja en un espacio de menor dimensión.

El problema de las incoherencias subcomposicionales radica en el hecho que las correlaciones entre partes de una composición no se preservan al analizar las mismas partes en una subcomposición de dicha composición.

Para ejemplificar, se puede considerar muestras de suelo en las cuales se analiza, en primera instancia, 4 partes clasificadas como animal, vegetal, mineral, agua ( $x_1, x_2, x_3, x_4$ ) expresadas como fracciones del total. Luego las muestras son secadas con lo cual solo se puede estudiar las partes animal, vegetal, mineral ( $s_1, s_2, s_3$ ), siendo esta última una subcomposición (B) del primer análisis (A). En la Tabla 2 se ejemplifica esta situación.

**TABLA 2:** (A) Composición original (animal, vegetal, mineral, agua). (B) Subcomposición (animal, vegetal, mineral). Partes como fracción del total. (Alperin 2013).

A	B
$(x_1, x_2, x_3, x_4)$ .	$(s_1, s_2, s_3)$
(0,1; 0,2; 0,1; 0,6)	(0,25; 0,50; 0,25)
(0,2; 0,1; 0,1; 0,6)	(0,50; 0,25; 0,25)
(0,3; 0,3; 0,2; 0,2)	(0,375; 0,375; 0,25)

De la Tabla 2 se puede verificar que la correlación entre las partes animal y vegetal en la situación A es  $corr(x_1, x_2) = 0,5$ . Mientras que la correlación entre las mismas partes en la

situación B es  $\text{corr}(s_1, s_2) = -1,0$ . Es evidente que esta correlación espuria genera problemas en la interpretación de los datos.

Con tal de sortear estos inconvenientes emanados de la restricción de la suma constante, Aitchinson propone, en 1982, analizar las composiciones a través de la **magnitud relativa de sus partes**. Esto se logra expresando las composiciones a través de cocientes del tipo  $x_i/x_j (i, j = 1, \dots, D; i \neq j)$ . Al realizar aquella transformación las correlaciones espurias entre las partes se ven eliminadas sin perder la información contenida en cada variable. Este principio es denominado **invariancia por cambios de escala**: “*cualquier función aplicada sobre datos composicionales debe poder expresarse en términos de cocientes entre sus partes o componentes*” (Mateu-Figueras et al., 2003).

En el ejemplo anterior, muestras de suelo (Tabla 2), se puede constatar que los coeficientes entre partes comunes tanto para la composición original y su subcomposición son iguales ( $x_i/x_j = s_i/s_j$ ). Por ejemplo los cocientes entre las partes animal y vegetal (animal/vegetal) para la primera muestra son  $0,1/0,2 = 0,25/0,50 = 0,5$  para los casos A y B respectivamente.

El procedimiento de transformación desde datos crudos (clausurados) a cocientes es refinado por la incorporación de diferentes transformaciones log-cocientes de vital importancia para el tratamiento estadístico de los datos. Estas transformaciones son abordadas más adelante en el presente trabajo.

## 2.2.4 Operatoria en el Simplex

Luego de definido el *Simplex* como el espacio en el que alojan los datos composicionales, y los problemas asociados a la suma constante, es necesario definir ciertas operaciones y relaciones de este espacio, el cual no conserva la métrica Euclidiana clásica, y por ende su geometría no es evidente. En esta sección se describe la operación Clausura, la cual es empleada en el presente trabajo. Otras operatorias como Perturbación y Potenciación son descritas en sección de Anexo A.

### 2.2.4.1 Operación Clausura

La operación clausura ( $C$ ) permite expresar un set de datos como una composiciones, es decir, como datos clausurados. Es importante señalar que no deben existir datos nulos (ausentes) o negativos.

Dado un vector  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_D]$  de datos no clausurados (mediciones absolutas), e.g.  $Y \in \mathbb{R}_+^D$ , este puede ser clausurado por el operador  $C$  definido por:

$$C(Y) = \left( \frac{ky_1}{y_1 + y_2 + \dots + y_D}, \frac{ky_2}{y_1 + y_2 + \dots + y_D}, \dots, \frac{ky_D}{y_1 + y_2 + \dots + y_D} \right) \quad (5)$$

Dónde  $k$  es la constante de clausura y  $C(Y) \in S^D$

Cabe señalar que comúnmente las unidades de medidas con que se expresan los datos ya se encuentran clausurados, por lo cual no es necesario realizar esta operación. Ese es el caso de datos expresados como concentraciones (mg/L, porcentaje en peso, ppm).

A modo de ejemplo se puede considerar un conteo modal de una muestra de arena, en la cual se cuantifican el cuarzo total (Qt), feldespato (F), líticos (L) de un total de 444 granos:

Qt	F	L
302	136	6

Al aplicar el operador clausura se obtiene una composición  $x = (68,02; 30,63; 1,35)$ . En este caso la constante de clausura elegida es  $k = 100$

### 2.2.5 Transformaciones log-cocientes

Con tal de posibilitar el trabajo estadístico univariante y multivariante de datos composicionales, Aitchinson propone la aplicación de transformaciones log-cocientes que lleva los datos desde el *Simplex*  $S^D$  al espacio de los números reales  $\mathbb{R}^+$ .

#### 2.2.5.1 Transformación log-cociente aditiva (alr)

La transformación log-cociente aditiva (alr: additive log-ratio) se obtiene al calcular el cociente entre cada componente y un componente fijo aplicando luego logaritmo. La transformación alr queda definida entonces como:

$$y = alr(x) = \left( \ln \frac{x_1}{x_D}, \ln \frac{x_2}{x_D}, \dots, \ln \frac{x_{D-1}}{x_D} \right) = (y_1, y_2, \dots, y_{D-1}) \quad (6)$$

Donde  $x \in S^D$ ;  $y \in \mathbb{R}^{D-1}$ . El divisor  $x_D$  es tomado a elección.

Cabe señalar que no existe pérdida de información multivariable pese a la disminución de la dimensión. Esta transformación es biyectiva, es decir que admite una función inversa, sin embargo, esta no es simétrica entre sus partes (no preserva las distancias). En términos matemáticos, la transformación alr es isomorfa pero no isométrica Alperin 2013; Pawlowsky-Glahn et al., 2011A).

La función inversa de alr queda definida por:

$$x = alr^{-1}(y) = C(e^{y_1}, e^{y_2}, \dots, e^{y_{D-1}}) \quad (7)$$

Donde  $y \in \mathbb{R}^{D-1}$ ;  $x \in S^D$ .

Los datos obtenidos mediante una transformación alr son útiles para realizar pruebas de hipótesis estadísticas, tales pruebas de como normalidad multivariable, centro y estructura de covarianza. No obstante, su falta de simetría impide cálculo de regresiones lineales además de dificultar la interpretación de diagramas de dispersión (Alperin 2013).

Se presenta, a modo de ejemplo, la transformación alr de la composición de los óxidos mayores de una muestra de gneis tonalítico, tomando como divisor la sílice.

**TABLA 3:** Transformación log-cociente aditiva de una muestra de gneis tonalítico. Sílice es escogido como divisor.

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
$x$	62,74	0,75	18,42	4,71	0,05	1,62	4,03	5,59	1,90	0,19
$alr(x)$		-4,423	-1,226	-2,590	-7,131	-3,659	-2,746	-2,418	-3,499	-5,796

### 2.2.5.2 Transformación log-cociente centrada (clr)

La transformación log-cociente centrada (clr: centred log-ratio) se obtiene al dividir cada componente de una composición por la media geométrica de dicha composición, esto es:

$$y = clr(x) = \left( \ln \frac{x_1}{g(x)}, \ln \frac{x_2}{g(x)}, \dots, \ln \frac{x_D}{g(x)} \right) = (y_1, y_2, \dots, y_D) \quad (8)$$

Donde  $x \in S^D$ ,  $y \in \mathbb{R}^D$ , y  $g(x)$  es la media geométrica de  $x$  definida como:

$$g(x) = \left( \prod_{i=1}^D x_i \right)^{1/D} = \sqrt[D]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_D} \quad (9)$$

Al igual que la transformación alr, la transformación clr es biyectiva y admite función inversa dada por:

$$x = clr^{-1}(y) = C(e^{y_1}, e^{y_2}, \dots, e^{y_D}) \quad (10)$$

A diferencia de la transformación alr, la transformación log-cociente centrada es simétrica entre sus partes. Esta simetría se traduce en una suma nula de los componentes clr-transformados dando lugar a una matriz de varianza-covarianza singular. Por otro lado, cabe resaltar que los datos clr-transformados no son subcomposicionalmente coherentes, ya que la media de las partes de una subcomposición no es necesariamente igual a de la composición original. En términos matemáticos, la transformación clr, es isométrica pero no isomorfa (Alperin 2013; Pawlowsky-Glahn et al., 2011A)

Los datos clr-transformados son utilizados en métodos que emplean distancias, tal como análisis de agrupamiento

### 2.2.5.3 Transformación log-cociente isométrica (ilr)

Tanto la transformación alr como clr no pueden ser directamente asociadas a una base ortonormal, lo que, sumado a la falta de simetría de la primera y la falta de isomorfismo de la segunda, repercute en dificultades en la aplicación de metodologías matemáticas generalizadas sobre los datos sometidos a dichas transformaciones. Ante esto emerge la transformación log-cociente isométrica (ilr: isometric log-ratio), la cual es construida a partir de una base ortonormal de manera tal que esta transformación es isomorfa e isométrica (Pawlowsky-Glahn et al., 2011A).

Una definición concisa de la transformación log-cociente isométrica es:

$$y = ilr(x) = ( \langle x, e_1^* \rangle_a, \langle x, e_2^* \rangle_a, \dots, \langle x, e_{D-1}^* \rangle_a ) \quad (11)$$

Dónde

$$x \in S^D$$

$$y \in \mathbb{R}^{D-1}$$

$$\vec{e}^* = (e_1^*, e_2^*, \dots, e_{D-1}^*) \text{ Base ortonormal en } S^D$$

$$\langle w, z \rangle_a \text{ Producto interno de Aitchinson con } w, z \in S^D, \text{ el cual es definido como:}$$

$$\langle w, z \rangle_a = \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^D \ln \frac{w_i}{w_j} \ln \frac{z_i}{z_j} \quad (12)$$

En otras palabras, la transformación log-cociente isométrica consiste simplemente en proyectar una composición en  $S^D$  sobre una base ortonormal de este mismo espacio. Ahora bien se debe delinear un método para encontrar dicha base ortonormal en  $S^D$ . Existen muchas maneras para construir una base ortonormal en el simplex.

Un procedimiento sencillo para obtener una base ortogonal, y con esta una transformación ilr, es mediante de aplicación de una **partición binaria secuencial** de los vectores composicionales. Este es un procedimiento jerárquico aplicado a una matriz de datos composicionales en el cual, en su primer orden de jerarquía, cada parte de una composición es asignada a un grupo, de nomenclatura “-1” o “+1”. En los pasos siguientes, cada subgrupo generado (un grupo de partes asignada a “-1” y otro asignado a “+1”), es nuevamente dividido en 2 grupos, manteniendo la misma la misma nomenclatura, continuando el proceso hasta que cada grupo contenga una sola parte (ver Tabla 4).

**TABLA 4:** Ejemplo de matriz de partición binaria secuencial de matriz de datos composicionales,  $x_i$ ;  $i = 1, \dots, D$  son componentes (variables, e.g. elementos y compuestos químicos) de la matriz de composiciones,  $D = 6$  en este ejemplo. Notar que el último orden (paso de partición) es  $D - 1$ . Por su parte  $r$  es el número elementos asignado a el grupo “+1” por paso, y  $s$  es el número elementos asignado a el grupo “-1” por paso. (Pawlowsky-Glahn et al., 2011A).

order	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	r	s
1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	4	2
2	+1	-1	0	0	-1	-1	1	3
3	0	+1	0	0	-1	-1	1	2
4	0	0	0	0	+1	-1	1	1
5	0	0	+1	-1	0	0	1	1

Para cada orden  $k \in [1, D - 1]$  es posible definir un **balance** entre los dos grupos formados en ese nivel. Considerando  $i_1, i_2, \dots, i_r$  con  $r$  el número de partes del grupo “+1”, y  $j_1, j_2, \dots, j_s$  con  $s$  el número de partes del grupo “-1”, el balance  $b$  es definido como el un log-cociente normalizado entre las medias geométricas de cada grupo:

$$b_k = \sqrt{\frac{rs}{r+s}} \ln \frac{(x_{i_1} \cdot x_{i_2} \cdot \dots \cdot x_{i_r})^{1/r}}{(x_{j_1} \cdot x_{j_2} \cdot \dots \cdot x_{j_s})^{1/s}} = \ln \frac{(x_{i_1} \cdot x_{i_2} \cdot \dots \cdot x_{i_r})^{a_{k+}}}{(x_{j_1} \cdot x_{j_2} \cdot \dots \cdot x_{j_s})^{a_{k-}}} \quad (13)$$

Dónde  $a_{k+}, a_{k-}, a_0$  coeficientes de balance tales que:

$$a_{k+} = +\frac{1}{r} \sqrt{\frac{rs}{r+s}}, \quad a_{k-} = -\frac{1}{s} \sqrt{\frac{rs}{r+s}}, \quad \text{ó} \quad a_0 = 0$$

Luego puede ser definida una **matriz de coeficientes de balances**  $\Psi$  tal que sus componentes están dadas por:



$$\Psi_{ik} = \begin{cases} a_{k+} & ; x_{ik}^* = +1 \\ a_{k-} & ; x_{ik}^* = -1 \\ a_0 & ; x_{ik}^* = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Donde  $x_{ik}^* = -1, 0, +1$  (código de grupo para la parte  $i \in [1, D - 1]$  de la orden  $k \in [1, D - 1]$  de la matriz de partición binaria)

A partir del ejemplo de la Tabla 4 se genera la matriz de coeficientes de balances siguiente (Tabla 5):

**TABLA 5:** Matriz de coeficientes de balances a partir de ejemplo de matriz de partición binaria secuencial de TABLA 4. (Pawlowsky-Glahn et al., 2011A).

order	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
1	$\frac{1}{4} \sqrt{\frac{4 \cdot 2}{4+2}}$	$\frac{1}{4} \sqrt{\frac{4 \cdot 2}{4+2}}$	$\frac{-1}{2} \sqrt{\frac{4 \cdot 2}{4+2}}$	$\frac{-1}{2} \sqrt{\frac{4 \cdot 2}{4+2}}$	$\frac{1}{4} \sqrt{\frac{4 \cdot 2}{4+2}}$	$\frac{1}{4} \sqrt{\frac{4 \cdot 2}{4+2}}$
2	$+\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{1}{\sqrt{12}}$	0	0	$-\frac{1}{\sqrt{12}}$	$-\frac{1}{\sqrt{12}}$
3	0	$+\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	0	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$
4	0	0	0	0	$+\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$
5	0	0	$+\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	0

Cabe notar que  $\Psi\Psi^T = I_{D-1}$  matriz identidad de dimensión  $D - 1$ . Por otro lado es relevante señalar que las filas de  $\Psi$  están compuestas una base ortogonal de  $S^D$  clr-transformada,  $clr(\bar{e}^*)$ . Luego, una definición alternativa de una transformación log-cociente isométrica está dada por:

$$ilr(X) = clr(X) \cdot \Psi^T \quad (15)$$

Donde  $X$  es una matriz de datos composicionales. En esta última operación se logra la premisa de proyectar una composición en el simplex en una respectiva base ortonormal.

Por otro lado, una manera de recuperar la matriz de datos composicionales original una vez que son ilr-transformados, es mediante el siguiente procedimiento:

$$clr(X) = ilr(X)\Psi, \quad X = ilr^{-1}(X) = C[\exp(ilr(X)\Psi)] \quad (16)$$

En definitiva, la transformación log-cociente isométrica es útil en casos que el empleo de las transformaciones alr y clr llevan a conclusiones erróneas dadas sus propiedades.

## 2.3 EVALUACIÓN DE AGRUPAMIENTO

Con el objetivo de verificar la homogeneidad de los datos, entendida como la inexistencia de grupos naturales identificables por medio un método de agrupamiento particional, grupos naturales que puedan guardar relación con la naturaleza del sustrato, se realiza un análisis de agrupamiento multivariable. Para este análisis (*cluster analysis*), primero se realiza un agrupamiento del método particional K-medoids, el que luego es evaluado por medio del índice de silueta (*average silhouette width*), el cual entrega una estimación de qué tan óptimo es el agrupamiento encontrado.

### 2.3.1 Métodos de agrupamiento

Un análisis de agrupamiento, cualquiera este sea, busca evaluar la similitud entre los distintos objetos que se analizan, esto ya sea por las características intrínsecas de los objetos o bien las distancias entre ellos. Existen dos clases principales de métodos de agrupamiento. Por un lado, existen las técnicas jerárquicas en las cuales se crean grupos, o bien se separan, de manera tal de minimizar alguna distancia o maximizar alguna medida de similitud. Este procedimiento se realiza por etapas (jerarquías) en las cuales se evalúa los parámetros de comparación entre los diferentes grupos y los elementos contenidos en ellos (Kaufman y Rousseeuw 1990).

Por otro lado, existen las técnicas particionales en las cuales cada elemento es asignado a un grupo de los  $k$  que puedan ser requeridos o definidos. El número  $k$  de grupos es dado por el usuario, por lo cual no necesariamente la similitud entre los elementos de cada grupo es natural (en el sentido de que existe una estrecha similitud entre los elementos) (Kaufman y Rousseeuw 1990).. En este sentido es útil una evaluación de grupos naturales por medio de un procedimiento particional para diferentes  $k \geq 2$  (Buccianti et al., 2015)

#### 2.3.1.1 Partición entorno a medoides (K-medoids)

El método K-medoids, o partición entorno a medoides, determina  $k$  grupos a partir de  $k$  objetos representativos de cada grupo. Este objeto es el que minimiza la distancia entre los diferentes elementos de cada grupo y a su vez maximiza la distancia con los elementos de otros grupos.

El procedimiento de K-medoids empieza por asignar, arbitrariamente,  $k$  objetos representativos a los cuales se les asignan, según cercanía, los demás objetos de la base de datos. Luego, por medio de un método recursivo, se evalúa para cada elemento de cada grupo el elemento representativo que minimice el promedio de distancias (o disimilitud) de todos los elementos en el grupo. El objeto que logra minimizar dicha disimilitud es llamado medoide.

En K-medoids cada objeto representativo que minimiza las distancia es un objeto real presente en la base de datos (medoide), lo cual lo diferencia con el bien conocido K-means para el cual los objetos representativos son el centroide de cada grupo, el cual no necesariamente es real, sino más bien solo un punto en el espacio. En ese sentido K-medoids es más robusto respecto a valores atípicos (outliers). (Kaufman y Rousseeuw 1990).

### 2.3.2 Índice de silueta

El índice, o coeficiente, de silueta permite evaluar si un agrupamiento realizado es óptimo, así como también evaluar que tan robusto es dicho agrupamiento.

El índice de silueta para un conjunto de datos (i.e. toda la base de datos o bien grupos dentro de este) se define como la media del índice de silueta de cada objeto. El índice de silueta para cada objeto ( $s_i$ ) está definido como:

$$s_i = \begin{cases} 1 - \frac{a_i}{b_i}, & a_i > b_i \\ 0, & a_i = b_i \\ \frac{b_i}{a_i} - 1, & a_i < b_i \end{cases} \quad (17)$$

Donde  $a_i$  es la distancia medio ente el objeto  $i$  y todos los demás objetos del mismo grupo (clúster), y  $b_i$  es la distancia media entre el objeto  $i$  y todos los objetos del clúster más cercano.

Se desprende de la Ecuación 17 que  $s_i \in [-1,1]$ , en donde un valor de 1 indica un agrupamiento óptimo ya que implica una distancia mínima entre los objetos del clúster, y una distancia máxima con los de otros grupos ( $a_i \ll b_i$ ). A medida que el valor del índice se acerca a 0 indica que el agrupamiento es menos robusto, siendo 0 indicador de que el objeto se encuentra equidistante de dos clústeres. Por otro lado, valores negativos indica que el objeto se encuentra mal asignado a su grupo ya que su distancia con el clúster más cercano es más pequeña que respecto al clúster al cual pertenece (Rousseeuw 1987). Una interpretación de del valor del índice de silueta entre 0 y 1 es dada en la Tabla 6.

**TABLA 6:** Interpretación de índice de silueta. (Struyf et al., 1997)

<b>Índice de silueta</b>	<b>Interpretación</b>
<b>0,71 – 1,00</b>	Las estructuras encontradas son sólidas
<b>0,51 – 0,70</b>	Las estructuras encontradas son significativas
<b>0,26 – 0,50</b>	Las estructuras encontradas son débiles y pueden ser artificiales
<b>≤ 0,25</b>	No se encuentran estructuras sustanciales

## 2.4 IDENTIFICACIÓN DE DATOS COMPOSICIONALES ANÓMALOS (OUTLIERS)

Dada la naturaleza multivariada de los datos composicionales es conveniente, o incluso necesario, realizar un tratamiento de estos datos desde una perspectiva multivariada. Dada los problemas que emergen de la suma constante de los datos composicionales (Sección 2.2.2), los métodos de determinación de datos atípicos, u outliers, multivariados no pueden ser directamente aplicados sobre ellos. No obstante, las transformaciones log-cocientes planteadas en la Sección 2.2.5 permiten trabajar los datos al transportar la información, sin pérdida, desde el Simplex al espacio de los Reales. (Filzmoser et al., 2011)

Los outliers multivariados pueden ser entendidos “observaciones que se consideran extrañas no por el valor que toman en una determinada variable, sino en el conjunto de aquellas. Son más difíciles de identificar que los outliers unidimensionales, dado que no pueden considerarse “valores extremos”, como sucede cuando se tiene una única variable bajo estudio” (Muñoz & Uribe 2013).

### 2.4.1 Identificación de Outliers por medio de distancias de Mahalanobis

Para la determinación de outliers multivariados es común el empleo de distancias como factor indicativo de lo ‘atípico’ que es una observación. La distancia de Mahalanobis ha sido ampliamente usada para este propósito dado que, a diferencia de la distancia Euclidiana clásica, considera la varianza de los datos, de manera que pondera los datos según su distancia al centro aminorando los efectos de variables de mayor magnitud (i.e. escala) en el cálculo de la misma. Y aún más, en los últimos años se han desarrollado metodologías robustas a partir de distancias de Mahalanobis de manera tal que sea aún menos afectada por los valores atípicos.

#### 2.4.1.1 Metodología clásica

La distancia de Mahalanobis de una observación (vector)  $i$  está definida como:

$$MD_i = \sqrt{(x_i - \bar{\mu})^T \Sigma_n^{-1} (x_i - \bar{\mu})} \quad (18)$$

Dónde:

$x_i$ : Vector objetivo

$\bar{\mu}$ : Media del vector muestral

$\Sigma_n$ : Matriz de covarianza muestral de  $n$  observaciones

$T$ : Vector transpuesta

La distancia de Mahalanobis presenta una distribución chi-cuadrado de  $p$  grados de libertad, siendo  $p$  las variables analizadas ( $\chi^2_{(p,\alpha)}$ ,  $\alpha$ : grado de confianza). En definitiva son considerados outliers aquellas observaciones que caen en la cola de la distribución determinada por el valor de corte  $\chi^2_{(p,\alpha)}$ .

La distancia de Mahalanobis clásica puede verse afectada por efectos de enmascaramiento (la presencia de un outlier enmascara condición outlier de otra observación) y empantanamiento (la presencia de outlier otorga la condición outlier a otra observación). Estos efectos adversos pueden ser resueltos empleando estimadores robustos en donde destaca el estimador de covarianza de mínimo determinante (MCD) comúnmente usado, el cual fue desarrollado en Rousseeuw (1985), (Muñoz y Uribe 2013; Filzmoser et al., 2005).

#### 2.4.1.2 Metodología robusta (estimador de covarianza de mínimo determinante)

Como es mencionado en el apartado anterior, estimadores robustos han sido desarrollados con tal de aminorar los efectos de enmascaramiento y empantanamiento en el cálculo de distancias

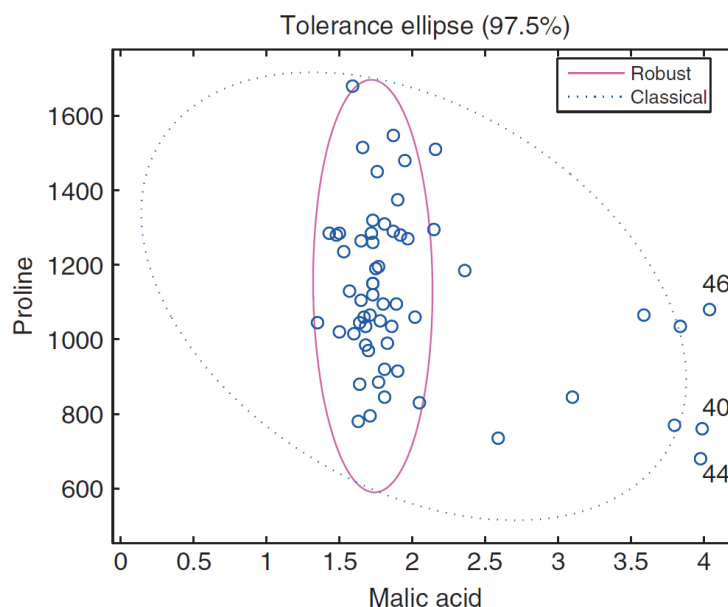
de Mahalanobis. En el presente trabajo se recurre al estimador de covarianza de mínimo determinante (MCD) desarrollado en Rousseeuw (1984, 1985). El término ‘robusto’ puede ser entendido como como “resistencia contra la influencia de outliers” en la estimación de la distancia (Filzmoser et al., 2005).

El estimador MCD es determinado por un subgrupo de observaciones de tamaño  $h$  (vectores) el cual minimiza la matriz de covarianza calculado respecto a los  $h$  vectores ( $\Sigma_{MCD}$ ). La media robusta ( $\bar{\mu}_{MCD}$ ) es estimada también respecto a estas  $h$  observaciones. Comúnmente se selecciona un valor de  $h = 0,75n$ ;  $n$ : tamaño de base de datos original (Filzmoser et al., 2005).

En definitiva, la distancia de Mahalanobis robusta queda definida, a partir de la ecuación 18, como:

$$MD_i = \sqrt{(x_i - \bar{\mu}_{MCD})^T \Sigma_{MCD}^{-1} (x_i - \bar{\mu}_{MCD})} \quad (19)$$

Desde una perspectiva geometría la distancia de Mahalanobis, tanto clásica como robusta, identifican outliers tomando en cuenta la forma en de la nube de datos, al ser empleada la matriz de covarianza y centro del vector muestral, en la determinación de las distancias de Mahalanobis de cada observación. En cambio, una metodología univariante no toma en cuenta este hecho. Al emplear el estimador MCD se logra determinar la nube de datos con mínimo volumen dada una distribución chi-cuadrado con una confianza  $\alpha$  (Muñoz & Uribe 2013, Rousseeuw 1985). Esto puede ser visualizado con un ejemplo bivariante (Figura 2), en donde la geometría a minimizar es el área de una elipse de tolerancia.



**FIGURA 2:** Elipse de tolerancia de datos atípicos (valores externos a la elipse son considerados outliers). Se compara las elipses generadas por distancias de Mahalanobis clásica versus distancias de Mahalanobis robusta por medio de estimador MCD. Ambas elipses de tolerancia son calculadas respecto a una distribución Chi-cuadrado de con valor de corte 0,975 muestras de vino en que se analiza su contenido de prolina (aminoácido) y ácido málico. Se logra distinguir como la elipse de tolerancia robusta resuélvele los efectos de enmascaramiento y empantanamiento generados muestras de alto contenido de ácido málico (extremo inferior derecho) respecto a la elipse de tolerancia clásica, aminorado su área (Hubert y Deruyne, 2010).

## 2.5 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS COMPOSICIONALES

Los estimadores de momentos comúnmente usados para caracterizar los datos multivariantes son la media experimental y varianza-covarianza. No obstante estos no son suficientemente informativos al trabajar con datos composicionales, alojados en el simplex  $S^D$ , por lo que se debe tomar en cuenta la geometría de dicho espacio. Es por esta restricción que emergen el *Centro* y la *Varianza Total* como estimadores de momentos análogos a los mencionados anteriormente, correspondiendo el primero al análogo de media (estimador de tendencia central o locación) y el segundo análogo a Varianza (estimador de dispersión) (Pawlowsky-Glahn et al., 2011A, 2011B).

Una manera de representar la centro composicional y varianza total es por medio la *Matriz de variación* la cual muestra la varianza entre cocientes de datos, sumado a la *Matriz de covarianza de datos clr-transformados* y su representación gráfica en *Biplots composicionales* resultante de un análisis de componentes principales.

### 2.5.1 Centro

El *Centro* ( $G$ ), o *Media geométrica clausurada* de un set de datos composicionales  $X \in S^D$ , en tanto estimador de tendencia central, puede ser definido como:

$$G = C[g_1, g_2, \dots, g_D] \quad (20)$$

Donde  $g_i$  es la media geométrica de la componente  $i$  (análogo a Ecuación 9) y  $C$  operador clausura (Ecuación 5). Notar que el  $g_i$  en este caso corresponde a la media geométrica de la componente, es decir del vector columna, a diferencia a la media geométrica empelada en la transformación clr correspondiente a la composición (vector columna).

Este estimador, como se ha dicho anteriormente, toma el rol de la media multivariable cuando se trabaja en el simplex.

### 2.5.2 Varianza total

La varianza global de un set de datos composicionales  $X \in S^D$  es estimada por la *Varianza total*, definida como:

$$totVar(X) = \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^{D-1} \sum_{j=1}^D var\left(\ln \frac{X_i}{X_j}\right) \quad (21)$$

La varianza total también puede ser representada en función de transformaciones log-cocientes clr e ilr como:

$$totVar(X) = \sum_{i=1}^D var[clr_i(X)] = \sum_{j=1}^{D-1} var[ilr_j(X)] \quad (22)$$

De la ecuación 22 se desprende que la varianza total de un set de datos composicionales es la suma de las varianzas de los logaritmos del cociente entre cada una de las partes. Así también la varianza total es la suma de la varianza de cada componente de la matriz de datos clr o ilr-transformados.

### 2.5.3 Matriz de variación

Una manera de útil de representación de centro y variabilidad de un set de datos composicionales  $X \in S^D$  la Matriz de variación  $M_v$  (Variation Array). Esta matriz posee una diagonal nula, su triangulo superior muestra la varianza de log-cocientes simples entre partes, y su triangulo inferior muestra la media de log-cocientes simples entre partes. Esto queda representado por:

$$M_v(X) = \begin{pmatrix} 0 & var\left(\ln \frac{x_1}{x_2}\right) & var\left(\ln \frac{x_1}{x_3}\right) & \dots & var\left(\ln \frac{x_1}{x_D}\right) \\ E\left(\ln \frac{x_1}{x_2}\right) & 0 & var\left(\ln \frac{x_2}{x_3}\right) & \dots & var\left(\ln \frac{x_2}{x_D}\right) \\ E\left(\ln \frac{x_1}{x_3}\right) & E\left(\ln \frac{x_2}{x_3}\right) & 0 & \dots & var\left(\ln \frac{x_3}{x_D}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E\left(\ln \frac{x_1}{x_D}\right) & E\left(\ln \frac{x_2}{x_D}\right) & E\left(\ln \frac{x_3}{x_D}\right) & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

Donde  $E(z)$  es la esperanza de  $z$  número cualquiera, la cual se puede calcular como la media aritmética, i.e:

$$E\left(\ln \frac{x_i}{x_j}\right) = \overline{\ln \frac{x_i}{x_j}}$$

Cabe notar que los coeficientes de la varianza total (ecuación 21) se encuentran contenidos en la matriz de variación (ecuación 23).

El análisis crítico de esta matriz relacionando la varianza de log-cocientes entre partes, así como sus medias, puede dar luces del comportamiento de estas variables, condiciendo con comportamientos naturales razonables. Esto es útil, por ejemplo, en petroquímica en donde las características de compatibilidad-incompatibilidad de ciertos elementos a una u otra fase física {o mineralógica pueden ser detectadas. Por ejemplo, las varianzas de log-cocientes entre Mg y otros elementos tales como K, Na, Ca, P, Ti y Al, podría ser atribuido a fraccionamiento de olivino (y otros ferromagnesianos) en rocas ígneas durante su formación, como un contraste entre dos poblaciones de minerales. en el caso de las medias, el signo que toman estas, dado que es un log-cociente, indica cuál de las partes de cada cociente se presenta en mayor proporción. Valores negativos se deben a que la parte que se encuentra en el denominador se encuentra en mayor proporción respecto al numerador, y viceversa. Si la media entre un valor igual a cero, o cercano a este, indica que ambas partes se encuentran en un equilibrio proporcional (Alperin 2013).

En definitiva, por medio de la matriz de variación se tiene acceso tanto a la variabilidad total repartida entre las partes, y más aún, entre las partes (Pawlowsky-Glahn et al., 2011A).

### 2.5.4 Biplot composicional

Un análisis gráfico la información emanada tanto de la Matriz de variación, así como de la Matriz de covarianza de datos clr-transformados, es por medio de un *Biplot composicional*. Este se construye por medio de la descomposición de valores singulares enmarcado en un análisis de componentes principales. En este proceso se logra reducir la dimensión en la representación de los datos de tal manera que sea apreciable visualmente ya sea en 2 o 3 dimensiones. En resumidas palabras un Biplot composicional consiste en una proyección de los datos en el espacio generado por los componentes principales de mayor variabilidad (2 o 3), en conjunto a

la proyección, sobre los mismos componentes principales, de las variables clr-transformadas. De esta manera se puede analizar en un mismo grafico (Biplot) tanto la *nube de los individuos*, así como la *nube de las variables*, lo cual conlleva beneficios a la hora de interpretar la relación entre ambas (Pawlowsky-Glahn et al., 2011A, 2011B).

El procedimiento para la construcción e interpretación detallada de un Biplot composicional se encuentra en el Anexo A.

### 2.5.5 Matriz de covarianza de los datos clr-transformados

Otra herramienta estadística multivariable, complementaria a la matriz de variación, es la *matriz de varianza-covarianza de los datos clr-transformados (MC-clr)*. Esta está definida, a partir de un set de datos composicionales  $X \in S^D$ , como:

$$\text{var}[\text{clr}(X)] = \begin{pmatrix} \text{var}[\text{clr}_1(X)] & \text{covar}[\text{clr}_1(X), \text{clr}_2(X)] & \dots & \text{covar}[\text{clr}_1(X), \text{clr}_D(X)] \\ & \text{var}[\text{clr}_2(X)] & \dots & \vdots \\ & & \ddots & \text{covar}[\text{clr}_i(X), \text{clr}_D(X)] \\ & & & \text{var}[\text{clr}_D(X)] \end{pmatrix} \quad (24)$$

Esta matriz es simétrica por lo cual se omite el triángulo inferior. Cabe notar que la diagonal constituye la varianza de cada una de las partes de la matriz de datos clr-transformadas. Con ello, de acuerdo con ecuación 21, la traza de matriz de covarianza de los datos clr-transformados corresponde a la varianza total.

Al igual que la matriz de variación, de MC-clr se desprenden relaciones entre las partes. Tomando el mismo ejemplo anterior, covarianzas negativas entre Mg y K, Na, Ca, P, Ti y Al se atribuiría incompatibilidad de dichos elementos en las diferentes fases minerales de un magma en cristalización, por lado Mg enriquecido en fases máficas y los demás elementos señalados enriquecidos en fases intermedias a félsicas.



### 3 METODOLOGIA

En la Figura 3 se presenta modelo conceptual con el cual se desarrolla el presente trabajo. La metodología se resume, en primera instancia, en depurar la base de datos original generando una base de datos modificada en función de criterios específicos. Una vez confeccionada la base de datos modificada, con la cual se procesarán y analizarán los datos, son aplicados sobre aquellos datos la transformación log-cociente centrada (clr) y luego sometidos a evaluación de agrupamiento por medio de método K-medoids. En caso de no verificar grupos naturales los datos ‘crudos’ son nuevamente transformados ahora por medio de la transformación log-cociente isométrica (ilr), datos transformados que luego son empleados para la identificación de composiciones ‘outliers’ por medio de distancias de Mahalanobis robustas. De este procedimiento surgen dos sub sets de datos, A y B, siendo el primero una propuesta de línea base y el segundo las composiciones consideradas ‘anómalas’. El set de datos A es evaluado en búsqueda de grupos naturales, en caso de no verificar dicha condición es analizado por medio de herramientas estadísticas multivariantes con tal de caracterizar su naturaleza en contraste a los antecedentes del medio físico del área estudiada.

#### 3.1 CONFECCIÓN DE BASE DE DATOS

Los datos empleados en el presente trabajo son extraídos de la Base de Datos geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena (Espinoza et al, 2016). Esta consiste en un archivo formato Excel, donde se presentan los resultados analíticos de concentraciones para 59 elementos y compuestos, de 699 muestras de sedimentos fluviales correspondientes a 681 puntos de muestreo.

La Hoja La Serena está comprendida entre 29°30' y 31°00' S de latitud y desde la línea de costa, por al poniente, hasta el meridiano 70°30' de longitud oeste, al oriente, cubriendo una totalidad de 16.218 km<sup>2</sup>.

En el Anexo B se presenta un resumen de las metodologías de recolección, análisis y control de calidad desarrollado en Espinoza y colaboradores (2016)

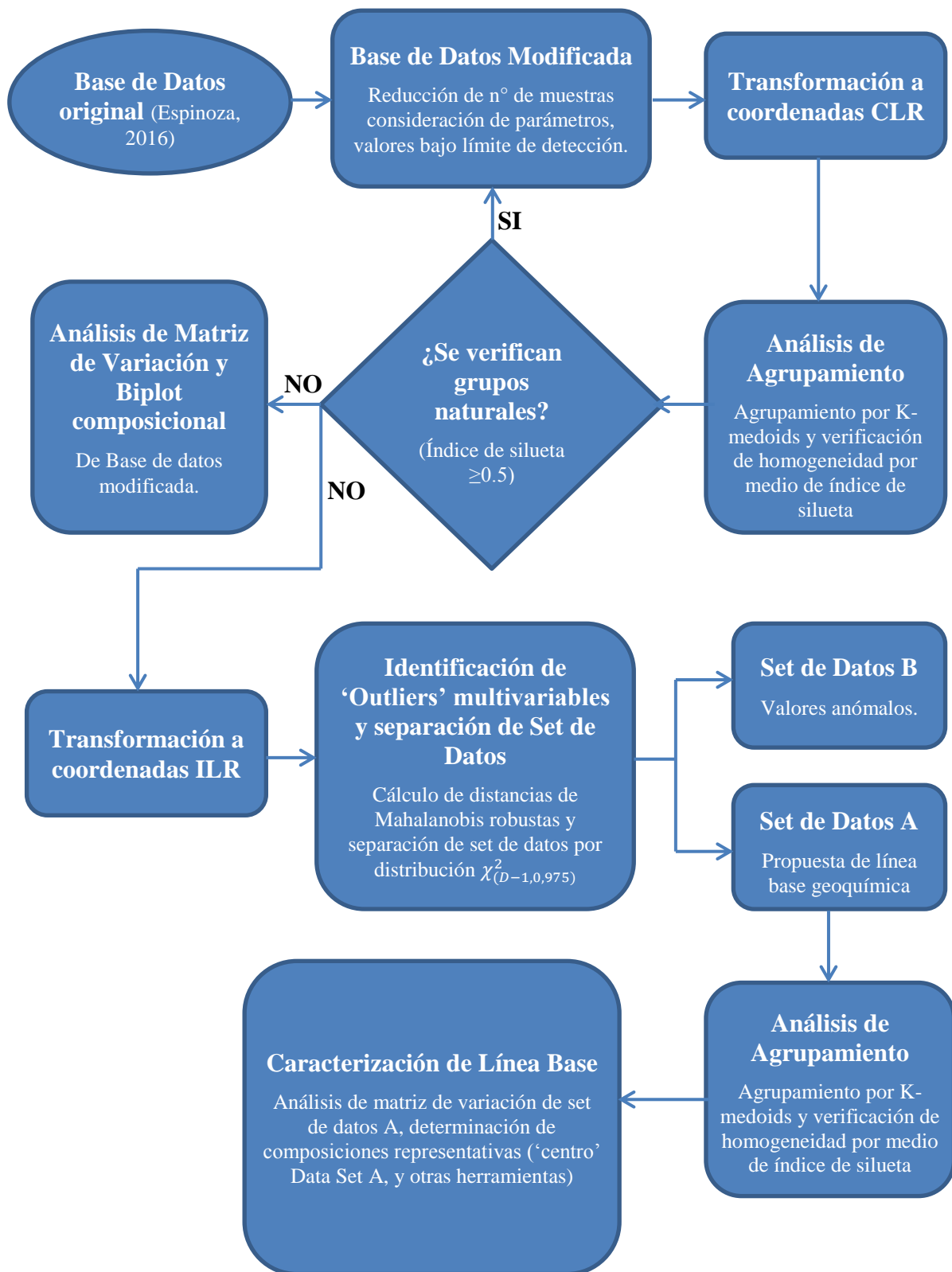
##### 3.1.1 Base de datos modificada

La Base de Datos geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena (Espinoza et al., 2016) contiene en su totalidad la información obtenida en las sucesivas campañas de muestreo realizada para la confección del mapa geoquímico de dicha Hoja. De tal información no necesariamente toda es útil para el presente trabajo, o bien la consideración de ciertos parámetros o ambiente puede inferir es los resultados finales o interpretaciones. Por ello se realiza un análisis crítico de esta base de datos de tal manera de seleccionar la porción de esta que será considerada para los posteriores análisis, tomando en cuenta la naturaleza de los ambientes sedimentarios muestreados, las muestras gemelas y control de calidad de los datos.

##### 3.1.1.1 Reducción de número de muestras

##### Ambientes sedimentarios

Como se señala en la Anexo B sección 1.3, los ambientes sedimentarios que son muestreados corresponden a cauces fluviales activos, planicies de inundación, cauces fluviales intermitentes y terrazas fluviales. Este último ambiente, al no poseer información sobre las edades de las diferentes terrazas muestreadas, no se logra tener certeza de su época de formación, a diferencia de los otros tres ambientes para los cuales es viable atribuir una condición dada por procesos actuales.



**FIGURA 3:** Diagrama de flujo que describe, resumidamente, la metodología empleada en el presente trabajo.

Por lo cual, en el presente trabajo, se considera que muestras correspondientes a terrazas fluviales no deben ser empleadas ya que eventualmente distorsionarían, en una dimensión temporal, los resultados ante el propósito de determinar una línea base geoquímica. Lo anterior fundamentado bajo la concepción de que una línea base debe representar una condición natural en una época del tiempo determinada (Buccianti et al, 2015), asumida en el presente trabajo.

### Muestras gemelas

La Base de Datos geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena (Espinoza, 2016) alberga los resultados de los análisis de muestras gemelas para un mismo punto de muestreo. Esto conlleva a tener una sobre representación de dichos puntos de muestreo. Con tal de aminorar el sesgo en la reducción de muestras, se considera como dato válido solo la primera muestra gemela enlistada en la base de datos, su duplicado es desechado (en base a la metodología empleada en Espinoza y colaboradores (in prep.).

#### 3.1.1.2 Consideración de parámetros

Como resultado del control de calidad (Anexo B sección 3), se obtiene que 13 parámetros (Be, Sn, Cd, Au, Ta, W, Hg, Sb, C<sub>Total</sub>, Th, Mo, U y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se encuentran fuera del rango para ser considerados ‘estadísticamente tratables’. No obstante, dichos resultados pueden ser consecuencia de diversos factores que deben ser sopesados de manera tal de calificar su pertinencia en la eventual exclusión en los posteriores procedimientos.

1. Como primera fuente imprecisión de los parámetros fuera de rango, se puede destacar aquellos en que gran proporción de la muestra presentan concentraciones muy cercanas a su límite de detección (Hg, Be, Sb, Cd, Sn, W, Th, Ta, U y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Este error relativo estaría influenciado por a una componente analítica (Espinoza et al., 2016), y por ende los valores extremos alcanzados por estos parámetros no constituyen necesariamente a datos erróneos o carentes de valor. Bajo esta premisa cabe considerar que al descartar dichos parámetros se podría estar eliminando posible información relevante.
2. Para algunos elementos, en particular el Mo, el valor de FR en duplicados de pulpa es marcadamente menor que el valor de FR para muestras gemelas. Ello implicaría que la alta variabilidad de los valores del Mo estaría asociado a la heterogeneidad que presenta este elemento dada su afinidad a minerales pesado altamente segregables (Espinoza et al., 2016).
3. En el caso del Au, la detección de valores extremos es esperable principalmente por el conocido “efecto pepita” que se presenta al analizar una muestra que contenga oro nativo (pepita de oro) (Espinoza et al., 2016).

Con tal de evaluar la pertinencia de inclusión de cada uno de estos 13 parámetros, que bajo control de calidad mostraron una alta dispersión, se confeccionan mapas regionales de concentración por medio del software Arcgis 10.1©. Estos mapas constan de 2 capas principales: (i) una capa de puntos que, graduados en tamaño, muestran la concentración de cada parámetro, y (ii) una capa correspondiente a una interpolación geoespacial por medio de un kriging ordinario con un modelo de variograma esférico para dos casos: 6 puntos de estimación o bien 24 puntos de estimación. Cabe señalar que la capa de interpolación se emplea como ayuda de visualización de posibles patrones regionales, por lo cual su valor geoestadístico es nulo.

Con la combinación de dichas capas se busca visualizar patrones regionales de distribución que guarden una plausible relación ya sea con la geología base de la región, con el contexto metalogénico y mineralización, o posibles procesos antrópicos como fuentes de anomalía. Estos mapas son analizados y discutidos en la sección de resultados.

### 3.1.1.3 Valores bajo límites de detección

Dado que el CoDA no admite ceros en sus procedimientos de cálculo de transformaciones log-cocientes, se opta por asignar a los datos bajo el límite de detección con un valor correspondiente a la mitad de este límite. De esta manera las diferentes muestras son tratables en un análisis CoDA considerando los valores bajo el límite de detección como una señal de fondo.

## 3.2 TRANSFORMACIÓN A DATOS LOG-COCIENTES

Las transformaciones log-cocientes, necesarias para los diferentes procedimientos aplicados, son calculados por medio del software CoDA-PACK, desarrollado por el grupo de investigación de análisis composicional de datos de la Universidad de Girona, España. Este software permite realizar, además de las transformaciones log-cocientes, operaciones en el simplex (clausura, perturbación, potenciación, etc.), algunas aplicaciones estadísticas como es la matriz de variación, y confección de Biplots composicionales.

Las transformaciones inversas ( $ilr^{-1}$  y  $clr^{-1}$ ) son calculadas por medio de rutinas desarrolladas en Microsoft Excel<sup>®</sup>, aplicando los procedimientos detallados en la sección 2.2.4.

## 3.3 EVALUACIÓN DE AGRUPAMIENTO

Dado el carácter composicional de los datos (clausurados), resulta necesario realizar el análisis de agrupamiento desde una perspectiva de CoDA por medio de transformaciones log-cocientes que permitan trabajar los datos en el espacio de los reales ( $\mathbb{R}$ ).

El análisis de agrupamiento (cluster analysis) se realiza a partir de datos  $clr$ -transformados ya que estos conservan la simetría entre las observaciones en el traspaso de la información desde el simplex ( $S^D$ ) a los reales ( $\mathbb{R}$ ) (sección 2.2.4.2). De esta manera es posible realizar un análisis de agrupamiento por medio del método de partición entorno a medoides, o K-medoids (sección 2.3.1.1) que se basa en distancias entre observaciones.

El procedimiento de análisis de agrupamiento consiste en realizar un agrupamiento de los datos  $clr$ -transformados para diferentes valores de  $k$  (número de clústeres), con  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  número de repeticiones elegido por el analista. Para cada valor de  $k$  se determina el índice de silueta (sección 2.3.2) tanto de la base de datos por completo como para cada clúster.

Todos estos procedimientos son realizados por medio del software RapidMiner Studio<sup>®</sup>, empleando las funciones de K-medoids que contiene dicho programa y la función *Silhouette (average)* desarrollada por Dvorožňák (2012), estudiante de doctorado del departamento de computación gráfica e interacciones de la Czech Technical University de Praga, en base al procedimiento señalado en Rousseeuw (1987).

Si los valores de índice de silueta son sistemáticamente menores a 0,5 se considera que las estructuras de agrupamiento encontradas son débiles y pueden ser artificiales (sección 2.3.2; Tabla 6).

## 3.4 IDENTIFICACIÓN DE OUTLIERS Y SEPARACIÓN DE SET DE DATOS

Con el fin de dividir la base de datos en dos grupos, un conjunto A y un conjunto B, en donde el primero representaría un prospecto de set de datos que albergaría la señal geoquímica de fondo (línea base), y el segundo, que por otro lado alberga las composiciones anómalas correspondientes a enriquecimientos por procesos puntuales tales como mineralización o contaminación.

Como se menciona en la sección 2.4, la identificación de outliers multivariados empleada en el presente estudio implica el empleo de distancias robustas de Mahalanobis para cuyo cálculo se emplea la matriz de covarianza. Por esta razón es necesario emplear una transformación log-cociente que sea proyectada en una base ortonormal y que a su vez conserve la simetría de los datos. Estas condiciones solo son cumplidas por la transformación log-cocientes isométrica (ilr).

Para la identificación de outliers composicionales, a partir de datos ilr-transformados, se emplea el software Matlab-R2014a<sup>®</sup> implementando las rutinas desarrolladas por proyecto LIBRA, llevado a cabo por ROBUST@Leuven (grupo de investigación de estadísticas robustas de la universidad de Leuven, Bélgica), el cual constituye un repositorio de códigos de estadísticas robustas de acceso libre.

De dicho repositorio se emplea la función `mcdcov` la cual calcula la matriz de covarianza de determinante mínimo (MCD, sección 2.4.1.2) entregando diferentes productos de utilidad entre los que destacan (i) gráfico de distancias robustas versus distancias clásicas y sus valores de corte, (ii) gráficos de distancias robustas versus distribución chi-cuadrado (marcando valor de corte), (iii) gráfico de distancia robustas versus cuantiles de distribución chi-cuadrado, entre otros.

La función `mcdcov` es confeccionada en base los procedimientos desarrollados en Rousseeuw (1984). En el presente trabajo se emplean los valores por defecto de  $h = 0,75n$  y  $\chi^2_{(D-1,0,975)}$ , con  $D - 1$  grados de libertad y 0,975 valor de corte (ver sección 2.4.1.2). Se emplean estos valores con tal de hacer comparable el presente estudio con otros de similares características (Buccianti et al., 2015).

Luego de definido el set de datos A, prospecto de línea base, se verifica la homogeneidad de este por medio de un análisis de agrupamiento idéntico al inicial (secciones 2.3 y 3.3). Luego de verificado a ausencia de grupos robustos en el set de datos A, se descarta la posibilidad de presencia de grupos naturales. Con ello resulta viable analizar este set de datos por medio de métodos tradicionales sin perjuicio de ser distorsionado por grupos de muestras de naturaleza marcadamente.

### **3.5 CARACTERIZACIÓN DE LINEA BASE**

#### **3.5.1 Vector representativo**

A partir del set de datos A es posible obtener un vector que albergue la combinación de concentraciones representativa Línea Base. Este vector constituye el centro composicional del set de datos A.

Aquel vector se calcula a partir de la media geométrica de datos en el simplex luego de ser transformados por medio la inversa de la transformación ilr (Ecuación 16). Para ello se emplea la matriz de coeficientes de balances obtenida a partir de la matriz de partición binaria originalmente empleada en la transformación ilr (Anexo D).

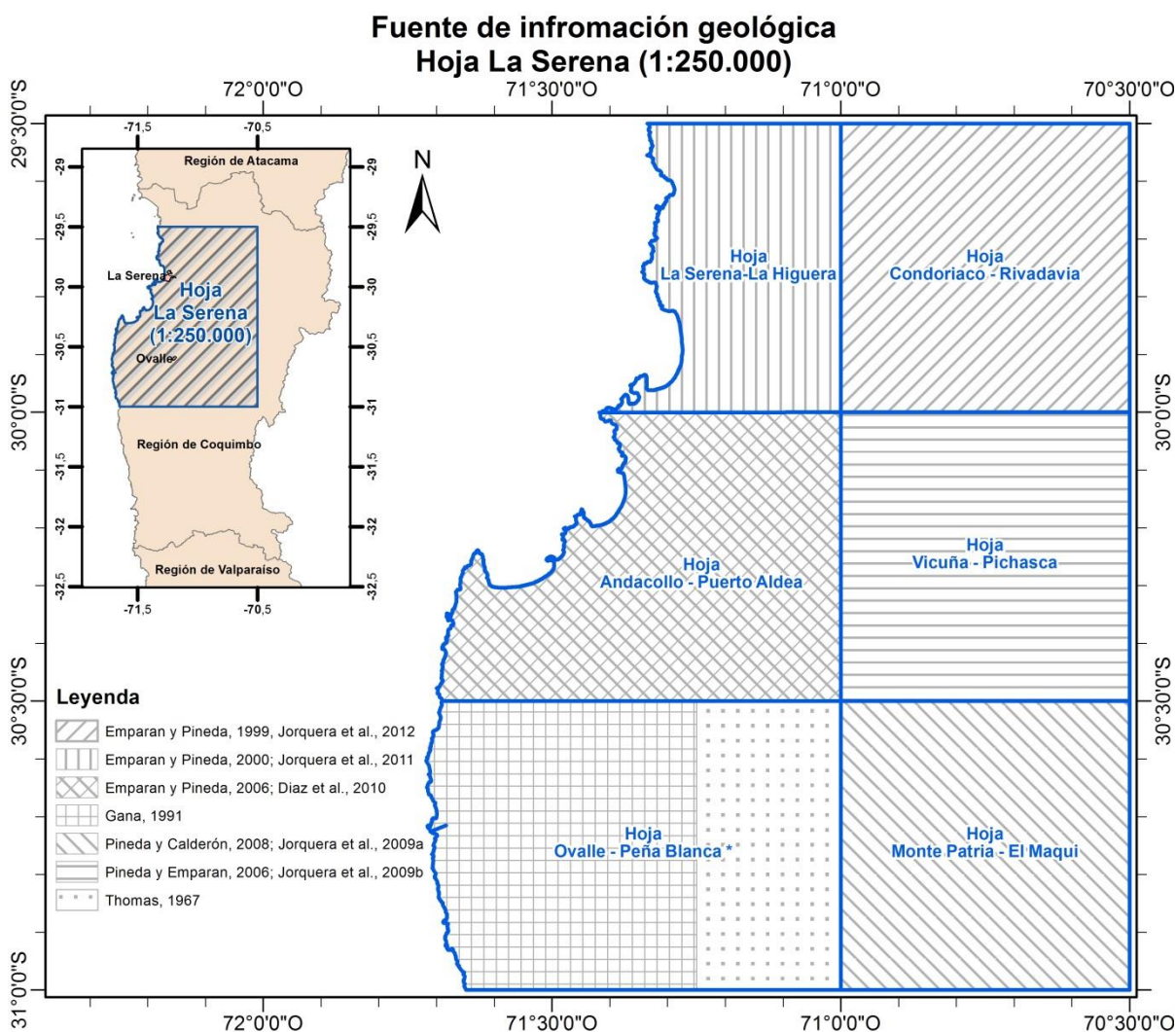
#### **3.5.2 Análisis estadísticos**

Las herramientas de análisis estadísticos multivariados, como matriz de variación, matriz de varianzas-covarianzas, varianza total y Biplot composicional, descritos en la sección 2.5, son confeccionados a partir de software Coda Pack.

Empleando aquellas herramientas es posible identificar e interpretar patrones de comportamiento entre las variables desde un punto de vista composicional.

## 4 MARCO GEOLOGICO

La información geológica comprendida por la Hoja La Serena (1:250.000) es obtenida, principalmente, de la Serie Mapas Geológicos, Serie Geología Básica, Serie Recursos Minerales y Energéticos, los últimos correspondientes a la Carta Geológica de Chile, ejecutadas por el Servicio Nacional de Geología y Minería. Ambas series presentan trabajos a escala 1:100.000, que para el caso de la Hoja La Serena (1:250.000), corresponden a las Hojas (5): La Serena - La Higuera, Condoriaco - Rivadavia, Andacollo - Puerto Aldea, Vicuña - Pichasca, Monte Patria - El Maqui. Una sexta hoja, correspondiente al cuadrante suroccidental del área de estudio, no presenta trabajos de ninguna de las dos series señaladas. No obstante, en el presente trabajo, se considera a aquel cuadrante con el nombre asignado en la división cartográfica original: Hoja Ovalle - Peña Blanca. La información de esta última hoja es obtenida de fuentes más antiguas y correlacionadas con las unidades regionales descritas en el resto de hojas que componen el área de estudio.



**FIGURA 4:** Fuente de información geológica Hoja La Serena (1:250.000). Trabajos de Empan and Pineda (1999, 2000) se enmarcan en la Serie Mapas Geológicos, Trabajos Empan and Pineda (2006), Pineda and Empan (2006) and Pineda and Calderón (2008) se enmarcan en la Serie Geología Básica. Trabajos de Jorquera et al. (2009a, 2009b, 2011, 2012) and Díaz et al. (2010) corresponden a trabajos de la Serie Recursos Minerales y Energéticos. (\*) Cuadrante correspondiente a Hoja Ovalle - Peña Blanca no presenta un trabajo geológico como tal, Por ello se analiza la información de fuentes más antiguas que comprenden parte de dicho cuadrante (Gana, 1991; Thomas, 1967) correlacionando su información con fuentes de los cuadrantes adyacentes.

## 4.1 SÍNTESIS

La geología de la Hoja la Serena, al igual que gran parte del territorio nacional, presenta una configuración geológica general correspondiente a franjas litológicas de orientación norte-sur, con edades decrecientes hacia el oriente, salvo excepciones. La litológica se encuentra dominada por unidades volcanosedimentarias de edades principalmente asignadas al Cretácico Superior, ampliamente distribuidas en el margen central y oriental de la Hoja La Serena, con lavas de composiciones principalmente intermedias a básicas e intercalaciones sedimentarias continentales y/o marinas. De estas unidades pueden ser destacadas las Formaciones Arqueros, Quebrada Marquesa, Los Elquinos y Viñita, Estratos de Quebrada del Calvario, y los Complejos Volcánicos Agua Salada, La Corina y Cerro el Inca, entre otros. No menos importante, cuerpos intrusivos de composiciones variables, con predominancia intermedia (diorita a tonalita), afloran ampliamente en el área de estudio, siendo su principal expresión en el margen central y occidental. Estos cuerpos plutónicos poseen edades entre Jurásico superior a Eoceno, asociados, en el margen occidental de la Hoja, al Sistema de Fallas El Romeral que se extiende en dirección norte Sur. En sumatoria las unidades plutónicas y volcano-sedimentarias dominan la litología de la Hoja la Serena con una presencia preponderante en los 6 sub-cuadrantes (hojas 1:100.000) que conforman el área de estudio (Figuras 4 y 5).

Subordinadamente se presentan unidades sedimentarias continentales, marinas y transicionales del Mioceno-Pleistoceno (Formación Coquimbo, Formación Confluencia, Depósitos aluviales antiguos) principalmente en el margen occidental de la Hoja (Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea, Ovalle-Peña Blanca, Vicuña-Pichasca). En menor medida se presentan unidades Sedimentarias Continentales de edades Triásico Superior a Cretácico Medio, tales como Estratos de Quebrada La Totorá, Formaciones Mostazal y Pucalume, y facies sedimentarias de Formación Las Breas. Estas unidades se concentran principalmente en el margen centro-oriental y nororiental del área de estudio (Hojas Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca, y en menor medida Monte Patria-El Maqui). En similar, pero menor proporción, se presentan secuencias marinas en el margen suroriental del área de estudio (principalmente Hoja Monte Patria-El Maqui, en menor medida Vicuña-Pichasca) con una importante presencia de niveles calcáreos correspondiente a la Formación Río Tascadero de edad Jurásico Superior tardío a Cretácico Inferior.

Por otra parte, aisladamente se encuentran unidades volcanosedimentarias de composiciones marcadamente ácidas a intermedia en el margen centro-oriental, en las Hojas Condoriaco-Rivadavia y Vicuña-Pichasca, asociadas a calderas volcánicas de edades entre el Paleoceno al Eoceno principalmente. Unidades relevantes de este tipo son las calderas Llano Perrada, Condoriaco, facies ácidas de Calderas Tierras Blancas y Cerro el Indio, y Estratos de Quebrada Yungay (Caldera Cerro Tololo)

Como casos particulares se pueden considerar cuerpos plutónicos-metamórficos de la costa, en el margen suroccidental (Hojas Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca) correspondientes al Complejo Plutónico Altos del Talinay (Triásico) y Complejo Metamórfico Choapa (Devónico - Carbonífero). El bloque conformado por ambas unidades ha sido interpretado como '*resultado de la construcción y deformación de un bloque acrecionado a un margen continental, durante el Devónico-Triásico Superior*' (Díaz et al., 2010). Por esta razón, en el presente trabajo, se han agrupado estas unidades de forma diferenciada.

Por último, depósitos sedimentarios no consolidados, o en su defecto parcialmente consolidados, tales como depósitos fluviales, recientes o antiguos, depósitos aluviales y coluviales, se concentran a lo largo de los cauces principales, y por otro lado depósitos eólicos y de playas se disponen en el borde costero

Como estructuras de mayor relevancia se pueden considerar el Sistema de Fallas El Romeral, el cual se alinea de norte a sur limitando el margen occidental y central del área de estudio que se ha asociado al Sistema de Falla Atacama, y por otro a lado cabe destacar los sistemas de fallas Vicuña y Rivadavia en el margen oriental de la hoja, con registro de movimiento similares a los presentados por el Sistema de Falla Domeyko. Y más al sur, con un movimiento del tipo normal y un rumbo NNE, emerge la falla Tuluahuén, en el cuadrante correspondiente LA Hoja Monte Patria-El Maqui.

Para información más detallada sobre unidades litoestratificadas y depósitos sedimentarios no consolidados consultar Anexo C.

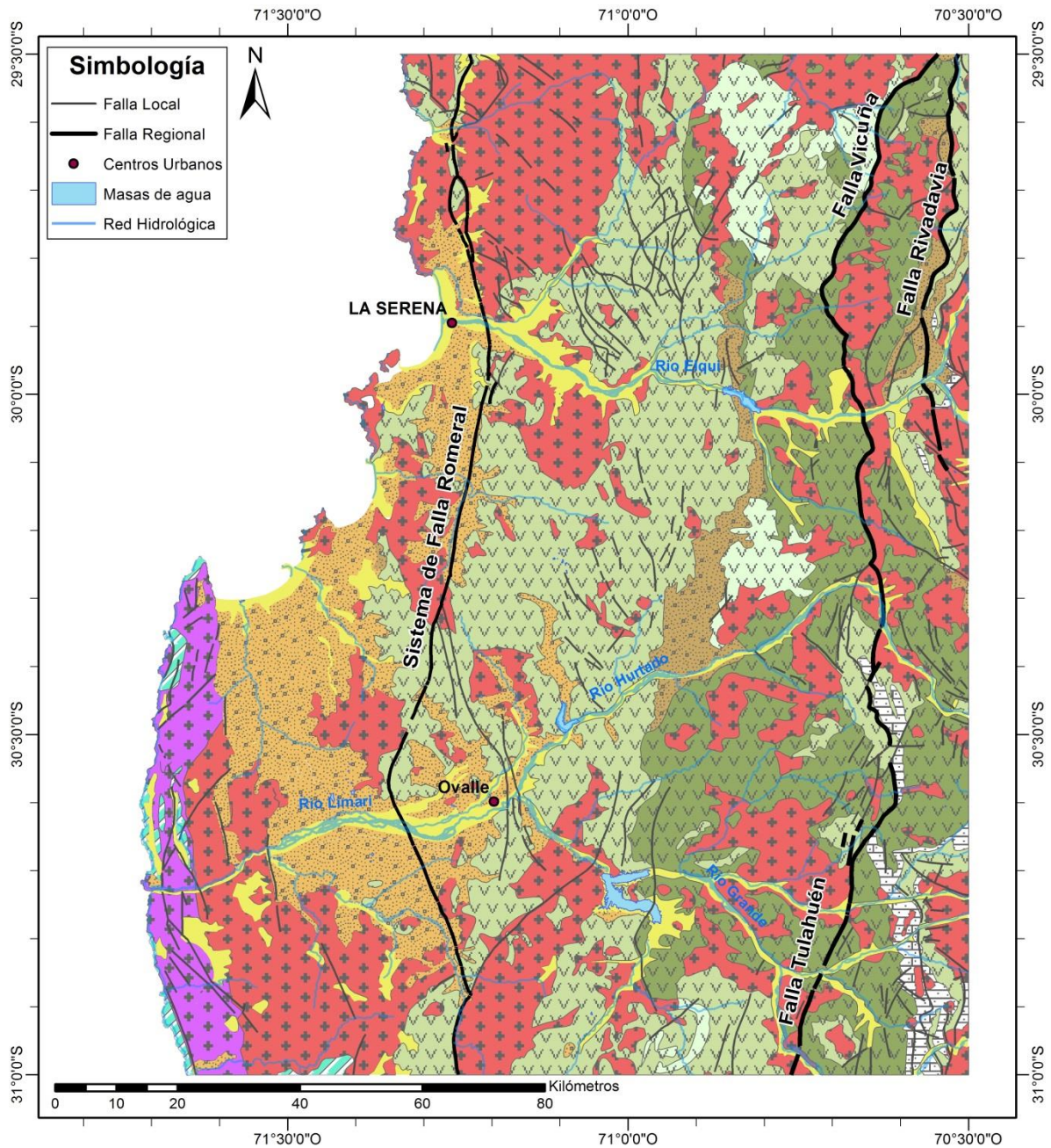
## **4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

El área estudiada se sitúa en un segmento de subducción subhorizontal de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental de Sudamérica. La velocidad de convergencia es de aproximadamente 8 cm/año con dirección N78°E. La fosa oceánica se sitúa a una distancia aproximada de 110 km de la línea de costa. Entre 30-32°S, la placa subductada presenta inflexiones desde la fosa oceánica (aprox. 73°W) hacia el este, con un segmento inicial por unos 200 km con inclinación aproximada de 25-30°E y un estado de tensiones compresivo; a continuación (aprox. 70,5°W a 67°W), un segmento subhorizontal desde 200-500 km de la fosa, con un estado tensional extensivo; a los 500 km otra inflexión, que desciende la placa oceánica con inclinación de 27°E y un estado de tensiones compresivo. Esta geometría tiene por efecto el desplazamiento de la cuña astenosférica y el desarrollo de una ancha franja de antearco 'fría', con ausencia de volcanismo; asimismo, un mayor grado de sismicidad (5-10 veces) en la placa continental suprayacente, que en los segmentos adyacentes de inclinación 'normal', propicia un mayor grado de solidarización de ambas placas y en consecuencia mayor riesgo de sismos interplacas (Emparan & Pineda, 2006)

Como estructuras de carácter regional de primer orden pueden ser destacadas el Sistema de Falla Romeral, en el margen occidental, y el conjunto de Fallas Vicuña y Rivadavia en el margen oriental. Ambas se extienden en dirección norte sur, siendo la primera ha sido asociado a la Zona de Falla Atacama, la cual cuenta con registro de movimiento sinistral entre 144 – 131 Ma atribuido a una subducción oblicua en dicho periodo. En el área de estudio (Emparan & Pineda, 2006). Por otro lado, las Fallas Vicuña y Rivadavia registran eventos compresionales de edad eocena constituyendo una posible estructura de flor que levanta la cobertura mesozoica, el que es comparable a la fase transpresional eocena media registrada a lo largo de todo el Sistema de Fallas de Domeyko desde Antofagasta hasta Copiapó, contemporánea con la Fase Incaica de deformación andina. (Pineda & Emparan, 2006)



## Resumen geología Hoja La Serena



**FIGURA 5:** Resumen geología de Hoja La Serena (1:250.000). Esta figura es elaborada a partir del cruce de información obtenida de las fuentes señaladas en la Figura 4 y del Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2002).

### 4.3 GEOLOGÍA ECONÓMICA<sup>1</sup>

La región de Coquimbo se caracteriza por poseer una gran diversidad de tipos de yacimientos minerales. Destaca el cobre como principal elemento de extracción con yacimientos de este metal abarcando gran parte de la extensión de la Hoja la Serena. Además, existen distritos y yacimientos económicos de plata, hierro, manganeso y ciertos sectores de la Hoja. Como subproductos se encuentran el cobalto, plomo, cinc, molibdeno, mercurio y titanio.

La metalogena de la Hoja la Serena se encuentra dominada por actividad magmática-hidrotermal Mesozoica con emplazamiento de diferentes tipos yacimientos tanto en los propios cuerpos plutónicos del mesozoico como en rocas encajaste volcanosedimentarias de igual edad (Oyarzun et. al., 2007).

Los tipos de yacimientos representativos de la Hoja la Serena son (Oyarzun et. al., 2007):

1. Depósitos estratoligados y vetiformes de *Cu* (e.g. Distrito Talcuna, Hoja Condoriaco-Rivadavia)
2. Vetiformes de *Ag*, e.g. (e.g. Distrito Arqueros, Hoja Condoriaco-Rivadavia)
3. Vetiformes de *Cu – Hg – Au* (e.g. Distrito Punitaqui, Hojas La Serena-La Higuera y Condoriaco-Rivadavia Hoja Ovalle-Peña Blanca)
4. Estratiformes de *Mn* (e.g. Distrito Corral Quemado, Hoja Vicuña-Pichasca)
5. Pórfidos y epitermales de *Cu – Hg – Au* (e.g. Distrito Andacollo, Hoja Andacollo-Puerto Aldea)
6. Kiruna (e IOCG) de *Fe* (e.g. mineral El Romeral, Hoja La Serena-La Higuera)

Cabe también señalar la presencia de yacimientos epitermales de *Cu – Au – As* en alta montaña correspondiente a franja Epitermal El Indio, que si bien se encuentra fuera del área de estudio, al este, podría influir la química de sedimentos fluviales como resultado de transporte de material en suspensión y disuelto.

La mineralización es principalmente de sulfuros, dependiendo del yacimiento. de los que destacan: calcopirita, pirita, arsenopirita, bornita, calcosina, covelina, cobaltita, argentita, molibdenita, tetraedrita y tennantina, entre otros. También importante la mineralización de óxidos de hierro-titanio y/o cobre como magnetita, ilmenita, hematita, rutilo, crisocola, malaquita, cuprita brocantita, etc. También existe mineralización nativa de oro evidenciado en distritos Andacollo, Pajonales (Hoja Andacollo-Puerto Aldea); La Higuera, Santa Gracia (Hoja La Serena-La Higuera); y La Corina, Condoriaco, El Sauce (Hoja Condoriaco-Rivadavia). También es posible de encontrar depósitos de tipo Skarn cuprífero en distritos San Antonio (Hoja Serena-La Higuera); y distritos Cerro Blanco y Panulcillo (Hoja Ovalle-Peña Blanca)

La zonación de alteración es variada dependiendo del tipo de depósito. Es posible encontrar alteraciones desde Potásica a argílica, siendo común y extensivas las del tipo cuarzo, sericítica, propilítica y argílica.

---

<sup>1</sup> Información obtenida como síntesis de fuentes correspondiente a Serie Recursos Minerales y Energéticos indicados en la figura 7

## 5 RESULTADOS

### 5.1 BASE DE DATOS MODIFICADA

#### 5.1.1 Reducción número de muestras

Según el procedimiento argumentado en la sección 3.1.1.1, de un total de 699 muestras recolectadas 33 corresponden a sedimentos de terrazas fluviales, y 26 poseen una muestra gemela.

Eliminando las 33 muestras correspondientes a sedimentos de terrazas fluviales y las 26 muestras gemelas ('segunda observación') se obtiene una base de datos modificada que contiene 640 muestras de las 699 correspondientes a la base de datos original. Esta base de datos es la empleada en la formulación de una línea base geoquímica.

#### 5.1.2 Consideración de parámetros Fuera de Rango

En base al procedimiento señalado en la sección 3.1.1.2, se confeccionan mapas de concentración e interpolación para los 13 parámetros (Be, Sn, Cd, Au, Ta, W, Hg, Sb, C<sub>Total</sub>, Th, Mo, U y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que se encuentran fuera del rango para ser considerados 'estadísticamente tratables'. Se discute a continuación la pertinencia o no de la inclusión de estos parámetros en la base de datos modifica que se empleara en el presente estudio. Anticipadamente se puede mencionar que, de los 13 elementos analizados, solo uno, Be, es rechazado. El resto de parámetros son incorporados inmediatamente, sin análisis previo, a la base de datos final, dado que han superado con éxito el control de calidad en Espinoza y colaboradores (2016).

##### 5.1.2.1 Oxido de Cromo, Tantalio, Estaño, Torio, Uranio

En los Anexos I.1 a I.10 se puede observar que las concentraciones de óxido de cromo, torio, tantalio y uranio son sistemáticamente mayores en el margen occidental de la Hoja. Patrón particularmente marcado para el Ta, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Por otro lado, tanto el U y el Th, elementos que suelen compartir comportamiento geoquímico, también presentan relativas mayores concentraciones en el borde oriental de la hoja. Esto entrega un indicio de una posible señal geoquímica evidenciada por parte de estos datos.

Con tal de complementar esta idea, se puede verificar que el porcentaje de valores Fuera de Rango (FR [%]), para el caso de duplicados de pulpa, es de 35% y 30% para el Th y U respectivamente, y para el caso de muestras gemelas es de 31% y 27% (Tablas 8 y 9). Sumado a que estos dos elementos no poseen datos bajo límite de detección no se puede aseverar, en primera instancia, cuales son los factores. Error fundamental ('natural') o error analítico, son los que dominan dicha variabilidad y dado que los patrones presentados en los anexos I.7 a I.10, son significativamente marcados, se estima que tanto el U y Th presentan una señal geoquímica plausible, pertinente de ser evaluada.

Por su parte, tanto el Ta como el Sn. presentan baja proporción de muestras bajo el límite de detección (1,1% y 7,9%) y porcentajes de muestras Fuera de Rango similares siendo, para duplicados de pulpa, de 55% y 60% respectivamente y, para muestras gemelas, de 27% y 38% respectivamente. Esto daría cuenta de que la alta variabilidad de estos elementos está dominada, por una componente analítica por sobre su heterogeneidad 'natural', la cual puede estar siendo enmascarada. Sin embargo, el patrón geoquímico presentado el anexo I.3 a I.6 son significativamente marcados para ambos elementos, siendo pertinente que sean evaluados.

Por otro lado, el Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presenta bajo porcentaje de muestras bajo el límite de detección (4,9%), y porcentajes de muestras de fuera de rango de 40% y 58%, para duplicados de pulpa y muestras

gemelas respectivamente. Esto evidencia una heterogeneidad ‘natural’ de su concentración, lo cual puede estar relacionado a su compatibilidad con fases minerales pesadas que facilitan su segregación (Meyer et al, 1979), sumado a una componente de error analítico significativa. Más aun, el patrón regional presentado por este compuesto (Anexos I.1 y I.2), es relativamente bien definido, por lo cual es pertinente incluir a este la base de datos final.

#### 5.1.2.2 Oro

El oro presenta un marcado enriquecimiento en los sedimentos de corriente en el centro de La Serena, específicamente en Quebrada El Arrayan (Anexo I.11 y I.12). Este enriquecimiento coincide, aguas arriba, con el distrito minero Andacollo, caracterizado por su la minería de Au-Cu de larga data. En el resto de la Hoja presenta patrones relativamente homogéneos.

El porcentaje de muestras bajo el límite de detección es de 19,2%, y los porcentajes de muestras Fuera de Rango, para duplicados de pulpa y muestras gemelas, son 59% y 81% respectivamente. Esto índices serian consecuencia de un ‘efecto pepita’ común para el oro, lo cual indicaría enriquecimientos puntuales en algunas muestras dada la segregación del oro nativo como partícula pesada.

Lo anterior, sumado a un marcado patrón geoquímico, permite corroborar la pertinencia del Au en la base de datos final.

#### 5.1.2.3 Mercurio, Antimonio

Tanto el Hg y Sb presentan una concentración marcada en el margen central de la Hoja, presentando una forma de franja, En particular el Hg presenta correlación con los distritos mineros de Andacollo y Punitaqui (al sur de la Hoja) caracterizados por minería de Cu-Au-(Mo), asociados a enriquecimiento de Hg (Díaz et al., 2010; Oyarzun et al., 2001) (Anexos I.13 a I.16). Por otro lado, los sectores de enriquecimiento relativo de Sb presentan correlación con los distritos Andacollo, y en menor medida con los distritos Arqueros y Talcuna.

El porcentaje de muestras bajo el límite de detección, de Hg y Sb, son de 18,3% Y 10,9% respectivamente, y porcentajes de muestras Fuera de Rango, relativamente similares siendo, para duplicados de pulpa, de 53% y 41% respectivamente y, para muestras gemelas, de 73% y 50% respectivamente. Estos índices podrían indicar una suma de errores de carácter analíticos sobrepuestos a una alta variabilidad natural de estos elementos.

Dado que los patrones presentados por estos elementos son claros, y se correlaciona con zonas de mineralización con enriquecimiento, o posible enriquecimiento, se determina pertinente incluirlos en la base de datos final.

#### 5.1.2.4 Molibdeno

La distribución de concentraciones de Mo presenta un patrón significativamente homogéneo, con una leve concentración asociado al distrito Andacollo, caracterizado por una mineralización principal del tipo pórfido Cu-Au-Mo (Díaz et al, 2010). Se observan otros sectores con altas concentraciones, la cuenca del Rio Hurtado y en Quebrada Uchumi (cuenca río Elqui) en el borde oriental del mapa, y en la cuenca de la Quebrada Honda (Anexos I.17 y I.18).

Prácticamente la totalidad de muestras presentan valores de Mo sobre el límite de detección. Por otro lado, los porcentajes de muestras Fuera de Rango, para duplicados de pulpa y muestras gemelas, son 35% y 38% respectivamente. Estos porcentajes pueden estar relacionados a la común asociación de Mo a minerales pesados fácilmente segregables (Espinoza et al. 2016).

En suma, el patrón general del Mo daría cuenta de una incipiente señal geoquímica. Algunos valores extremos, puntuales, pueden llegar a ser outliers descartables en los procedimientos venideros. Es por ello que se determina pertinente la inclusión del Mo en la base de datos final.

#### 5.1.2.5 Wolframio

Similar al Mo, el W muestra un patrón relativamente homogéneo de la distribución de sus concentraciones, salvo un grupo reducido de muestras en la hoya de Quebrada Talca (cuenca de río Elqui) en el centro del mapa, que presentan valores considerablemente elevados sobre el resto, 50 y 36,7 (ppm) sobre 2,2 (ppm) de media para este elemento.

El porcentaje de muestras bajo el límite de detección es de 8,0%, y los porcentajes de muestras Fuera de Rango, para duplicados de pulpa y muestras gemelas, son 55% y 38% respectivamente. Dada su fuerte compatibilidad con el Mo (Salminen et al., 2005) hacen presumir un comportamiento segregación con fases minerales pesadas (Espinoza et al., 2016).

Se determina con ello que es pertinente considerar el wolframio como parte de la base de datos final, dado que puede entregar una señal de fondo consistente.

#### 5.1.2.6 Berilio

El Be presenta una distribución de concentraciones errática, sin un patrón regional reconocible (anexo I.21 y I.22). Sumado a ello, el porcentaje de muestras bajo el límite de detección es elevado, constituyendo un 50,1%. Los porcentajes de muestras fuera de rango son 65% y 54% para duplicados de pulpa y muestras gemelas respectivamente. Dados estos índices, y a la cercanía de los datos con los límites de detección y resolución de la medición, se puede considerar que los datos de Be carecen de valor estadístico y geoquímico, por lo cual es excluido de la base de datos final.

#### 5.1.2.7 Cadmio

El Cd muestra mayores concentraciones en el margen oriental de la Hoja, con sistemática mayor concentración en la parte alta de la cuenca del río Hurtado, con valores extremos esta cuenca (valores hasta de 26 ppm), y subordinadamente en la parte alta de la cuenca del río Elqui y confluencia de quebrada Marquesa con el río Elqui (anexo I.23 y I.24).

El Cd presenta un alto porcentaje de muestras bajo el límite de detección (35,8%), y porcentajes de muestras Fuera de Rango para duplicados de pulpa y muestras gemela de 59% y 42% respectivamente. Esto sugiere que la fuente de error está principalmente controlada por la gran proporción de datos bajo y cercanos al límite de detección. Con alrededor de un 60% de las muestras con valores menores al 10 veces al límite de detección.

Por la anterior, se considera que el Cd entrega un patrón geoquímico plausible pertinente de ser evaluado. Por ello se incluye en la base de datos final.

#### 5.1.2.8 Carbono total

El patrón presentado por el C<sub>total</sub> no resulta del todo claro (anexo I.25 y I.26), sin embargo, cabe señalar que la concentración de la biosfera y suelos es altamente inhomogéneo, dado que este elemento es fácilmente movilizadado por acción humana (Salminen et al., 2005), como lo es la actividad industrial y agrícola. De todos modos, es plausible interpretar la presencia de una señal de fondo dada la dispersión de las concentraciones, y a su vez una segunda señal (anómala) que puede ser causada ya sea por factores antrópicos, o bien presencia de rocas carbonatadas.

No se presentan muestras bajo el límite de detección y los porcentajes de muestras Fuera de Rango, para duplicados de pulpa y muestras gemelas, son de 38% y 23% respectivamente. Esto implicaría que existe una componente de error analítico fuertemente asociada a dicha medición.

En definitiva, dado que se puede asumir incipientes señales geoquímicas por parte del carbono, y dado que la variabilidad respecto a las mediciones de control no son muy elevadas estando asociada a una componente de predominancia analítica, se estima pertinente integrar al  $C_{total}$  como parte de la base de datos final.

### 5.1.3 Resultado Base de datos modificada

Finalmente, la base de datos final con la cual se determinará una línea base geoquímica de sedimentos de corriente de la Hoja La Serena, consta de 58 parámetros ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $MnO$ ,  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$  y  $Cr_2O_3$ ,  $C_{Total}$ ,  $S_{Total}$ , Au, Ag, As, Ba, Bi, Cd, Co, Cs, Cu, Ga, Hf, Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu), y 640 muestras constituyentes a sedimentos de corriente actuales sin considerar muestras gemelas.

En términos matemáticos, esta base de datos constituye una matriz de 640 filas y 58 columnas (640x58).

Como el presente estudio se aplica análisis de datos composicionales, y por ende multivariantes, los datos deben ser expresados todos en las mismas unidades de concentración. Es por ello que la base de datos es expresada, en su totalidad, en unidades de partes por millón (ppm).

## 5.2 ESTADÍSTICA CLÁSICA

Se presenta a continuación los resultados de la estadística clásica sobre datos crudos (sin transformaciones ni eliminación separación de outliers). Además, se entrega a modo de comparación los valores propuesto por Rudnick & Gao (2003) como representativos de la corteza continental superior.

**TABLA 7:** Estadística clásica de datos crudos correspondiente a la base de datos final. Se incluye referencialmente composición media de la corteza continental superior. Min: mínimo; 1<sup>er</sup>: primer cuartil;  $\bar{G}$ : Media geométrica;  $\bar{X}$ : media aritmética; 2<sup>do</sup>: segundo cuartil (mediana); 3<sup>er</sup>: tercer cuartil; Max: máximo; s desviación estándar; CCS: composición de la corteza continental superior. se resaltan estimadores de tendencia central.

Parámetro	Unidad	Min	1 <sup>er</sup>	$\bar{G}$	$\bar{X}$	2 <sup>do</sup>	3 <sup>er</sup>	Max	s	CCS**
SiO <sub>2</sub>	% peso	9.43	47.69	49.52	50.47	51.67	54.81	71.88	7.67	66.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	1.55	13.77	14.26	14.63	15.14	16.10	19.83	2.41	15.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	1.08	7.94	10.93	11.78	9.91	12.92	60.01	6.83	5.04
MgO	"	0.57	1.95	2.49	2.51	2.36	2.87	6.45	0.87	2.48
CaO	"	1.22	4.11	5.37	6.14	5.21	6.76	45.76	4.35	3.59
Na <sub>2</sub> O	"	0.31	2.51	2.86	3.00	2.97	3.47	6.56	0.80	3.27
K <sub>2</sub> O	"	0.2	1.3	1.52	1.65	1.6	2.0	3.9	0.6	2.8
TiO <sub>2</sub>	"	0.12	0.90	1.34	1.51	1.09	1.43	15.56	1.48	0.64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"	0.04	0.17	0.20	0.23	0.20	0.25	1.69	0.13	0.15
MnO	"	0.03	0.15	0.19	0.23	0.18	0.23	7.48	0.33	0.1
C <sub>TOTAL</sub>	"	0.04	0.42	0.76	1.32	0.83	1.60	12.83	1.59	No reportado
S <sub>TOTAL</sub>	ppm	200*	100	291.2	1006	300	700	78300	4509	620
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	20*	40	79.3	104	60	100	1410	145	92
Sc	"	2	17	20.3	20.17	20	23	39	5.1	14
V	"	11	178	272	323	240	353	2462	283	97
Ni	"	1.4	8.9	12.6	13.4	11.7	15.4	86.2	8.1	47
Co	"	1.9	16.6	20.9	22	20.3	24.8	436.2	18.2	17.3
Cu	"	7.1	52.73	84	171.1	83.2	142.65	4781.6	344.84	28
Zn	"	8	40	55.9	105	71	103	3556	227	67
Ga	"	2	15.5	16.5	16.7	16.7	18	26	2.4	17.5
As	"	1*	4.6	7.03	13.99	8.3	13.7	399.3	29.91	4.8
Se	"	0.5*	0.25	0.31	0.43	0.25	0.5	3.1	0.39	0.09
Rb	"	6.2	39.8	49.9	55.36	52.95	67.28	168.1	22.92	84
Sr	"	89.5	283.7	308	339	330.3	381.5	846.5	91.3	320
Y	"	2.9	20.2	25.1	26.1	23.9	29.8	76.9	9.3	21
Zr	"	21.9	133.9	253	371.1	193.9	396.4	5314.8	489.7	193
Nb	"	0.6	4.5	7.6	9.66	6.4	9.58	109.6	10.86	12
Mo	"	0.1*	0.5	0.79	1.48	0.8	1.2	114.2	5.13	1.1
Ag	"	0.1*	0.05	0.068	0.12	0.05	0.05	5.3	0.34	
Cd	"	0.1*	0.05	0.117	0.36	0.1	0.3	26	1.53	0.09

Parámetro	Unidad	Min	1 <sup>er</sup>	$\bar{G}$	$\bar{X}$	2 <sup>do</sup>	3 <sup>er</sup>	Max	s	CCS**
Sn	ppm	1*	1	1.87	2.55	2	3	38	2.51	2.1
Sb	"	0.1*	0.2	0.24	0.4	0.3	0.4	4.8	0.4	0.4
Cs	"	0.4	2.3	3.62	5.45	4	6.6	34.2	4.92	4.9
Ba	"	76	296	352	509	362	451	16143	988	628
La	"	2.1	16.1	20.7	21.85	20.05	25.48	129.6	9.28	31
Ce	"	4.8	36	46	48.7	44.1	56.9	289.3	20.8	63
Pr	"	0.63	4.56	5.77	6.12	5.53	7.17	32.93	2.48	7.1
Nd	"	2.3	19.6	24.1	25.5	23.4	29.8	127.7	9.8	27
Sm	"	0.46	4.24	5.18	5.42	4.94	6.2	21.62	1.91	4.7
Eu	"	0.1	1.1	1.27	1.3	1.3	1.4	2.2	0.3	1
Gd	"	0.66	4.1	5.04	5.19	4.78	5.95	15.17	1.73	4
Tb	"	0.08	0.59	0.72	0.75	0.7	0.87	2.31	0.26	0.7
Dy	"	0.43	3.63	4.49	4.61	4.27	5.23	13.88	1.58	3.9
Ho	"	0.1	0.71	0.88	0.9	0.84	1.01	2.67	0.31	0.83
Er	"	0.32	2.04	2.54	2.64	2.43	3	7.65	0.93	2.3
Tm	"	0.05	0.31	0.38	0.4	0.37	0.46	1.2	0.15	0.3
Yb	"	0.28	2.04	2.52	2.65	2.38	3.04	7.57	0.99	1.96
Lu	"	0.05	0.31	0.4	0.41	0.37	0.48	1.2	0.16	0.31
Hf	"	0.6	3.7	6.73	9.76	5.3	11.08	133.4	12.37	5.3
Ta	"	0.1*	0.3	0.54	0.73	0.5	0.8	7.7	0.83	0.9
W	"	0.5*	0.8	1.33	2	1.3	2.2	50	3	1.9
Au	ppb	0.5*	0.8	1.9	10	2.1	4.7	1531.3	84	1.5
Hg	ppm	0.01*	0.01	0.02	0.08	0.03	0.05	5.02	0.29	0.05
Tl	"	0.1*	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	1	0.08	0.9
Pb	"	1.3	6.3	10.6	17.43	11.8	20.68	296.3	21.06	17
Bi	"	0.1*	0.05	0.097	0.17	0.1	0.2	12.4	0.53	0.16
Th	"	0.9	4.3	7.42	9.96	6.7	11.7	130.8	11.28	10.5
U	"	0.3	1.4	2.1	2.71	2	3.38	17.6	2.19	2.7

(\*) Límite de detección.

(\*\*) Concentraciones publicadas por Rudnick y Gao (2003)



### 5.3 EVALUACIÓN DE AGRUPAMIENTO

A la base de datos modificada (sección 5.1.3) se le es aplicada la transformación clr, bajo el procedimiento descrito en capítulo de metodología (sección 3.3), y basado en la restricción de emplear datos alojados en el espacio de los reales, como es señalado en el marco teórico (sección 2.2.4.2).

Luego de realizar la evaluación de agrupamiento, conforme al procedimiento descrito en la sección 3.3, se obtiene que para un total de 10 evaluaciones, considerando de 2 a 11 clústeres ( $k = 2, \dots, 11$ ), ninguna muestra un índice de silueta mayor o igual a 0.5, es más el máximo valor obtenido es de 0.163 para  $k = 2$  (Tabla 11).

**TABLA 8:** Resultados de evaluación de agrupamiento por medio de método k-medoids de la base de datos final en coordenadas clr-transformadas. Consistencia del agrupamiento es estimado por medio de índice de silueta.

$k$ (N° de clústeres)	Índice de silueta total
2	0.162
3	0.072
4	0.096
5	0.09
6	0.083
7	0.077
8	0.079
9	0.064
10	0.047
11	0.029

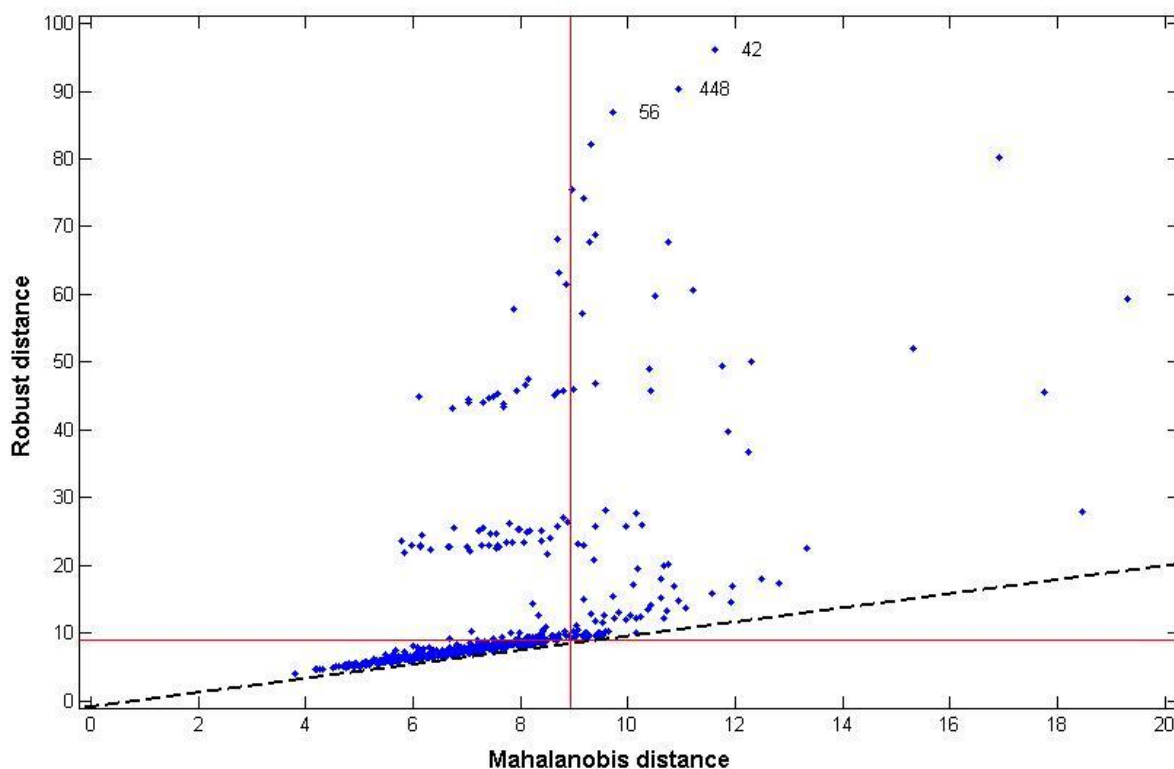
Como se señala en el marco teórico (sección 2.3), este resultado implica que el set de datos evaluado no presenta grupos naturales en base a estructuras sustanciales. Por lo cual se puede asumir un set de datos ‘homogéneo’. Con ello es posible proseguir con el procedimiento de identificación de datos anómalos.

### 5.4 IDENTIFICACIÓN DE ‘OUTLIERS’ Y SEPARACIÓN DE SET DE DATOS

Aplicando una metodología robusta para la identificación de composiciones anómalas de datos multivariantes (secciones 2.4.1.2 y 3.4), se obtiene que, de las 640 muestras de la base de datos modificada, el 69.7% (446 muestras) son asignados al set de datos A (propuesta de línea base), y 30.3% (194 muestras) corresponden a datos ‘anómalos’ asignados al set de datos B.

Por otro lado, si se considera una metodología clásica (sección 2.4.1.1), se obtiene que, de las 640 muestras de la base de datos final, el 86.25% (552 muestras) son asignadas al set de datos A, mientras que el 13.75% (88 muestras) son asignadas al set de datos B.

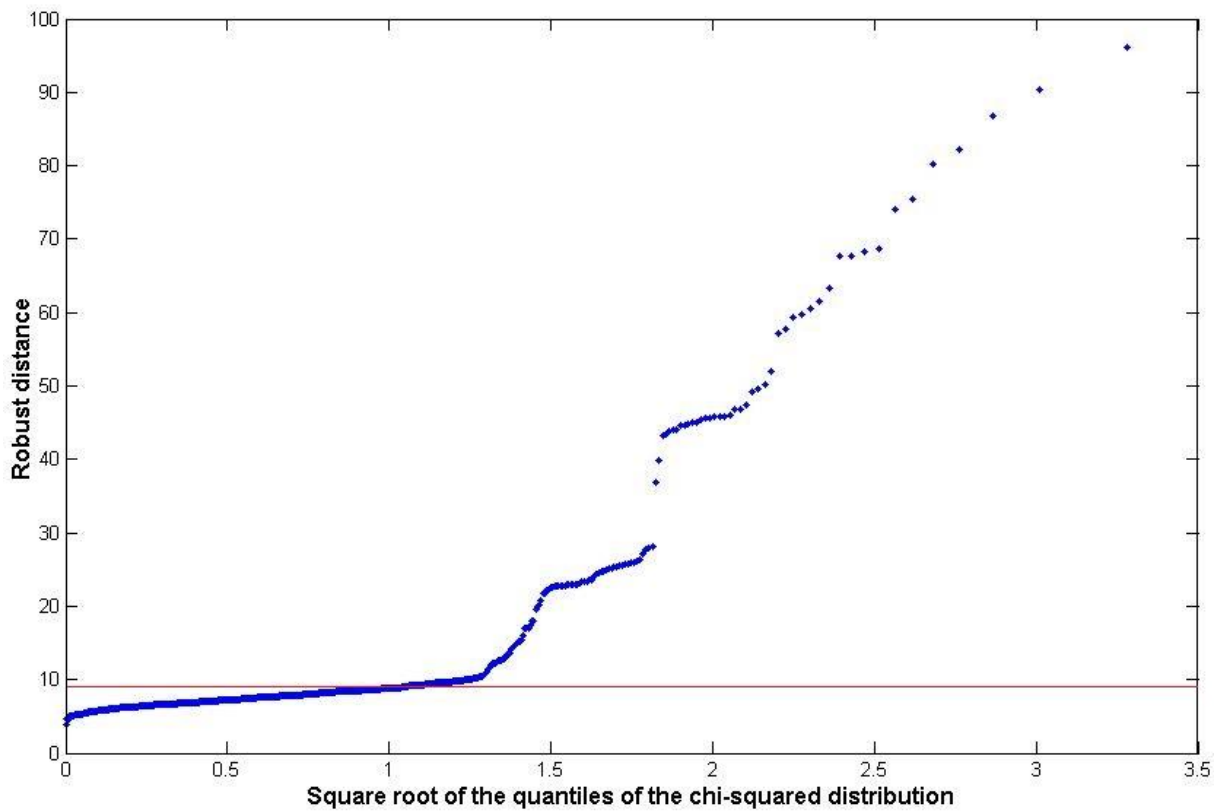
Esto se ve reflejado en la Figura 6, en donde a los datos que son considerados anómalos desde una metodología clásica (cuadrante superior derecho) se le suma una serie de datos que son considerados anómalos ahora por medio de una metodología robusta (cuadrante superior izquierdo). Por otro lado, en el cuadrante inferior izquierdo se acumulan las muestras que son asignados al set de datos A.



**FIGURA 6:** Distancias de Malahanobis versus contraparte robustificada. Las líneas horizontales y verticales indican el valor de corte para una distribución chi-cuadrado a 0.975 de riesgo. Para El valor de corte para ambas distancias es de 8.93. Los valores a la derecha de la línea vertical constituyen valores ‘anómalos’ empleando una metodología clásica, y por otro lado los valores sobre la línea horizontal constituyen valores ‘anómalos’ empleando una metodología robusta. La línea diagonal corresponde a la recta identidad.

En la Figura 6, correspondiente a las distancias robustas versus la raíz cuadrada de los cuantiles de distribución chi-cuadrado, es posible observar que los datos siguen un patrón lineal hasta el valor de corte, aproximadamente.

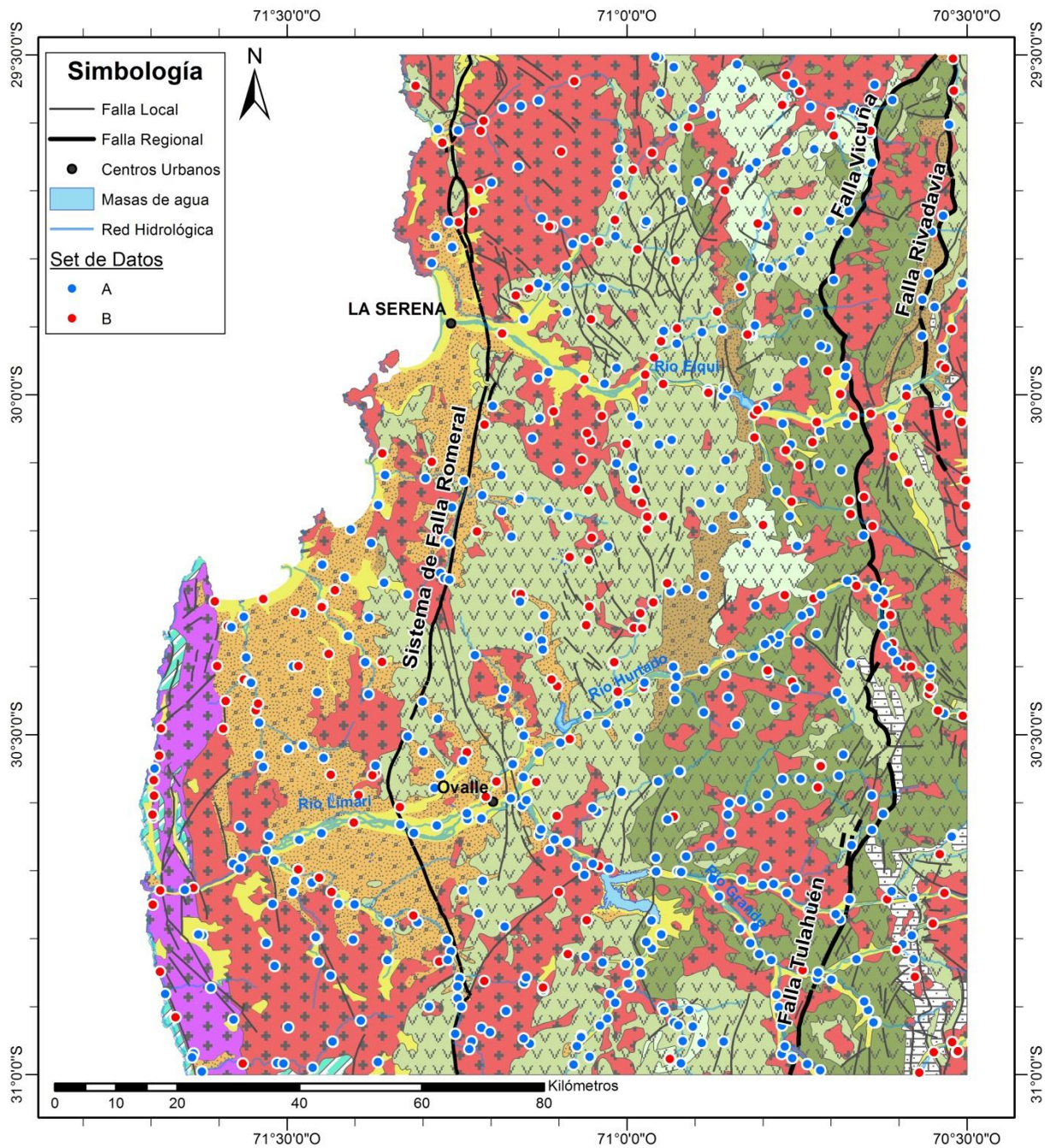
En definitiva, el set de datos A obtenido por medio de una metodología robusta se propone como posible línea base geoquímica de sedimentos de corriente de Hoja La Serena.



**FIGURA 7:** Raíz cuadrada de cuantiles de distribución chi-cuadrado versus distancia robusta. Patrón lineal bajo el valor de corte (8.93) dan cuenta de una distribución normal multivariable. Línea horizontal corresponde al valor de corte.

En cuanto a la distribución espacial del set de datos, como se puede observar en la Figura 8, resulta difícil correlacionar, a escala regional, la litología presente en la Hoja con respecto a la asignación a cada uno de los sets de datos, A: 'línea base', o B: 'anómalos'.

## Set de datos vs. Geología Hoja La Serena



**FIGURA 8:** Distinción de set de datos (A y B) en función de su ambiente litológico. Fuente de información geológica indicada en Figura 5.

## 5.5 CARACTERIZACIÓN DE LINEA BASE

### 5.5.1 Evaluación de agrupamiento

La propuesta de línea base, correspondiente al set de datos A, es evaluado en búsqueda de posibles grupos naturales, según se indica en la sección 3.4. Del análisis por medio del método K-medoids para 10 casos, considerando de 2 a 11 clústeres ( $k = 2, \dots, 11$ ), en ninguno obtuvo un índice de silueta mayor o igual a 0.5. El máximo valor obtenido es de 0.417 para  $k = 2$  (Tabla 9).

**TABLA 9:** Resultados de evaluación de agrupamiento por medio de método k-medoids de set de datos A en coordenadas clr-transformadas. Consistencia del agrupamiento es estimado por medio de índice de silueta.

$k$ (N° de clústeres)	Índice de silueta total
2	0.417
3	0.209
4	0.303
5	0.244
6	0.168
7	0.178
8	0.231
9	0.17
10	0.153
11	0.126

Por ende, se considera que el set de datos A es ‘homogéneo’ no presentando grupos naturales discernibles.

### 5.5.2 Concentraciones representativas

A partir del set de datos A se obtiene un vector representativo de las concentraciones de los 58 parámetros considerados en el presente estudio, el cual se construye según el procedimiento descrito en la sección 3.5.1. En la Tabla 10 se disponen de las concentraciones representativas de Línea Base (LB). Además, se añaden las concentraciones características de la Corteza Continental Superior (CCS) según Rudnick y Gao (2003). Cabe notar que el vector línea base corresponde a la media geométrica por parámetro del set de datos A. Indistintamente puede ser representado con la mediana por parámetro (ver sección 6.2.2.1)

**TABLA 10:** Concentraciones representativas de línea Base ambiental. Se presenta también las características reportadas para la corteza continental superior propuestas por Rudnick y Gao (2003), así como media y mediana, por parámetro, de base de datos modificada (sin separación de set de datos ni transformaciones log-cocientes).

Parámetro	Unidad	Vector Línea Base (LB)	$\bar{G}$	$\bar{X}$	$2^{\text{do}}$	CCS**	Fracción LB/CCS	Fracción G/LB
SiO <sub>2</sub>	% peso	50.88	49.52	50.47	51.67	66.6	0.76	0.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	14.80	14.26	14.63	15.14	15.4	0.96	0.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	11.07	10.93	11.78	9.91	5.04	2.20	0.99
MgO	"	2.40	2.49	2.51	2.36	2.48	0.97	1.04
CaO	"	5.38	5.37	6.14	5.21	3.59	1.50	1.00
Na <sub>2</sub> O	"	2.99	2.86	3.00	2.97	3.27	0.91	0.96
K <sub>2</sub> O	"	1.56	1.52	1.65	1.6	2.8	0.56	0.97
TiO <sub>2</sub>	"	1.30	1.34	1.51	1.09	0.64	2.04	1.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"	0.21	0.20	0.23	0.20	0.15	1.42	0.95
MnO	"	0.19	0.19	0.23	0.18	0.1	1.87	1.00
C <sub>TOTAL</sub>	"	0.75	0.76	1.32	0.83	No reportado	No aplica	1.01
S <sub>TOTAL</sub>	ppm	263	291.2	1006	300	620	0.52	1.11
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	68.86	79.3	104	60	92	0.75	1.15
Sc	"	20.32	20.3	20.17	20	14	1.45	1
V	"	280	272	323	240	97	2.89	0.97
Ni	"	11.46	12.6	13.4	11.7	47	0.24	1.1
Co	"	20.07	20.9	22	20.3	17.3	1.16	1.04
Cu	"	84.9	84	171.1	83.2	28	3.03	0.99
Zn	"	64.02	55.9	105	71	67	0.96	0.87
Ga	"	16.7	16.5	16.7	16.7	17.5	0.95	0.99
As	"	7.53	7.03	13.99	8.3	4.8	1.57	0.93
Se	"	<0.5*	0.31	0.43	0.25	0.09	No aplica	No aplica
Rb	"	50.6	49.9	55.36	52.95	84	0.6	0.99
Sr	"	336	308	339	330.3	320	1.05	0.92
Y	"	25	25.1	26.1	23.9	21	1.19	1
Zr	"	256	253	371.1	193.9	193	1.33	0.99
Nb	"	7.27	7.6	9.66	6.4	12	0.61	1.05
Mo	ppm	0.78	0.79	1.48	0.8	1.1	0.7	1.01

Parámetro	Unidad	Vector Línea Base (LB)	$\bar{G}$	$\bar{X}$	$2^{\text{do}}$	CCS**	Fracción LB/CCS	Fracción G/LB
<b>Ag</b>	"	<0.1*	0.068	0.12	0.05	0.053	No aplica	No aplica
<b>Cd</b>	"	0.13	0.117	0.36	0.1	0.09	1.42	0.9
<b>Sn</b>	"	2	1.87	2.55	2	2.1	0.95	0.94
<b>Sb</b>	"	0.25	0.24	0.4	0.3	0.4	0.63	0.96
<b>Cs</b>	"	3.91	3.62	5.45	4	4.9	0.8	0.93
<b>Ba</b>	"	367.07	352	509	362	628	0.58	0.96
<b>La</b>	"	20.63	20.7	21.85	20.05	31	0.67	1
<b>Ce</b>	"	46.11	46	48.7	44.1	63	0.73	1
<b>Pr</b>	"	5.84	5.77	6.12	5.53	7.1	0.82	0.99
<b>Nd</b>	"	24.6	24.1	25.5	23.4	27	0.91	0.98
<b>Sm</b>	"	5.25	5.18	5.42	4.94	4.7	1.12	0.99
<b>Eu</b>	"	1.29	1.27	1.3	1.3	1	1.29	0.98
<b>Gd</b>	"	5.02	5.04	5.19	4.78	4	1.26	1
<b>Tb</b>	"	0.73	0.72	0.75	0.7	0.7	1.04	0.99
<b>Dy</b>	"	4.45	4.49	4.61	4.27	3.9	1.14	1.01
<b>Ho</b>	"	0.87	0.88	0.9	0.84	0.83	1.05	1.01
<b>Er</b>	"	2.54	2.54	2.64	2.43	2.3	1.1	1
<b>Tm</b>	"	0.39	0.38	0.4	0.37	0.3	1.29	0.97
<b>Yb</b>	"	2.54	2.52	2.65	2.38	1.96	1.29	0.99
<b>Lu</b>	"	0.4	0.4	0.41	0.37	0.31	1.28	1
<b>Hf</b>	"	6.92	6.73	9.76	5.3	5.3	1.31	0.97
<b>Ta</b>	"	0.53	0.54	0.73	0.5	0.9	0.59	1.02
<b>W</b>	"	1.33	1.33	2	1.3	1.9	0.7	1
<b>Au</b>	ppb	1.65	1.9	10	2.1	1.5	1.1	1.15
<b>Hg</b>	ppm	0.02	0.02	0.08	0.03	0.05	0.49	1
<b>Tl</b>	"	<0.1*	0.06	0.06	0.05	0.9	No aplica	No aplica
<b>Pb</b>	"	11.38	10.6	17.43	11.8	17	0.67	0.93
<b>Bi</b>	"	0.10*	0.097	0.17	0.1	0.16	No aplica	0.97
<b>Th</b>	"	7.47	7.42	9.96	6.7	10.5	0.71	0.99
<b>U</b>	"	2.12	2.1	2.71	2	2.7	0.79	0.99

(\*) Límite de detección.

(\*\*) Concentraciones publicadas por Rudnick y Gao (2003)

A partir de la Tabla 13 es posible notar como, para el caso de elementos mayores, la concentración representativa de LB propuesta para la sílice es 16% menor que la asignada para CCS, en cambio el aluminio, magnesio y sodio muestran concentraciones similares a las propuestas para CCS. El potasio y el cromo muestran concentraciones menores, con concentraciones cercanas al 50% y 75% de las asignadas a CCS, respectivamente. En cuanto al hierro, manganeso y titanio, presentan el doble de la concentración de CCS. Así mismo el calcio y el fosfato presentan concentraciones mayores al propuesto para CCS, siendo 50% y 40% superiores respectivamente.

Con respecto a elementos menores y traza, pueden ser destacadas las altas concentraciones medias de cobre y vanadio siendo estas aproximadamente 3 veces a las indicadas para CCS.

Subordinadamente, el arsénico presenta una concentración 57% superior, en tanto que el escandio y cadmio presentan concentraciones de 45% y 42% sobre CCS, respectivamente. Finalmente es posible notar que el par zirconio-hafnio presenta una concentración de 30% superior respecto a CCS.

También son destacables las bajas concentraciones de algunos elementos. Tal es el caso del níquel y el mercurio con concentraciones correspondientes al 24% y 49% de CCS respectivamente. Sin embargo, cabe señalar que el porcentaje de muestras que presentan concentraciones de mercurio bajo el límite de detección es del 18%. Así mismo el bario, tantalio, rubidio, niobio, antimonio presentan concentraciones de alrededor del 60% de lo propuesto para CCS. Finalmente, tanto el plomo, molibdeno y wolframio presentan una concentración aproximada del 70% de lo asignado a CCS.

Cabe señalar que, para ciertos elementos, los valores de LB que se han obtenido se encuentran bajo el límite de detección. Tal es el caso de la plata, bismuto, selenio y talio. Esto tiene correlación con la gran cantidad de muestras con valores bajo el límite de detección para estos elementos, siendo del 42% a 87% de las muestras en aquella condición para dichos elementos. Es importante notar que, salvo el talio, los límites de detección de estos parámetros se encuentran por encima del valor medio propuesto para CCS.

En la misma Tabla 13 se incluye, además, la media aritmética y mediana de cada parámetro a partir de la base de datos modificada, esto es, sin realizar transformación log-cociente alguna, y por ende sin identificación de 'outliers' y separación de set de datos. Se integran estas columnas con el objeto de comparar dichos valores con los obtenidos como representativos de línea base geoquímica. De esta manera es posible evaluar, a nivel de resultados, los efectos de los procedimientos estadísticos multivariantes desde una perspectiva composicional en la formulación de tal línea base.

A partir de aquello se puede notar que elementos mayores (de sílice a carbono en tabla 13) presentan valores relativamente similares, o cercanos, entre LB y media-mediana, de datos crudos. En cuanto a compuestos minoritarios y traza tampoco existen diferencias significativas entre los valores de LB y los correspondientes a media-mediana, salvo contadas excepciones. De tales excepciones pueden ser destacadas las de azufre, cromo, bario, cobre, molibdeno, mercurio, plomo, hafnio, zirconio, y en menor medida vanadio, wolframio y zinc. Para todo estos elementos o compuestos, los valores correspondientes a línea base, media y/o mediana de datos crudos son significativamente alejados, en especial los referentes a media, los cuales suelen ser considerablemente más elevados respecto a los valores de LB, así como respecto a su mediana en menor medida. Por otro lado, los valores de línea base geoquímica son estrechamente parecido a los valores de media geométrica de datos crudos, salvo algunas contadas desviaciones considerables como las del azufre, oro, estroncio, que en cualquier caso son leves.

Como complemento de este vector línea base, se dispone en el Anexo J los gráficos 'box plot' de los 58 parámetros estudiados en base al sub set de datos A.

### 5.5.3 Matriz de variación

#### 5.5.3.1 Base de datos modificada

De la matriz de variación correspondiente a la base de datos modificada (Anexo E) se destaca la gran variabilidad, respecto a la varianza total (21.62), que presentan el oro (2.05), mercurio (1.46) y azufre (1.45), los cuales representan un 9.5%, 6.8% y 6.7% de la varianza total, respectivamente. Subordinadamente el carbono (1.09) y el cadmio (1.08) presentan, cada uno,



el 5.0% de la varianza total (Tabla 11). En suma, estos 5 parámetros albergan un tercio de la variabilidad total, bajo la consideración de que se cuenta con 58 variables en total.

**TABLA 11:** Varianzas totales por parámetro en coordenadas clr y varianza total de la base de datos modificada (sin separación de sub set de datos). Parámetros son ordenados de menor a mayor porcentaje de varianza respecto al total.

Orden	Parámetro	Varianza en coordenadas clr	% varianza total	Orden	Parámetro	Varianza en coordenadas clr	% varianza total
1	<b>Ga</b>	0.047	0.2	30	<b>Tl</b>	0.209	1.0
2	<b>Eu</b>	0.052	0.2	31	<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.240	1.1
3	<b>Gd</b>	0.055	0.3	32	<b>U</b>	0.296	1.4
4	<b>Sm</b>	0.058	0.3	33	<b>V</b>	0.307	1.4
5	<b>Tb</b>	0.058	0.3	34	<b>Ba</b>	0.318	1.5
6	<b>Ho</b>	0.062	0.3	35	<b>CaO</b>	0.333	1.5
7	<b>Y</b>	0.063	0.3	36	<b>Sn</b>	0.340	1.6
8	<b>Dy</b>	0.064	0.3	37	<b>Nb</b>	0.353	1.6
9	<b>Nd</b>	0.067	0.3	38	<b>Se</b>	0.361	1.7
10	<b>Er</b>	0.068	0.3	39	<b>Th</b>	0.401	1.9
11	<b>Tm</b>	0.073	0.3	40	<b>Ta</b>	0.460	2.1
12	<b>Pr</b>	0.073	0.3	41	<b>Hf</b>	0.488	2.3
13	<b>Yb</b>	0.073	0.3	42	<b>W</b>	0.522	2.4
14	<b>Lu</b>	0.077	0.4	43	<b>Zr</b>	0.523	2.4
15	<b>Ce</b>	0.080	0.4	44	<b>Mo</b>	0.523	2.4
16	<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.081	0.4	45	<b>Ag</b>	0.554	2.6
17	<b>La</b>	0.081	0.4	46	<b>Bi</b>	0.597	2.8
18	<b>Sc</b>	0.090	0.4	47	<b>Zn</b>	0.616	2.8
19	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.101	0.5	48	<b>Cs</b>	0.617	2.9
20	<b>Co</b>	0.103	0.5	49	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.655	3.0
21	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.128	0.6	50	<b>Cu</b>	0.714	3.3
22	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.128	0.6	51	<b>Pb</b>	0.716	3.3
23	<b>MgO</b>	0.148	0.7	52	<b>Sb</b>	0.750	3.5
24	<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.152	0.7	53	<b>As</b>	0.763	3.5
25	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.154	0.7	54	<b>Cd</b>	1.076	5.0
26	<b>Sr</b>	0.156	0.7	55	<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	1.086	5.0
27	<b>MnO</b>	0.176	0.8	56	<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	1.451	6.7
28	<b>Rb</b>	0.183	0.8	57	<b>Hg</b>	1.458	6.7
29	<b>Ni</b>	0.190	0.9	58	<b>Au</b>	2.052	9.5
				<b>Varianza Total</b>		21.6149	

En cuanto a la varianza del logaritmo de cocientes entre partes ( $var[\ln(x_i/x_j)]$ ), mostrados en el triángulo superior de la matriz de variación (Anexo E.0), pueden ser rescatados, en primera instancia, aquellos valores más cercanos a cero (i.e.  $var[\ln(x_i/x_j)] \rightarrow 0$ ). Estos valores dan cuenta de parámetros con una alta correlación entre ellos (numerado - denominador). Así mismo, valores elevados (i.e.  $var[\ln(x_i/x_j)] \rightarrow \infty$ ) dan cuenta de nula correlación. En lo que sigue el término ‘correlación’ es referente al valor de varianza del logaritmo de cocientes entre

partes. En Anexo E se presenta la matriz de variación correspondiente a la base de datos modificada. En ella se omite el triángulo inferior (media en coordenadas clr) dada su nula utilidad en este caso. Además son destacados, por un medio de un código de color, los valores de  $var[\ln(x_i/x_j)]$  en función de su distribución percentil. Los valores correspondientes a al 5% inferior (cola izquierda) son destacados de azul oscuro. Los valores entre 5%-25% de la distribución (cola izquierda) son destacados de Aguamarina claro (celeste). Los valores entre 75%-95% de la distribución (cola derecha) son destacados de rojo claro (magenta). Finalmente, los valores sobre 95% de la distribución (cola derecha) son destacados de rojo oscuro.

### Elementos mayores

En cuanto a elementos mayores destacan, dando cuenta de relaciones esperables para ‘minerales formadores de roca’, el cociente  $SiO_2/Al_2O_3$ , y subordinadamente  $SiO_2/Na_2O$  y  $Al_2O_3/Na_2O$ , con bajos valores de varianza. Se distinguen también los cocientes  $SiO_2/K_2O$ ,  $Al_2O_3/K_2O$  y  $Na_2O/K_2O$ . Y finalmente  $SiO_2/MgO$  y  $Al_2O_3/MgO$ . (Anexo E.1).

Por otro lado es también interesante la buena correlación de  $Fe_2O_3$  con  $TiO_2$ ,  $MnO$  y  $V$ , relacionables a óxidos de Ti-Fe, o sustitución de Fe en fases silicatadas máficas, especialmente en cuanto a Mn. Concordante a esto es también el cociente  $TiO_2/V$  (Anexo E.1, E.2)

Cabe notar, también, que el  $CaO$  presenta una variabilidad total mayor respecto la propia de elementos mayoritarios ( $SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Na_2O$ , ver tabla 14), así como la correlación individual con cada uno de estos parámetros, la cual es sistemáticamente más elevada, salvo para con<sup>2</sup>  $MgO$  (Anexo E.1)

### Oxido de Cromo

En relación a lo anterior, es rescatable la buena correlación que presenta el  $Cr_2O_3$  con respecto a  $Fe_2O_3, TiO_2$  y  $V$ , en relación a la elevada varianza que presenta el cociente de este compuesto con la mayor parte del set de datos. En menor medida pueden ser mencionados, bajo la misma lógica, la correlación del  $Cr_2O_3$  con respecto a  $Ni, Co$  (Anexo E.1, E.2, y E.5)

### Galio

El galio presenta una baja variabilidad total (0.0465). Por otro lado destaca la buena correlación que presenta con respecto a óxidos mayoritarios, en especial con respecto a  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$ , así también con respecto a  $Sc$  (Anexo E.2).

### Escandio

Al igual que el galio, el escandio presenta una baja variabilidad (0.090) además de una buena correlación con óxidos mayores, en especial con el  $MgO$  (Anexo E.2).

### Tierras Raras

Caso particular es la buena correlación presente entre elementos correspondientes a tierras raras (REE), esperable dada la gran similitud en comportamiento geoquímico global de dicho grupo (Anexo E.4). Cabe señalar, también, la baja variabilidad total (varianza clr) que presenta este grupo, anexando al itrio ( $Y$ ), respecto al resto de parámetros estudiados (Tabla 14), así como también la baja variabilidad individual de los cocientes entre REE con respecto al resto de variables (Anexo E.3, E.6).

Por otro lado, es destacable como la correlación entre miembros de este grupo es progresivamente más acentuada entre los correspondientes más cercanos entre sí en la tabla

---

<sup>2</sup> “para con” sinónimo de “respecto a”.

periódica. Esto corresponde a una correlación sistemática y progresivamente menor entre tierras raras livianas (LREE) y pesadas (HREE) en función de los extremos de esta serie (Anexo E.4).

Por último, es interesante el quiebre en la progresión de correlación, descrita recientemente, que presenta el europio, con correlaciones respecto a otras tierras raras significativamente menores al resto de valores de correlación de este grupo (Anexo E.4). Esto se suma a la buena correlación del europio con  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , Sc, Ga (Anexo E.1 y E.3).

#### Hafnio-Zirconio y Tantalio-Niobio

El hafnio y el zirconio presentan una fuerte correlación entre ellos, a lo que se suma valores de correlación similares de estos elementos con el resto de parámetros estudiados, por separado, reflejando comportamientos similares

Un patrón similar presenta el tantalio y niobio, con una muy buena correlación entre ambos y correlaciones relativamente similares con respecto al resto de parámetros estudiados.

Además, estos cuatro elementos presentan buenas correlaciones entre ellos, lo cual se relaciona a la similitud en características químicas reflejado en su proximidad en la tabla periódica de los elementos (Anexo E.2, E.3 y E.5).

#### Uranio-Torio

Como es esperable, dada la similitud en características geoquímicas entre el uranio y torio, estos presentan una buena correlación entre ellos, en relación a los valores de correlación de estos elementos para con el resto de parámetros estudiados (Anexo E.2, E.3 y E.5).

#### Estroncio

El estroncio presenta una relativa baja variabilidad total (Tabla 14). Destaca la buena correlación que muestra respecto a elementos mayores, en especial con respecto a  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , Sc, Ga (Anexo E.2).

#### Rubidio y Cesio

Al igual que el estroncio, el rubidio presenta una relativa baja variabilidad global (Tabla 14), salvo que muestra correlaciones levemente distintas. Por un lado comparten una buena correlación con  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , Sc, Ga, pero a su vez destaca la fuerte correlación con  $K_2O$ , y en menor medida con  $Na_2O$  y Ba (Anexo E.1, E.2).

Por su lado, el cesio presenta una relativa alta variabilidad global (2.9% del total, Tabla 14) Se destaca la correlación que muestra con respecto al Rb y  $K_2O$ , en comparación la variabilidad del cesio para con el resto de parámetros (Anexo E.1, E.2).

#### Níquel y Cobalto

Es interesante notar como, tanto el níquel como el cobalto, presentan variabilidades globales significativamente pequeñas a las presentadas por otros elementos siderófilos-litófilos, minoritarios o trazas, tales como Sn, Ta y W. Por un lado las variabilidades del Ni y Co son menores a 1% del total cada una, en cambio la del resto de parámetros señalados rondan entre 1.6% a 2.4% (Tabla 14).

Por otro lado, estos elementos presentan una buena correlación entre sí, así como de ambos respecto a 'elementos formadores de roca'. Es rescatable también, la buena correlación que tienen ambos elementos con respecto al Sc y Ga. (Anexo E.5, E.6)

### Oro y Mercurio

Como es señalado al principio de esta sección, el oro concentra la mayor proporción de variabilidad sobre el total del sistema, con un 9.5% del total, y le sigue el mercurio con un 6.7%. No obstante, para el caso del oro, pese a una variabilidad respecto al resto de elementos significativamente elevada, es rescatable como dicha variabilidad es relativamente menor con respecto al *Cu* y *Hg*, lo cual es también distinguible con *Ag*, *Bi*, y *Mo*, dando cuenta de una mayor afinidad con respecto a estos elementos. Estos patrones pueden estar vinculadas fuentes comunes, o paragenéticas, entre dichos elementos (Anexo E.5, E.6)

### Carbono y Azufre

El carbono y el azufre presentan altas variabilidades totales, correspondiente a 5% y 6.7% respectivamente, sin embargo el carbono presenta una relativa mayor correlación con respecto a *CaO*, a diferencia del azufre para el cual no es constatable una correlación significativa respecto algún otro parámetro (Anexo E.1, E.2, E.3, E.5).

### Elementos Calcófilos

Secundariamente a las altas variabilidades totales presentadas por el oro, mercurio, carbono y azufre, los elementos preferentemente calcófilos correspondientes al cadmio, arsénico, antimonio, plomo, cobre, zinc, bismuto y molibdeno presentan gran parte de la variabilidad total, con varianzas, por parámetro, de entre 2.4% a 5%, y un total sumado de 26.6% de la variabilidad total del sistema (Tabla 14). A este grupo puede ser añadido, parcialmente, el mercurio.

Correlaciones destacables, en relación a la alta variabilidad entre miembros de este grupo, son la existente entre *As* y *Sb*, y entre *Pb* y *Zn*. También es rescatable la relativa mayor correlación que presenta *Hg* para con el *Cu* y *Sb* en función de la gran variabilidad respecto al resto de parámetros (Anexo E.5, E.6).

#### 5.5.3.2 Set de datos A

Luego de realizar el procedimiento de detección de composiciones ‘anómalas’ por medio de distancias de Mahalanobis robustas, y la correspondiente separación de sub sets de datos, es posible analizar el set de datos A propuesto como línea base geoquímica de Hoja La Serena. Para ello es útil inspeccionar la matriz de variación de dicho set de datos (Anexo F).

En primera instancia es posible observar que la varianza total del sistema disminuye, como es esperable, luego de la separación de composiciones ‘anómalas’. La varianza total del set de datos A (16.6337) corresponde al 77% de la varianza total de la base de datos modificada (21.6149) (Tabla 14), es decir una reducción del 23% de la variabilidad del sistema (Tabla 15). Por otro lado, es posible observar como la distribución de la variabilidad del sistema entre los diferentes parámetros, tanto en el Set de Datos A (SDA) como en la Base de Datos Modificada (BDM), son estrechamente similares. En ambos sets de datos la mayor parte de la variabilidad del sistema la presenta el oro, mercurio, azufre, carbono y el cadmio, que en conjunto poseen alrededor del 30% de la variabilidad total.

Con el objeto de medir el efecto del procedimiento de determinación de composiciones ‘anómalas’, es posible calcular indicadores adicionales. Por un lado, para cuantificar cuanto afecta este procedimiento a cada parámetro, se calcula el porcentaje de variabilidad en el SDA con respecto a la variabilidad presentada en BDM, esta última representa el 100%. De esta manera se evidencia que el parámetro que más redujo su varianza es el talio (*Tl*) con un 85 % de reducción de su variabilidad, al cual lo sigue el calcio (*CaO*) con una reducción de 55%, y luego un amplio grupo de parámetros con una reducción de entre el 46% al 41% entre los cuales se encuentran el bario, manganeso, estroncio, cobalto, y variadas tierras raras (Tabla 15). Así

mismo, el zirconio, torio y mercurio fueron los parámetros que menos reducen su variabilidad, con una reducción aproximada de 8% cada uno.

**TABLA 12:** Varianzas totales, por parámetro, en coordenadas clr y varianza total de la set de datos A (sin considerar composiciones ‘anómalas’ asignadas a set de datos B ). Parámetros ordenados de menor a mayor porcentaje de varianza respecto al total de Set de Datos A (SDA). %BDM: porcentaje respecto varianza de mismo parámetro en Base de Datos Modificada (Tabla 14). Contribución reducción varianza BDM – SDA (%): porcentaje de aporte a la reducción de la varianza total entre Base de Datos Modificada (BDM) y Set de Datos A (SDA), se calcula según Ecuación 36

Orden	Parámetro	Varianza en coordenadas clr	% varianza total SDA	% BDM	Contribución reducción varianza BDM – SDA (%)
1	<b>Tl</b>	0.0322	0.2	15.4	3.6
2	<b>Tb</b>	0.0325	0.2	55.8	0.5
3	<b>Gd</b>	0.0342	0.2	62.3	0.4
4	<b>Ho</b>	0.0343	0.2	55	0.6
5	<b>Dy</b>	0.0353	0.2	55.3	0.6
6	<b>Ga</b>	0.0356	0.2	76.6	0.2
7	<b>Eu</b>	0.0357	0.2	68.9	0.3
8	<b>Sm</b>	0.0358	0.2	61.6	0.4
9	<b>Y</b>	0.0366	0.2	57.9	0.5
10	<b>Er</b>	0.0384	0.2	56.7	0.6
11	<b>Tm</b>	0.0395	0.2	54.5	0.7
12	<b>Nd</b>	0.0433	0.3	64.5	0.5
13	<b>Yb</b>	0.0435	0.3	59.6	0.6
14	<b>Lu</b>	0.0449	0.3	58.5	0.6
15	<b>Pr</b>	0.0497	0.3	68.5	0.5
16	<b>Sc</b>	0.0527	0.3	58.6	0.7
17	<b>Ce</b>	0.0538	0.3	67.4	0.5
18	<b>La</b>	0.0552	0.3	68.4	0.5
19	<b>Co</b>	0.0555	0.3	54	0.9
20	<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.0604	0.4	74.8	0.4
21	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.0761	0.5	75.4	0.5
22	<b>Sr</b>	0.0862	0.5	55.1	1.4
23	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.0905	0.5	70.5	0.8
24	<b>P<sub>2</sub>O</b>	0.0913	0.5	71.3	0.7
25	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.0928	0.6	60.2	1.2
26	<b>MnO</b>	0.0942	0.6	53.6	1.6
27	<b>MgO</b>	0.101	0.6	68.5	0.9
28	<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.117	0.7	77	0.7
29	<b>Rb</b>	0.1299	0.8	70.9	1.1
30	<b>Ni</b>	0.1447	0.9	76.4	0.9
31	<b>CaO</b>	0.1496	0.9	44.9	3.7
32	<b>Ba</b>	0.1696	1.0	53.4	3.0
33	<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.1833	1.1	76.4	1.1
34	<b>V</b>	0.1994	1.2	65	2.2
35	<b>Se</b>	0.246	1.5	68.2	2.3
36	<b>U</b>	0.254	1.5	85.9	0.8
37	<b>Sn</b>	0.298	1.8	87.6	0.8
38	<b>Nb</b>	0.3218	1.9	91.1	0.6
39	<b>Mo</b>	0.3527	2.1	67.4	3.4

Orden	Parámetro	Varianza en coordenadas clr	% varianza total SDA	% BDM	Contribución reducción varianza BDM – SDA (%)
40	<b>Th</b>	0.3699	2.2	92.3	0.6
41	<b>Ag</b>	0.3772	2.3	68.1	3.5
42	<b>Ta</b>	0.4116	2.5	89.5	1.0
43	<b>Hf</b>	0.4425	2.7	90.7	0.9
44	<b>Bi</b>	0.4436	2.7	74.3	3.1
45	<b>Cu</b>	0.4447	2.7	62.3	5.4
46	<b>W</b>	0.4641	2.8	88.9	1.2
47	<b>Zr</b>	0.4787	2.9	91.6	0.9
48	<b>Zn</b>	0.5034	3.0	81.7	2.3
49	<b>Cs</b>	0.5249	3.2	85.1	1.8
50	<b>As</b>	0.5708	3.4	74.8	3.9
51	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.5763	3.5	88	1.6
52	<b>Sb</b>	0.6234	3.7	83.2	2.5
53	<b>Pb</b>	0.6358	3.8	88.8	1.6
54	<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	0.8282	5.0	76.3	5.2
55	<b>Cd</b>	0.8474	5.1	78.8	4.6
56	<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	1.024	6.2	70.6	8.6
57	<b>Hg</b>	1.3372	8.0	91.7	2.4
58	<b>Au</b>	1.683	10.1	82	7.4
<b>Varianza Total</b>		16.6337	-	77	-

Como segundo indicador de impacto es posible calcular la contribución en a la reducción de la varianza total del sistema por parte de cada parámetro. Esto según a la siguiente operación:

$$[\text{Reducción varianza BDM – SDA (\%)}] = \frac{\text{Var}(\text{clr} \cdot x_{i(\text{BDM})}) - \text{Var}(\text{clr} \cdot x_{i(\text{SDA})})}{\text{totVar}(\text{BDM}) - \text{totVar}(\text{SDA})} \cdot 100 \quad (25)$$

De la Tabla 15 se observa que los parámetros que más aportan a la reducción de la variabilidad son el azufre, oro, cobre y carbono que en conjunto contribuyen con aproximadamente el 27% de la reducción de variabilidad. Cabe notar de la Tabla 12 que, por lo general, los parámetros que ven menos reducida su varianza son precisamente aquellos que presentan un mayor porcentaje de la varianza total del sistema y así mismos los que más aportan a la reducción de la variabilidad total (porción inferior de la Tabla 12).

En cuanto a las relaciones entre parámetros, inspeccionando la matriz de variación del set de datos A (Anexo F), es posible verificar que se mantienen las mismas relaciones entre parámetros observadas en la matriz de variación de la base de datos modificada.

#### 5.5.4 Matriz de correlación

Una representación gráfica de la correlación entre variables, y a su vez de la variabilidad de las mismas respecto al centro composicional, se logra mediante el Biplot composicional (sección 5.5.5). Este es construido a partir de la matriz de varianza-covarianza de datos clr-transformados. Sin embargo, al emplear set de datos voluminoso puede ocurrir que gran parte de la variabilidad del sistema no sea representada. Es por ello que obtener la matriz de correlación de datos clr-transformados, construida en base a la misma matriz varianza-covarianza, resulta útil para visualizar en mayor detalle las correlaciones entre parámetros,

complementando las observaciones a partir de la matriz de variación, y también como objeto de comparación con respecto a la matriz de correlación clásica de datos sin transformar (en el simplex), con tal de evaluar el efecto de las transformaciones log-cocientes en la análisis exploratorio de datos y sus posibles implicancias en las interpretaciones.

#### 5.5.4.1 Base de datos modificada clr-transformada

Como se señala anteriormente, la matriz de variación informa de la variación del cociente entre partes de manera tal que varianzas cercanas son indicativas de correlación positiva entre las partes, sin embargo, esta no entrega información referente a correlaciones negativas o bien posibles correlaciones positivas enmascaradas por una alta variabilidad, o al menos estas no son inmediatamente interpretables. En ese sentido la matriz de correlación de datos clr-transformados (MCorr-clr) complementa la matriz de variación mostrando relaciones entre las partes que no son evidentes en esta última.

Tal es el caso de la matriz de correlación de la base de datos modificada de datos clr-transformados (Anexo G), en donde se puede verificar que se preserva las buenas correlaciones descritas para la matriz de variación (sección 5.5.3.1). Así mismo se observa como la matriz de correlación enfatiza la correlación entre algunos pares de variables, como es el caso la correlación entre ( $Na_2O - SiO_2 - Al_2O_3$ ); ( $Fe_2O_3 - TiO_2 - V$ ); ( $Sc - Mg$ ); ( $Zr - Hf - Nb - Ta$ ). Por otro lado se logra visibilizar algunas correlaciones negativas, no observables en la matriz de variación, tales como *Rb* respecto a  $Fe_2O_3$  y *V*; *Cs* respecto a *Zr, Hf, V, W* o *Mo* respecto a  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$ , entre otros.

Es también interesante como el azufre, un elemento que presenta una alta variabilidad, presenta correlaciones marcadamente negativas respecto a las tierras raras y levemente menores respecto a  $Fe_2O_3 - TiO_2$ , y por otro lado presenta una relativa buena correlación positiva con el  $C_{Total}$ , en menor medida con *CaO*, y con respecto a elementos de comportamiento calcófilo como *Mo-Cu-As*.

También emergen correlaciones ‘enmascaradas’ en la matriz de variación tales como las correlaciones positivas entre *Cd - Zn - Sb - As - Ag - Cu - Pb*, entre las que destacan la correlación entre *Cd - Zn - Pb - As*. De la misma manera se observa una correlación positiva entre *Au* y *Hg* y *Cu*.

#### 5.5.4.2 Base de datos modificada original

Con tal de evaluar el impacto del empleo de técnicas de análisis de datos composicionales (CoDA) se obtiene la Matriz de Correlación de la base de datos modificada original (MCorr-BDMorg), esto es, datos sin transformar (‘crudos’, en el simplex) (Anexo H) la cual es contrastada con la matriz de correlación de datos clr-transformados (Sección 5.5.4.1, Anexo G), ambos de la base de datos modificada (sin separación de sub sets de datos).

En términos generales se presentan relaciones de correlación similares a las observadas en la matriz de correlación de datos clr-transformados, no obstante, ciertas de estas relaciones son significativamente diferentes. Esto se observa, por ejemplo, en correlaciones marcadamente negativas, como las de *CaO* respecto a  $SiO_2 - Al_2O_3$  que en la MCorr-BDMorg se encuentran en el orden de -0.65, en cambio en la MCorr-clr estas correlaciones pasan a positivo con valores del orden de +0.15, dando cuenta de una leve correlación positiva. Algo similar ocurre con el *MgO* el cual presenta correlaciones negativas o nulas con respecto a  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  en MCorr-BDMorg (-0.15 y +0.07 respectivamente), en cambio en MCorr-clr estas relaciones pasan a ser positivas (+0.32 y +0.44 respectivamente), concordante con una relativa baja variabilidad de los cocientes entre estas partes mostrada en la Matriz de Variación. Véase también los cambios de correlación de *Sc* y *Sr* respecto a  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$ , respectivamente

En otros casos se observa como el valor del coeficiente de correlación es de menor en magnitud. Esto es ilustrativo para la relación que posee el  $Mo$  con el  $Co$  con una correlación positiva muy marcada (+0.86) MCorr-BDMorg que pasa a correlación débil o nula (+0.11) en MCorr-clr. El mismo comportamiento se verifica tanto para  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  con respecto a  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $C_{Total}$  y  $V$  respectivamente. También ocurre lo contrario, correlaciones que aumentan en magnitud, tal es el caso de  $Mo$  con respecto a  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$ ;  $Cr_2O_3$  respecto a  $Zn$  y  $As$ ; y una gran variedad de casos de relaciones comprendidas en la sub-matriz formada entre los elementos  $Ga$  al  $Lu$  (filas) y  $Mo$  a  $Hg$  (columnas) en MCorr-BDMorg (Anexos H.5, H.6).

### 5.5.5 Biplots composicionales

A partir de la base de datos modificada se obtiene, mediante el software CoDaPack, dos Biplot composicionales los cuales contienen los 3 primeros ejes principales, formando los 2 planos que albergan la mayor proporción de la variabilidad del sistema. Por un lado, en la Figura 9 se presenta los dos primeros ejes principales los cuales forman un plano que contiene 32.7% de la variabilidad, y por otro lado la Figura 11 presenta el segundo y tercer eje principal conformando un plano que alberga el 14.9% de la variabilidad. En conjunto ambos planos representan el 47.6% de la variabilidad total del sistema. En estas figuras se grafican exclusivamente las variables, sin disponer de los individuos (realizaciones, muestras), las cuales son representadas en las Figuras 10 y 11 respectivamente.

#### 5.5.5.1 Nube de las variables

Como primeras observaciones se desprende como tanto en la Figura 9 como 11 se verifica como la variabilidad del sistema está dominada, en primera instancia, por el oro, y secundariamente por el mercurio, azufre y carbono. Como un segundo grupo de alta variabilidad se observa, concordante a la matriz de variación, al formado por elementos preferente mente calcófilos (cadmio, arsénico, antimonio, plomo, cobre, zinc, bismuto y molibdeno).

A partir del Biplot de las Figuras 9 y 11 es posible agrupar las variables estudiadas:

#### Grupo 1

En términos de agrupamiento se desprende, de ambos Biplot, una estrecha relación entre  $Au$  y  $Hg$ , a los cuales se le puede anexar el grupo formado por  $Cu, Mo, Bi, Sb, Ag$ , y con cautela  $W$  y  $S_{Total}$ , todos en el primer cuadrante de ambas figuras en sentido horario. Este grupo presenta un amplio rango de variabilidad respecto al centro composicional (origen de Biplot)

#### Grupo 2

Por su lado, en el segundo cuadrante de la Figura 9 y cuarto de la Figura 11, pueden ser agrupados  $Cd, Zn, Pb, As$ , y  $Cs$ .

#### Grupo 3

Siguiendo en sentido horario, en la Figura 9, adyacente al grupo anterior, se puede observar un tercer grupo de menor variabilidad conformado por elementos mayores propios de ‘minerales formadores de roca’ dados por  $SiO_2, Al_2O_3, K_2O, Na_2O, MgO, CaO$ , que se encuentra en el segundo cuadrante y parcialmente en el tercer cuadrante. Es posible anexar a este grupo  $MnO, Ga, Rb, Sr, Sc, Ni, Tl, Ba$ , y con cautela, el  $C_{Total}, Se$  y  $Eu$ . Este grupo presenta un rango de variabilidad de sus miembros relativamente amplio. Por su parte, en el tercer a cuarto cuadrante de la Figura 11, se observa como el grupo recientemente descrito se sobrepone parcialmente al Grupo 2 constituido por  $Cd, Zn, Pb, As$ . Finalmente, como un posible subgrupo, podemos



mencionar el determinado el  $CaO$  y  $C_{Total}$ , bien marcado en la Figura 11, al cual podría ser anexado el  $Ba$ .

#### Grupo 4

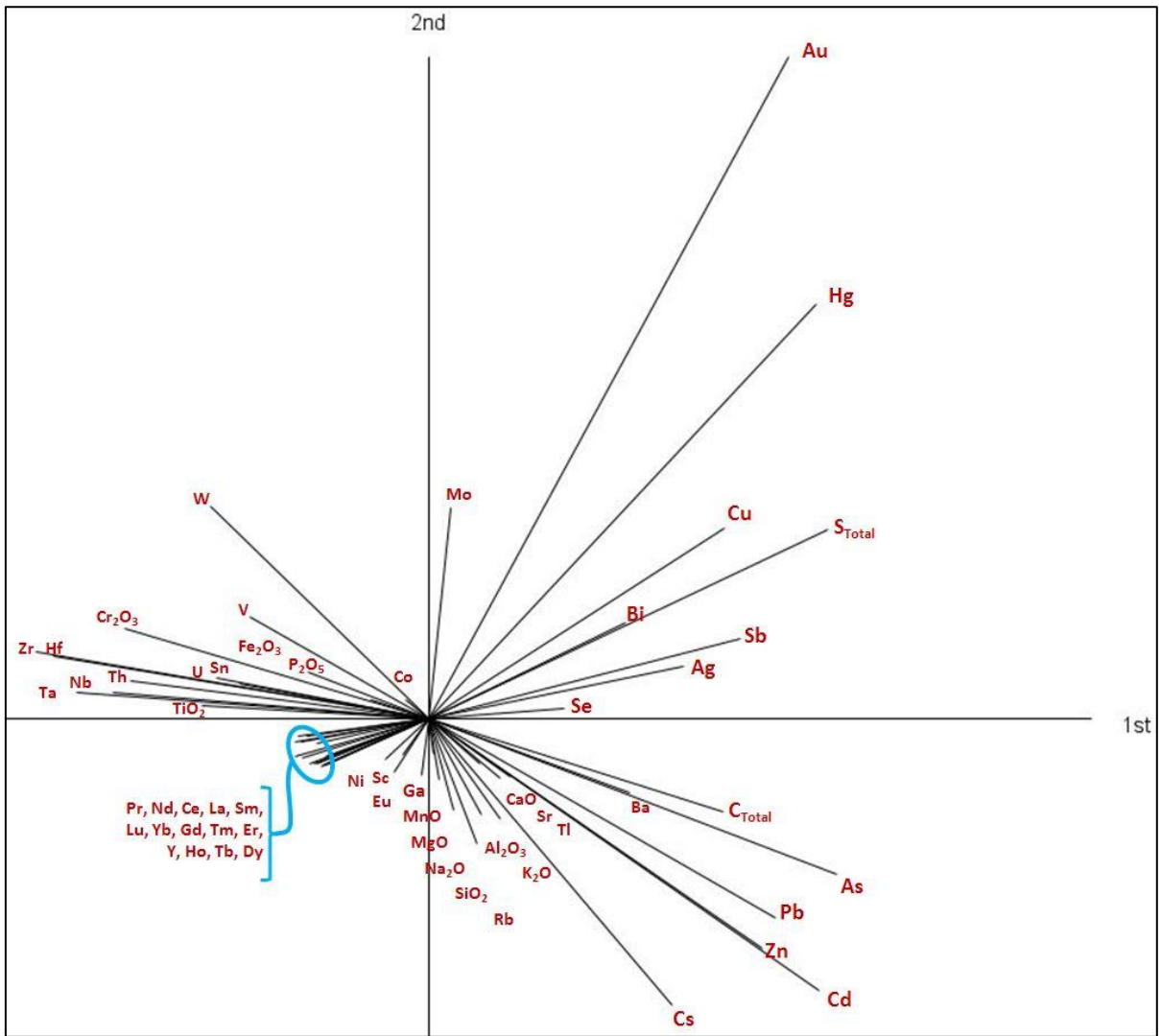
Aun en la Figura 9, y siguiendo el sentido horario, se observa un cuarto grupo, compacto, constituido por tierras raras de la serie de lantánidos a los cuales se puede agregar el Itrio ( $Y$ ). Este grupo se observa en el tercer cuadrante de la Figura 9, en donde resulta interesante señalar el leve desmarque que presenta el europio ( $Eu$ ), en sentido anti horario, acercándose levemente al grupo conformado por elementos mayores. En el cuarto cuadrante de la Figura 11, este grupo de tierras raras se encuentra sobrepuesto a los dos últimos grupos principales señalados (Grupo 2 y Grupo 3).

#### Grupo 5

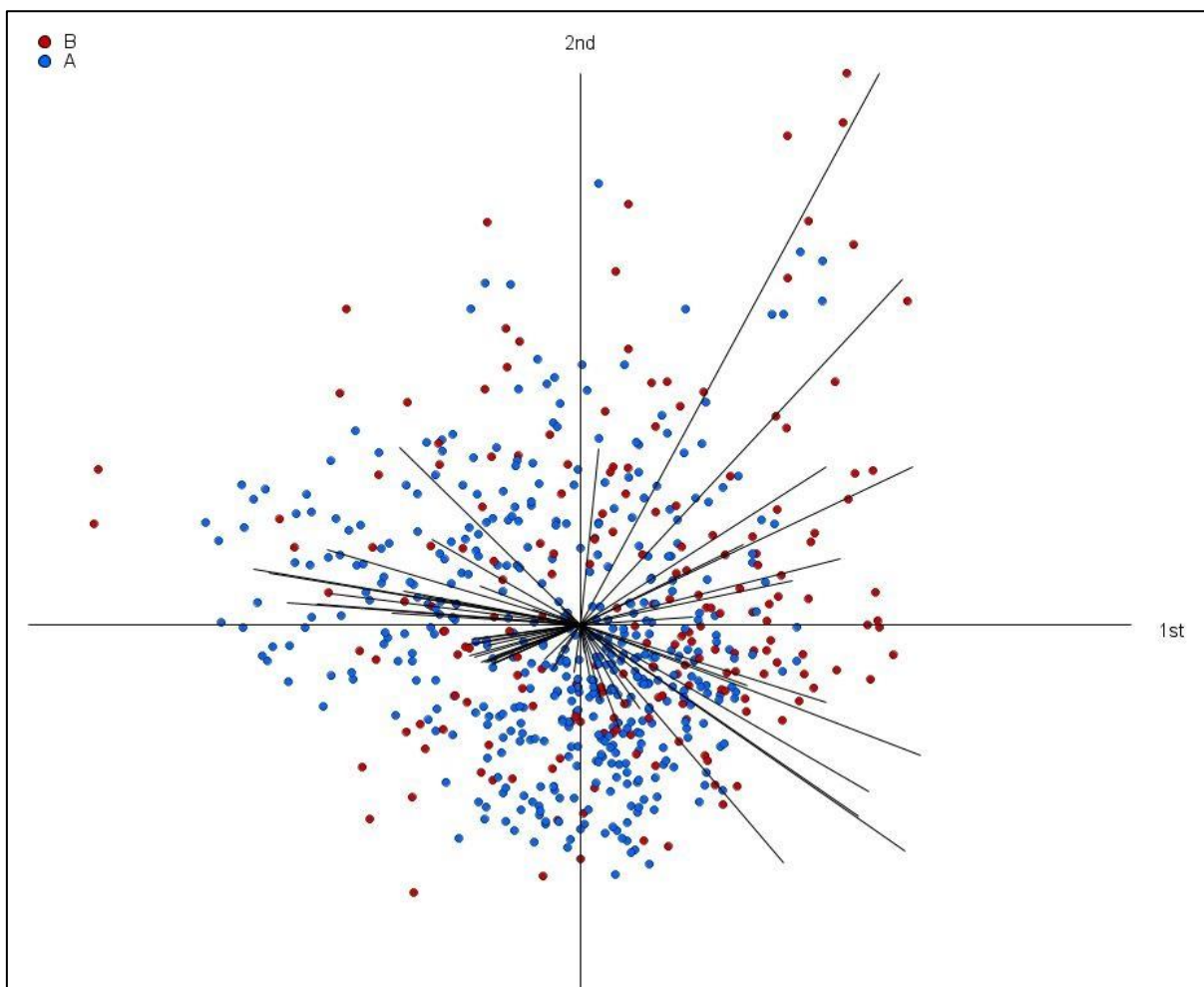
Por último, es posible identificar un quinto grupo, de amplio rango de variabilidad, constituido por hierro, vanadio, cromo, titanio, niobio, tantalio, zirconio, hafnio, uranio, torio, fosfato, y en menor medida pueden ser incorporados el estaño, wolframio, cobalto y selenio. Este grupo es distinguible, íntegramente, en el cuarto cuadrante de la Figura 9, pero, por otro lado, en la Figura 11, se encuentran sobrepuesto con el Grupo 1, de mayor variabilidad, marcado por la presencia de oro y mercurio, y en menor medida cobre, molibdeno, antimonio, plata. Esto en el primer a cuarto cuadrante de dicha figura. Cabe señalar que el grupo recién definido (Grupo 5) concuerda con elementos de comportamiento preferente litófilo a siderófilo, y en menor medida calcófilo según sea el caso, con preferencia a ocupar posiciones estructurales, o como remplazo de estas, en' minerales formadores de roca' tales como piroxenos, anfíbolos, micas, o granates, entre otros; en minerales densos, correspondiente a óxidos de hierro-titanio, como la magnetita, ilmenita, rutilo, hematita; o bien en minerales accesorios, densos, como zircón, titanita (Salminen et.al., 2005).

**TABLA 13:** Agrupaciones de variables a partir de Biplot composicional de Figuras 9 y 11. Parámetros en rojo son los que definen cada grupo. Parámetros entre paréntesis no son fácilmente agrupables y/o pueden estar asociados a más de un grupo.

<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>	<b>Grupo 4</b>	<b>Grupo 5</b>
<b>Au</b>	<b>Cd</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>REE</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
<b>Hg</b>	<b>Zn</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Y</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>
<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>		<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>
<b>Mo</b>	<b>As</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>		<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
<b>Bi</b>	<b>Cs</b>	<b>CaO</b>		<b>V</b>
<b>Sb</b>		<b>Rb</b>		<b>Zr</b>
<b>Ag</b>		<b>Sr</b>		<b>Hf</b>
<b>(W)</b>		<b>Ba</b>		<b>Nb</b>
<b>(S<sub>TOTAL</sub>)</b>		<b>Tl</b>		<b>Ta</b>
		<b>MgO</b>		<b>U</b>
		<b>MnO</b>		<b>Th</b>
		<b>Ga</b>		<b>Co</b>
		<b>Sc</b>		<b>Sn</b>
		<b>Ni</b>		<b>(W)</b>
		<b>(C<sub>TOTAL</sub>)</b>		<b>(Se)</b>
		<b>(Eu)</b>		
		<b>(Se)</b>		



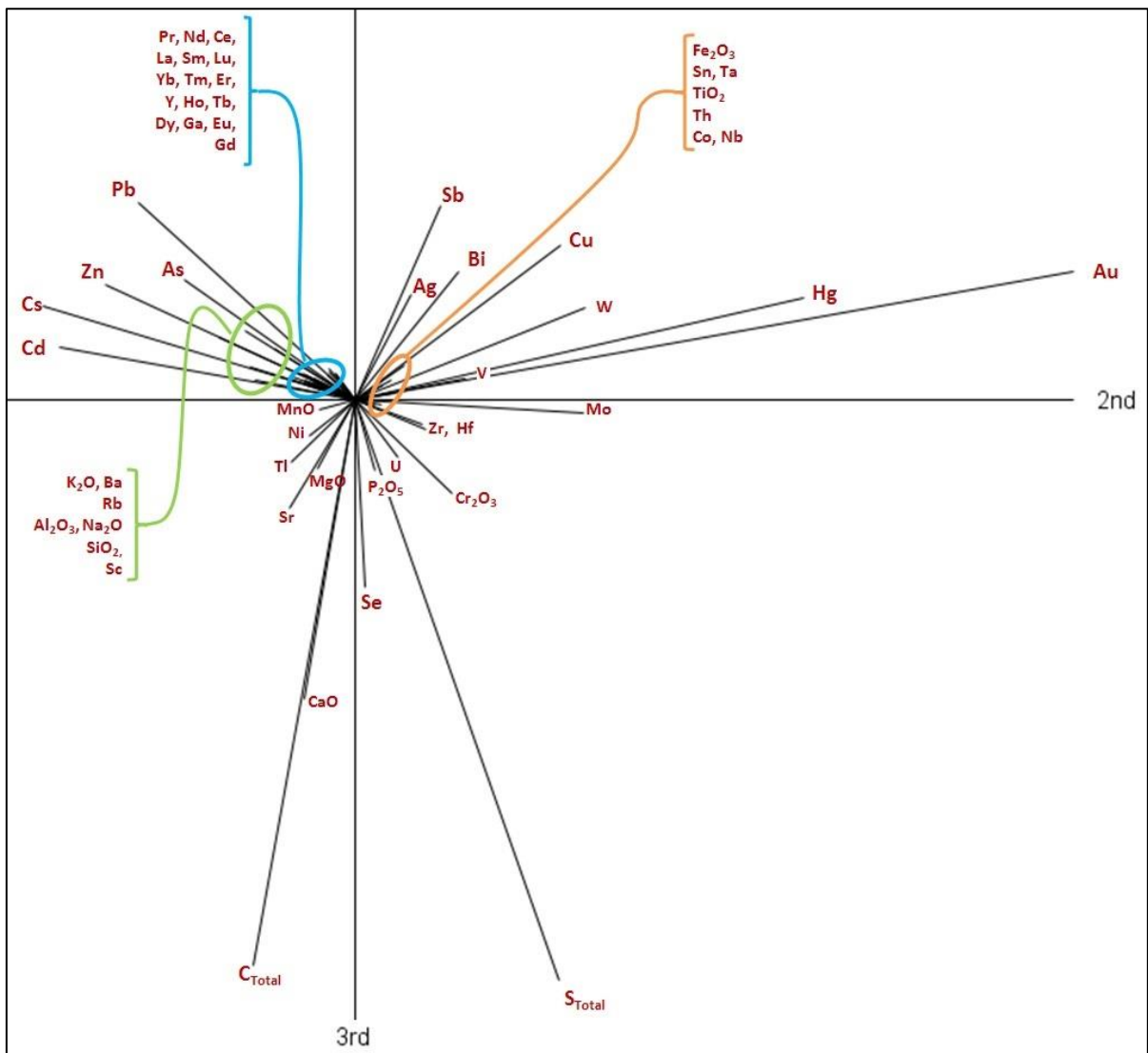
**FIGURA 9:** Biplot composicional de los 2 primeros factores principales. Este plano contiene el 32.7% de la variabilidad total. Ejes se encuentran truncados a conveniencia para efectos de representación.



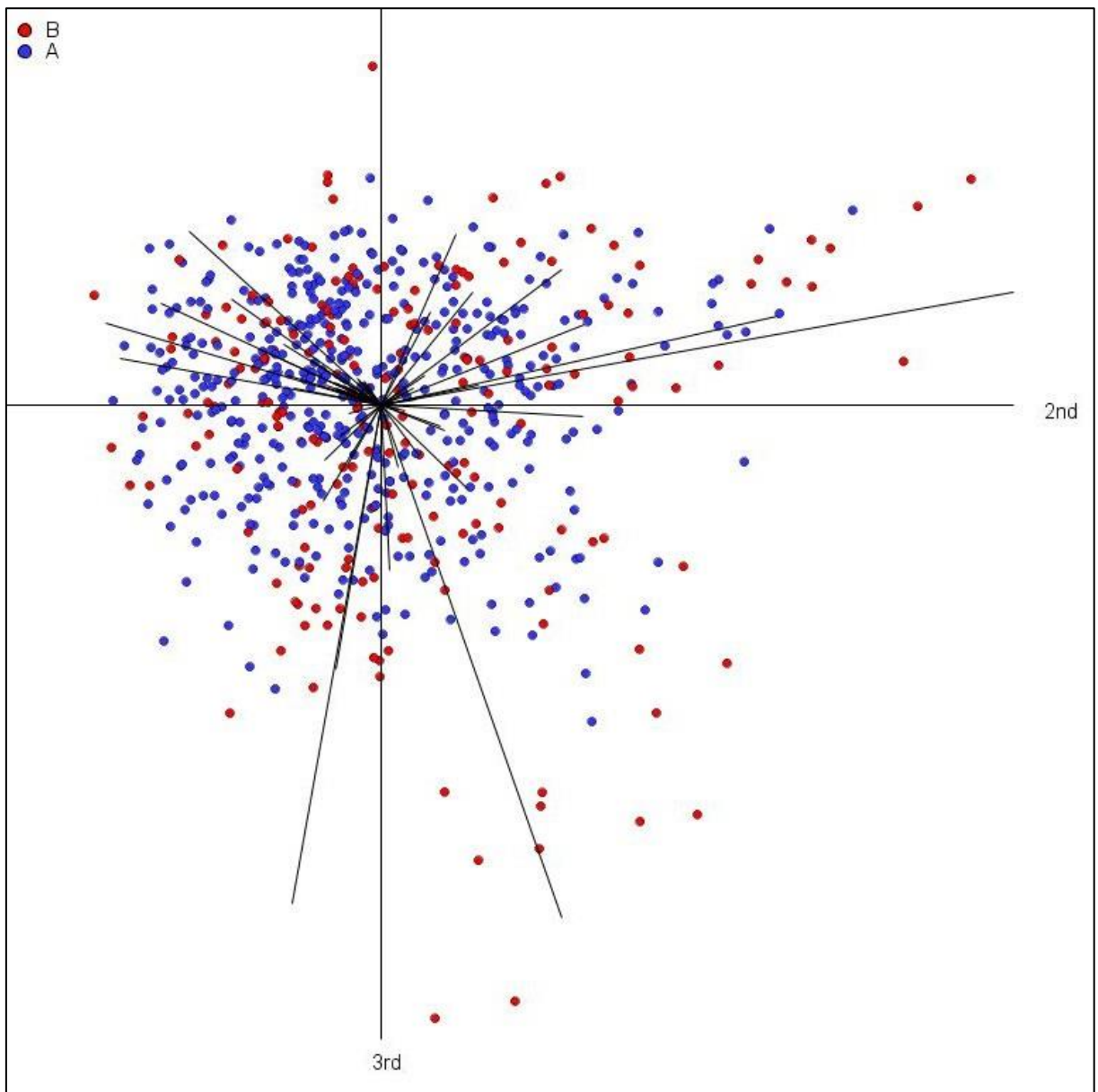
**FIGURA 10:** Observaciones (muestras) graficadas en el plano generado por los 2 primeros ejes factoriales composicionales. Rotulación de variables (vectores) en Figura 9. Ejes se encuentran truncados a conveniencia para efectos de representación. Este plano contiene el 32.7% de la variabilidad total

#### 5.5.5.2 Nube de los individuos

Observando las Figuras 10 y 12, correspondientes a la proyección de los individuos (realizaciones, muestras) sobre los planos generados por los 3 primeros ejes principales, Figuras 9 y 11 respectivamente, se logra distinguir que la distribución de las muestras asignadas tanto al set de datos A como B, es homogénea. Es decir, no es posible aseverar, consistentemente, que uno u otro componente (variable) influye directamente en la determinación a alguno de los dos sets de datos. Salvo las muestras pertenecientes al set de datos B que se encuentran en el margen inferior de la Figura 12, las cuales al parecer pueden estar ligadas a valores elevados de azufre.



**FIGURA 11:** Biplot composicional del segundo y tercer eje factorial. Este plano contiene el 14.9% de la variabilidad total. Ejes se encuentran truncados a conveniencia para efectos de representación.



**FIGURA 12:** Observaciones (muestras) graficadas en el plano generado segundo y tercer eje factorial composicional. Rotulación de variables (vectores) en Figura 11. Ejes se encuentran truncados a conveniencia para efectos de representación. Este plano contiene el 14.9% de la variabilidad total

## 6 DISCUSIONES

Las interpretaciones descritas a continuación son el resultado del análisis de las herramientas estadísticas presentadas en el apartado de resultados, así como incorporadas en sección de anexos, en conjunción de los análisis e interpretaciones de trabajos anteriores, o en paralelo, realizados por la Unidad de Geoquímica del Servicio Nacional de Geología y Minería, tales como Astudillo (2011), Miralles (2013 y Espinoza y colaboradores (in prep.). Además, se emplea bibliografía variada para complementar y sustentar dichas interpretaciones.

### 6.1 DETERMINACIÓN DE COMPOSICIONES ‘ANÓMALAS’

Luego de determinados los dos sub sets de datos (A y B), realizado mediante discriminación estadística de distancias de Mahalanobis robustas, es deseable realizar un análisis crítico de los posibles factores determinantes en la asignación de cada muestra a alguno de estos dos grupos. Para ello cabe recordar que el método empleado determina una composición anómala en base una distancia euclidiana ponderada por un factor de varianza (matriz de varianzas-covarianzas), en un espacio geométrico multivariable  $\mathbb{R}^{D-1}$ , ( $D$ : número de parámetros), de datos il-transformados (Secciones 2.4, 3.4). Por esta razón, la incorporación de un factor de varianza, el método es sensible a anomalías causadas por parámetros con concentraciones típicas de menor magnitud, elementos menores y trazas, respecto a elementos mayoritarios. De esta manera se atenúa la mayor contribución proporcional a la distancia aportado por elementos mayores, principalmente  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  y  $Fe_3O_2$ , los cuales dominan el cálculo de distancias en un caso euclidiano clásico.

Bajo la misma lógica, es esperable que parámetros que presentan mayores varianzas sean determinantes en el cálculo de distancias de Mahalanobis. Los parámetros que dominan la variabilidad del sistema, i.e. sobre el 2% de la variabilidad total cada uno (Tabla 14), tienen en común ser propios de enriquecimiento en zonas de alteración hidrotermal, zonas de mineralización económica, y/o fases minerales densas fácilmente fraccionadas por cambios en los regímenes hidrodinámicos, entre otros factores. Esto es reportado en trabajos anteriores en el área e estudio, en los cuales se plantean posibles factores determinantes de la impronta geoquímica de sedimentos fluviales activos de las cuencas del río Limarí (Astudillo, 2011) y río Elqui (Miralles, 2013) en función de anomalías de diferentes agrupaciones de compuestos y/o elementos.

Integrando lo señalado en ambos estudios, los principales factores determinantes de geoquímica de sedimentos fluviales en las cuencas de los ríos Limarí y Elqui son:

1. Litología: principalmente el contraste entre unidades intrusivas y sedimentarias del paleozoico en alta montaña, versus unidades volcanosedimentarias e intrusivas del cretácico en media y baja montaña, limitado por sistema de fallas Vicuña y Tuluahuén.
2. Zonas de alteración hidrotermal y/o mineralización de interés económico. Destaca la signatura de alteración a escala regional en alta montaña, afectando unidades paleozoicas. Estas signaturas son observables en la geoquímica de sedimentos de los ríos Hurtado, Elqui y Turbio, con concentraciones elevadas de metales y metaloides tales como  $Cd$ ,  $As$ ,  $Zn$ ,  $Pb$ , asociadas a mineralización del tipo epitermal. A esto se suman zonas de alteración diseminadas en las cuencas sobre litologías Mesozoicas, asociadas comúnmente a diferentes distritos mineros declarados, con mineralización del tipo pórfido cuprífero, vetiforme, mesotermal, etc.
3. Geomorfología y/o estructuras: cambios topográficos abruptos dadas condiciones geomorfológicas y estructurales conllevan cambios importantes en

regímenes hidrodinámicos lo cual afecta a la segregación de fases minerales densas.

4. Confluencia de torrentes: Efectos de dilución-concentración y cambios en regímenes hidrodinámicos.
5. Acumulación de material orgánico en riberas de cauces.
6. Actividad antrópica:
  - Embalses: cambios abruptos en el régimen hidrodinámico
  - Actividad minera: tranques de relaves próximos a cauces, pilas de lixiviación, drenaje ácido, contaminación eólica por material particulado, etc.
  - Agricultura y ganadería: Empleo de pesticidas y fertilizantes, desechos fecales, etc.
  - Urbanización: descarga de aguas servidas, material particulado, etc.

De aquellos factores se desprende que las fuentes atribuibles a composiciones ‘anómalas’ se distribuyen ampliamente en la extensión de la Hoja la Serena en una gran amplitud de escalas (local a regional). Esto es concordante con la aparente distribución aleatoria de muestras ‘outliers’ en el presente estudio distinguible en la Figura 8 (sección 5.4). En aquella figura, y tomando en cuenta los factores señalados, no es posible aseverar, a primera instancia y a escala regional, un control litológico en la determinación de composiciones ‘anómalas’.

No obstante, ciertas zonas no estudiadas en los trabajos anteriores (en Astudillo 2011 y Miralles 2013) muestran una llamativa concentración de puntos de muestreo en condición de ‘outlier’. Ello vuelve interesante el análisis de estos sectores considerando la baja presencia de posibles fuentes de anomalías tales como zonas de mineralización y alteración, yacimientos minerales, etc. Estas zonas corresponden ‘Altos de Talinay’, cordón montañoso en el borde costero al suroeste de la Hoja La Serena, y la planicie litoral entre la bahía de Guanqueros y río Limarí adyacente al este de Altos de Talinay. Así también el área señalada es descrita en Espinoza y colaboradores (in prep) con comportamiento diferenciado y como área de posibles prospectos de yacimientos de tipo IOCG, en específico del tipo Hierro-Apatito.

El primer sector, Altos de Talinay, comprende principalmente al Complejo Plutónico Altos de Talinay y al Complejo Metamórfico el Choapa, unidades de edades Paleozoica a Triásico las cuales se caracterizan por una petrología marcadamente metamórfica. En cuanto a la planicie litoral señalada, esta se encuentra principalmente constituida por la Formación Coquimbo, unidad sedimentaria marina, de débil litificación, del Mioceno-Eoceno (Anexo C).

Para evaluar la posible influencia de la litología de dichos sectores en la determinación de composiciones (muestras) ‘anómalas’, se seleccionan puntos de muestreo circunscritos por las litologías mencionadas, o bien directamente influenciadas por estas dada la dirección de la escorrentía de los cauces, sin discriminar a que sub set de datos corresponden (A o B) (Figura 13).

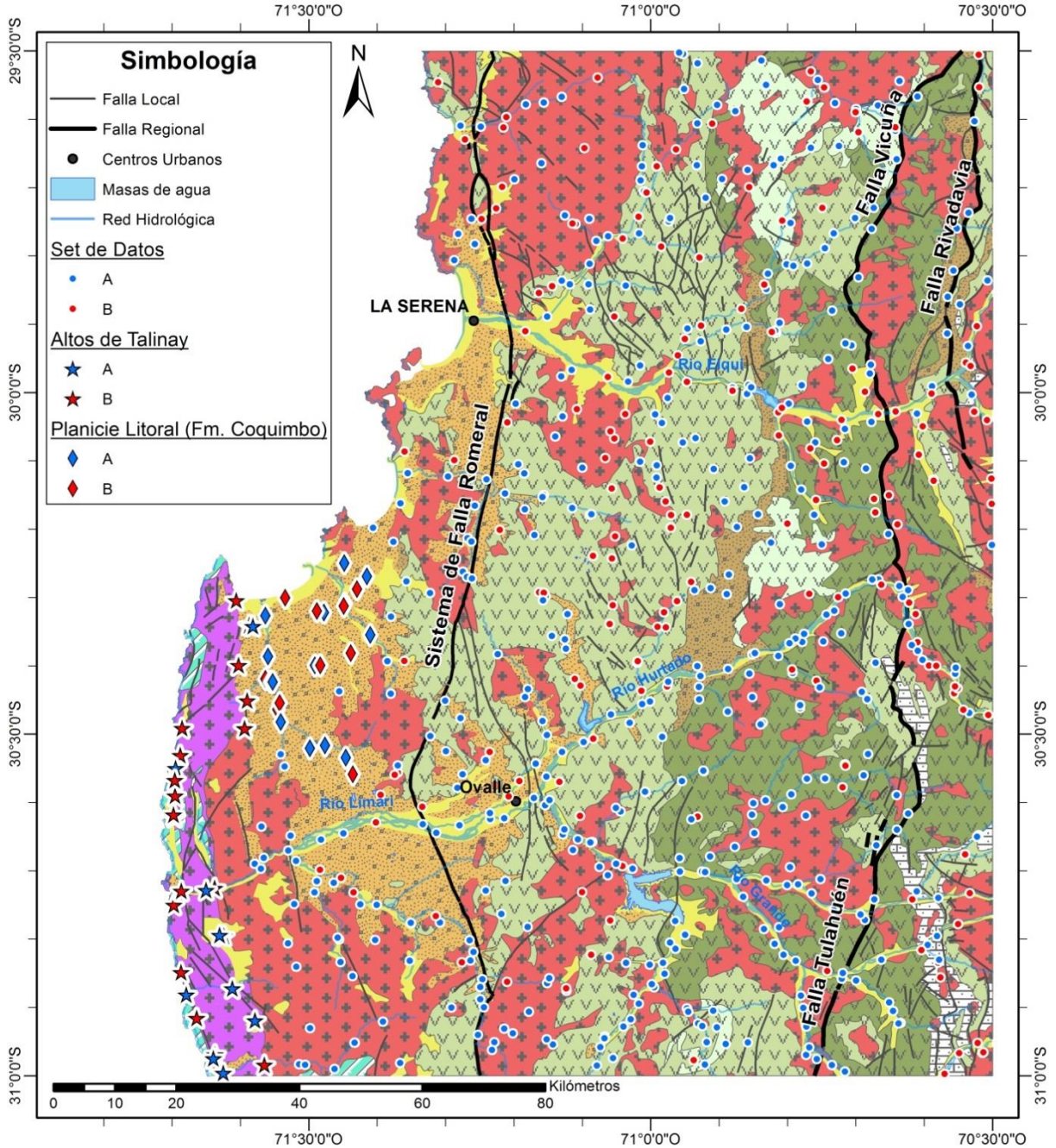
Para aquella selección de muestras se calcula su media geométrica por parámetro las cuales son comparadas respecto al vector representativo de línea base (sección 5.5.2 - Tabla 13). Se asume que los parámetros que más contribuyen a amplificar las distancias de Mahalanobis respecto al centro composicional, y con ello la determinación de una composición outlier, son aquellas que porcentualmente se encuentran más alejados del correspondiente valor de línea base, tanto sobre o bajo éste.

En la Tabla 17 se dispone de la media geométrica, por parámetro, de los grupos de muestras seleccionadas tanto del sector de Altos de Talinay como de planicie litoral. Estas medidas se



comparan con los respectivos valores del vector representativo de línea base mediante el cálculo del cociente entre ambas partes. Se destacan los valores un 40% por bajo y sobre el respectivo valor de línea base. Se desprende que las anomalías de estos dos sectores son producto de, por un lado, las altas concentraciones de elementos propios de fases minerales densas, estos son el *Zr, Hf, Nb, Ta, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (Sn)*, y las bajas concentraciones de elementos propios de mineralización polimetálica como lo son *Ag, Cu, Hg, Pb, Zn, Cd, Sb*. También es notable como, en el caso de Altos de Talinay, se observa un marcado enriquecimiento en tierras raras en general y en especial de tierras raras pesadas. Estas características marcarían la

## Set de datos vs. Geología Hoja La Serena



**FIGURA 13:** Puntos de muestreo seleccionados par análisis de en sectores de ‘Altos de Talinay’ y planicie Litoral al sur de bahía de Guanaqueros (Formación Coquimbo). Fuente de información geológica referenciada en Figura 4.

impronta geoquímica del margen suroccidental de Hoja La Serena. Por un lado, un bloque metamórfico paleozoico-triásico enriquecido en elementos propios de fases minerales densas (o en su defecto presentes como remplazo en fases silicatadas), y por otro lado una cubierta sedimentaria ‘reciente’ (Mioceno-Eoceno) que incorpora parcialmente la signatura geoquímica del basamento rocoso adyacente, en este caso Altos de Talinay. Estas concentraciones, luego de un análisis más acabado de geoquímica y mineralogía de basamento, podrían ser catalogadas como concentraciones naturales.

Estas observaciones dan paso a concluir que el proceso de determinación de composiciones ‘anómalas’ de sedimentos de corriente a una escala regional (1:250.000), por medio de una metodología multivariable sin sesgo aparente, como lo son las distancias de Mahalanobis robustas, conlleva a descartar (o separar) composiciones que plausiblemente corresponde a una condición natural local, lo cual podría parecer contraproducente a la hora de determinar una composición de línea base. Sin embargo, cabe notar que la metodología empleada incorpora en el sub set de línea base (A) parte de la variabilidad total del sistema y su distribución entre parámetros. Esto implica que las señales ‘anómalas’, y con ello la heterogeneidad del medio, son incorporadas en la determinación cuantitativa de un vector representativo de línea base, no sin antes descartar una cantidad considerable de realizaciones (muestras) que sobre dimensionarían dicha anomalía en el vector línea base.

Por ejemplo, en la misma Hoja La Serena, en algunos sectores que han sido reportados con muy altas concentraciones de metales-metaloides tales como *Cd, As, Zn, Cu*, en los ríos Hurtado, Turbio o Elqui, aguas arriba de falla Vicuña (Astudillo, 2011; Miralles, 2013) no todas la muestras con dichas signaturas han sido catalogadas de ‘outliers’ en el presente estudio. Lo mismo ocurre en sectores caracterizados por concentraciones metálicas similares, como lo son quebrada Arrayan, proveniente del distrito minero de Andacollo, y estero Punitaqui, los cuales son afectados por la mineralización y subsecuente minería de depósitos de Cobre-Oro-Mercurio.

En definitiva, a diferencia de una metodología clásica univariante, esta metodología multivariable no determina composiciones outliers como anomalías puntuales de uno otro parámetro, si no por una conjunción de valores extremos en una muestra, con lo cual esta metodología tendería a determinar anomalías en base a agrupaciones de parámetros alejados respecto al centro composicional del medio estudiado.

**TABLA 14:** Media geométricas de parámetros de sedimentos de corriente directamente influenciados por unidades intrusivas y metamórficas de ‘Altos de Talinay’ así como alojados sobre sedimentos derivados de la Formación Coquimbo en planicie litoral al sur de bahía de Guanaqueros. Se compara con vector Línea Base (sección 5.5.2 - Tabla 13) y se calcula cociente entre línea base y muestras de sectores señalados. Casilleros en rojo presentan un valor 40% por sobre el respectivo valor de línea base. Casilleros de color azul presentan un valor 40% por debajo del respectivo valor de línea base. LREE: *Light Rare Earth Elements*, MREE: *Middle Rare Earth Elements*, HREE: *Heavy Rare Earth Elements*.

Parámetro	Composiciones representativas de Línea Base (LB) [ppm]	Media Geométrica en Altos de Talinay (AT) [ppm]	Media Geométrica en Fm. Coquimbo, bahía Guanaqueros al sur (FC) [ppm]	Fracción AT/LB	Fracción FC/LB
<b>SiO<sub>2</sub></b>	508813	499051	514862	0.98	1.01
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	148008	132479	129241	0.90	0.87
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	110653	109789	102085	0.99	0.92
<b>MgO</b>	24042	41083	18373	1.71	0.76
<b>CaO</b>	53798	63668	57567	1.18	1.07
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	29917	28186	28719	0.94	0.96
<b>K<sub>2</sub>O</b>	15587	12222	15275	0.78	0.98
<b>TiO<sub>2</sub></b>	13045	21202	21699	1.63	1.66
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	2133	2215	1763	1.04	0.83
<b>MnO</b>	1869	1838	1919	0.98	1.03
<b>CTOTAL</b>	7532	6428	4161	0.85	0.55
<b>STOTAL</b>	263	228	265	0.87	1.01
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	69	223	129	3.24	1.87
<b>Sc</b>	20.32	26.41	18.09	1.3	0.89
<b>V</b>	280	298	267	1.06	0.95
<b>Ni</b>	11.46	19.62	10.62	1.71	0.93
<b>Co</b>	20.07	26.44	16.4	1.32	0.82
<b>Cu</b>	84.86	39.3	32.3	0.46	0.38
<b>Zn</b>	64.02	28.48	26.35	0.44	0.41
<b>Ga</b>	16.71	17.58	15.82	1.05	0.95
<b>As</b>	7.53	2.18	3.22	0.29	0.43
<b>Se</b>	0.319	0.292	0.266	0.92	0.83
<b>Rb</b>	51	47.49	52.97	0.94	1.05
<b>Sr</b>	336	246	305	0.73	0.91
<b>Y</b>	25	36.62	26.97	1.47	1.08
<b>Zr</b>	256	506	489	1.97	1.91
<b>Nb</b>	7.27	12.94	14.46	1.78	1.99
<b>Mo</b>	0.78	0.51	0.51	0.66	0.66
<b>Ag</b>	0.065	0.053	0.054	0.81	0.83
<b>Cd</b>	0.128	0.057	0.112	0.45	0.88
<b>Sn</b>	2	2.81	2.81	1.4	1.4
<b>Sb</b>	0.252	0.063	0.156	0.25	0.62
<b>Cs</b>	3.91	2.66	2.17	0.68	0.55
<b>Ba</b>	367	200	290	0.54	0.79
<b>Hf</b>	6.92	12.79	12.27	1.85	1.77
<b>Ta</b>	0.53	0.98	1.13	1.87	2.14
<b>W</b>	1.33	1.41	1.95	1.06	1.47
<b>Au</b>	0.002	0.001	0.001	0.89	0.61
<b>Hg</b>	0.024	0.014	0.008	0.57	0.34

Parámetro	Composiciones representativas de Línea Base (LB) [ppm]	Media Geométrica en Altos de Talinay (AT) [ppm]	Media Geométrica en Fm. Coquimbo, bahía Guanaqueros al sur (FC) [ppm]	Fracción AT/LB	Fracción FC/LB	
<b>Tl</b>	0.05	0.088	0.051	1.76	1.03	
<b>Pb</b>	11.38	3.9	5.21	0.34	0.46	
<b>Bi</b>	0.093	0.068	0.071	0.73	0.76	
<b>Th</b>	7.47	11.56	9.26	1.55	1.24	
<b>U</b>	2.12	2.63	2.55	1.24	1.2	
LREE	<b>La</b>	20.63	24.91	24.68	1.21	1.20
	<b>Ce</b>	46.11	57.32	52.81	1.24	1.15
	<b>Pr</b>	5.84	7.16	6.62	1.23	1.13
	<b>Nd</b>	24.60	29.81	26.48	1.21	1.08
	<b>Sm</b>	5.25	6.69	5.45	1.27	1.04
MREE	<b>Eu</b>	1.29	1.45	1.34	1.13	1.03
	<b>Gd</b>	5.02	6.84	5.34	1.36	1.06
HREE	<b>Tb</b>	0.73	1.04	0.78	1.42	1.07
	<b>Dy</b>	4.45	6.51	4.73	1.46	1.06
	<b>Ho</b>	0.87	1.27	0.94	1.46	1.08
	<b>Er</b>	2.54	3.78	2.77	1.49	1.09
	<b>Tm</b>	0.39	0.57	0.41	1.47	1.07
	<b>Yb</b>	2.54	3.75	2.80	1.48	1.10
<b>Lu</b>	0.40	0.57	0.45	1.45	1.14	

## 6.2 CARACTERIZACION DE LINEA BASE

### 6.2.1 Análisis exploratorio de datos composicionales

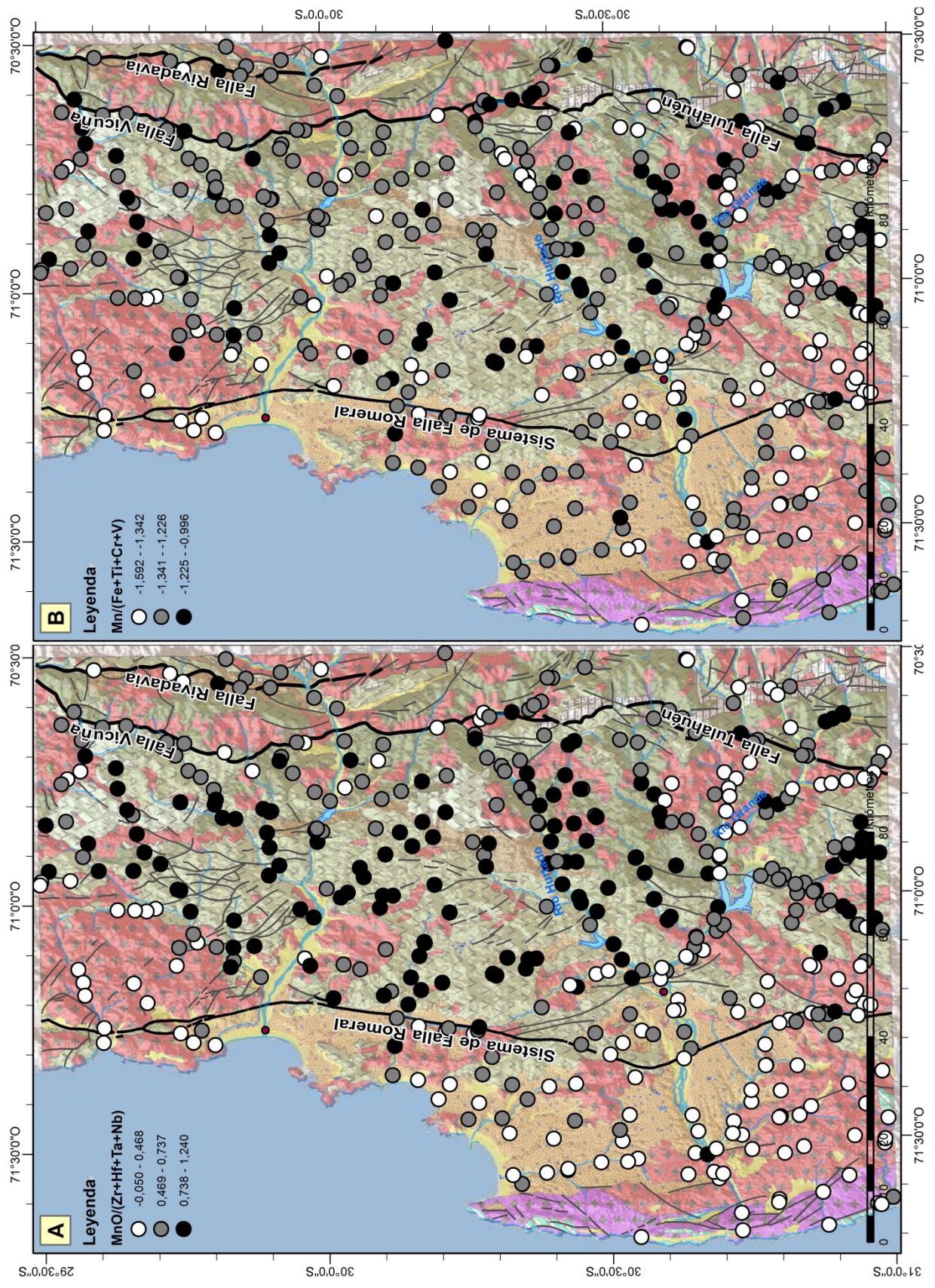
#### 6.2.1.1 Matriz de variación y matriz de correlación clr-transformada

Como se señala en el marco teórico, existen herramientas estadísticas CoDA que pueden ser usadas con el objetivo de encontrar relaciones entre las variables, permitiendo así interpretar posibles factores que determinan el comportamiento de dichas variables (sección 2.5). Tal es el caso de la matriz de variación y matriz de varianzas-covarianzas de los datos clr-transformados (en su defecto matriz de covarianza clr-transformada). A partir de relaciones entre variables observables en estas dos matrices es posible interpretar comportamientos geoquímicos generales entre pares o agrupaciones de elementos, o posibles factores de alteración de señales geoquímicas primarias causadas por procesos exógenos y/o antrópicos.

Es muy importante señalar que al hacer uso de transformaciones log-cocientes en la obtención dichas herramientas estadísticas se evitan los problemas emanados de la restricción de la suma constante. Dado que una metodología CoDA se centra en realizar comparaciones de la magnitud relativa entre las partes, ello implica conservar la invariancia por escala que en caso de no respetarse conlleva correlaciones espurias entre variables de diversos ordenes de magnitud, como es el caso de la relaciones entre elementos mayores y trazas, o incluso solo la  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  respecto al resto de parámetros.

A partir de las observaciones de ambas matrices, tanto para la base de datos modificada como para el set de datos A (secciones 5.5.3 y 5.5.4) se interpretan las siguientes relaciones:

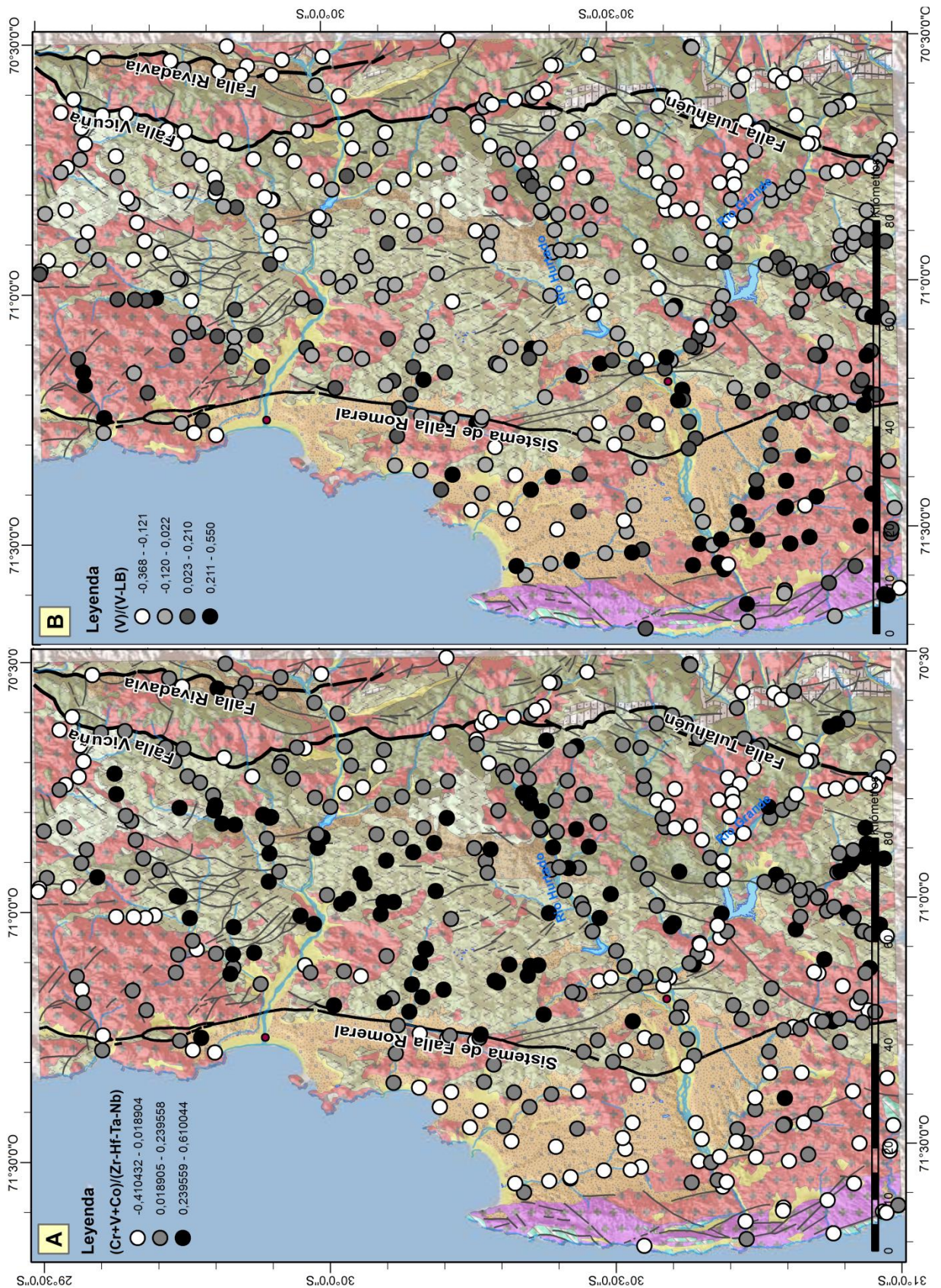
- i. Clara asociación de elementos mayores propios de ‘minerales formadores de roca’. En este sub grupo es posible diferenciar entre un grupo de elementos propios de facies félsicas tales como feldespatos, en especial hacia el rango de la anortita (feldespato sódico) dada la alta correlación entre  $Na_2O - SiO_2 - Al_2O_3$  y una menor correlación con  $K_2O$  dando cuenta de fraccionamiento entre feldespatos sódicos y potásicos. Se observa una leve correlación de  $MgO$  con respecto a  $SiO_2 - Al_2O_3 - Na_2O$ , no así con respecto a  $K_2O$  con lo cual se puede asociar el magnesio a facies silicatadas máficas en litologías básicas a intermedia que no serían paragenéticas con litologías félsicas más alcalinas (granitos, granitos alcalinos). Además la pobre correlación de  $CaO$  con respecto a  $SiO_2 - Al_2O_3 - Na_2O - K_2O$ , en contraste a una significativa correlación con respecto a  $MgO$  y  $C_{Total}$ , indicaría que el calcio en la Hoja La Serena se encuentra principalmente en facies carbonatadas (calcita, dolomita), y en menor medida a facies silicatadas (leve correlación con respecto a  $SiO_2 - Al_2O_3$ ). En todos estos escenarios es válido incorporar las eventuales, y probables, arcillas derivadas de feldespatos por procesos de meteorización, los cuales conservarían gran parte de la correlación descrita.  
  
Cabe notar que las correlaciones de  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  respecto  $CaO$  y  $MgO$  respectivamente, son mayores en el set de datos A, en contraste a la base de datos modificada. Y simultáneamente la correlación entre  $MgO$  y  $CaO$  se ve disminuida. Esto implica que se han considerado como outlier muestras con mayores concentraciones de carbonatos en relación a minerales silicatados.
- ii. Clara asociación entre elementos propios de fases ferromagnesianas, tanto silicatadas (piroxenos, anfíbolos, titanita, etc.) así como óxidos de  $Fe-Ti$  (Magnetita, ilmenita, rutilo, cromita). Se evidencia por la buena correlaciones entre  $Fe_2O_3 - TiO_2 - MnO - V - Cr_2O_3$ . y correlaciones negativas con respecto a asociaciones ácidas (punto anterior). Interpretación análoga a las señaladas en Espinoza y colaboradores (in prep.)
- iii. Clara asociación entre elementos enriquecidos en fases minerales densas, tales como  $Zr-Hf-Ta-Nb-U-Th$  los cuales comúnmente forman parte de minerales como el zircón, titanita, ilmenita, rutilo, etc. Es notable la asociación que presenta este grupo con respecto al señalado en el punto anterior (2), a excepción del  $MnO$ . Este contraste estaría causado por un enriquecimiento regional de minerales de manganeso en Formaciones Arqueos y Quebrada Marquesa. En aquellas formaciones se han reportado, por ejemplo, mantos con minerales de manganeso tales como braunita, pirolusita, psilomelano y manganita asociado a estratos de areniscas tobáceas y lutitas con clastos andesíticos y fragmentos de plagioclasas y minerales ferromagnesianos (Boric, 2010). Esta situación se ve clara en la Figura 14A en donde el cociente entre  $MnO$  y la suma  $Zr + Hf + Ta + Nb + U + Th$  muestra sus mayores valores en la zona central del mapa, en donde se encuentra las formaciones volcano-sedimentarias mencionadas, y es extensivo a formaciones de similares características más al este, tales como Formación Viñita y Estratos de Quebrada la Totora (en formaciones volcanosedimentarias intermedias a básicas de Figura 5). Valores más elevados de este cociente indica un enriquecimiento de Mn respecto a los elementos señalados, i.e. diferencias de orden regional. Se refuerza esta idea a partir de la Figura 14B, en donde se grafica la concentración de  $MnO$  respecto a  $Fe_2O_3 - TiO_2 - V - Cr_2O_3$ . Interpretaciones similares a las señaladas en Espinoza y colaboradores (in prep.)



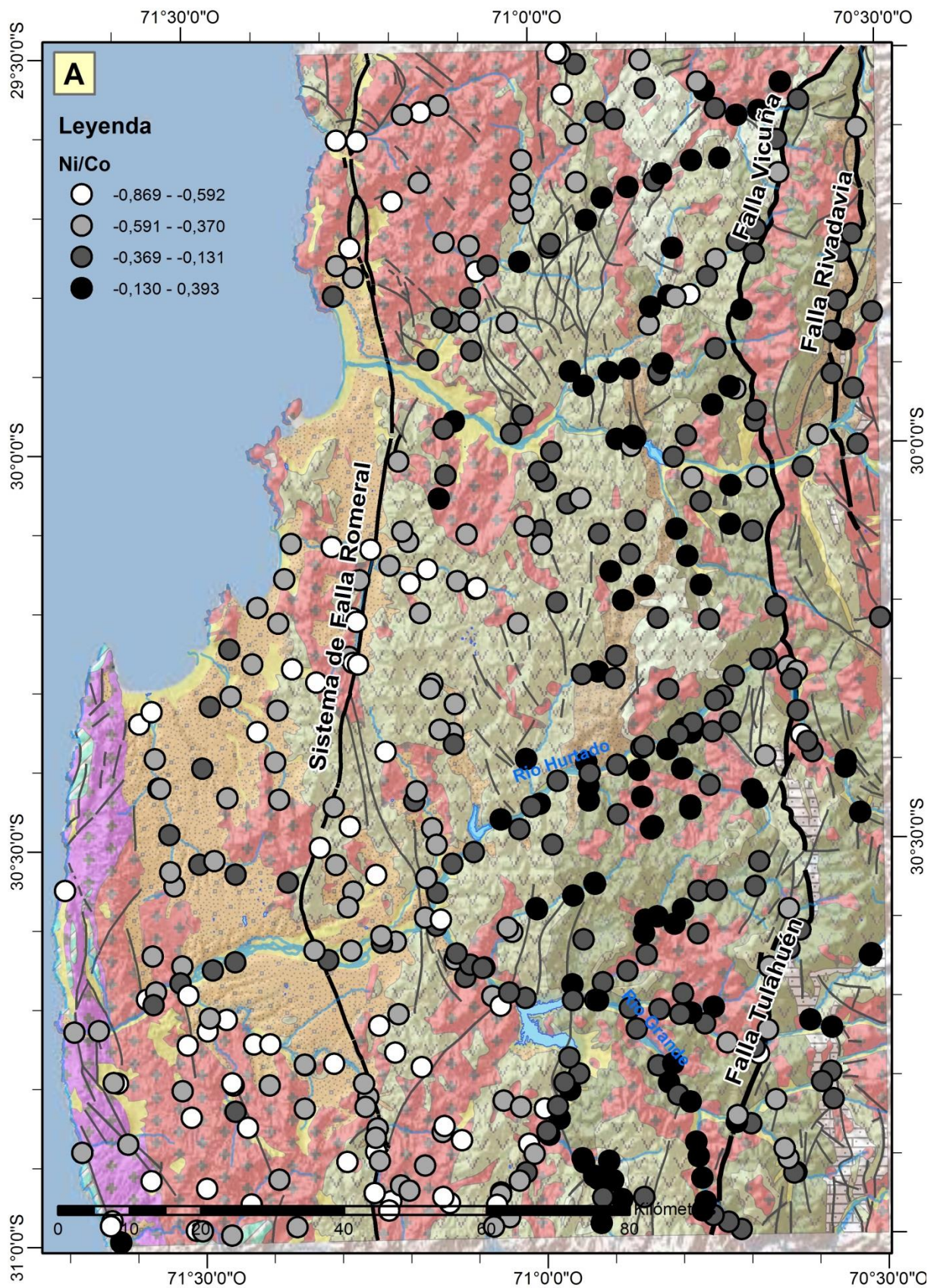
**FIGURA 14:** (A):  $(1/\sqrt{2}) \log[MnO/(Zr + Hf + Ta + Nb)]$ ; (B):  $(1/\sqrt{2}) \log[MnO/(Fe_2O_3 + Cr_2O_3 + V)]$ . Clasificación realizada por método de natural Jenks, histogramas en anexo H. Leyenda de unidades litológicas en Figura 16

- iv. Del mismo modo se puede realizar un mapa de cocientes entre las asociaciones las señaladas en los puntos (ii) y (iii) (sin considerar el  $MnO$ ). De aquel mapa es posible interpretar el margen suroccidental de la Hoja La Serena se encuentra enriquecido en fases minerales densas. No obstante la asociación  $Zr-Hf-Ta-Nb-U-Th$  se encuentra sobre-enriquecido en este margen a diferencia del grupo de elementos ferromagnesianos del grupo (ii), los cuales se encuentran más ampliamente distribuidos en el área de estudio (Figura 15). De lo anterior se puede interpretar que la buena correlación que presentan ambas asociaciones entre ellas (puntos ii y iii) sería producto de eficientes procesos de segregación de fases minerales densas.
- v. El  $Ga$  se encuentra íntimamente relacionado a las minerales félsicas, en específico fases ricas en  $Al_2O_3$  en tanto el  $Ga$  actúa como remplazo de aluminio en estructura cristalina (Salminen et al. 2005). Esto es consistente con la sistemática correlación de este elemento para con otros también asociados a fases félsicas.
- vi. El  $Sc$  se presenta principalmente como remplazo del  $Fe$  en fases silicatadas ferromagnesianos, y secundariamente al  $Al$  (Salminen et al. 2005). Esto se ve evidenciado en la muy buena correlación que posee con  $MgO$ , y en menor medida con  $Al_2O_3$ , así también la considerable correlación con  $SiO_2$ ,  $Ga$  y  $MnO$ .
- vii. Se verifica un fraccionamiento de  $Eu$  en plagioclasas dado al diferencial comportamiento en correlación con respecto al resto de REE así como por las buenas correlaciones que presenta con elementos de fases félsicas ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Ga$ ). Por otro lado, buenas correlaciones entre los elementos del grupo (iii) y REE indicaría que estas últimas se encuentra mayormente asociadas paragénicamente, o bien como reemplazo, de minerales propios de dicha agrupación (anexo F.3 y H.3).
- viii. Tanto el  $Rb, Cs, Sr$  y  $Ba$  estarían estrechamente relacionados a fases silicatadas, carbonatadas o arcillas en tanto reemplazo de elementos similares en sus propiedades químicas tales como  $K, Na$  y  $Ca$  o bien en posiciones estructurales.
- ix. Tanto el  $Ni$  como el  $Co$  presentan relativa buena correlación entre sí, esperable dado sus muy similares propiedades químicas. No obstante, ambos elementos presentan ciertos comportamientos dispares cuando son comparados con otros parámetros. Ambos elementos comparten buenas correlaciones con respecto a el  $MgO$ ,  $Cr_2O_3$ , pero se diferencian en que el  $Co$  además posee buenas correlaciones con  $Fe_2O_3, TiO_2, MnO, Sc, Ga$ , y  $V$ , relaciones que respecto a  $Ni$  son significativamente más leves. Esto indicaría que ambos elementos actúan como reemplazo en facies ferromagnesianas, como una señal de fondo, pero a su vez existía una región con presencia de una fase mineral principalmente compuesta de  $MgO, Cr_2O_3$  enriquecida en  $Ni$  respecto a  $Co$ . En la Figura 16 se puede notar claramente aquella zonación en aquel mapa el margen con mayor presencia de  $Ni$  estaría asociado a litologías volcanosedimentarias del cretácico tardío (Formación Viñita y Estratos de Quebrada la Totora).
- x. Existe una clara paragénesis entre  $Au - Hg - Cu$ , y subordinadamente con  $Mo$ , lo cual guarda directa relación con mineralización del tipo  $Cu-Au-Hg$  de los cuales destacan los distritos Andacollo y Punitaqui (Díaz et al., 2010; Oyarzun et al., 2001) (Figura 17). En estos depósitos se presentan diversos sulfuros de cobre asociados a oro nativo, cinabrio y molibdenita. Estos se enmarcan en la franja metalogénica del Cretácico Inferior caracterizada por pórfidos cupríferos del tipo  $Cu-Mo$  (Maksaev, 2001). Esta interpretación es análoga a la expuesta en Espinoza y colaboradores (in prep.)

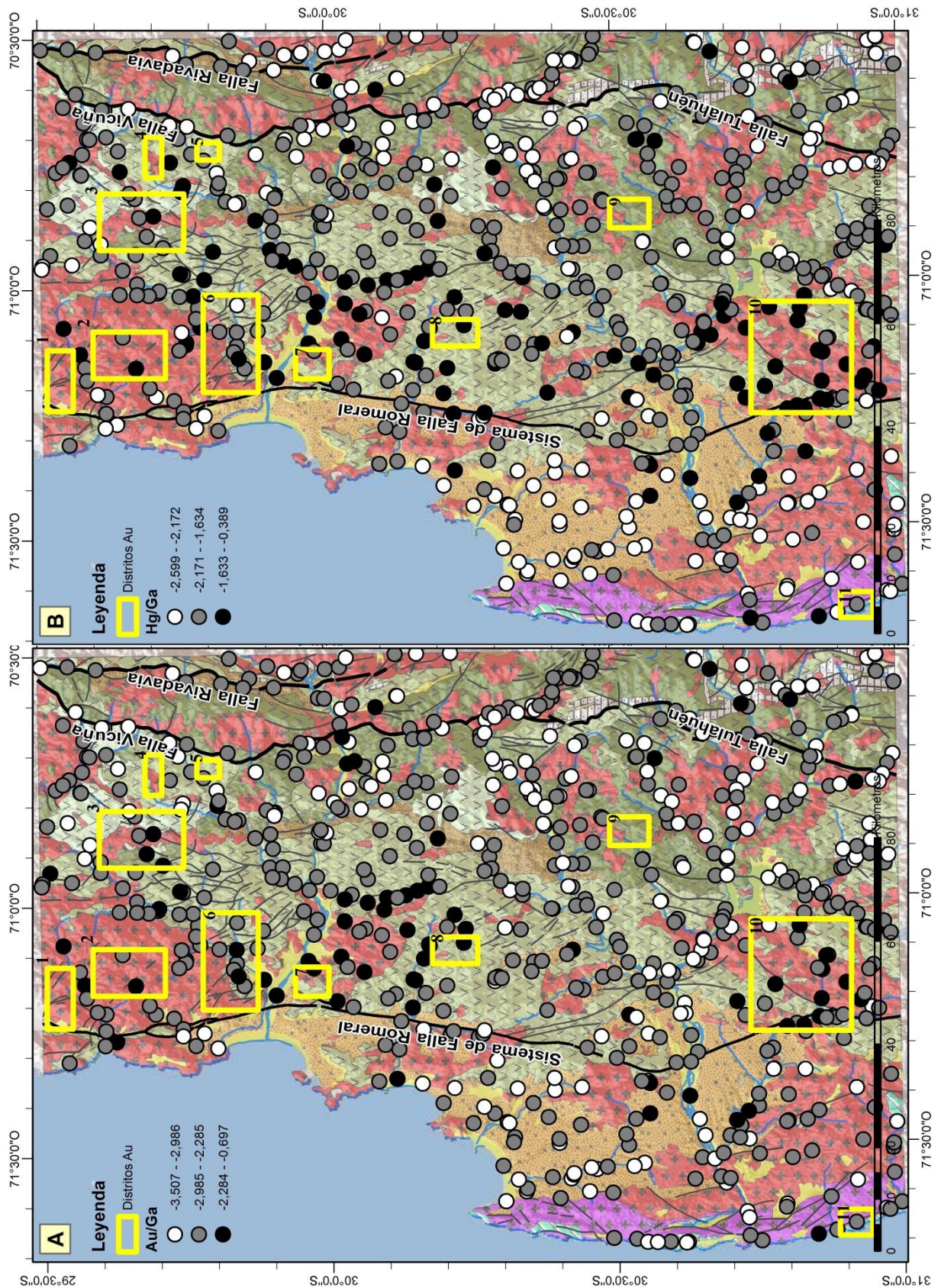




**FIGURA 15:** (A):  $(1/\sqrt{2}) \log[(Cr_2O_3 + TiO_2 + V)/(Zr + Hf + Ta + Nb)]$ ; (B):  $(1/\sqrt{2}) \log[V/V_{L\acute{i}nea Base}]$ . Clasificaci3n realizada por m3todo de natural Jenks, histogramas en anexo H. Leyenda de unidades litol3gicas en Figura 16



**FIGURA 16:** A):  $(1/\sqrt{2}) \log[\text{Ni}/\text{Co}]$ ; Clasificación realizada por método de natural Jenks, histogramas en anexo H. Leyenda de unidades litológicas en Figura 16.



**FIGURA 17:** (A):  $(1/\sqrt{2}) \log[Au/Ga]$ ; (B):  $(1/\sqrt{2}) \log[Hg/Ga]$ . Clasificación realizada por método de natural Jenks, histogramas en anexo K. Leyenda de unidades litológicas en Figura 13. 1-Dto. La Higuera, 2- Dto. Santa Gracia, 3- Dtos. Alte. Latorre y Condoriaco, 4- Dto. La Corina, 5-Dto. El Sauce, 6-Dtos. Brillados, Lambert y San Antonio, 7-Dto. Pajonales, 8- Dto. Andacollo, 9-Dto. Pichilingo, 10- Dtos. Mantos de Punitaqui, La Laja y Huilmo Bajo, 11.- Mineral de Talca.

- xi. El grupo compuesto por *Zn, Pb, As, Cd, Sb* presentan muy buenas correlaciones entre sí, y en menor medida con *Bi, Ag*. Elementos de esta agrupación han sido interpretados, en trabajos anteriores en la zona, como productos de dispersión de metales a partir de zonas de alteración hidrotermal en alta codillera (Astudillo, 2011; Miralles, 2013). En la cuenca del río Hurtado parte de estos elementos ha sido asociado a aleaciones nativas, a minerales neoformados en procesos supérgenos como óxidos hidróxidos y boratos, o bien a sulfuros en general. Es posible sumar las evidencias de movilización de metales y metaloides como producto de adsorción en intersticios cristalinos de arcillas o bien en materia orgánica (Meyer et al., 1979).

De acuerdo a las matrices de correlaciones de BDM y SDA (anexos G y H) es posible apreciar que *Zn, Pb, As, Cd* presentan una buena correlación con respecto a *Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ba-Cs*, esto hace pensar que estos metales se encuentran ligados, a escala regional, preferentemente a arcillas. Secundariamente estarían ligados a sulfuros, dada las significantes, pero menores, correlaciones de este grupo metálico con respecto al azufre. Esto último sería el caso de *Bi, Sb, y Ag* que estarían principalmente asociados a sulfuros dadas las más bajas correlaciones con elementos propios de arcillas.

Por otro lado estos elementos guardan nula correlación, o incluso negativa, con el *Fe* y *MnO*. Sumado a lo anterior permiten aseverar que los óxidos e hidróxidos de Fe-Mn no serían los principales portadores de metales pesados en procesos de transporte exógeno de estos elementos.

- xii. El cobre presenta significativa correlación con miembros señalados en el punto anterior (x), tales como *Sb, Ag*, lo que sumado a una estrecha correlación con respecto a *Au* y *Hg* daría cuenta de la diversidad de estilos y paragénesis de mineralización de este metal en la región.
- xiii. La buena correlación entre *S<sub>Total</sub>* y *C<sub>Total</sub>*, pese a la gran variabilidad de estos dos parámetros, sería producto de una acumulación importante de material orgánico en las riberas de los ríos. Un análisis más acabado se realiza en Espinoza y colaboradores (in prep.). Por otro lado, el grupo compuesto por *Cu, Mo, Zn, Pb, As, Cd, Ag*, que si bien presenta índices de correlación moderados con respecto al azufre (0.15-0.3), estos son sistemáticamente positivos. Esto daría cuenta la presencia de sulfuros metálicos en los sedimentos fluviales como portadores secundarios de metales pesados en el área.

Así mismo el *S<sub>Total</sub>* presenta una leve correlación positiva con el *CaO* en desmedro de otros elementos propios de silicatos félsicos o arcillas derivadas. Esta correlación podría ser causada por una conjunción de sedimentos derivados desde depósitos minerales alojados en, o cercanos a, secuencias carbonatadas (calizas, areniscas calcáreas, etc.), o bien presencia de calcita producto de procesos de alteración hidrotermal y los sulfuros asociados a dichos depósitos. Ello es plausible en distritos mineros tales como Panulcillo, Tambillo, Lambert, San Antonio en Formación Arqueros.

- xiv. El fosfato presenta nula correlación con respecto a *S<sub>Total</sub>* y *C<sub>Total</sub>*, lo que implicaría que la contaminación difusa de industria agroalimentaria no se vería reflejada en la química de los sedimentos fluviales del área de estudio. Por otro lado el fosfato si presenta una considerable correlación respecto a *TiO<sub>2</sub>, V* y tierras raras, especialmente con tierras raras livianas a medias (*La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd*). Estas correlaciones serían producto de asociaciones propias del margen occidental de la Hoja La Serena, indicativo de depósitos del tipo IOCG (Espinoza et al., in prep.).

### 6.2.1.2 Biplot composicional

A partir del Biplot composicional de las Figuras 9 y 11 y los grupos interpretados a partir de ellos (sección 5.5.5) y en conjunción de lo expuesto en la sección anterior, es posible interpretar lo siguiente:

- i. La mayor parte de la variabilidad del sistema estaría controlada por mineralización cuprífera, en específico del tipo *Cu – Hg – Au*. (Grupo 1, sección 5.5.5)
- ii. La presencia de metales y metaloides tales como *Pb, Sb, Zn, Cd, Ag*, es la segunda fuente de variabilidad del sistema y estaría dada por a la presencia de arcillas enriquecidas en dichos elementos, y subordinadamente de sulfuros metálicos (Grupo 2, sección 5.5.5).
- iii. Enriquecimiento de minerales densos, tales como zirconio, titanita, rutilo, magnetita, allanita, se encontrarían enriquecidos en el sector sur occidental del área de estudio respecto al resto de la hoja, en sectores comprendidos por secuencias sedimentarias marinas (Fm Coquimbo) y plutónicas-metamórficas (Complejo metamórfico El Choapa y Complejo plutónico Altos de Talinay). Lo anterior sumado a la segregación de fases densas en procesos de transporte y sedimentación fluvial (cambios morfológicos e hidrodinámicos) serían causas de la variabilidad que dicho grupo presenta en el sistema (Grupo 5, sección 5.5.5).
- iv. Elementos mayores propios de ‘minerales formadores de roca’ presentan bajas variabilidades dando cuenta del ‘background’ composicional del área de estudio (Grupo 3, sección 5.5.5).
- v. Una fuente importante de variabilidad del sistema estaría controlada por la acumulación de material orgánico. En específico en función a la variabilidad de  $S_{Total}$  y  $C_{Total}$ .
- vi. El fosfato no muestra evidencias estadísticas de una preponderante contaminación difusa por actividades antrópicas.

## 6.2.2 Composiciones representativas

### 6.2.2.1 Modos de representación

La determinación de una composición representativa de línea base no está exento de ciertas problemáticas relevantes a la hora de la interpretación y posterior empleo de dichas composiciones. En ese sentido son relevantes a la hora de interpretar los valores de línea base la metodología empleada para llegar a ese ‘valor central’, la influencia de composiciones anómalas, y a su vez el estimador estadístico empleado para su formulación final. En cuanto a la metodología multivariable desde una perspectiva de datos composicionales, empleada en el presente trabajo, ya ha sido discutido en parte en la sección anterior (6.1) en tanto la metodología incorpora parte de la variabilidad total del sistema en el sub set de datos que es empleado para la determinación de vector de línea base.

#### Estimadores de tendencia central

En cuanto a la representación final del vector composicional, luego de definido el sub set de datos empleado para ello, resulta relevante discutir y explicitar la herramienta matemática para representar el ‘centro’ de la composición. Estimadores de tendencia central típicamente

empleados son la media aritmética, mediana, y media geométrica, cada uno de ellos sujetos a características intrínseca en base a como son calculados. Ante ello surge la interrogante de cuál de estos, u otros, son los más apropiados en la representación de una línea base. Por un lado, la media aritmética es significativamente susceptible a valores anómalos. Esto puede ser corroborado en la Tabla 10 en donde parámetros como el azufre, oro, mercurio, cromo, titanio arsénico, cobre, entre otros, presentan valores de media aritmética por sobre incluso el tercer cuartil de distribución. Por otro lado, la mediana es un estimador más robusto que la media aritmética en tanto que no se ve afectado directamente por composiciones outliers, no obstante, este si se vería afectado por la resolución (sensibilidad) del método analítico empleado en la medición, especialmente en elementos menores y traza, así como tampoco es sensible a las asimetrías de distribución (curtosis) al igual que la media aritmética. Por último, la media geométrica es menos sensible a los datos anómalos que la media aritmética, no obstante, no admite valores negativos y es muy sensible a presencia de ceros, o valores muy cercanos a estos. Se puede observar en la Tabla 10 como los valores de media geométrica y mediana son muy similares.

Se concluye que estos dos últimos estimadores, mediana y media geométrica, son adecuados para la representación de centro composicional.

#### *Incidencia de la metodología*

Por otro lado, cabe analizar los efectos que conlleva la ejecución de la presente metodología en la representación de una vector de línea base en comparación con una representación directa a partir de datos ‘crudos’, en este caso la base de datos modificada. Como se observa en la Tabla 13 (sección 5.5.2), no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos como línea base respecto a la media geométrica por parámetro de los datos ‘crudos’. Cabe señalar que ambos vectores son productos de media geométrica, uno del set de datos A, alojado en el Simplex, y descartados los ‘outliers’, y el otro corresponde a los datos en ‘crudos’, también en el simplex’, pero sin descartar ‘outliers’.

Esta nula, o leve, diferencia puede ser entendida como producto de la ya discutida incorporación de la variabilidad sistema al set de datos A (sección 6.1). Por otro lado, las leves diferencias entre ambas representaciones serían producto de la separación de composiciones ‘anómalas’ multivariantes.

#### *Consideraciones de representación de datos composicionales*

Un punto importante por discutir es el efecto de la **operación clausura** sobre la representación de una composición (Ecuación 5, sección 2.2.4.1). Cabe notar que el ‘centro’ composicional es definido, en la teoría de análisis de datos composicionales de John Aitchinson (1986), en base a la operación clausura del vector de media geométricas por parámetro (ecuación 20, sección 2.5.1). Esto implica que al realizar dicha operación clausura se fuerza a completar la suma constante que, por ejemplo, al trabajar los datos en partes por millón, significa que la suma de los componentes del vector es  $10^6$ . El mismo efecto se obtiene al obtener el vector de media aritméticas de los datos ilr-transformados y luego estos trasladados al Simplex. Ello se puede constatar en la Tabla 18 en donde la suma final de los componentes del vector línea base clausurado es  $10^6$ . Esto podría ser considerado un error a la hora de una representación final, dado que al realizar la operación clausura se le asigna, ponderadamente, un mayor valor a ciertas variables de manera tal de cumplir con la suma constante. Es así, por ejemplo, que el valor entregado para  $SiO_2$  por el vector línea base clausurado se encuentra incluso por sobre el tercer cuartil de la distribución del sub set de datos A, y en el caso del  $Al_2O_3$  el valor clausurado se encuentra prácticamente en límite del tercer cuartil (Figura 18).

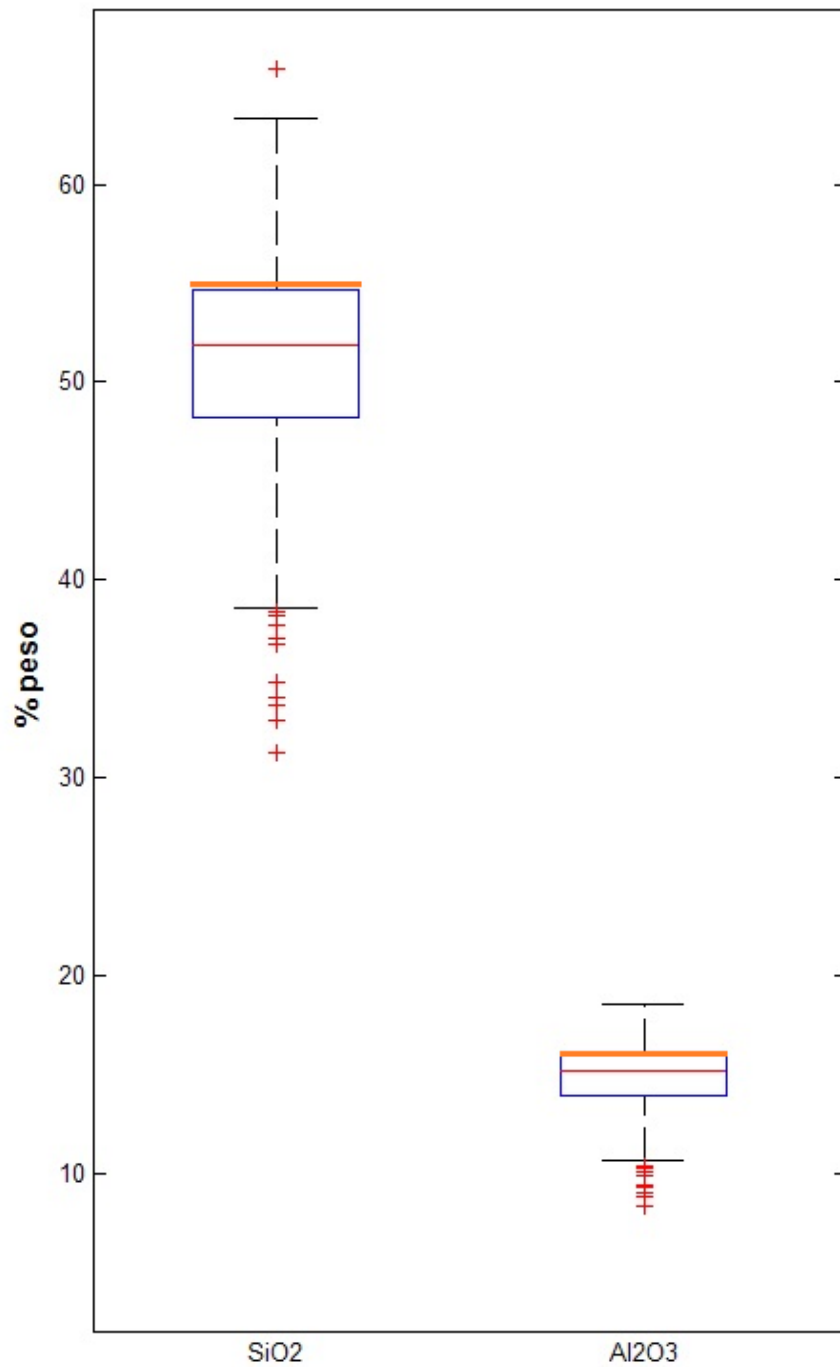
**TABLA 15:** Vectores de línea base, tanto clausurado o media geométrica y media por parámetro de Set de Datos A (SDA).

<b>Parámetro</b>	<b>Línea Base Clausurada SDA [ppm]</b>	<b>Vector Línea Base (LB) (Media geométrica SDA) [ppm]</b>	<b>Vector Línea - Base alternativo (Mediana SDA)[ppm]</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	554604	508813	518700
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	161328	148008	152250
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	120611	110653	104050
<b>MgO</b>	26206	24042	23900
<b>CaO</b>	58640	53798	52800
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	32610	29917	30200
<b>K<sub>2</sub>O</b>	16989	15587	15700
<b>TiO<sub>2</sub></b>	14219	13045	11300
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	2325	2133	2000
<b>MnO</b>	2037	1869	1800
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	8210	7532	7400
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	286	263	200
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	75.1	68.9	70.0
<b>Ag</b>	0.071	<0.1*	<0.1*
<b>As</b>	8.21	7.53	7.95
<b>Au</b>	0.00180	0.00165	0.00180
<b>Ba</b>	400	367	361
<b>Bi</b>	0.102	0.1*	0.1*
<b>Cd</b>	0.139	0.128	0.100
<b>Ce</b>	50.3	46.1	45.4
<b>Co</b>	21.9	20.1	20.0
<b>Cs</b>	4.26	3.91	4.00
<b>Cu</b>	92.5	84.9	80.5
<b>Dy</b>	4.85	4.45	4.34
<b>Er</b>	2.76	2.54	2.45
<b>Eu</b>	1.41	1.29	1.28
<b>Ga</b>	18.2	16.7	16.7
<b>Gd</b>	5.48	5.02	4.85
<b>Hf</b>	7.55	6.92	5.35
<b>Hg</b>	0.026	0.024	0.020
<b>Ho</b>	0.95	0.87	0.85
<b>La</b>	22.5	20.6	20.3
<b>Lu</b>	0.43	0.40	0.38
<b>Mo</b>	0.84	0.78	0.70
<b>Nb</b>	7.92	7.27	6.30
<b>Nd</b>	26.8	24.6	23.7
<b>Ni</b>	12.5	11.5	11.5
<b>Pb</b>	12.4	11.4	11.6
<b>Pr</b>	6.37	5.84	5.64

<b>Parámetro</b>	<b>Línea Base Clausurada SDA [ppm]</b>	<b>Vector Línea Base (LB) (Media geométrica SDA) [ppm]</b>	<b>Vector Línea - Base alternativo (Mediana SDA)[ppm]</b>
<b>Rb</b>	55.2	50.6	51.4
<b>Sb</b>	0.275	0.252	0.300
<b>Sc</b>	22.1	20.3	21.0
<b>Se</b>	0.348	<0.5*	<0.5*
<b>Sm</b>	5.73	5.25	5.02
<b>Sn</b>	2.18	2.00	2.00
<b>Sr</b>	367	336	335
<b>Ta</b>	0.58	0.53	0.50
<b>Tb</b>	0.79	0.73	0.71
<b>Th</b>	8.14	7.47	6.80
<b>Tl</b>	0.054	<0.1*	<0.1*
<b>Tm</b>	0.42	0.39	0.38
<b>U</b>	2.31	2.12	2.00
<b>V</b>	305	280	257
<b>W</b>	1.45	1.33	1.30
<b>Y</b>	27.2	25.0	24.3
<b>Yb</b>	2.77	2.54	2.42
<b>Zn</b>	69.8	64.0	71.0
<b>Zr</b>	279	256	197
<b>Suma</b>	1000000	917435	921982

Es así como la representación del centro composicional, en base a teoría de datos composicionales, está condicionado a las subcomposición con la cual se trabaja. En este sentido la representación de línea base por medio de un vector clausurado no es recomendable dado que este vector no daría cuenta del rango de valores medidos realmente, lo cual hace perder su validez para objetivos prácticos y comparativos (e.g. línea base ambiental, exploración geoquímica, petrogénesis, etc.). Por ende, es estrictamente necesario declarar al trabajar en base a análisis de datos composicionales si es que un set datos o vector presentado se encuentra clausurado o no.





**FIGURA 18:** 'Box plot' de  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  de set de datos A, se las cajas azules representan el 50% de los datos, (primer y tercer cuartil) línea roja representa el valor de línea base en base a media geométrica, y línea anaranjada representa el valor de línea base de vector clausurado..

### 6.2.2.2 Comparación con la corteza continental superior

El vector de línea base obtenido puede ser usado en interpretaciones de procesos petrogenéticos y tectónicos a escala regional bajo la asunción de que este vector es fiel representante de la química de la corteza superior. Para estos efectos es conveniente comparar las concentraciones resultantes con las estimadas para la corteza continental superior (CCS) realizado por Rudnick y Gao (2003) en base a estudios realizados en regiones cratónicas. Aquel estudio es realizado bajo al principio de que los sedimentos y rocas sedimentarias, a escala continental, son un buen reflejo de la composición de CCS dada la homogeneización causada por procesos erosivos, transporte, mezcla y sedimentación, propuesto por Goldschmidt en 1933.

En la Tabla 19 se enlista las concentraciones representativas tanto para la línea base de la Hoja La Serena (LB), y las propuestas por Rudnick y Gao (2003) para CCS. En esta tabla se dispone también de un factor de comparación entre LB y CCS. Los parámetros son ordenados de mayor a menor en función de dicho factor desde los parámetros más enriquecidos a los más deprimidos en la Hoja La Serena en comparación a CCS.

En cuanto a elementos mayores, la menor concentración de  $SiO_2$  respecto a CCS, sumado a al enriquecimiento de  $Fe_2O_3 - TiO_2 - MnO$  darían cuenta de una corteza superior en la Hoja La Serena de composición más básica que la media mundial. Es más, si asumimos a la corteza continental como una litología ígnea, esta tendría una composición de un basalto a andesita basáltica,

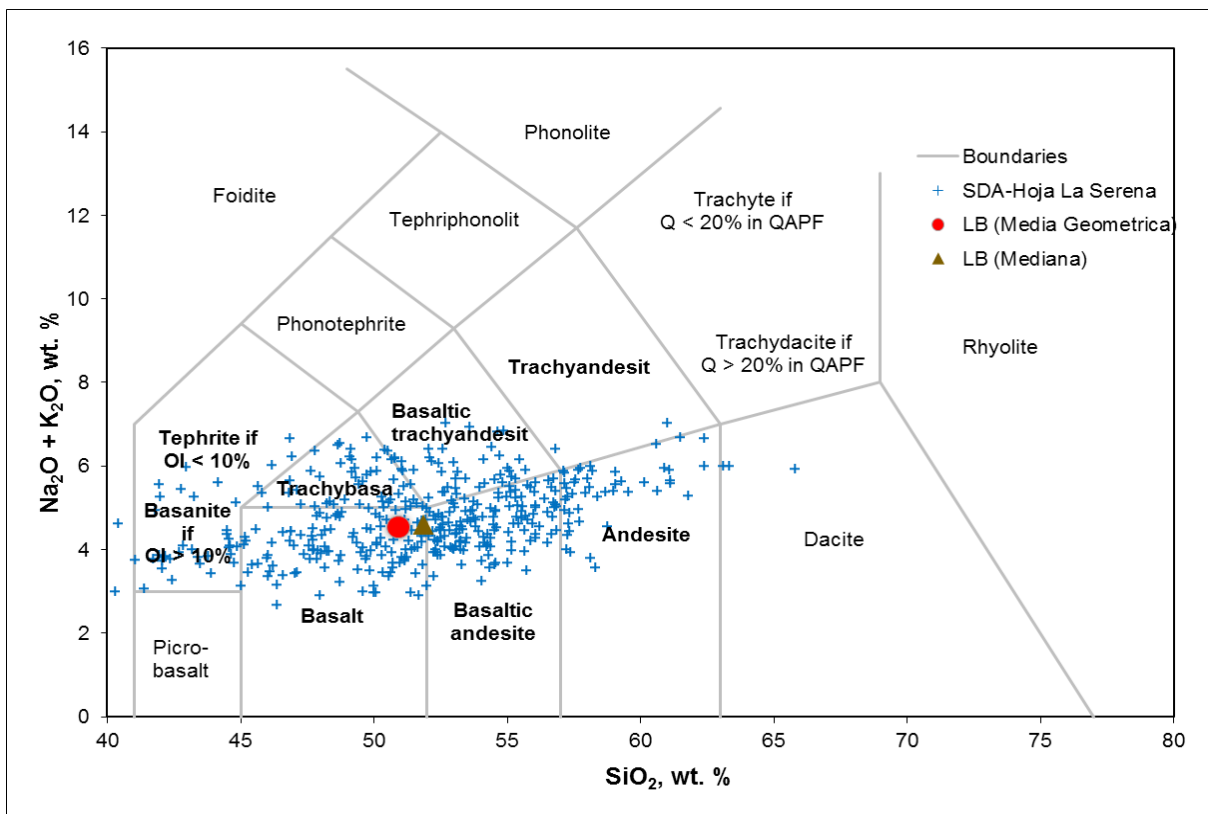
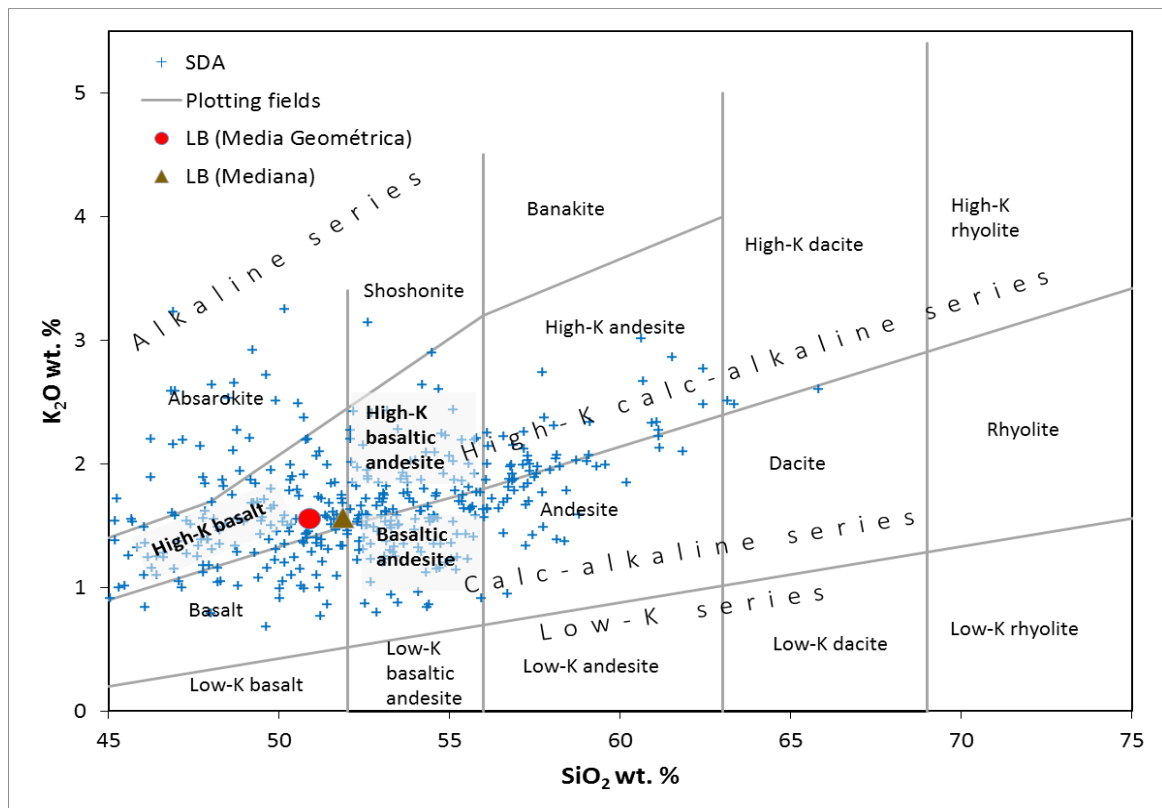


FIGURA 19 Diagrama TAS de muestras del set de datos A (SDA), se grafica valores de línea base (LB) (Le Bas et al. 1986)

De las Figuras 19, 20 y 21 es posible verificar que la corteza continental superior comprendida en la Hoja La Serena tendería a ser similar la composición de basalto a andesita-basáltica calcoalcalino de relativo alto potasio. Esto concuerda con las firmas calcoalcalinas a shoshoníticas reportadas la región (Parada et al., 2007).

En la porción central del área de estudio, y cubriendo gran parte de la superficie de la Hoja La Serena, las formaciones Arqueros y Quebrada Marquesa presentan secuencias sub áreas de balastos porfíricos y andesitas basálticas con alto contenido de potasio a shoshoníticos, Estas exhiben un patrón de REE relativamente plano, con razones  $La_N/Lu_N$  entre 4 y 11, además de una ligera anomalía de europio. A esto se le suma los cuerpos plutónicos comprendidos ente el Jurásico Medio-Tardío y el Cretácico Temprano aflorando en la cordillera de la costa de la región. Las principales litologías de los plutones Jurásicos consisten en dioritas de dos piroxenos, gabros de hornblenda y tonalitas de biotita, en estos últimos abundan enclaves máficos y son cortados por diques sinplutónicos de composiciones entre diorita y gabro. La geoquímica de estas unidades se caracteriza por comprender cuerpos de medio a alto contenido de potasio y un patrón de REE relativamente plano con razones  $La_N/Yb_N$  cercanas a 7, y una moderada anomalía negativa de europio. Por su lado, los cuerpos plutónicos Cretácicos comprenden un amplio espectro litológico con afinidades típicamente calcoalcalinas de elevado potasio (Parada et al., 2007). La suma de las unidades recién señaladas abarca gran parte de la superficie de la Hoja La Serena.

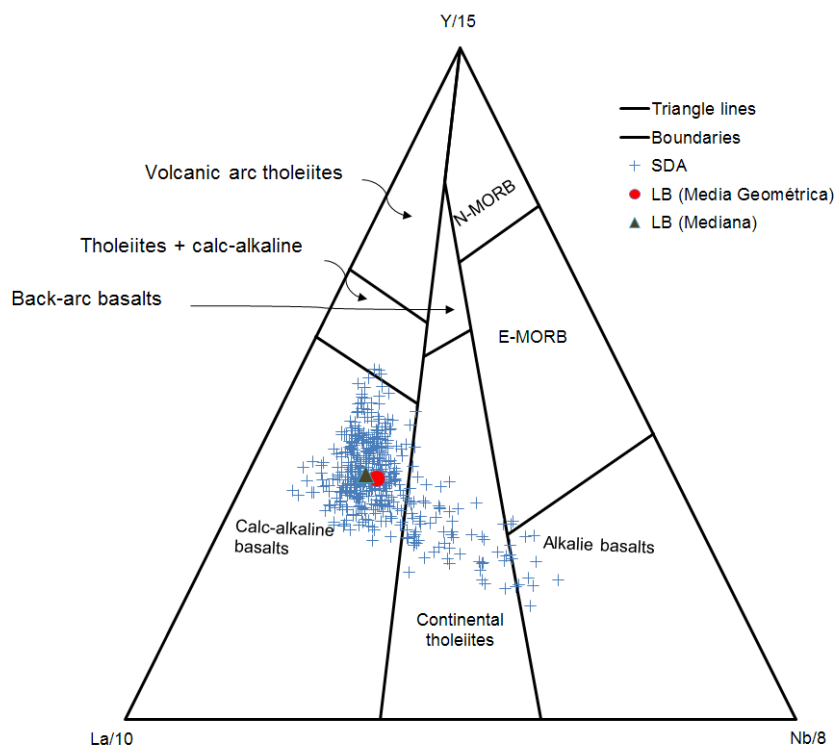
En definitiva, la actividad ígnea comprendida entre el Jurásico Medio a Cretácico Temprano es caracterizada por un volcanismo bimodal y actividad plutónica calcoalcalino, con una progresiva mayor participación de material derivado del manto, que tuvo lugar a lo largo de un margen continental extensivo (Parada et al., 2007).



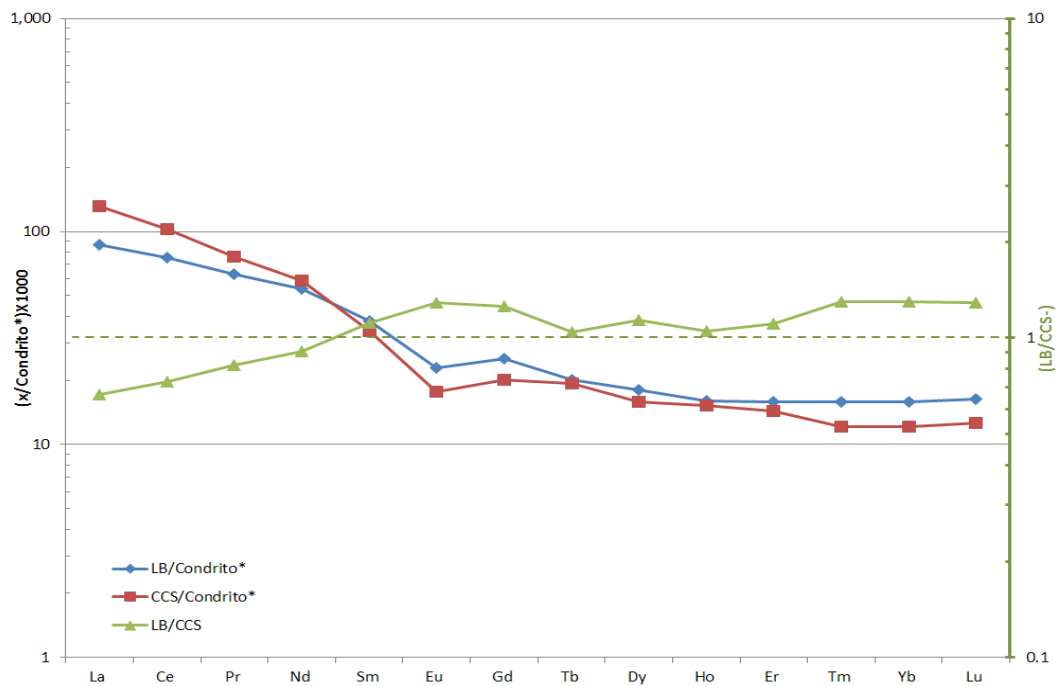
**FIGURA 20:** Clasificación e rocas volcánicas según contenido de potasio y sílice (Ewart, 1982), de muestras del Set de Datos A (SDA). Se grafica valor de Línea Base (LB)

Dadas estas características es entonces comprensible las elevadas concentraciones de  $CaO$  y  $Fe_2O_3$  en los sedimentos de la Hoja La Serena respecto a las estimadas para CCS, en tanto una presencia mayoritaria de rocas volcánicas de arco, calcoalcalinas, y secuencias sinsedimentarias marinas a continentales con importante presencia de niveles carbonatados (Formaciones río Tascadero, Arqueros, Coquimbo). La alta concentración de  $MnO$  estaría asociada a la preponderancia de litologías máficas en la región, así como también a depósitos sinsedimentarios enriquecidos en este elemento en Formación Arqueros y Marquesa (Charrier et al, 2007).

El patrón plano de REE mostrado en la Figura 22 concuerda con las características señaladas anteriormente, un empobrecimiento de *La* respecto a CCS, considerado también un empobrecimiento de LREE en general; una anomalía de *Eu* atenuada y un leve enriquecimiento de HREE respecto a CCS. Esto sería indicativo de materiales menos diferenciados como fuentes de los sedimentos (Sensarma et al, 2008). Por otro lado, valores bajos de cromo y níquel en andesitas de arco sería indicativo de eficaces procesos de fraccionamiento en el ascenso y diferenciación de los magmas de arco, con un consiguiente magma mantélico residual enriquecido en elementos traza ferromagnesianos (McLennan, 2001). En función de los resultados obtenidos se confirma bajas concentraciones de Cr y Ni respecto a CCS, no obstante, los valores de otros elementos trazas ferromagnesianos tales como V y Co son considerablemente elevados. Como posibles hipótesis que explicarían esta contradictoria situación serían: (a) procesos de diferenciación magmáticas con una mayor incompatibilidad con el fundido del Co-V respecto al Ni-Cr, o bien (2) diferentes fuentes mantélicas, posiblemente en diferentes estadios, presentando enriquecimientos diferenciales entre los pares de elementos mencionados, sumado a condiciones de fraccionamiento menos eficientes para el caso del V-Co. Esta segunda hipótesis concordaría con la zonación observada en las concentraciones de Ni y Co presentada en la Figura 16.

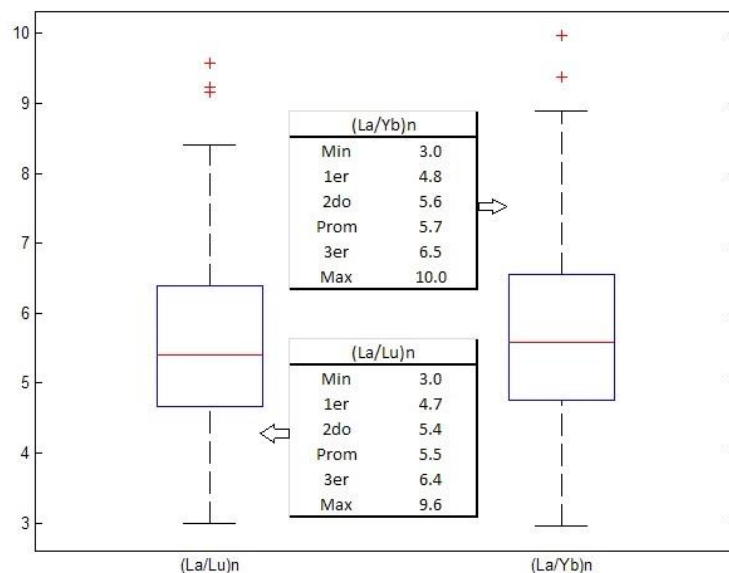


**FIGURA 21:** Diagrama La-Y-Nb de set de datos A (Cabanis et al. 1990)



**FIGURA 22:** Patrones de tierras raras (REE) normalizadas al condrito tipo CI ((McDonough, y Sun, 1995)), para concentraciones de línea base (LB) y cortea continental superior (CCS) propuesto por Rudnick y Gao (2003). Se grafica también en un eje secundario (derecho) las razones de REE entre LB y CCS.

En cuanto a los mayores valores de  $TiO_2$ ,  $V$ ,  $P_2O_5$ ,  $Zr$ ,  $Hf$ , y parcialmente  $Sc$ , estos serían el reflejo de un aporte significativo de fases minerales densas a partir de litologías restringidas al margen occidental de la Hoja. Este margen está principalmente constituido por cuerpos intrusivos del Triásico a Jurásico Temprano, y en menor medida unidades volcánicas del Jurásico temprano y metamórficas del paleozoico. Además, existiría una contribución significativa de dichas fases densas en los depósitos sedimentarios más modernos presentes en las planicies litorales tales como Formación Coquimbo y Formación Confluencia (Sección 6.1; Espinoza et al., in prep.)



**FIGURA 23:** Box plot de las razones (La/Lu) y (La/Yb) normalizadas al condrito Tipo CI (McDonough, y Sun, 1995), de muestras correspondiente al Set de Datos A. Se anexa datos estadísticos: Mínimo, primer cuartil, segundo cuartil (mediana), promedio, tercer cuartil y máximo.

Las muy elevadas concentraciones de *Cu* y *V* sobre la media de CCS serían consecuencia de una condición particular del margen andino de la región, condición que queda propuesta como objeto de estudio para un trabajo posterior.

**TABLA 16:** Composiciones representativas de línea base (LB) respecto a composición de Corteza Continental Superior (CCS). Parámetros ordenados de mayor a menor en función de su factor de enriquecimiento en Línea Base respecto a CCS. Se destacan en azul los parámetros que presenten un enriquecimiento en la Hoja La Serena.

Parámetro	Unidad	LB	CCS**	Fracción LB/CCS	Parámetro	Unidad	LB	CCS**	Fracción LB/CCS
Cu	ppm	84.9	28	3.03	Pb	ppm	11.38	17	0.67
V	ppm	280	97	2.89	Sb	ppm	0.25	0.4	0.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% peso	11.07	5.04	2.20	Nb	ppm	7.27	12	0.61
TiO <sub>2</sub>	% peso	1.3	0.64	2.04	Rb	ppm	50.6	84	0.60
MnO	% peso	0.19	0.1	1.87	Ta	ppm	0.53	0.9	0.59
As	ppm	7.53	4.8	1.57	Ba	ppm	367.07	628	0.58
CaO	% peso	5.38	3.59	1.50	K <sub>2</sub> O	% peso	1.56	2.8	0.56
Sc	ppm	20.32	14	1.45	S <sub>TOTAL</sub>	ppm	263	620	0.52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% peso	0.21	0.15	1.42	Hg	ppm	0.02	0.05	0.49
Cd	ppm	0.13	0.09	1.42	Ni	ppm	11.46	47	0.24
Zr	ppm	256	193	1.33	C <sub>TOTAL</sub>	% peso	0.75	No reportado	No aplica
Hf	ppm	6.92	5.3	1.31	Ag	ppm	<0.1*	0.053	No aplica
Y	ppm	25	21	1.19	Bi	ppm	0.1	0.16	No aplica
Co	ppm	20.07	17.3	1.16	Se	ppm	<0.5*	0.09	No aplica
Au	ppb	1.65	1.5	1.10	Tl	ppm	<0.1*	0.9	No aplica
Sr	ppm	336	320	1.05	La	ppm	20.63	31	0.67
MgO	% peso	2.4	2.48	0.97	Ce	ppm	46.11	63	0.73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% peso	14.8	15.4	0.96	Pr	ppm	5.84	7.1	0.82
Zn	ppm	64.02	67	0.96	Nd	ppm	24.6	27	0.91
Ga	ppm	16.7	17.5	0.95	Sm	ppm	5.25	4.7	1.12
Sn	ppm	2	2.1	0.95	Eu	ppm	1.29	1	1.29
Na <sub>2</sub> O	% peso	2.99	3.27	0.91	Gd	ppm	5.02	4	1.26
Cs	ppm	3.91	4.9	0.80	Tb	ppm	0.73	0.7	1.04
U	ppm	2.12	2.7	0.79	Dy	ppm	4.45	3.9	1.14
SiO <sub>2</sub>	% peso	50.88	66.6	0.76	Ho	ppm	0.87	0.83	1.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ppm	68.86	92	0.75	Er	ppm	2.54	2.3	1.10
Th	ppm	7.47	10.5	0.71	Tm	ppm	0.39	0.3	1.29
Mo	ppm	0.78	1.1	0.70	Yb	ppm	2.54	1.96	1.29
W	ppm	1.33	1.9	0.70	Lu	ppm	0.4	0.31	1.28

Por otro lado, cabe discutir la representatividad del vector línea base en su capacidad real de reflejar la composición de la litología del área de estudio. Para ello es necesario evaluar ciertos puntos metodológicos del presente estudio los cuales pueden desviar las composiciones de los sedimentos fluviales respecto a las composiciones ‘reales’ del basamento rocoso.

Por un lado, es importante recordar que las muestras que son analizadas en su composición química (pulpas) corresponden a la fracción fina (<0.18 mm) de las muestras recolectadas (Espinoza et al 2016). Esto puede implicar una sobre o sub representación de ciertos componentes químicos producto de segregación granulométrica por efectos de procesos exógenos. En trabajos realizados sobre geoquímica de sedimentos fluviales en otras cuencas, Roth (2016), se ha identificado un efecto del tamaño de grano en las composiciones químicas resultantes. En aquel trabajo se señala que granulometrías finas tenderían a concentrar fases minerales densas y arcillas.

En este sentido los componentes minerales mayoritarios más resistentes a la meteorización química se verían empobrecidos en las fracciones finas. En específico la sílice se vería sub-representada, en tanto este compuesto se concentraría en fracciones gruesas por su resistencia a la descomposición química, en desproporción respecto a otros elementos mayoritarios como *Na, Mg, K, Ca, Rb, Sr* que participan preferencialmente en la construcción de arcillas. Ante esto, la concentración de línea base de  $SiO_2$ , de entre 50.9 a 51.9 % en peso, análoga a la de un basalto a andesita basáltica, probablemente no es fiel representante de la composición del basamento rocoso como se esperaría. Esto tendría sentido dado que las litologías mayoritarias en el área rondan en composiciones intermedias preferentemente entre andesitas a dacitas a lo que se le suma el aporte de cuerpos, aislados y de menor volumen, de composiciones marcadamente ácidas (diversas calderas y plutones de alta cordillera en el margen oriental), con lo cual llevaría a pensar que la concentración de  $SiO_2$  estuviera en el rango rocas andesíticas principalmente.

Con la intención de medir indirectamente este efecto se calcula el índice de alteración química (CIA: Chemical Index of Alteration; Nesbitt y Young, 1982) para las muestras consideradas en el set de datos A.

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO)} \cdot 100 \quad (26)$$

Se obtiene que el CIA promedio para muestras del set de datos A es bien definido en torno al 59-60% (Tabla 20). Un valor de CIA de 50% representa una roca inalterada químicamente y para valores progresivamente mayores las arcillas aumentan en proporción a expensas de feldespatos (Nesbitt y Young, 1989). Para un valor de 60% de CIA los feldespatos alteran a caolinita o illita (como arcillas típicas) en alrededor de un 17% del volumen total en tanto que el cuarzo se ve inalterado (Figura 24).

Luego, si consideramos las formulas genéricas del feldespato potásico, plagioclasa, illita y caolinita, es posible estimar, a groso modo, la ‘disminución’ de sílice por los cambios mineralógicos señalados. Esto lo podemos realizar estimando la proporción estequiometría de sílice en cada estructura mineral (Tabla 21) para luego estimar la disminución porcentual de la sílice producto de la transición feldespato-arcilla. En este caso se idealiza una alteración feldespato potásico (K-Feld.)-illita(ill) y plagioclasa(Pg)-caolinita(Kao).

**TABLA 17:** Resultados CIA muestras set de datos A.

Mínimo	33 %
1er Cuartil	57 %
Promedio	59 %
Mediana	60 %
3er cuartil	63 %
Máximo	72 %

Asumiendo un sistema abierto, es decir con interacción de componentes externos al sistema 'roca', la disminución estequiometría al transformar una unidad estructural de K-Feld. en illita se encuentra entre el 0 y 62% de la sílice original contenida en aquel feldespato (en función de (27): Porcentaje estequiométrico de disminución de contenido de sílice producto de alteración de feldespatos a arcillas como consecuencia de meteorización química).

$$\left( \begin{array}{c} \text{Disminución} \\ \text{estequiometrica} \\ \text{de } SiO_2 \end{array} \right) = 100 - \frac{\%SiO_2_{\text{Arcilla}}}{\%SiO_2_{\text{Feldespato}}} \cdot 100 \quad (27)$$

Luego, la disminución 'volumétrica' de sílice es calculado como el producto entre el cociente 'volumétrico' entre arcilla y feldespato según CIA, y la disminución estequiometría de sílice (28).

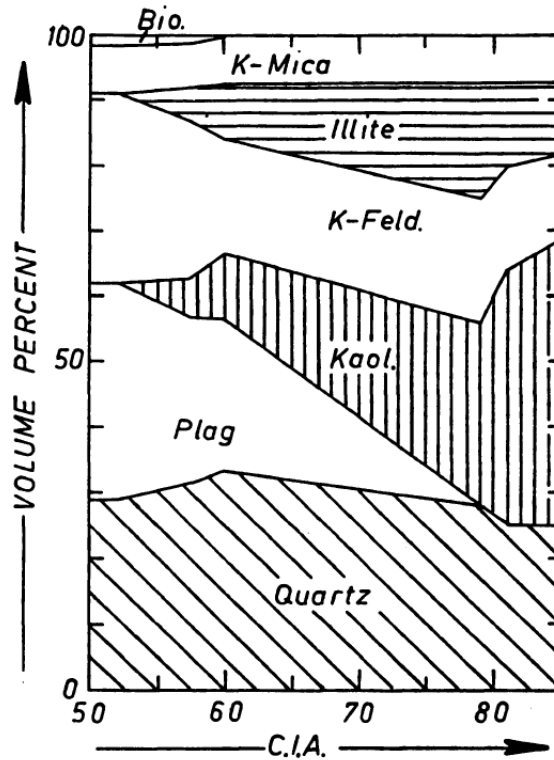
$$\left( \begin{array}{c} \% \text{ disminución} \\ \text{'volumétrica' } SiO_2 \end{array} \right)_{CIA} = \left( \begin{array}{c} \text{Disminución} \\ \text{estequiometrica} \\ \text{de } SiO_2 \end{array} \right) \cdot \left( \frac{Arcilla_{CIA}}{Feldespato_{CIA}} \cdot 100 \right) \quad (28)$$

A partir de la Figura 24 se estima que tanto la illita como el caolín representan un 30% del feldespato potasio y plagioclasa respectivamente bajo un CIA igual a 60% (segundo miembro de (39)).

Si consideramos una 'roca media' de la corteza continental superior esta contiene aproximadamente un 35% de plagioclasa un 11% de feldespato potásico (en base a Nesbitt y Young, 1984). Luego la disminución neta de sílice por feldespato, aproximada según 'roca media' de CCS, es el producto entre la disminución 'volumétrica' de sílice y la concentración de cada feldespato en al 'roca media' (29).

$$\left( \begin{array}{c} \text{Pérdida neta de } SiO_2 \\ \text{en 'roca media'} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \% \text{ disminución} \\ \text{'volumétrica' } SiO_2 \end{array} \right)_{CIA} \cdot \left( \frac{\% \text{ Feldespato en}}{100} \right) \quad (29)$$





**FIGURA 24:** Cambios porcentuales en volumen de mineralogía mayoritaria en función de intensidad de la meteorización (CIA) (extraído de Nesbitt y Young, 1989)

De estos cálculos se obtiene que para una roca de composición media de CCS la pérdida de sílice producto de meteorización química de feldespato potásico y plagioclasa se encuentra entre el 0 a 9% de la sílice total (columna derecha Tabla 22), considerando alteración a illita y caolinita respectivamente. Ahora, si asumimos que la arcilla es incorporada preferencialmente a los sedimentos y estos se encuentra en la fracción fina y además si descartamos los extremos de este rango, y consideramos el valor medio (4.5%), el valor de sílice en sedimentos fluviales podría ser empobrecido en un porcentaje en un 4.5%. Esto virtualmente significaría un valor línea base de  $SiO_2$  corregido de 53-54%. Estos valores se encuentran netamente en el rango de la andesita-basáltica por sobre los estimados para línea base.

**TABLA 18:** Fracción estequiometría aproximada de molécula  $SiO_2$  en feldespatos y arcillas.

Mineral	Formula genérica	Fracción ( $SiO_2$ /Total)	% ( $SiO_2$ /Total)
Feldespato potásico	$(K, Na, Ca, Ba, NH_4)(Si, Al)_4O_4$	$(0/5 - 4/5)$	(0 - 80)
Plagioclasa	$(Na, Ca)(Si, Al)_3O_8$	$\sim(0/4 - 3/4)$	(0 - 75)
Illita	$(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$	$\sim(0/10 - 3/10)$	(0 - 30)
Caolinita	$Al_2Si_2(OH)_4$	$\sim(2/8)$	(25)

Claro está que el procedimiento recién realizado una aproximación. Es simplemente un ejercicio con el objetivo de comprender la magnitud de la incidencia de procesos de meteorización química sobre la composición medida en la fracción fina de sedimentos. Este procedimiento no considera un sin número de otras fases minerales, tipos de roca y procesos físicos. En ningún caso debe ser considerado como una corrección válida, no obstante, puede ser un punto de partida para generar un factor de corrección robusto de empobrecimiento de sílice (u otras fases) en la fracción fina de sedimentos.

**TABLA 19:** Ejercicio de estimación de pérdida de sílice por alteración de arcillas de feldespatos. Porcentaje de disminución estequiométrica de  $SiO_2$  calculado a partir de Tabla 21.

Alteración	% disminución estequiométrica de $SiO_2$	Arcilla/Feld. (CIA=60)	% disminución 'volumétrica' de $SiO_2$ (CIA=60)	% en "Roca media"*	Pérdida neta de $SiO_2$ a CIA=60 en "Roca media"*
K-Feld. - ill	~(0 - 62)	~30%	~(0 - 18)	K-Feld. = 11%	~(0 - 2)
Pg - Kao	~(0 - 66)	~30%	~(0 - 20)	Pg = 35%	~(0 - 7)

(\*) Composición de 'roca media' de corteza continental superior a partir de Nesbitt y Young, 1984)

Por otro lado, la meteorización de fases máficas es más eficiente que sus contrapartes félsicas, por lo cual los componentes máficos producirían mayor proporción de regolito o suelo, y con ello mayor proporción de sedimentos disponibles (Sensarma et al., 2008). Además existen evidencia de que fases densas ferromagnesianas (magnetita, ilmenita, rutilo, etc.) tienden a ser concentrados en fracciones finas (Roth, 2016), a lo cual se le suma que los elementos propios de estas fases ( $Fe_2O_3$  -  $TiO_2$  -  $V$  -  $Cr_2O_3$  -  $MnO$ ) comúnmente se ven enriquecidos en arcillas y en óxidos e hidróxidos de Fe-Mn (Meyer et al., 1979). Todo ello permite pensar que las concentraciones de línea base obtenidas para elementos tales como  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $V$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $Sc$  estarían sobre estimadas. Sin embargo, el grado de esta desviación no es aun medible.

### **6.2.3 Evaluación de metodología CODA versus representaciones tradicionales**

#### Herramientas estadísticas

Comparando los resultados entregados por las matrices de correlación de datos clr-transformados y su contra parte tradicional (en el simplex) es posible corroborar que las transformaciones log-cocientes tienen un efecto apreciable en las relaciones entre variables (ver sección 5.5.4). Si bien muchas de las correlaciones entre variables son similares entre uno y otro caso, al realizar dichas transformaciones algunas relaciones pueden ser modificadas de manera importante influenciando directamente su interpretación.

Por ejemplo, la buena correlación positiva entre *Co* y *Mo* mostrada en la matriz de correlación tradicional indicaría que existen zonas con un alto contenido de ambos metales, no obstante la baja o nula correlación de los mismos en la matriz de correlación de datos clr-transformados indicaría que estos dos no tenderían a estar asociados a las mismas fases minerales o bien uno de ellos tendría preferencia por una fase específica. Ambos elementos son clasificados como siderófilos y/o calcófilos e incluso litófilos (Salminen et al., 2005), ante ello resulta interesante discernir cuál de estos comportamientos domina en cada uno de ellos.

A partir de la matriz de correlación de datos clr-transformados se puede interpretar lo siguiente. Por un lado, el cobalto estaría principalmente vinculado a fases densas de Fe-Ti dadas sus buenas correlaciones con elementos propios de estas fases, no así con respecto al azufre, con el cual presenta nula correlación. Por su parte el molibdeno también presenta una leve correlación positiva con elementos propios de fases siderófilas, no tan pronunciados como el cobalto, a lo que se le suma que el molibdeno muestra una correlación positiva con respecto al azufre. Esto indicaría que ambos elementos presentan un comportamiento siderófilo-litófilo de fondo, no obstante, el molibdeno presenta una preferencia a ser segregado en sulfuros en comparación al cobalto. Esta señal 'calcófila' del *Mo* sería producto de la importante mineralización de Cu-Mo en el área.

Otros ejemplos ilustrativos de situaciones similares son las correlaciones que presentan *Zn, Pb, As, Cd* con respecto a *Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ba-Cs* indicativo de afinidad de dichos elementos metálicos a arcillas (punto (xi) sección 6.2.1.1), los cuales son más claros en la matriz de datos clr-transformados en comparación a la matriz de correlación tradicional. O bien la nula correlación que presenta el *MgO* con respecto al *SiO<sub>2</sub>* en la matriz de correlación tradicional enmascarando la relación que presentaría el *MgO* a fases silicatadas máficas.

A partir de estos ejemplos es posible aseverar que el empleo de transformaciones log-cocientes para la representación de herramientas estadísticas multivariantes, tales como la matriz de correlación, resulta ser útil a la hora de encontrar relaciones genéticas entre variables, las cuales pueden no ser claras al tratar los datos en 'crudo', es decir, en el Simplex.

#### Vector Línea Base

De la Tabla 13, sección 5.2.2, es posible apreciar que el resultado de vector línea base por medio de una estrategia CoDA no reviste mayores diferencias a una representación inmediata de los datos crudos empleando estimadores de tendencia central más robustos tales como la mediana o media geométrica (influencia discutida en sección 6.2.2.1). Las diferencias presentadas de ciertos parámetros entre ambas representaciones estarían dadas por el procedimiento de separación de outliers. En ese sentido la ventaja práctica del empleo de una estrategia CoDA, intrínsecamente multivariable, es que la necesaria separación de composiciones anómalas es 'más simple' y menos sesgada metodológicamente con respecto a un método univariante. En una metodología multivariable las composiciones anómalas son determinadas en un solo paso, en cambio en métodos univariantes se requiere un mayor consumo de tiempo para analizar cada variable por separado.

## **7 CONCLUSIONES**

Por medio de la ejecución de una metodología multivariable en base a análisis de datos composicionales, propuesto por Buccianti y colaboradores (2015), es posible determinar una línea base geoquímica de sedimentos fluviales de la Hoja La Serena (1:250.000). Esta línea base consta de diferentes herramientas y representaciones, tales como un Vector Línea Base el cual pretende representar la composición típica del área de estudio, así como la matriz de variación, matriz de covarianzas de datos clr-transformados y Biplots composicionales, los cuales permiten caracterizar e interpretar el comportamiento de las variables estudiadas.

### **7.1 DETERMINACIÓN DE COMPOSICIONES ANÓMALAS, SEPARACIÓN DE SET DE DATOS Y REPRESENTACIÓN DE VECTOR LÍNEA BASE**

Por medio del procedimiento de determinación de composiciones anómalas empleado, y la consiguiente utilidad en la separación de set de los cuales es posible obtener un vector de línea base, se concluye que:

- i. El método de determinación de composiciones anómalas desde una perspectiva multivariable por medio del cálculo de distancia de Mahalanobis robustas de datos transformados por medio de transformaciones log-cocientes carece de sesgo evidente y además permite incorporar la distribución de variabilidad original al set de datos que es empleado en la formulación de una línea base. De este modo la línea base da cuenta no solo de las señales de fondo (background) sino también de los diferentes procesos exógenos afectando la geoquímica de sedimentos fluviales.
- ii. Las concentraciones químicas obtenidas como parte de vector línea base no difieren significativamente de las obtenidas por medio de estimadores de tendencia central aplicado sobre los datos originales
- iii. Los métodos matemáticos empleados en la representación de un vector línea base deben ser debidamente explicitados dadas las considerables diferencias en magnitud mostradas en sus diferentes variantes (e.g. vector clausurado, media geométrica, mediana, media aritmética). Esto tiene influencia directa en posteriores empleos y comparaciones.
- iv. El Vector Línea Base muestra una buena relación con respecto a geológica básica de la región. Sin embargo, como consecuencias de factores metodológicos tales como análisis de fracciones finas de sedimentos, es esperable una sobre o sub-representación de diferentes elementos y compuestos según sea el caso

## 7.2 ANÁLISIS EXPLORATORIOS DE DATOS COMPOSICIONALES Y SUS INTERPRETACIONES

Por medio de herramientas de análisis multivariantes de datos composicionales, tales como matriz de variación, matriz de correlación de datos clr-transformados, Biplot composicional y mapas de puntos de cocientes entre variables, así como trabajos anteriores, o paralelos, realizados en el área de estudio, es posible interpretar relaciones entre parámetros concordantes con la geología y antecedentes descritos para el área de estudio. De ello es posible concluir que:

- i. El análisis estadístico por medio de una estrategia CoDA permite visualizar relaciones entre variables que no son del todo claras por medio de una metodología tradicional. Esto como consecuencia de evitar correlaciones espurias producto de la restricción de suma constante de datos composicionales. De las relaciones entre variables encontradas, no identificables por medio de datos composicionales, destacan:
  - Asociación entre MgO, Sc y Ga a fases silicatadas
  - Desacoplamiento en el comportamiento geoquímico regional entre el Co y Ni
  - Enriquecimiento regional diferencial de MnO respecto a otras fases densas.
  - Concentración de minerales densos enriquecidos en Zr, Hf, Ta, Nb, U, Th en el margen suroccidental de la Hoja La Serena dando cuenta de una marcada señal geoquímica del fondo de aquel sector. En menor medida se acopla un enriquecimiento de elementos propios de fases ferromagnesianas como Fe, Ti, Cr, Mn, V, no obstante, la señal de este último grupo se encuentra mayormente dispersa en el área de estudio.
  - Se verifica que los principales portadores de metales y metaloides, tales como As, Pb, Zn, Cd, son arcillas y subordinadamente sulfuros.
  - Se verifica señales de fondo esperables como anomalía de Eu respecto al resto de REE.
- ii. Se logra identificar parámetros de mayor variabilidad y se logra correlacionar con posibles fuentes de tal condición. Por ejemplo:
  - Alta variabilidad de Au-Hg- (Cu-Sb) producto de mineralización en franja metalogénica del cretácico inferior.
  - Alta Variabilidad de azufre como producto de mineralización de sulfuros y acumulación de materia orgánica
  - Variabilidad de Carbono como producto de afloramientos de rocas carbonatadas dispersas y acumulación de materia orgánica.
  - Variabilidad de As, Pb, Zn, Cd, Cs producto de alteración hidrotermal, con importante proveniencia desde alteración de rocas paleozoica de alta montaña (fuera del área de estudio)

### **7.3 EVALUACIÓN GENERAL DE METODOLOGÍA CODA**

En términos generales el procedimiento de determinación e línea base desarrollado en el presente estudio tiene como ventajas:

- Ser Insesgado
- Permite sintetizar la información geoquímica a nivel regional haciéndola comparable
- De relativa rápida ejecución técnica al ser tratados los datos como un solo objeto y no analizado parámetro por parámetro.
- Logra dar cuenta de relaciones genéricas entre parámetros la cuales no son claras por medio de otras metodologías centradas en la magnitud absoluta de concentraciones.

Como desventajas es posible mencionar que:

- Requiere de una suma de tiempo importante en la inspección de herramientas estadísticas e interpretaciones.
- Las interpretaciones se encuentran fuertemente sujetas al conocimiento previo de la región estudiada y la experticia por parte analista.
- La lectura y manejo de datos composicionales no es intuitiva, por lo cual requiere de considerable tiempo en el aprendizaje de sus bases teóricas y aplicaciones.

En suma, se estima que la metodología ejecutada es pertinente como herramienta en la determinación de una línea base geoquímica teniendo en consideración las particularidades de los datos composicionales.

## 8 RECOMENDACIONES

Como recomendaciones y proyecciones que emanan del presente trabajo pueden ser mencionados:

- Aplicar la metodología multivariable empleada a escala de cuenca fluvial como sistema geoquímico contenido y delimitado, a diferencia de una hoja cartográfica que no guarda relación al comportamiento de los sedimentos y su distribución.
- Aplicar la metodología a diferentes escalas de trabajo y circunscritas a zonas de características más homogéneas. Por ejemplo, llevar a la cabo metodología íntegramente en diferentes porciones hoja diferenciadas por algún criterio (geología, fisiográfico, climático, etc.). Con ello se lograría aminorar efectos de heterogeneidad a gran escala y facilitar la identificación de procesos geoquímicos y transporte por medio de herramientas exploratorias de datos composicionales.
- Complementar la metodología empleada con otras, tales como redes neuronales artificiales, gráficos de variación geográfica, índices de anomalía de sulfuros, hierro u otros (Lacassie, 2008; Astudillo, 2011, Miralles, 2013, Espinoza et al., in prep.) de manera robustecer las interpretaciones sobre la región desde una perspectiva metodológica variada.
- Incorporar procesamientos de datos desde una perspectiva composicional (CoDA) en la aplicación de otros tipos de análisis de datos. Esto es, aplicar transformaciones log-cocientes previamente a los datos para luego ser analizados por medio de otras metodologías, como por ejemplo redes neuronales artificiales.
- Investigar nuevas posibilidades de trabajar los datos empleados, desde una perspectiva de datos composicionales, en función de análisis de impactos ambientales.
  - Se proyecta la posibilidad de estimar un ‘grado de afectación antropogénica’ en la geoquímica de sedimentos fluviales por medio de la comparación de química de terrazas fluviales pre-operacionales respecto a su contraparte activa, así como respecto a la línea base ya delineada.
  - Estudiar la posibilidad de, empleando datos composicionales y subcomposiciones de interés, cuantificar cual es el grado de contaminación en sedimentos fluviales activos proveniente desde relaves mineros de la región. Ello empleado los datos Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile (SERNAGEOMIN, 2017)

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Aitchison, J. (1982). The statistical analysis of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 139-177.
- Alperin, M. (2013) *Introducción al análisis estadístico de datos geológicos* / Marta Alperin; con prólogo de Luis Spalletti. - 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata, ISBN 978-950-34-1029-5
- Astudillo Wells, 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 para optar al título de Geólogo. Disponible en <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/104185>
- Buccianti, A., Lima, A., Albanese, S., Cannatelli, C., Esposito, R., & De Vivo, B. (2015). Exploring topsoil geochemistry from the CoDA (Compositional Data Analysis) perspective: The multi-element data archive of the Campania Region (Southern Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 159, 302-316.
- Boric, R. (2010). Geología y yacimientos metálicos del distrito Talcuna, IV Región de Coquimbo. *Andean Geology*, (25-26).
- Cabanis, B., Cochemé, J. J., Vellutini, P. J., Joron, J. L., & Treuil, M. (1990). Post-collisional Permian volcanism in northwestern Corsica: an assessment based on mineralogy and trace element geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44(1-2), 51-67.
- Castillo, S., & Lozano, E. (2007). QQ Plot Normal. Los puntos de posición gráfica. *Iniciación a la investigación*, revista electrónica Universidad de Jaén.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *The Geology of Chile*, 21-114.
- Chayes, F. (1960). On correlation between variables of constant sum. *Journal of Geophysical research*, 65(12), 4185-4193.
- Darnley, A. G. (1990). International geochemical mapping: a new global project. *Journal of Geochemical Exploration*, 39(1-2), 1-13.
- Darnley, A. G., Bjorklund, A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Koval, P. V., Plant, J. A., ... & Tauchid, M. Xie Xuejing (1995) A global geochemical database for environmental and resource management. Recommendations for International Geochemical Mapping. Final Report of IGCP Project 259. *Earth Sciences*, 19.
- Díaz, A.; Lacassie, J.P.; Vivallo, W. (2010). Yacimientos Metalíferos del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 31: 28 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Dvorožňák, M. (2012). RapidMiner Clustering Performance Plugin. Lugar de publicación: <http://korek.name/web/moje-tvorba/rapidminer-clustering-performance-plugin-average-silhouette-cophenetic-coefficient>.
- Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., & Barcelo-Vidal, C. (2003). Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology*, 35(3), 279-300.
- Egozcue, J. J., & Pawlowsky-Glahn, V. (2011). Análisis composicional de datos en Ciencias Geoambientales. © *Boletín Geológico y Minero*, 2011, vol. 122, núm. 4, p. 439-452.



- Emery, X. (2013). Análisis estadístico de dato. Apunte curso MI4040-Análisis estadístico y geostadístico de datos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
- Emparan, C.; Pineda, G. (1999). Área Condoriaco Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Mapas Geológicos, No. 12, 1 mapa escala 1:100.000, 1 anexo, Santiago.
- Emparan, C.; Pineda, G. (2000). Área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Mapas Geológicos, No. 18, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Emparan, C.; Pineda, G. (2006). Geología del Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 96, 85 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago
- Espinoza, F.; Astudillo, F.; Baeza, L.; Carrasco, F.; Castillo, P.; Lacassie, J.; Miralles, C.; Muñoz, N.; Ramírez, C., (2016). Base de datos de Geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Base de datos 4: 42 p., 1 Base de datos, 1 Anexo (1 DVD versión 1.0). Santiago.
- Espinoza, F.; Lacassie, J.; Carrasco, F.; Astudillo, F.; Ramírez, C.; Salinas, P. (in prep.). Geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geoquímica No.4, 1 DVD versión 1.0, que contiene 1 mapa interactivo para 59 elementos químicos escala 1:250.000, 1 texto y 2 anexos. Santiago.
- Ewart, Anthony. (1982). "The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range." *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks* 7 25-98
- Filzmoser, P., Garrett, R. G., & Reimann, C. (2005). Multivariate outlier detection in exploration geochemistry. *Computers & geosciences*, 31(5), 579-587.
- Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C., (2011). Interpretation of multivariate outliers for compositional data. *Comput. Geosci.* 39, 77-85.
- Gana, F. (1991). Mapa geológico de la cordillera de la costa entre La Serena y Quebrada El Teniente: Región de Coquimbo. 1 mapa, 1:100.000.
- Hawkes H. E., Webb J. S. (1962) *Geochemistry in Mineral Exploration...* Harper & Row, Publisher, Incorporated. 49 East 33rd Street, New York 16, N. Y.
- Hubert, M., & Debruyne, M. (2010). Minimum covariance determinant. *Wiley interdisciplinary reviews: Computational statistics*, 2(1), 36-43.
- Jorquera, R.; Díaz, A.; Vivallo, W.; Astudillo, N. (2009A). Yacimientos Metalíferos del área Vicuña-Pichasca, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 29: 29 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Jorquera, R.; Díaz, A.; Vivallo, W.; Lacassie, J. (2009B). Yacimientos Metalíferos del Área Monte Patria-El Maqui, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 28: 29 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Jorquera, R.; Pizarro, N.; Vogel, S.; Díaz, A.; Vivallo, W. (2011). Yacimientos Metalíferos del Área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y

- Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 32: 32 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Jorquera, R.; Vivallo, W.; Carrasco, R.; Pizarro, N.; Pineda, G.; Vogel, S. (2012). Yacimientos Metalíferos del Área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 33: 41 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (1990). Finding groups in data: an introduction to cluster analysis (Vol. 344). John Wiley & Sons.
- Lacassie, J.P. (2008). Estudio mineralógico y geoquímico del sistema fluvial del río Rapel, VI Región, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-08-37, 66 p. Santiago.
- Le Bas, Michael J., et al. (1986). "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram." *Journal of petrology* 27.3: 745-750.
- Maksaev, J. V. (2001). Reseña Metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. Santiago, p.63. Link: <http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/METALOGENESIS%20DE%20CHILE.pdf>
- Mateu-Figueras, G., Martín-Fernández, J. A., Pawlowsky-Glahn, V., & Barceló-Vidal, C. (2003). El problema del análisis estadístico de datos composicionales. In 27th Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. Lleida, Abril (pp. 8-11).
- McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253.
- McLennan, S. M. (2001). Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4).
- Meyer, W. T., Theobald, P. K., & Bloom, H. (1979). Stream sediment geochemistry. *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Economic Geology Report*, 31, 411-434.
- 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 para optar al título de Geólogo. Disponible en <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/115370>
- Muñoz, J. A., y Uribe, I. A. (2013). Técnicas para detección de outliers multivariantes. *Revista en telecomunicaciones e informática*, 3(5), 11-25
- Nesbitt, H., & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885), 715-717.
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7), 1523-1534.
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1989). Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*, 97(2), 129-147.
- Oyarzún, J., Oyarzun, R., & Pavicic, S. (2001). Estudio geoquímico prospectivo en un distrito de Cu-Au-Hg asociado a zona de cizalla: Punitaqui, Chile. *Boletín geológico y Minero*, 112(2), 75-84.

- Oyarzun, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H., & Higuera, P. (2007). Mineral deposits and Cu–Zn–As dispersion–contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. *Environmental Geology*, 53(2), 283-294.
- Parada, M. A., López-Escobar, L., Oliveros, V., Fuentes, F., Morata, D., Calderón, M., ... & Figueroa, O. (2007). Andean magmatism. In *The geology of Chile*.
- Pawłowsky-Glahn, V., Egozcue, J. J., & Tolosana Delgado, R. (2011A). Lecture notes on compositional data analysis.
- Pawłowsky-Glahn, V., & Buccianti, A. (Eds.). (2011B). *Compositional data analysis: Theory and applications*. John Wiley & Sons.
- Pineda, G.: Emparan, C. (2006). Geología del área Vicuña-Pichasca, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, No. 97.40 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Pineda, G.; Calderón, M. (2008). Hoja Monte Patria-El Maqui, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 116: 44 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Ramirez Mora, C. (2012). Caracterización geoquímica e identificación de zonas de anomalías en la cordillera de la costa entre los 20°S y 21°S, I Región de Tarapacá Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Disponible en <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/111539>
- Reimann, C., & Filzmoser, P. (2000). Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental geology*, 39(9), 1001-1014.
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R. G. (2005). Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 346(1), 1-16.
- Roth Chaparro, T. (2016). Geoquímica y mineralogía de los sedimentos fluviales de la cuenca del río Aysén, XI Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, Chile: influencia de factores antrópicos y naturales. Memoria para optar al título de Geólogo. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138553>
- Rousseeuw, P.J. (1984), Least Median of Squares Regression, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 79, pp. 871-881.
- Rousseeuw, P. J. (1985). Multivariate estimation with high breakdown point. *Mathematical statistics and applications*, 8, 283-297.
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of computational and applied mathematics*, 20, 53-65.
- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. *Treatise on geochemistry*, 3, 659.
- Sabadías, A. V. (1995). Estadística descriptiva e inferencial (Vol. 8). Univ de Castilla La Mancha.
- Salminen, R., & Gregorauskiene, V. (2000). Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology. *Applied Geochemistry*, 15(5), 647-653.
- Salminen, R., Batista, M. J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., ... & Heitzmann, P. (2005). Geochemical atlas of Europe, part 1, background information, methodology and maps. Geological survey of Finland.

- 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), 111-125.
- SERNAGEOMIN (2002). Mapa Geológico de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica No. 75, 1 mapa en 3 hojas, escala 1:1.000.000. Santiago.
- SERNAGEOMIN (2017). Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, Subdirección Nacional de Minería. Programa de Caracterización Geoquímica de Depósitos de Relaves. Web: <http://www.sernageomin.cl/deposito-de-relaves/>
- Struyf, A., Hubert, M., & Rousseeuw, P. (1997). Clustering in an object-oriented environment. *Journal of Statistical Software*, 1(4), 1-30.
- Thomas, H. (1967). Geología de la Hoja Ovalle (Coquimbo). 58 p. y carta geológica (1:250.000). Boletín, (23). ungl
- Van den Boogaart, K. G., & Tolosana-Delgado, R. (2013). Analyzing compositional data with R (Vol. 122). Heidelberg: Springer.

## **ANEXOS**

## INDICE ANEXOS

ANEXO A .....	- 102 -
Elementos teóricos .....	- 102 -
1. Operatoria en el Simplex (Continuación) .....	- 103 -
1.1. Operación Perturbación .....	- 103 -
1.2. Operación Potenciación .....	- 103 -
1.3. Subcomposiciones y amalgamas.....	- 103 -
2. Biplot composicional (continuación).....	- 104 -
2.1. Construcción del Biplot composicional .....	- 104 -
2.2. Interpretación del Biplot composicional .....	- 105 -
ANEXO B .....	- 108 -
Confección de Base de Datos Original .....	- 108 -
1. Recolección de muestras .....	- 109 -
1.1. Selección de puntos de muestreo .....	- 109 -
1.2. Procedimiento de muestreo .....	- 109 -
1.3. Ambientes sedimentarios .....	- 109 -
2. Análisis Químico .....	- 110 -
3. Control de calidad .....	- 110 -
3.1. Precisión de los resultados del análisis químico .....	- 111 -
ANEXO C .....	- 115 -
Unidades Litoestratificadas y Sedimentarias no consolidadas .....	- 115 -
1. Unidades litoestratificadas .....	- 116 -
2. Unidades sedimentarias no consolidadas.....	- 131 -
ANEXO D .....	- 133 -
Matriz de Partición Binaria.....	- 133 -
ANEXO D.0 .....	- 134 -
ANEXO D.1 .....	- 135 -
ANEXO D.2 .....	- 136 -
ANEXO D.3 .....	- 137 -
ANEXO D.4 .....	- 138 -
ANEXO D.5 .....	- 139 -
ANEXO D.6 .....	- 140 -
ANEXO E.....	- 141 -
Matriz de Variación de Base de Datos Modificada .....	- 141 -
ANEXO E.0 .....	- 142 -

ANEXO E.1 .....	- 143 -
ANEXO E.2 .....	- 144 -
ANEXO E.3 .....	- 145 -
ANEXO E.4 .....	- 146 -
ANEXO E.5 .....	- 147 -
ANEXO E.6 .....	- 148 -
ANEXO F.....	- 149 -
Matriz de Variación de Set de Datos A .....	- 149 -
ANEXO F.0.....	- 150 -
ANEXO F.1.....	- 151 -
ANEXO F.2.....	- 152 -
ANEXO F.3.....	- 153 -
ANEXO F.4.....	- 154 -
ANEXO F.5.....	- 155 -
ANEXO F.6.....	- 156 -
ANEXO G .....	- 157 -
Matriz de Correlación de datos clr-transformados, Base de Datos Modificada .....	- 157 -
ANEXO G.0 .....	- 158 -
ANEXO G.1 .....	- 159 -
ANEXO G.2 .....	- 160 -
ANEXO G.3 .....	- 161 -
ANEXO G.4 .....	- 162 -
ANEXO G.5 .....	- 163 -
ANEXO G.6 .....	- 164 -
ANEXO H .....	- 165 -
Matriz de Correlación de datos ‘crudos’, Base de Datos Modificada .....	- 165 -
ANEXO H.0 .....	- 166 -
ANEXO H.1 .....	- 167 -
ANEXO H.2 .....	- 168 -
ANEXO H.3 .....	- 169 -
ANEXO H.4 .....	- 170 -
ANEXO H.5 .....	- 171 -
ANEXO H.6 .....	- 172 -
ANEXO I.....	- 173 -
Mapas de concentración de parámetros Fuera de Rango.....	- 173 -
ANEXO I.1.....	- 174 -

ANEXO I.2.....	- 175 -
ANEXO I.3.....	- 176 -
ANEXO I.4.....	- 177 -
ANEXO I.5.....	- 178 -
ANEXO I.6.....	- 179 -
ANEXO I.7.....	- 180 -
ANEXO I.8.....	- 181 -
ANEXO I.9.....	- 182 -
ANEXO I.10.....	- 183 -
ANEXO I.11.....	- 184 -
ANEXO I.12.....	- 185 -
ANEXO I.13.....	- 186 -
ANEXO I.14.....	- 187 -
ANEXO I.15.....	- 188 -
ANEXO I.16.....	- 189 -
ANEXO I.17.....	- 190 -
ANEXO I.18.....	- 191 -
ANEXO I.19.....	- 192 -
ANEXO I.20.....	- 193 -
ANEXO I.21.....	- 194 -
ANEXO I.22.....	- 195 -
ANEXO I.23.....	- 196 -
ANEXO I.24.....	- 197 -
ANEXO I.26.....	- 199 -
ANEXO J.....	- 200 -
Box Plot por parámetro de Set de Datos A.....	- 200 -
ANEXO J.1.....	- 201 -
ANEXO J.2.....	- 202 -
ANEXO J.3.....	- 203 -
ANEXO J.4.....	- 204 -
ANEXO J.5.....	- 205 -
ANEXO J.6.....	- 206 -
ANEXO J.7.....	- 207 -
ANEXO J.8.....	- 208 -
ANEXO J.9.....	- 209 -
ANEXO J.10.....	- 210 -



ANEXO J.11 .....	- 211 -
ANEXO J.12 .....	- 212 -
ANEXO K .....	- 213 -
Histograma y cortes por natural Jenks de mapas de cocientes .....	- 213 -
ANEXO K.1 .....	- 214 -

## **ANEXO A**

### **Elementos teóricos**

## 1. Operatoria en el Simplex (Continuación)

### 1.1. Operación Perturbación

La operación perturbación ( $\oplus$ ) se puede entender como el equivalente de la translación en el espacio de los reales.

Sean dos composiciones  $x, y \in S^D$ , tal que  $x = (x_1, x_2, \dots, x_D)$ ,  $y = (y_1, y_2, \dots, y_D)$ , el operador perturbación es definido como:

$$z = x \oplus y = C(x_1y_1, x_2y_2, \dots, x_Dy_D) \quad (30)$$

Donde  $C$  es el operador clausura y  $z \in S^D$ .

Si se perturba  $x$  por su inversa  $x^{-1} = (1/x_1, 1/x_2, \dots, 1/x_D)$  se obtiene el elemento neutro  $e = C(1, 1, \dots, 1) = (1/D, 1/D, \dots, 1/D)$  el cuál es el baricentro de la geometría determinada por la dimensión de la composición. Por ejemplo, el elemento neutro de una composición de 3 partes se encuentra en el centro geométrico de un diagrama ternario, i.e. el baricentro de un triángulo equilátero.

### 1.2. Operación Potenciación

La operación potenciación ( $\otimes$ ) se puede entender como el equivalente de la multiplicación en el espacio de los reales.

Sea una composición  $x \in S^D$  y un número  $a \in \mathbb{R}^+$ , el operador potenciación queda definido por:

$$y = x \otimes a = C(x_1^a, x_2^a, \dots, x_D^a) \quad (31)$$

Donde  $C$  es el operador clausura, e  $y \in S^D$ .

### 1.3. Subcomposiciones y amalgamas

Por medio del operador clausura se puede lograr manejar subespacios de una composición a elección. Es el caso de las subcomposiciones las que son obtenidas a partir de una composición original por medio de la extracción de las partes de interés para luego aplicar la clausura a estas. Por ejemplo, si se desea estudiar un sistema ternario particular como puede ser el CNK (CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) a partir de un set de datos que comprende las concentraciones de todos los óxidos mayoritarios de una muestra de roca.

Por otro lado, una *amalgama* es un subespacios del *Simplex* generado a partir de la recombinación de las partes de una composición, como puede ser sumando dos o más partes y dejando otras intactas. Un ejemplo ilustrativo es el diagrama AFM (alcalinos-hierro-magnesio) que considera A: K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O, F: F<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y M: MgO. Análogamente a una subcomposición, se extraen las partes y luego son clausuradas, salvo que entre ambos pasos las partes son recombinadas según se desea, en este caso se adicionan dos partes K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O.

## 2. Biplot composicional (continuación)

### 2.1. Construcción del Biplot composicional

La construcción de un Biplot composicional se basa en la descomposición de valores singulares de la matriz de datos clr-transformados. Sea  $Z$  matriz de datos clr-transformados, i.e.  $Z = clr(X)$ ,  $X \in S^D$ . Luego la descomposición de valores singulares de  $Z$  se obtiene a partir de la matriz de vectores propios de  $ZZ^T$  (matriz  $U$ ), de la matriz de vectores propios de  $Z^T Z$  (matriz  $V$ ), y de la raíz cuadrada de los valores propios positivos, tanto de  $ZZ^T$  como  $Z^T Z$ ,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ ,  $s \leq \min\{(D-1), n\}$ ,  $n$  número de observaciones. Esto se resume como:

$$clr(X) = Z = U \begin{pmatrix} k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_s \end{pmatrix} V^T \quad (32)$$

Donde  $k_i = \sqrt{\lambda_i}$  y la diagonal ordenada de mayor a menor magnitud, i.e.  $k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_s$ . La matriz  $U$  tiene una dimensión de  $(n, s)$  mientras que para  $V$  esta es de  $(D, s)$ . Ambas son matrices ortonormales, i.e.  $UU^T = I_s$  y  $VV^T = I_s$ .

En búsqueda de una representación visual, y con ello una reducción dimensional, la ecuación 25 puede reducirse a una aproximación ( $Y; Y \approx Z$ ) de los 2 primeros valores propios (un plano). Como dichos valores se encuentran ordenados de mayor a menor, la reducción a 2 dimensiones concentra la mayor parte de la variabilidad de los datos. Esta reducción se traduce en:

$$Y = (\vec{u}_1 \quad \vec{u}_2) \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} (\vec{v}_1 \quad \vec{v}_2)^T \quad (33)$$

Donde  $\vec{u}_i$  y  $\vec{v}_i$ ,  $i = 1 \vee 2$ , vectores columna tales:

$$\vec{u}_i = \begin{pmatrix} u_{i1} \\ u_{i2} \\ \vdots \\ u_{in} \end{pmatrix}; \quad \vec{v}_i = \begin{pmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \\ \vdots \\ v_{id} \end{pmatrix}$$

Los valores singulares  $k_1$  y  $k_2$  de la ecuación 25, los cuales guardan la mayor fracción de la variabilidad total, definen los 2 primeros componentes principales en los cuales se proyectan las observaciones y variables

La bondad de ajuste de esta reducción dimensional está dada por el cociente entre la suma de los valores propios considerados en la reducción dimensional y la suma de todos los valores propios (toda la variabilidad). Esto representa la fracción porcentual de la variabilidad total representada en la dimensión reducida (ecuación 29).

$$Bondad\ de\ ajuste = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_s} = \frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1^2 + k_2^2 + \dots + k_s^2} \quad (34)$$

Para obtener en definitiva un Biplot, la descomposición de valores singulares mostrada en la ecuación 26 debe ser planteada como la factorización de  $Z$  como producto de dos matrices:

$$Z = FG^T \quad (35)$$

Donde las matrices  $F$  y  $G$  son análogas a  $U$  y  $V$  respectivamente. Por un lado  $F$  da cuenta de los vectores singulares por izquierda (representación de los individuos/observaciones), y por otro lado  $G$  da cuenta de los vectores singulares por derecha (representación de las variables). Esta

factorización permite enfatizar a elección la representación final ya sea de los individuos o bien de las variables, asignando a uno u otro ( $F$  o  $G$ ) una ponderación como fracción de los valores propios  $k_i^2$ . Tomando el caso de la reducción bidimensional, la factorización  $Y = \hat{F}\hat{G}^T$  puede ser definida con factores tales como:

$$\begin{aligned}\hat{F} &= (k_1^\alpha \vec{u}_1 \quad k_2^\alpha \vec{u}_2) = (\vec{f}_1 \quad \vec{f}_2) \\ \hat{G} &= (k_1^{1-\alpha} \vec{v}_1 \quad k_2^{1-\alpha} \vec{v}_2) = (\vec{g}_1 \quad \vec{g}_2)\end{aligned}\tag{36}$$

Donde  $\alpha \in [0,1]$ .

Valores tipo para los cuales puede ser elegido  $\alpha$  son:

- $\alpha = 1$  : Biplot muestra las filas (observaciones) ponderadas por los valores singulares. Esto favorece la representación de los individuos. Este es llamado *Biplot de forma (Form Biplot)*
- $\alpha = 0$  : Biplot muestra las columnas (variables) ponderadas por los valores singulares. Esto favorece la representación de las variables. Este es llamado *Biplot de covarianza (covariance Biplot)*
- $\alpha = 0,5$ : Los valores singulares son igualmente distribuidos entre las filas y columnas. Esta es llamada *Biplot ponderado (scaled Biplot)*

A la hora de representar en conjunto las variables y los individuos es conveniente tomar un valor de  $\alpha = 0,5$ .

Una representación final de la factorización  $Y$  es:

$$Y = \begin{pmatrix} k_1^\alpha u_{11} & k_2^\alpha u_{21} \\ k_1^\alpha u_{12} & k_2^\alpha u_{22} \\ \vdots & \vdots \\ k_1^\alpha u_{1n} & k_2^\alpha u_{2n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1^{1-\alpha} v_{11} & k_1^{1-\alpha} v_{12} & \cdots & k_1^{1-\alpha} v_{1D} \\ k_2^{1-\alpha} v_{21} & k_2^{1-\alpha} v_{22} & \cdots & k_2^{1-\alpha} v_{2D} \end{pmatrix}\tag{37}$$

$$Y = \begin{pmatrix} \vec{f}_1 \\ \vec{f}_2 \\ \vdots \\ \vec{f}_n \end{pmatrix} (\vec{g}_1 \quad \vec{g}_2 \quad \cdots \quad \vec{g}_D)\tag{38}$$

El Biplot en definitiva consiste en proyectar las observaciones y/o variables proyectadas en una base ortonormal ( $F$  y/o  $G$ ), reducida dimensionalmente, obtenida mediante la descomposición de valores singulares. Cabe recordar que el biplot composicional proyecta las coordenadas clr-transformadas, por lo cual su interpretación no es exactamente igual a la realizada para un Biplot tradicional.

## 2.2. Interpretación del Biplot composicional

Como se ha dicho anteriormente, un Biplot composicional debe ser interpretado con cautela tomando en cuenta que los objetos proyectados no son exactamente los datos crudos, sino más bien el resultado de una transformación log-cociente. Para lograr interpretar un Biplot

composicional primero es necesario definir los objetos contenidos en este. Para un biplot composicional bidimensional son:

1. un *origen*  $O$  el cual representa el centro composicional de los datos.
2. *vértices* en los puntos  $g_i$  para cada una de las  $D$  variables.
3. un *marcador* para  $f_k$  para cada uno de los  $n$  individuos.
4. la unión entre el centro  $O$  y un vértice  $g_i$  es llamado *rayo* ( $\overline{Og_i}$ )
5. la unión entre 2 vértices  $g_i$  y  $g_j$  es llamado *enlace* ( $\overline{g_i g_j}$ )

Las relaciones entre estos objetos guardan ciertas propiedades útiles para la interpretación de la variabilidad composicional:

1. Los enlaces y rayos entregan información sobre la variabilidad relativa entre las partes dado que:

$$|\overline{g_i g_j}|^2 \approx var\left(\ln \frac{x_i}{x_j}\right) \quad ; \quad |\overline{Og_i}|^2 \approx var\left(\ln \frac{x_i}{g(X)}\right) \quad (39)$$

Cabe señalar los enlaces y rayos, como se plantea en la ecuación 32, dan cuenta de la variabilidad del logaritmo de los cocientes entre datos. Por un lado, los enlaces entregan información sobre la variabilidad de cocientes entre variables, información dispuesta en la matriz de variación, y por otro lado los rayos informan sobre la variabilidad de cocientes entre una variable y el centro de la composición. Por ende, al momento de interpretar estos objetos se debe tener en consideración su estructura matemática.

2. La intersección entre enlaces provee información sobre la correlación entre subcomposiciones. Sean dos enlaces  $\overline{g_i g_j}$  y  $\overline{g_p g_r}$  que se intersectan en el punto  $M$ , entonces:

$$\cos \left[ \angle (g_i M g_p) \right] \approx corr \left( \ln \frac{x_i}{x_j}, \ln \frac{x_p}{x_r} \right) \quad (40)$$

Es decir, si dos links se intersectan en un ángulo de  $90^\circ$  grados, o cercano, los cocientes que generan los enlaces no se encuentran correlacionados (son independientes). Cabe observar que si el punto de intersección  $M$  es un vértice que comparte 2 enlaces, el coseno del ángulo formado por dichos links informa la correlación entre las variables en el numerador de dichos enlaces. Esta propiedad es útil para encontrar independencia entre variables.

3. Si dos vértices  $g_i, g_j$  son coincidentes, o bien cercanos, implica que  $var(\ln(x_i/x_j))$  es cero, o aproximadamente cero, y con ello el cociente  $x_i/x_j$  constante. Se puede concluir que las partes involucradas  $x_i, x_j$  entregan la misma señal, es decir pueden ser consideradas redundantes, o bien si se tiene un grupo de vértices cercanos, pueden ser considerado como un grupo natural afín.

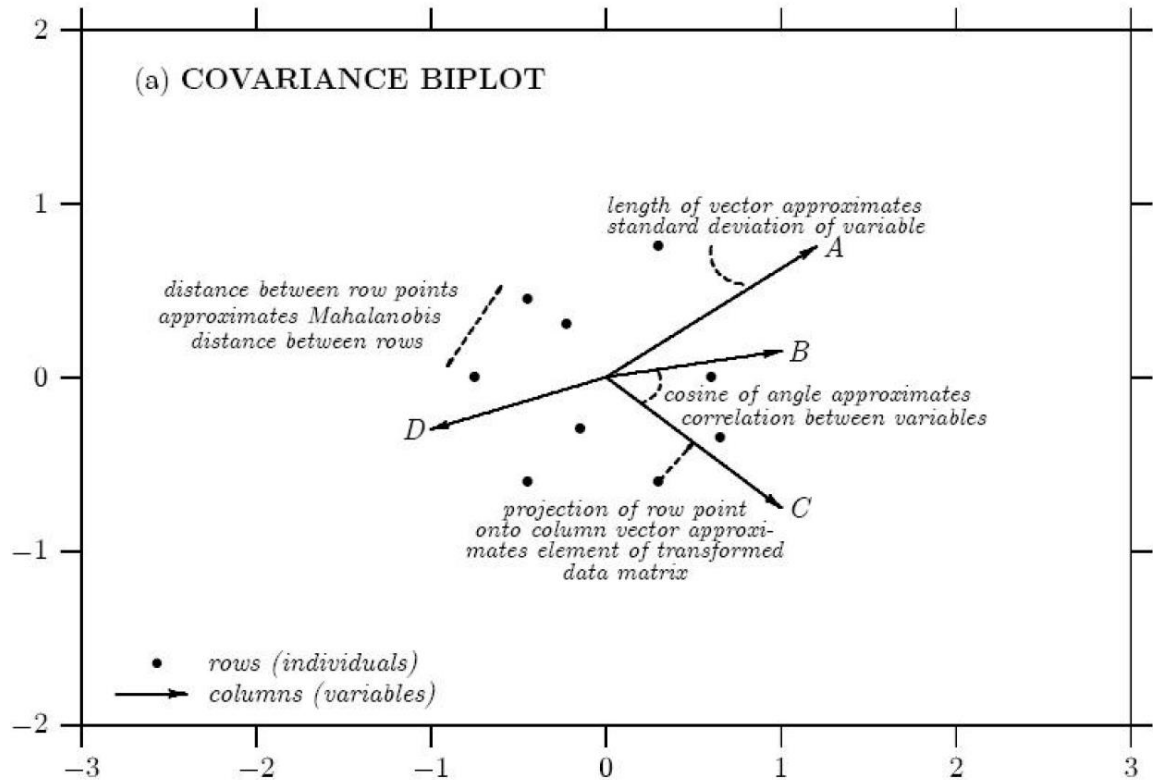


FIGURA 25: Interpretación de un biplot composicional (biplot de covarianza) (Aitchinson, 1986)

En resumen, un Biplot composicional informa, por medio de las relaciones entre enlaces y rayos, sobre la estructura de covarianza de log-cocientes simples, dispuesta en la matriz de variación, y con ellos da luces sobre variabilidad subcomposicional y grados de independencia entre variables.

## **ANEXO B**

### **Confección de Base de Datos Original**



**Nota:** Toda la información contenida en el presente anexo es extraída directamente de Espinoza y colaboradores (2016)

## **1. Recolección de muestras**

### **1.1. Selección de puntos de muestreo**

En la confección de la Base de Datos geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena (2016) se realiza una selección previa de puntos de muestreos que responde a la topografía abrupta presente en la región, i.e. valles fluviales en forma de uve encajonados que no permiten implementar una malla de muestreo regular como en el caso de una “pampa”, por lo cual se procede a un muestreo orientado en microcuencas.

Cada una de estas microcuencas considera un área de influencia, definida como área de captación y escurrimiento de aguas a un único punto de desembocadura, de entre 16 a 22 km<sup>2</sup>. A partir de esta segmentación de los cauces fluviales se designan los puntos de muestreo de manera tal que respeten las áreas de influencias establecidas, lo cuales son respetados en la medida que las condiciones de terreno lo permitan.

Las muestras son recolectadas en diferentes campañas de muestreo entre los años 2012 y 2013 además de incluir muestras de proyectos anteriores del año 2007, año 2011, y 14 muestras en el año 2015 recolectadas con el fin de completar información faltante de la Hoja.

### **1.2. Procedimiento de muestreo**

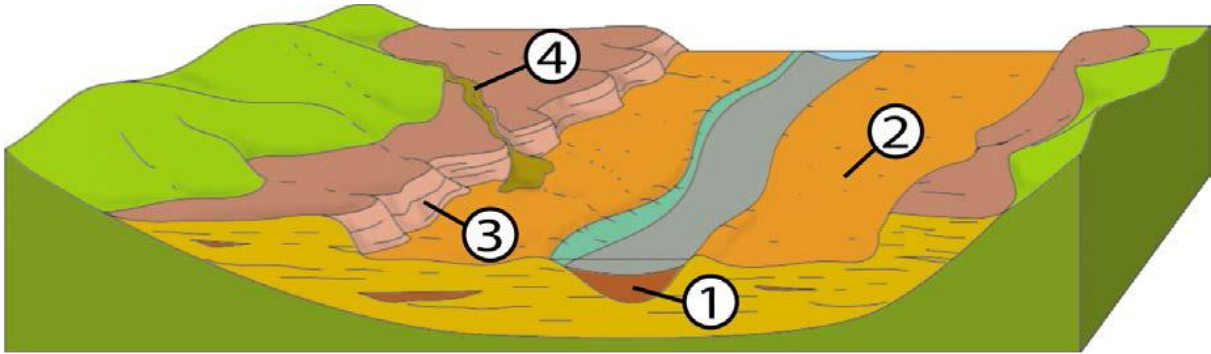
En el muestreo en terreno se implementan protocolos de recolección tales que permitan evitar cualquier tipo de contaminación. Por otro lado, cada muestra corresponde a un compósito de 2 a 4 kg conformado por 10 o más incrementos (sub-muestras) del mismo punto de muestro hasta una profundidad no mayor a 15 cm, obtenidas posteriormente a la remoción y eliminación de la primera capa de sedimentos eólicos si es que correspondiese.

Para cada punto de muestreo se registra sus coordenadas en el sistema WGS 1984 UTM Zona 19S, además de observaciones generales del entorno, como lo es observaciones respecto a la geología, geomorfología, litología y/o posibles fuentes antrópicas de contaminación. Así también se anexan fotos que documentan del entorno y sustrato de cada punto de muestreo.

Con el objetivo de estimar la magnitud del error fundamental intrínseco de la campaña, se recolectan muestras gemelas (dos muestras en el mismo sitio) por cada 25 puntos de muestreo.

### **1.3. Ambientes sedimentarios**

Principalmente se recolecta material correspondiente a sedimentos de drenaje, estos desde diferentes ambientes sedimentarios tales como cauces fluviales activos, cauces fluviales intermitentes, planicies de inundación y terrazas fluviales (Figura 26). Cada uno de estos ambientes condiciona el procedimiento específico para cada muestra. Para mayores detalles consultar Espinoza y colaboradores (2016)



**FIGURA 26:** Diagrama esquemático explicativo de los ambientes sedimentarios muestreados: cauce fluvial activo (1), planicie de inundación (2), terraza fluvial (3) y cauce fluvial intermitente (4) (Espinoza et al, 2016).

## 2. Análisis Químico

La preparación de las muestras, para los posteriores análisis químicos, contempla, en primera instancia, el secado en hornos por un periodo de entre 3 y 5 días a temperaturas de entre 25 y 30°C, con tal de evitar cambios mineralógicos por causa de la humedad. Luego, las muestras secas son cuarteadas, reteniendo una mitad de cada muestra como respaldo, y la otra mitad es tamizada hasta su fracción más fina, menores 2,0 mm, la que es pulverizada a una fracción de 180µm. Este último producto es enviado a laboratorios AcmeLabs (Canadá) para su análisis químico.

Los métodos analíticos empleados para la caracterización química de estas muestras son espectrometría de emisión (ICP-ES) y de masa (ICP-MS) con los cuales se determina la abundancia de 11 óxidos mayores y menores (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con concentraciones en unidades de porcentaje en peso (%), y 46 elementos traza Au, Ag, As, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cs, Cu, Ga, Hf, Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu), con concentraciones en unidades de partes por millón (ppm), y en unidades de partes por billón (ppb) para el caso particular del Oro.

Para la medición de carbono (C<sub>Total</sub>) y azufre (S<sub>Total</sub>) se emplea un *Carbon/Sulfur Elemental Analyzer*, marca LECO, el cual analiza la abundancia de estos elementos, en porcentaje en peso, en muestras sólidas.

## 3. Control de calidad

Los procedimientos realizados por AcmeLabs para los análisis químicos descritos cuentan con certificación de la norma ISO 9001 (sistema de calidad conforme a la Organización Internacional de Normalización) y la norma ISO/IEC 17025, requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.

Los límites de detección reportados por AcmeLabs para cada elemento, así como los límites de detección informados por FOREGS (Forum of European Geological Surveys) en la confección del Atlas Geoquímico de Europa, son mostrados en la Tabla 7. Como se puede observar en dicha tabla los límites de detección de ambos casos son homologables, considerándose así apropiados los límites de detección reportados por AcmeLabs.

**TABLA 20:** Método de análisis y límite de detección de cada compuesto y elemento químico, reportado por AcmeLabs, para la metodología de análisis utilizada (Espinoza et al., 2016).

Compuesto o elemento	AcmeLabs		FOREGS*	Compuesto o elemento	AcmeLabs		FOREGS*
	Método de análisis	Límite de detección	Límite de detección		Método de análisis	Límite de detección	Límite de detección
SiO <sub>2</sub>	ICP-ES	0,01%	0,10%	Rb	ICP-MS	0,1 ppm	1 ppm
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ICP-ES	0,01%	0,10%	Sb	ICP-MS	0,1 ppm	0,2 ppm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ICP-ES	0,04%	0,01%	Sc	ICP-ES	1 ppm	no reportado
CaO	ICP-ES	0,01%	0,05%	Se	ICP-MS	0,5 ppm	no reportado
MgO	ICP-ES	0,01%	0,10%	Sn	ICP-MS	1 ppm	1 ppm
Na <sub>2</sub> O	ICP-ES	0,01%	0,20%	Sr	ICP-MS	0,5 ppm	1 ppm
K <sub>2</sub> O	ICP-ES	0,01%	0,05%	Ta	ICP-MS	0,1 ppm	0,05 ppm
MnO	ICP-ES	0,01%	0,01%	Th	ICP-MS	0,2 ppm	1 ppm
TiO <sub>2</sub>	ICP-ES	0,01%	0,005%	Tl	ICP-MS	0,1 ppm	0,4 ppm
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ICP-ES	0,01%	0,01%	U	ICP-MS	0,1 ppm	1 ppm
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ICP-ES	0,002%	3 ppm	V	ICP-MS	8 ppm	2 ppm
C <sub>Total</sub>	LECO	0,01%	no reportado	W	ICP-MS	0,5 ppm	0,05 ppm
S <sub>Total</sub>	LECO	0,02%	no reportado	Y	ICP-MS	0,1 ppm	0,02 ppm
Au	ICP-MS	0,5 ppb	no reportado	Zn	ICP-MS	1 ppm	1 ppm
Ag	ICP-MS	0,1 ppm	no reportado	Zr	ICP-MS	0,1 ppm	1 ppm
As	ICP-MS	1 ppm	1 ppm	La	ICP-MS	0,1 ppm	0,02 ppm
Ba	ICP-MS	1 ppm	3 ppm	Ce	ICP-MS	0,1 ppm	0,02 ppm
Be	ICP-MS	1 ppm	2 ppm	Pr	ICP-MS	0,02 ppm	0,02 ppm
Bi	ICP-MS	0,1 ppm	no reportado	Nd	ICP-MS	0,02 ppm	0,02 ppm
Cd	ICP-MS	0,1 ppm	0,5 ppm	Sm	ICP-MS	0,05 ppm	0,02 ppm
Co	ICP-MS	0,2 ppm	2 ppm	Eu	ICP-MS	0,02 ppm	0,02 ppm
Cs	ICP-MS	0,1 ppm	4 ppm	Gd	ICP-MS	0,05 ppm	0,02 ppm
Cu	ICP-MS	0,1 ppm	1 ppm	Tb	ICP-MS	0,01 ppm	0,02 ppm
Ga	ICP-MS	0,5 ppm	1 ppm	Dy	ICP-MS	0,05 ppm	0,02 ppm
Hf	ICP-MS	0,1 ppm	0,05 ppm	Ho	ICP-MS	0,02 ppm	0,02 ppm
Hg	ICP-MS	0,1 ppm	0,001 ppm	Er	ICP-MS	0,03 ppm	0,02 ppm
Mo	ICP-MS	0,1 ppm	1 ppm	Tm	ICP-MS	0,01 ppm	0,02 ppm
Nb	ICP-MS	0,1 ppm	1 ppm	Yb	ICP-MS	0,05 ppm	0,02 ppm
Ni	ICP-MS	0,1 ppm	1 ppm	Lu	ICP-MS	0,01 ppm	0,02 ppm
Pb	ICP-MS	0,1 ppm	1 ppm				

### 3.1. Precisión de los resultados del análisis químico

Con el objeto de estimar la precisión de los resultados de los análisis químicos se realiza el cálculo del *Error Relativo (ER)* para cada variable (compuesto o elemento según sea el caso). Esto se realiza tanto para el caso de muestras gemelas, los cuales informan sobre la heterogeneidad química del sustrato muestreado en cada punto, como también para duplicados de pulpa. Estos últimos corresponden a un control de calidad interno que realiza AcmeLabs para verificar la variabilidad de los resultados de los métodos analíticos ejecutados. Para ello el laboratorio analiza por una segunda vez una muestra, escogida al azar, con tal de comparar los resultados duplicados. La población de muestras que presentan un duplicado de pulpa es de 3% aproximadamente. El error relativo para el caso de los duplicados de pulpa da cuenta de la variabilidad de los resultados de los análisis químicos realizados por el laboratorio.

El Error Relativo es calculado, para cada variable, según la siguiente fórmula (Ecuación 35):

$$ER = \frac{|V_o - V_d|}{(V_o + V_d)/2}$$

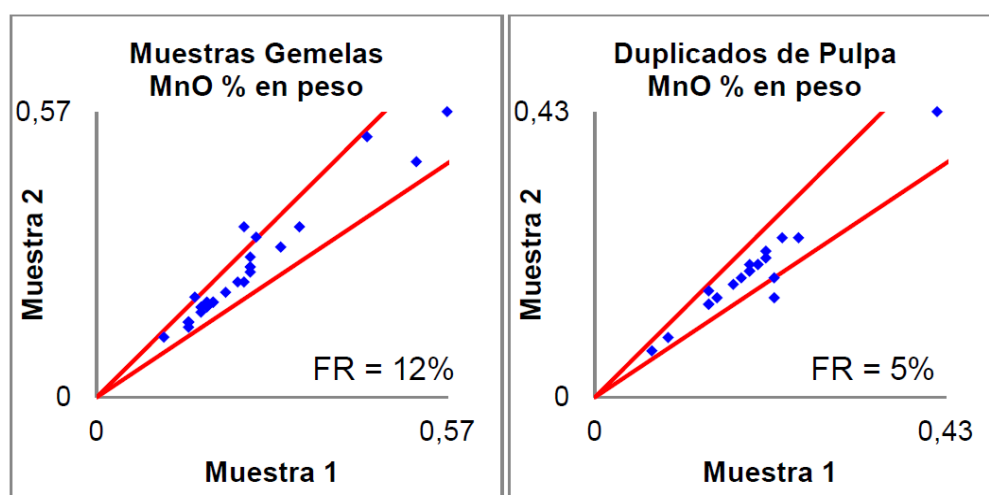
Dónde:

$ER$ : Error relativo

$V_o$ : Valor original

$V_d$ : Valor de la muestra gemela o del duplicado de pulpa, según corresponda.

En definitiva, para evaluar la calidad de los datos obtenidos, se gráfica, para cada variable, la concentración de cada par duplicado/gemelo – muestra original (“Muestra 1” – “Muestra 2”). Luego se define un área (rango) de aceptación enmarcado por rectas que corresponden a  $ER = \pm 20\%$ . Para el total de pares de muestras graficadas por variable, se considera válida tal variable si el porcentaje de datos Fuera de Rango (FR) de aceptación es menor al 30%, i.e.  $FR < 30\%$ . Este procedimiento es ilustrado en la Figura 27.



**FIGURA 27:** Diagramas de dispersión para el MnO. El diagrama de la izquierda corresponde a muestras gemelas y el diagrama de la derecha a duplicados de pulpa. Los rombos azules indican las concentraciones de cada par de muestras. Las rectas son los límites de aceptación para un  $ER + 20\%$  y  $ER - 20\%$ . El parámetro FR indica el porcentaje de pares de muestras que se encuentran fuera del rango de aceptación (Espinoza et al., 2016).

En el control de calidad de las variables de la Base de Datos geoquímica de sedimentos de la Hoja La Serena (2016) se obtiene como resultado que nueve elementos (Au, Hg, Be, Sb, Cd, Sn, W, Mo y Th) y un compuesto químico ( $Cr_2O_3$ ) presentan un valor de FR superior al 30% (Tabla 8).

**TABLA 21:** Resultados del control de calidad mediante el análisis de muestras gemelas (extraído de Espinoza et al, 2016).

Elemento	Pares de muestras	Total de fallos	FR %	Elemento	Pares de muestras	Total de fallos	FR %
Au	26	21	81	Sr	26	2	8
Hg	26	19	73	La	26	2	8
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	15	58	Nd	26	2	8
Be	26	14	54	Tb	26	2	8
Sb	26	13	50	Ho	26	2	8
Cd	26	11	42	Cu	26	2	8
Sn	26	10	38	Pb	26	2	8
W	26	10	38	Tl	26	2	8
Mo	26	10	38	MgO	26	1	4
Th	26	8	31	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	26	1	4
Hf	26	7	27	Ba	26	1	4
Ta	26	7	27	Co	26	1	4
U	26	7	27	Rb	26	1	4
C <sub>Total</sub>	26	6	23	Y	26	1	4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	6	23	Pr	26	1	4
V	26	6	23	Sm	26	1	4
Bi	26	6	23	Gd	26	1	4
Ag	26	6	23	Er	26	1	4
S <sub>Total</sub>	26	5	19	Tm	26	1	4
TiO <sub>2</sub>	26	5	19	Yb	26	1	4
Zr	26	4	15	Lu	26	1	4
As	26	4	15	SiO <sub>2</sub>	26	0	0
Se	26	4	15	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	0	0
MnO	26	3	12	K <sub>2</sub> O	26	0	0
Cs	26	3	12	Sc	26	0	0
Nb	26	3	12	Ga	26	0	0
Dy	26	3	12	Ce	26	0	0
Ni	26	3	12	Eu	26	0	0
CaO	26	2	8	Zn	26	0	0
Na <sub>2</sub> O	26	2	8				

Por otro lado, el resultado de control de calidad para duplicados de pulpa muestra que doce elementos (Be, Sn, Cd, Au, Ta, W, Hg, Sb, C<sub>Total</sub>, Th, Mo y U) y un compuesto químico (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), presentan valores de FR > 30% (Tabla 9).

**TABLA 22:** Resultados del control de calidad mediante el análisis de duplicados de pulpa (extraído de Espinoza et al, 2016).

Elemento	Pares de muestras	Total de fallos	FR %	Elemento	Pares de muestras	Total de fallos	FR %
Be	20	13	65	Yb	20	3	15
Sn	20	12	60	Cu	17	2	12
Cd	17	10	59	Tl	17	2	12
Au	17	10	59	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	2	10
Ta	20	11	55	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	2	10
W	20	11	55	CaO	20	2	10
Hg	17	9	53	TiO <sub>2</sub>	20	2	10
Sb	17	7	41	Co	20	2	10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	8	40	Sr	20	2	10
C <sub>Total</sub>	16	6	38	Y	20	2	10
Th	20	7	35	Nd	20	2	10
Mo	17	6	35	Sm	20	2	10
U	20	6	30	Gd	20	2	10
Bi	17	5	29	Tb	20	2	10
Hf	20	5	25	Dy	20	2	10
S <sub>Total</sub>	16	4	25	Ho	20	2	10
Pb	17	4	24	Lu	20	2	10
Zn	17	4	24	SiO <sub>2</sub>	20	1	5
As	17	4	24	MgO	20	1	5
Ag	17	4	24	Na <sub>2</sub> O	20	1	5
Se	17	4	24	K <sub>2</sub> O	20	1	5
Ni	17	3	18	MnO	20	1	5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20	3	15	Sc	20	1	5
Cs	20	3	15	Ba	20	1	5
Nb	20	3	15	Ga	20	1	5
Rb	20	3	15	La	20	1	5
V	20	3	15	Ce	20	1	5
Zr	20	3	15	Pr	20	1	5
Er	20	3	15	Eu	20	1	5
Tm	20	3	15				

## **ANEXO C**

**Unidades Litoestratificadas y Sedimentarias no consolidadas**

A continuación, se presenta las unidades litoestratigráficas más representativas que componen la Hoja La Serena (1:250.000) con focalización en las características composiciones de estas. La información presentada está constituida por citas literales de las fuentes que estudiaron las diferentes áreas de la geología de esta hoja (Figura 4). Para cada unidad se señala en que cuadrante se encuentra contenido según Figura 4.

## **1. Unidades litoestratificadas**

### **COMPLEJO METAMÓRFICO DEL CHOAPA (Devónico-Carbonífero)**

Rocas metasedimentarias y metavolcánicas básicas, que comprenden esquistos y filitas, en el área de estudio. Abarca las rocas metamórficas que afloran en el borde costero ‘entre la desembocadura del río Limarí y Tongoy’. Las rocas metamórficas descritas han sido observadas, por diversos autores, en contacto por intrusión con rocas cataclásticas y miloníticas de protolito plutónico, agrupadas en este trabajo en el Complejo Plutónico Altos de Talinay

En este complejo se han diferenciado tres facies por el color de los afloramientos, composición, textura y estructuras. Dichas facies se pueden resumir como:

- a) Esquistos de actinolitita, clorita y plagioclasa color verde (Metabasitas)
- b) Esquistos de Cuarzo, epidota y biotita (metaturbiditas)
- c) Filitas de biotita, muscovita, anfíbola, cuarzo, epidota (metapelitas)

El basamento esquistoso portador de metabasitas ha sido interpretado como sedimentos marinos con basaltos abisales intercalados que han sido acrecionados al continente sudamericano. Las metabasitas están asociadas a esquistos pelíticos, esquistos cuarzo-feldespáticos y metacherts. El quimismo de las metabasitas es comparable al de los basaltos toleíticos de los fondos oceánicos. Son parte de una asociación petrotectónica característica de fondo oceánico, acrecionada a la corteza continental durante el Pérmico-Triásico Inferior (Empanan y Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca

### **GRANITOIDES DE BIOTITA Y MUSCOVITA (CARBONÍFERO; CA. 328 MA) (M-M)**

Rocas intrusivas que corresponden a cuerpos de color gris claro a rosado, formados principalmente por granodioritas y monzogranitos foliados, de biotita y muscovita, de grano medio a grueso. En esta unidad se agrupan los plutones Los Molles y El Toro Chico. Afloran de manera discontinua entre los ríos Los Molles y Mostazal y al sur del río Grande en el Cordón Los Cuvos, alcanzando aproximadamente un área de exposición de 25 km<sup>2</sup> (Pineda y Calderón, 2008).

Ubicación: Hoja Monte Patria-El Maqui

### **BATOLITO ELQUI-LIMARÍ (V-P)**

La Alta Cordillera de Elqui y Limarí está formada por un gran batolito, que se extiende por más de 200 km desde el río Grande hasta el río Tránsito y alcanza un ancho máximo de 60 km, entre Rivadavia y el río La Laguna. Este complejo intrusivo, denominado Batolito Elqui-Limarí (BEL), está constituido por un centenar de plutones, formados por rocas intrusivas del más variado tipo. La mayoría de ellos son de edad paleozoica superior a triásica, excepto algunos cuerpos de granodioritas y dioritas que son de edad cretácica (Pinerda & Empanan, 2006).



Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia y Vicuña-Pichasca

### **FOMACIÓN MATAHUAICO (Pérmica?) (Volcánica sedimentaria continental)**

La Formación Matahuaico fue definida como una secuencia volcánica de origen continental, constituida principalmente por brechas piroclásticas, tobas, lavas ácidas y limolitas. Posteriormente Emparan y Pineda (1999) modificaron la definición separándola en dos asociaciones de facies: la primera corresponde a una secuencia bien estratificada de origen volcanosedimentario continental (a) y la segunda a riolitas macizas (b) (Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia y Vicuña-Pichasca

### **GRANITOIDES DE HORNBLENDA Y BIOTITA (Pérmico; ca. 294 Ma)**

Rocas intrusivas que corresponden a cuerpos tabulares de color gris, formados principalmente por tonalitas y granodioritas bandeadas, de hornblenda y biotita, de grano grueso. Afloran en el extremo oriental del mapa, entre los ríos San Miguel y Palomo (sector Panguecillo) y al norte del río Grande, alcanzando una superficie de exposición cercana a los 80 km<sup>2</sup>. En esta unidad se agrupan los plutones El Panguecillo y El Pangué. Los intrusivos subyacen y se encuentran en contacto por falla inversa con conglomerados y rocas volcánicas jurásicas de las formaciones Tres Cruces, Mostazal y Algarrobal (Pinerda & Emparan, 2006).

Hoja Monte Patria-El Maqui

### **INTRUSIVOS DEL PÉRMICO-TRIÁSICO**

Esta unidad forma parte del complejo intrusivo, denominado Batolito Elqui-Limarí (BEL), y está constituida por tres plutones (Dolores, Uchumi, Alcohuás), formados por rocas intrusivas graníticas. En la Hoja Vicuña-Pichasca, aflora en tres franjas elongadas de dirección NNW, ubicadas en el extremo noreste del mapa. Intruye rocas de la Formación Matahuaico y los plutones Río Claro, Chapilca y Paiguano de edad carbonífera. Esta conformado por los plutones Dolores, Uchumi y Alcohuás (Pinerda & Emparan, 2006)

Hoja Vicuña-Pichasca

### **COMPLEJO PLUTÓNICO ALTOS DE TALINAY (213-207 Ma; Triásico Superior)**

Está constituido mayormente por rocas cataclásticas y miloníticas de protolito plutónico, que afloran en el cordón montañoso Altos de Talinay; exhiben relaciones de contacto intrusivas, tanto internas como con las rocas de caja. Se pueden subdividir en dos facies principales: una (a) facies melanocrática y una (b) facies leucocrática. La facies melanocrática contiene rocas de protolito diorítico y está intruida por diques leucocráticos. La facies leucocrática está formada por rocas con protolito de monzo y sienogranito. Ambas presentan contacto por falla y de intrusión con el Complejo Metamórfico del Choapa. También se expone una (c) facies de aspecto agmatítico o brechoso, minoritaria, con relaciones de contacto transicionales con las dos anteriores y por falla con el Complejo Metamórfico del Choapa.

Este Complejo constituye el cordón montañoso litoral, Altos de Talinay, que se desarrolla desde la localidad de Puerto Aldea hacia el sur (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca

### **FORMACIÓN LAS BREAS** (Triásico Superior?)(Sedimentaria y volcánica continental)

La Formación Las Breas fue definida en el Cuadrángulo Vicuña. La describe como una secuencia de rocas sedimentarias continentales, formada principalmente por conglomerados, lutitas carbonosas y areniscas en las que los clastos más abundantes son de cuarzo. Señala que la formación comprendería, además de capas delgadas de toba riolítica fluidal y toba brechosa riolítica. Posteriormente, Emparan y Pineda (1999), en el Área de Condoriaco-Rivadavia, la redefinieron como una secuencia sedimentaria y volcánica continental de 300-550 m de espesor en las que reconocen tres asociaciones de facies: la primera integrada por rocas sedimentarias de color blanco anaranjado a negro con un nivel de lutitas negras con flora fósil, de edad triásica (Superior?); la segunda, por ignimbritas riolíticas y riolíticas gris rojizo con una intercalación sedimentaria con flora fósil de edad triásica (Superior?) y la tercera compuesta por andesitas y basaltos de piroxenas. En la Hoja Vicuña-Pichasca, la formación aflora al este de la quebrada Uchumi, como una franja discontinua de dirección NNW de color gris oscuro verdoso. Cubre, en discordancia angular, la Formación Matahuaico y subyace en discordancia de erosión, a las Formaciones Tres Cruces y Algarrobal (Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia y Vicuña-Pichasca

### **FARMACIÓN TRES CRUCES** (Sinemuriano-Toarciano)(sedimentaria marina)

Formación Tres Cruces fue definida en el Cuadrángulo Vicuña, como una secuencia sedimentaria marina fosilífera integrada por conglomerados finos, areniscas cuarcíferas, areniscas calcáreas, calizas fosilíferas y lutitas de edad jurásica. En la Hoja Vicuña-Pichasca aflora con una potencia máxima de 200 m, está cubierta en discordancia angular y de erosión por la Formación Algarrobal y se apoya en discordancia de erosión sobre las formaciones Las Breas y Matahuaico.

Está compuesta por una secuencia estratificada de color ocre, rosado y blanco en la que, de base a techo, en forma generalizada, se pueden distinguir: (1) alternancia de areniscas arcóscas de guijarros (de cuarzo) y conglomerados de cuarzo finos a gruesos (compuesto de cuarzoarenitas, tobas silicificadas y fragmentos argilizados y cristales de cuarzo), (2) escasas intercalaciones de calizas fosilíferas marinas, (3) conglomerados de cuarzo clasto-soportados, areniscas ortocuarcíferas y lutitas (Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca, Hoja Monte Patria-El Maqui

### **COMPLEJO VOLCÁNICO AGUA SALADA** (Jurásico)

Secuencia de rocas volcánicas y subvolcánicas continentales, andesíticas y dacíticas, con escasas intercalaciones de areniscas y lutitas. Está constituida, de base a techo en el sector indicado, por sucesiones (facies a) de lavas y tobas andesíticas con escasas intercalaciones de areniscas (calizas localmente), ignimbritas con intercalación de andesitas fluidales (facies b) y asociaciones subvolcánicas (facies c) de andesitas porfíricas ‘ocoíticas’, pórfidos dioríticos, pórfidos andesíticos y microdioritas. Está delimitada al este por la Falla Romeral (FR) que la pone en contacto con la Formación Arqueros y unidades de rocas plutónicas.

Este Complejo constituye gran parte de los cordones precordilleranos situados al oeste de la traza de la FR y aflora en sectores separados por afloramientos de rocas plutónicas. (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca.

## **INTRUSIVOS MONZODIORÍTICOS-GRANODIORÍTICOS (164-151 Ma)(Jurásico Medio-Superior)**

Esta unidad incluye rocas plutónicas de composición variable desde monzodioritas a granodioritas (transicionalmente), con predominio de las monzodioritas cuarcíferas. Como minerales máficos contienen anfíbola, biotita y piroxeno, en diferentes proporciones, con predominio de anfíbola; en algunos contactos de intrusión se exponen restringidamente granodioritas leucocráticas. Su mineralogía se caracteriza por la uralitización generalizada de los piroxenos y la abundancia de esfeno y circón como accesorios.

Intruyen el Complejo Volcánico Agua Salada y está intruida por la unidad Kig (Intrusivos Granitoides) y por diques de granito y felsitas, de color rosado. Por otra parte, está cubierta en discordancia por los depósitos de las formaciones Coquimbo y Confluencia.

Se exponen en afloramientos dispersos y en un extenso sector desde el Cordón Colorado a la Loma Pelada, conformando una franja norte-sur, con ancho aproximado de 10-12 km, desde el sector de Guanaquero hacia el sur. Ocupan el borde occidental de la precordillera y parte de la depresión litoral donde se emplazó la cuenca sedimentaria cenozoica. (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca.

## **FORMACIÓN MOSTAZAL (Jurásico Superior)**

La Formación Mostazal fue definida como una secuencia de rocas sedimentarias clásticas, de origen continental. En la Geología del Área Monte Patria-El Maqui, esta formación está constituida por una sucesión de potencia Pucacercana a 1.400 m, compuesta predominantemente por estratos de conglomerados volcanoclásticos y por niveles de tobas, brechas, andesitas, areniscas y limolitas rojas. Se apoya en discordancia de erosión sobre la formación Tres Cruces y está cubierta de igual manera por la Formación Río Tascadero. Se encuentra en contacto por fallas inversas y de rumbo con granitoides paleozoicos (Pineda & Calderón, 2008).

Ubicación: Hoja Monte Patria-El Maqui

## **FORMACIÓN ALGARROBAL (Jurásico Superior-Cretácico inferior?) (Volcánico continental con intercalaciones de rocas sedimentarias)**

La Formación Algarrobal fue definida en la quebrada homónima. En el Cuadrángulo Rivadavia, como una secuencia de rocas volcánicas andesíticas y sedimentarias elásticas, de origen continental. En la Geología del Área Vicuña-Pichasca, esta formación está constituida por aproximadamente 2.500 m de tufitas, andesitas, tobas y areniscas rojas. Se apoya en discordancia de erosión sobre las formaciones Matahuaico, Las Breas y Tres Cruces (Jtc) y está cubierta de igual manera por las formaciones Río Tascadero y Pucalume. Al sur del río Hurtado, la falla Vicuña la pone en contacto con la Formación Los Elquinos.

La Formación Algarrobal aflora en dirección NNW a lo largo de la quebrada Uchumi, desde el sector La Campana hasta Altos de Alcohuás, donde presenta colores pardo rojizo debido a la presencia de hematita; así como también es posible observarla entre las quebradas las Cuevas y Las Barajas donde aparece deformada por una estructura sinclinal; además se reconoce en la localidad de San Agustín, en el río Hurtado y por último en una franja nortesur entre el sector Los Maitenes y al pie de la sierra Negra. Sus principales litologías, de base a techo, son: (1) 2.000 m de una secuencia estratificada de color pardo rojizo que aflora al este de la quebrada Uchumi, en el cerro Las Tórtolas, compuesta por tobas brechosas y de lapilli (fragmentos de

andesitas, escorias ferruginosas, vítreos perlíticos, tobas de cristales y líticos silicificados y calcitizados) y lavas andesíticas porfíricas de anfíbola con abundantes vetillas de epidota y sílice, (2) 300 m de tufitas o conglomerados tobáceos masivos con clastos, de hasta 30 mm de diámetro, compuestos de andesitas con diferentes texturas, que afloran en la loma Andacollito, (3) 300 m, aproximadamente, de areniscas de color rojizo de grano grueso a muy grueso, constituidas por fragmentos líticos (intrusivos, andesitas, líticos argilizados y epidotizados) y, en menor proporción cristales de cuarzo y feldespatos. Son inmaduras composicional y granulométricamente y afloran entre el sector los Maitenes y al pie de la sierra Negra, inmediatamente al este de la Falla Vicuña (Emparan & Pinerda, 2006).

Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca, Hoja Monte Patria-El Maqui

### **INTRUSIVOS DIORÍTICOS** (151-143 Ma; Titoniano-Berriasiano)

Rocas plutónicas de composición diorítica que comprenden monzodioritas cuarcíferas (piroxeno, acompañando a la anfíbola y, en menor grado, a la biotita, o solo), monzodioritas (piroxeno-anfíbola-biotita, en distintas proporciones), principalmente; pero también dioritas cuarcíferas y dioritas de anfíbola, piroxeno y biotita.

Presenta rocas de falla asociadas a dos estructuras comprendidas en el Sistema de Fallas Romeral. Esta unidad intruye el Complejo Volcánico Agua Salada. A su vez, está intruida por la unidad 'Intrusivos Granitoides' y por diques de monzogranito, de color rosado, y granodioríticos, de color gris pardusco, que podrían estar relacionados con esa unidad. Está en contacto por la Falla Romeral, FR (Emparan y Pineda, 2000), y con la unidad plutónica Kigd 'Intrusivos Graníticos a Dioríticos del Cretácico Inferior' . .

Aflora en toda la longitud norte-sur de las Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca y forma una franja central discontinua con ancho variable de 9 a 12 km. Esta franja está limitada al Este por la FR, y al Oeste, en parte, por la franja de afloramientos de los intrusivos del Jurásico Medio-Superior. (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca.

### **FORMACIÓN RÍO TASCADERO** (Titoniano superior-Hauteriviano)

La Formación Río Tascadero fue definida por en la localidad homónima, como una secuencia de rocas carbonatadas de origen marino. En la Hoja Vicuña-Pichasca, corresponde a una secuencia de aproximadamente 700 m de espesor, bien estratificada, de color pardo amarillento, muy deformada, constituida por calizas de grano fino. Su base cubre, en discordancia de erosión, la Formación Algarrobal de edad jurásica superior y está cubierta, en discordancia de erosión, por la formación Pucalume de edad barremiana-cenomaniana.

Corresponde a una secuencia estratificada y plegada muy homogénea, de color pardo amarillo, formada por rocas carbonatadas marinas. Las rocas carbonatadas son de grano fino, laminadas, constituidas por una alternancia de mudstones y wackestones. En los wackestones, al microscopio, se encontraron fragmentos fósiles (esponjas, espiculas de equinoideos), parcialmente reemplazados por carbonatos, clorita, hidrobiotita y óxidos de hierro. Intercaladas en la secuencia de rocas calcáreas de grano fino se reconocen areniscas de grano fino a medio, bien seleccionadas, cementadas por calcita, composicionalmente inmaduras y texturalmente maduras. Se compone de fragmentos cristalinos (ortoclasa, plagioclasa, cuarzo, magnetita, feldespatos alterados a calcita) y líticos (andesitas, basaltos, clastos calcitizados y cloritizados) (Pinerda & Emparan, 2006)...

Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca, Hoja Monte Patria-El Maqui

### **INTRUSIVOS GRANITOIDES (141-130 Ma) (Neocomiano)**

Granitoides que comprenden, principalmente, granodioritas de anfíbola-biotita, a veces con piroxeno, de grano medio, con tendencia porfírica en los contactos y sienogranitos de biotita, de grano fino. Forman plutones simples, con tamaño de <1 km<sup>2</sup> a 19 km<sup>2</sup>. También se consideran asociados a esta unidad cúpulas de intrusivos y diques de similar composición, que afloran al oeste de los plutones.

Intruye el Complejo Volcánico Agua Salada y unidades de rocas plutónicas, del Jurásico-Cretácico. Esta unidad aflora al oeste de la FR. (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca.

### **FORMACIÓN ARQUEROS (Neocomiano)**

Secuencia de rocas volcánicas principalmente andesíticabasáltica, de color gris oscuro a pardo oscuro, con intercalaciones sedimentarias marinas, mayormente calizas, areniscas y lutitas, de colores ocre, pardo anaranjado y verde; de estratificación gruesa (2-40 m de espesor cada estrato) y en parte de aspecto macizo. No presenta base expuesta y subyace a la Formación Quebrada Marquesa (de edad hauteriviana-albiana temprana) mediante un sistema de fallas de relevo, que permite observar contacto de erosión en algunos sectores.

Constituida principalmente por rocas de deposición submarina: lavas andesítico-basálticas, basaltos, andesitas, calizas, areniscas y por depósitos piroclásticos subaéreos. Esta formación se caracteriza por una gran variación lateral de facies, atributo que había sido señalado con anterioridad: ‘hay un paso gradual de depósitos marinos en el norte a continentales en el sur’

Facies:

- a) Andesitas basálticas de clinopiroxeno y anfíbola. en menor medida pórfidos dioríticos de clinopiroxeno y anfíbola.
- b) Basaltos almohadillados con intercalaciones sedimentarias
- c) Calizas y areniscas calcáreas, fosilíferas con intercalaciones de brechas sinsedimentarias calcáreas y cherts.
- d) Brechas líticas andesíticas, con matriz cineríticas, y tobas clasto-soportadas con líticos andesíticos; intercalaciones de andesitas porfíricas de piroxeno y areniscas calcáreas.
- e) Areniscas, conglomerados matriz-soportados y brechas epiclásticas conglomerádicas, de color verde, con intercalaciones de tufitas y lutitas.

Forma una franja NNW, cuyo ancho varía de 2 km, a 14 km. Constituye la mayor parte de un bloque delimitado al oeste por la Falla Romeral y al este por las fallas El Álamo y El Cobre. (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Condoriaco-Rivadavia, Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca

### **FORMACIÓN QUEBRADA MARQUESA (Hauteriviano-Albiano temprano)**

Secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas, principalmente continental, de color pardo medio a pardo rojizo, con intercalación de potentes estratos sedimentarios marinos, de colores claros, en sus niveles estratigráficos inferiores. En parte, sobreyace a las rocas de la Formación Arqueros en contacto de erosión. En parte, el contacto con la Formación Arqueros es mediante un sistema de fallas (‘fallas de relevo’), del cual forman parte las fallas El Álamo y El Cobre. Como techo, se exponen los Estratos de Quebrada Yungay, a los que esta formación subyace con discordancia angular, en el sector del Portezuelo Leñera, al norte del Embalse Recoleta.

Esta formación se caracteriza por una gran variación lateral de espesor, litología y alternancia de las facies. Esto involucra diferencias respecto de los perfiles litológicos y asociaciones de facies descritas para esta formación al norte. Este hecho había sido señalado con anterioridad (Thomas, 1967); características similares han sido reconocidas más al norte (Moscoso et al., 1982) y de igual manera hacia el sur (Rivano y Sepúlveda, 1991). En parte, en el contacto con los plutones exhibe importantes aureolas de rocas córneas.

En el área de este mapa, se han identificado dos miembros. En el miembro inferior (Kqm 1), se distinguieron 4 facies (a, b, c, e), las cuales han sido reconocidas al norte de este mapa (Emparan y Pineda, 1999, 2000); sin embargo, la facies (d), (Emparan y Pineda, 1999, 2000) no fue identificada. En el miembro superior (Kqm 2), se distinguieron 2 facies (a, b), las cuales han sido reconocidas al norte de este mapa (Emparan y Pineda, 1999, 2000). Las facies litológicas de esta formación son mayormente volcánicas y continentales, con excepción de las facies (a) del Miembro 1, que es sedimentaria-continental y la facies (c) que es sedimentaria-marina

Facies:

#### Miembro 1

- a) Brechas epiclásticas, gresas principalmente, con intercalaciones de areniscas
- b) Alternancia de andesitas y rocas piroclásticas, con intercalación de areniscas
- c) Sedimentitas marinas, en parte fosilíferas: calizas, areniscas y limolitas.
- d) Areniscas calcáreas con ondulitas y calcilutitas laminadas, lacustres, con flor fósil.
- e) Ignimbritas, tobas de caída, brechas piroclásticas, con escasas intercalaciones de andesitas

#### Miembro 2

- a) Andesitas de anfíbola-piroxeno y de anfíbola y basaltos de piroxeno-olivino.
- b) Ignimbritas reomórficos, tobas de caída e ignimbritas poco soldadas.
- c) Brechas epiclásticas, conglomerados, areniscas, calizas y lutitas continentales, con tobas.

Las rocas de la Formación Quebrada Marquesa forman una ancha franja de 7 a 16 km de ancho, desde la latitud de El Peñón hasta el Embalse Recoleta, respectivamente. Desde El Peñón hacia el norte, se expone en una franja de 1-3 km de ancho, entre la Falla El Álamo y el Plutón que aflora en la hoyada y en los cordones del cerro Blanco (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, , Andacollo-Puerto Aldea, Ovalle-Peña Blanca, Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui.

### **FORMACIÓN PUCALUME** (sedimentaria continental) (Barremiano-Cenomaniano)

La Formación Pucalume fue definida como una secuencia de origen continental, constituida principalmente por rocas sedimentarias clásticas, localmente carbonatadas, y subordinadamente por depósitos piroclásticos y lavas andesíticas. En la región, presenta aproximadamente 500 metros de espesor, aflora en dos franjas de color rojo, finamente estratificadas, constituidas por conglomerados finos, areniscas y calizas. Se apoya discordantemente sobre la Formación Algarrobal y en concordancia sobre la Formación Río Tascadero y está cubierta en discordancia por la Formación Viñita. La intruyen rocas plutónicas de las unidades Ksdpl y PaEmb. Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui

## **ESTRATOS DE QUEBRADA LA TOTORA** (Albiano medio-Cenomaniano)

Secuencia sedimentaria continental, definida en el Área Condoriaco-Rivadavia (Emparan y Pineda, 1999). En su localidad tipo, agrupa a los miembros 1 y 2 de la Formación Viñita, allí está constituida por una sección inferior (facies (a)) formada por conglomerados y areniscas, de color pardo y 500 m de espesor, a la cual sobreyace una sección superior (facies (b)) formada por areniscas breasas calcáreas amarillas, con 2 a 5 m de espesor, que sirven de base a calizas estromatolíticas, de 10 a 50 m de espesor, lacustres, que localmente contienen gastrópodos indeterminados. (Emparan & Pinerda, 2006a)

Las rocas de esta unidad afloran como una franja estratificada y suavemente plegada de dirección nor-noreste. (Pinerda & Emparan, 2006)

Ubicación: Hojas Andacollo-Puerto Aldea, Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui

## **INTRUSIVOS GRANÍTICOS A DIORÍTICOS** (122-110 Ma; Cretácico Inferior alto)

Rocas plutónicas de composición dioritoide a granitoide, con amplio predominio areal de las primeras. Preferentemente son de textura de grano grueso a medio, con tendencia porfírica, en los dioritoides y de grano fino en los granitoides. Comprende dioritas de piroxeno-anfíbola, de piroxeno y de anfíbola; monzodioritas de anfíbola-piroxeno-biotita y de anfíbola-piroxeno; monzogranito de anfíbola-biotita. Forman plutones compuestos y simples de tamaño variable de 6-120 km<sup>2</sup>. También presentan rocas de falla asociadas a la Falla Romeral (Emparan y Pineda, 2000); se ha establecido una diferenciación cartográfica en rocas miloníticas y rocas cataclásticas.

Esta unidad intruye a la Formación Arqueros. A su vez, esta unidad plutónica está intruida por diques y stocks elongados de las unidades hipabisales dacíticas-andesíticas. Está en contacto por falla (traza principal de la FR), con el Complejo Volcánico Agua Salada y con la unidad plutónica 'Intrusivos Dioríticos' que intruye a dicho complejo.

Aflora en el lado oriental de la FR, desde la quebrada Lagunillas hasta el extremo sur del mapa; forma una angosta franja de 2 km de ancho y 28 km de largo, hasta la quebrada El Ganzo, donde se amplía como un plutón compuesto de 10 km de ancho y 16 km de largo. También esta unidad se presenta en un plutón que aflora aisladamente; es un plutón simple que desarrolla un área de metamorfismo de contacto, cercano al pueblo Tambillo, con 2 km x 3 km. (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea, Ovalle-Peña Blanca y Monte Patria-El Maqui

## **COMPLEJO INTRUSIVO CERRO EL CHIVATO** (ca. 103 Ma; Cretácico Inferior tardío)

Rocas ígneas cuya composición varía de monzonítica cuarcífera a diorítica-andesítica, principalmente. Su textura varía de grano medio, hipidiomórfica granular, a afanítica, con predominio de las variedades porfíricas; predominan la anfíbola y el piroxeno como minerales máficos. Se caracterizan por una alteración propilítica que varía de leve a mediana y en ciertos sectores es intensa; clorita y epidota se presentan de manera penetrativa, reemplazan fenocristales, forman cúmulos, pátinas en fracturas, rellenan amígdalas y forman vetillas; con

frecuencia están acompañadas por limonita diseminada y como pátinas en fracturas y por calcita reemplazando cristales. Donde la alteración es intensa se presentan piritita y especularita, diseminados y en vetillas. Sus afloramientos presentan en varios sectores áreas de alteración hidrotermal argílica y fílica, en las cuales se sitúan numerosas minas; en las minas predominan los minerales oxidados de Cu. La distribución de sus afloramientos es semejante a un stock compuesto con elongación norte-sur, ancho muy variable y contorno muy irregular, con un tamaño >25 km<sup>2</sup>. Esta unidad intruye a la Formación Quebrada Marquesa. A su vez, la unidad está intruida por la unidad plutónica Kmd y por la unidad hipabisal Ksih.

La unidad aflora desde el cerro El Chivato hasta la quebrada La Cortadera. Se expone en longitud de 16 km, con un ancho variable de 1-5 km. Sin embargo, sus afloramientos se continúan fuera de los límites del mapa, hacia el norte en el Área Condoriaco-Rivadavia (Emparan y Pineda, 1999) y hacia el este en el Área Vicuña-Pichasca (Pineda y Emparan, en preparación. (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea, Condoriaco-Rivadavia y Vicuña-Pichasca

**FORMACIÓN VIÑITA** (Turoniano-Campaniano?) (Volcánica continental con intercalaciones sedimentarias)

La Formación Viñita fue definida por Aguirre y Egert (1965) en el Cuadrángulo Quebrada Marquesa como una secuencia de rocas elásticas y volcánicas de origen continental, comprendidas en tres miembros. Posteriormente, Emparan y Pineda (1999) la redefinieron, dejando como los Estratos de Quebrada La Totorá los miembros uno y dos y la Formación Viñita propiamente tal el miembro 3. En esta nueva interpretación, la Formación Viñita se redefine como una secuencia volcánica con intercalaciones sedimentarias continentales.

La Formación Viñita se distribuye en dos franjas aisladas, separadas por la falla Vicuña, una en el sector de la alta cordillera y la otra en la media montaña. En la Hoja Vicuña-Pichasca se reconocen cuatro de las cinco definidas por Emparan y Pineda (1999) en la Hoja Condoriaco-Rivadavia. Estas se superponen parcialmente y/o engranan entre sí (Pinerda & Emparan, 2006):

- a) Esta facies aflora principalmente al este de la falla Vicuña y se extiende en una franja norte-sur de color gris oscuro. Está constituida por andesitas ferruginosas y andesitas basálticas porfíricas de anfíbola y piroxena, con intercalaciones delgadas de tobas de lapilli y brechas piroclásticas compuestas por fragmentos líticos (andesitas y daciandesitas) y cristales (plagioclasa).
- b) Secuencia de color pardo oscuro con niveles verdosos, constituida principalmente por tobas de lapilli y de líticos andesíticos intensamente alterados a epidota, clorita, sericita, calcita y esmectitas; andesitas y andesitas basálticas de piroxena, porfíricas y afaníticas. y brechas piroclásticas líticas con fragmentos andesíticos y dacíticos.
- c) Ignimbritas macizas, gris claro a gris rosáceo con textura eutaxítica. Corresponden a: Tobas andesíticas gruesas cinerítica de cristales y líticos, semisoldada, intensamente alterada a esmectitas y tobas de lapilli soldada, con textura piroclástica fluidal, de composición dacítica.
- d) Brechas clásticas en las cercanías de Falla Rivadavia Emparan y Pineda (1999)
- e) Brechas piroclásticas líticas de color verde con fragmentos volcánicos andesíticos de hasta 1 m de diámetro, con intercalaciones de pequeños niveles de tobas de lapilli andesíticas y tobas gruesas cineríticas soldadas de composición andesítica.

Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui



## **INTRUSIVOS MONZONÍTICOS A DIORÍTICOS (97-95 Ma; Cretácico Superior temprano)**

Rocas plutónicas de composición monzodiorítica. Preferentemente, son de textura de grano grueso; se caracterizan por la persistencia de biotita, anfíbola y cuarzo, como minerales esenciales y de esfeno como mineral accesorio. Su color en las facies monzodioríticas varía del gris muy claro al rosado. En los afloramientos de este sector, es común un moteado gris oscuro debido a la abundancia de enclaves máficos. Comprende: monzodioritas cuarcíferas de biotita-anfíbola y de anfíbolabiotita; diorita cuarcífera de anfíbola-biotita-piroxeno y monzonita de anfíbola. Forman plutones compuestos y simples de tamaño variable de 2-170 km<sup>2</sup>.

Aflora en el sector nororiental de la Hoja Andacollo-Puerto Aldea, desde su borde norte hasta el sector del Llano de Chepiquilla, poco al sur de la ciudad de Andacollo. Constituye un plutón compuesto de forma circular, en el extremo norte del mapa; este plutón ocupa un área aproximada de 170 km<sup>2</sup>, que comprende la hoya de la quebrada Talca y cordones situados al oeste de aquella. También forma un stock con un área de 2 km<sup>2</sup>, en el borde del mapa entre las quebradas Calabozo y Calabozo Chico. En el plutón de la quebrada de Talca, se sitúan numerosas minas de cuarzo y algunas explotaciones auríferas (Emparan & Pinerda, 2006a)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea, Ovalle-Peña Blanca, Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui

## **CALDERA CONDORIANO (ca 85 Ma; Cretácico superior) (Emparan & Pinerda, 1999)<sup>a</sup>**

- a) Tobas y Brechas, con matriz cinerítica, tobas de líticos y pómez, y tobas de cristales
- b) Tobas soldadas riolíticas vítreas y de cristales con fragmentos líticos, pumicios y fiammes negras.
- c) Tobas soldadas (ignimbritas reomórficas), vítreas y de cristales con líticos andesíticos.
- d) Brechas volcánicas clasto-soportadas, poli y monomicticas
- e) Dique anular de pórfidos riolíticos de anfíbola-biotita o de biotita. presenta variación composicional a pórfidos dacíticos de anfíbola-biotita-piroxeno.
- f) Lavas dacíticas y andesíticas.
- g) Arenitas (grauvacas arcólicas), lutitas, tobas de pómez, líticos y cristales y tobas vítreas de cristales y líticos.
- h) Tobas y tobas brechosas, cineríticas y de líticos, brechas líticas riolíticas.

Ubicación: Hoja Condoriaco-Rivadavia.

## **INTRUSIVOS HIPABISALES ANDESÍTICOS-DACÍTICOS (83-73 Ma; Cretácico Superior alto)**

Rocas hipabisales de composición andesítica (diorítica) y dacítica, con textura porfírica predominante. Como minerales máficos, presentan anfíbola, piroxeno y biotita; se caracterizan por la persistencia de la anfíbola, que en algunos afloramientos es el único mineral máfico presente y en escasos lugares está ausente. Los cuerpos hipabisales elongados se orientan en

dirección aproximada N30°W; dos de estos, cercanos a Andacollo, tienen longitud de 3-5 km, con un ancho promedio de 250 m; otro cuerpo, al noreste de Andacollo, se expone en longitud de 5 km, con ancho promedio de 400 m. En algunos lugares se observa limonitas, minerales oxidados de Cu, pirita y calcopirita, asociados a estos cuerpos. Sin embargo, al sureste de Andacollo, a los diques se asocia una densa ubicación de minas, en un sector de mineralización polimetálica, constituida por mercurio y cobre mayormente, y con oro y plata subordinados.

Esta unidad intruye la formación Quebrada Marquesa, la unidad plutónica ‘Intrusivos dioríticos y monzodioríticos’ el Complejo intrusivo Cerro El Chivato y las unidades hipabisales.

La unidad aflora entre el sistema de fallas de relevo El Álamo-El Cobre y el límite oriental. La mayor densidad de afloramientos se sitúa desde el meridiano de la ciudad de Andacollo hacia el este, entre las quebradas La Chupalla y Azogue. (Emparan & Pinerda, 2006<sup>a</sup>)

Ubicación: Hojas, Andacollo-Puerto Aldea, Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui

### **FORMACIÓN LOS ELQUINOS (Campaniano-Maastrichtiano?)**

La Formación Los Elquinos fue definida por Aguirre y Egert (1965) al norte del río Elqui (Cuadrángulo Quebrada Marquesa), como una secuencia de origen continental, constituido por lavas, tobas y brechas de composición basáltica a riolítica. Posteriormente, Emparan y Pineda (1999) la redefinieron separándola en dos unidades: los Estratos de Quebrada Yungay y la Formación Los Elquinos, quedando la primera como una secuencia volcánica de lavas y tobas e ignimbritas separadas en dos asociaciones de facies respectivamente y la segunda como una secuencia volcanosedimentaria continental, multicolor, bien estratificada en la que alternan principalmente rocas sedimentarias con intercalaciones de lavas y rocas piroclásticas (Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hojas Condoriaco-Rivadavia, Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui

### **ESTRATOS DE QUEBRADA YUNGAY (Maastrichtiano)**

Secuencia volcánica continental es definida en la hoja Condoriaco-Rivadavia. En su localidad tipo, está constituida por dos facies: (a) formada por ignimbritas de color gris claro, macizas; su espesor es de 250 m; en parte, infrayace y engrana parcialmente con la otra facies. Facies (b), constituida por una alternancia de tobas andesíticas y dacíticas, cineríticas y de líticos, con intercalaciones de andesitas basálticas, andesitas y dacitas, cuyo espesor es de 300 m. En este mapa se expone sólo un pequeño afloramiento de las ignimbritas de la facies (a). Esta unidad se apoya en contacto de erosión y discordancia angular, sobre la Formación Quebrada Marquesa y no presenta techo expuesto.

La unidad aflora en el sector suroriental de la Hoja Andacollo-Puerto Aldea y ocupa la parte alta del cordón, en el Portezuelo La Leñera. Presenta una extensión aproximada de 3 km, tanto en dirección este-oeste como norte-sur. (Emparan & Pinerda, 2006)

Ubicación: Hojas, Andacollo-Puerto Aldea, Ovalle-Peña Blanca, Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui

### **INTRUSIVOS DEL CRETÁCICO SUPERIOR TARDÍO (71-63 Ma; Maastrichtiano-Daniano)**

Corresponden a rocas plutónicas de grano medio en general, color gris claro a gris rosáceo que forman cuerpos elongados y semirredondeados tipo stocks, en el cual se han reconocido cinco

plutones: Dioritas Esperanza, Ollada, Pichasca y Peralillo y la Monzodiorita El Pedregoso. Intruyen las formaciones Quebrada Marquesa, Viñita. Los Elquinos, Estratos de Quebrada La Totorá, Pucalume, Algarrobal, Tres Cruces y Matahuaico (Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hojas Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui

**COMPLEJO VOLCÁNICO LA CORINA** (ca 60 Ma?; Paleoceno inferior?)(Emparan & Pinerda, 1999)

Lavas andesíticas basálticas de piroxeno-olivino; andesitas de anfíbola y de anfíbola-piroxeno; daciandesitas de anfíbola y de piroxeno-anfíbola, de colores negro a gris medio. Intercalaciones de tobas cineríticas, brechas líticas y aglomerados volcánicos.

Ubicación: Hoja Condoriaco-Rivadavia

**COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO EL INCA** (ca 60 Ma?; Paleoceno inferior?)(Emparan & Pinerda, 1999)

- a) Tobas multicolores y brechas líticas, con intercalaciones d andesitas porfíricas de piroxeno, de color negro
- b) Andesitas basálticas porfíricas, de anfíbola-piroxeno, de color gris oscuro, bien estratificadas, con intercalaciones de tobas cineríticas y brechas líticas.
- c) Domos riolíticos de anfíbola, porfíricos y fluidales.
- d) Andesitas porfíricas de clinopiroxeno y de anfíbola-ortopiroxeno y de color gris oscuro.

Ubicación: Hoja Condoriaco-Rivadavia

**ESTRATOS DE QUEBRADA DEL CALVARIO** (58-53 Ma; Paleoceno Superior-Eoceno Inferior) (Emparan & Pinerda, 1999)

- a) Tobas soldadas vítreas y de pómez con cuarzo y biotita; tobas vitreas y de cristales laminadas (depósitos de oleada piroclásticas), de color rosado claro o rojo; tobas de caída, líticas, brechosas con bombas rojas, y tobas cineríticas de pómez y líticas. Intercalaciones de riolitas bandeadas, dacitas y daciandesitas porfídicas de biotita, anfíbola y piroxeno, basaltos de anfíbola-olivino y andesitas afaníticas de anfíbola-piroxeno, de color gris.
- b) Andesitas basálticas, porfíricas de olivino y piroxeno, y andesitas de clinopiroxeno, de color gris oscuro y gris medio con intercalaciones menores de ignimbritas, brechas y tobas líticas andesíticas con matriz cineríticas.
- c) Microbrechas y brechas cataclasíticas, moteadas, rojas y verdes, asociadas a Falla Rivadavia.

Ubicación: Hoja Condoriaco-Rivadavia.

**COMPLEJOS VOLCÁNICOS CERRO BLANCO Y ALTOS DEL YARETAL** (45-44 Ma; Eoceno Medio)

- a) Tobas de caída, cineríticas, con líticas; tobas de cristales, gris medio; tobas de pómez clasto-soportadas, de color verdoso, y tobas vítreas rosadas. Incluyen, además, tobas

riodacíticas de flujo, cineríticas y delíticas, con fiammes, de color gris claro, y tobas vítreas laminadas y rosadas.

- b) Andesitas porfíricas de anfíbola, amigdaloidales, negras con niveles brechosos.
- c) pórfidos riolíticos y lavas dacíticas porfíricas y afaníticas con anfíbola y sanidina.

Ubicación: Hoja Condoriaco-Rivadavia

### **INTRUSIVOS HIPABISALES ANDESITICOS (41 34 Ma; Eoceno Medio a Superior)**

Stocks de variadas dimensiones que afloran en la parte centronorte de la Hoja Vicuña-Pichasca y en los que se han reconocido solo dos facies de las tres definidas por Emparan y Pineda (1999). Intruyen los Estratos de la Quebrada Yungay y desarrollan aureolas de alteración propilítica y silicificación en los contactos. Son rocas porfíricas con amplia variedad petrográfica y dos tipos predominantes: pórfidos andesíticos y dioríticos, se reconocen:

- a) Pórfidos andesítico-basálticos de color gris oscuro. con fenocristales de plagioclasa y localmente, clinopiroxeno, olivino y/o anfíbola, con masa fundamental intergranular, pilotaxítica y subofítica, incluyendo traquiandesitas
- b) Pórfidos dioríticos de anfíbola y piroxena de color gris claro y gris oscuro, con fenocristales de plagioclasa, anfíbola y clinopiroxeno, con masa fundamental gruesa, holocristalina fina, formada por los mismos minerales anteriores más cuarzo y opacos.
- c) En el área de estudio no se obtuvo dataciones para estos intrusivos. Es posible correlacionarlos con la franja de intrusivos eocenos reconocida por Emparan y Pineda (1999), inmediatamente al norte del área, y en la que se obtuvo 7 edades K-Arde entre 41 y 34 Ma (Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hojas Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui

### **DIORITA EL VENADO (ca. 37 Ma)**

Corresponde a un plutón de forma ovalada, de color gris claro, que aflora en el sector Altos del Pangué, en el borde sureste de la Hoja Vicuña-Pichasca, y se extiende fuera de ella hasta la quebrada Venado. La unidad está formada por dioritas cuarcíferas y tonalitas incluidas en un solo plutón, que se extiende por más de 50 km<sup>2</sup>. Está en contacto por intrusión con rocas de las formaciones Viñita (Turoniano-Coniaciano) y Las Breas (Triásico-Jurásico); fuera del área intruye plutones de edad carbonífera

Se compone de dioritas cuarcíferas a tonalitas de grano medio de anfíbola y biotita, textura holocristalina hipidiomorfa, constituida por: plagioclasa, en cristales tabulares de hasta 2,4 mm; ortoclasa, en cúmulos gráficos, intersticiales a la plagioclasa; cuarzo; anfíbola, en cristales prismáticos de hasta 4,5 mm; biotita en cristales laminares de hasta 1,4 mm. Como minerales accesorios se reconoce circón y esfeno (Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hoja Vicuña-Pichasca.

### **FORMACIÓN COQUIMBO (Mioceno-Pleistoceno)**

Secuencia sedimentaria marina fosilífera, bien estratificada, con débil litificación y de color pardo anaranjado, que con 100 m de espesor mínimo, aflora en forma discontinua, en una franja de hasta 19 km de ancho, en la zona costera. Presenta facies sedimentarias de ambiente litoral y, en parte, transicional. Presenta numerosas discontinuidades intraformacionales. Se apoya

discordantemente sobre rocas plutónicas mesozoicas y engrana con las facies (a) de la Formación Confluencia y los Depósitos Eólicos de Quebrada El Jardín.

Facies:

- a) Areniscas finas limosas, finas lamnadas, amalgamadas finas a gresas, muy gruesas de guijarros con bioclastos, y escasas diatomeas.
- b) Calizas bioclásticas matriz soportadas y (bio) clastosoportadas minoritarias. Se intercalan con areniscas bioclásticas finas a gruesas.

La Formación Coquimbo aflora discontinuamente en toda la longitud del borde occidental del mapa. Aflora principalmente desde la bahía Guanaquero hacia el sur y forma una franja con ancho de 19 a 5 km, cuyos depósitos han sido denominados la 'Cuenca Cenozoica' (Emparan & Pinerda, 2006).

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca

### **DEPOSITAS EÓLICOS DE QUEBRADA EL JARDÍN (Mioceno-Pleistoceno)**

Depósitos estabilizados de arenas finas a medias, poco consolidadas, de aspecto macizo y de color pardo anaranjado, que se sitúan adosados en la base del escarpe posterior de las planicies costeras.

Generalmente, en el lado occidental, los depósitos engranan con la Formación Coquimbo; en el lado oriental, se apoyan de manera parcial discordantemente sobre rocas mesozoicas y engranan con las facies (a) de la Formación Confluencia.

Se exponen en el sector costero desde la quebrada El Arrayán hacia el norte, principalmente frente a la bahía Guanaquero. (Emparan & Pinerda, 2006<sup>a</sup>)

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca

### **FORMACIÓN CONFLUENCIA (Mioceno-Pleistoceno)**

Secuencia sedimentaria continental, en parte bien estratificada, con débil litificación, y de color pardo, que, con altura de hasta 100 m, forma planicies o terrazas en los valles y quebradas principales, coalescentes en sus cursos inferiores o confluencias, y que forma conos en sus cabeceras y flancos de grandes quebradas con laderas muy escarpadas. Comprende: a) facies fluviales, que forman las planicies, constituidas por gravas gruesas bien redondeadas, con intercalaciones de areniscas poco consolidadas y lentes de limos; b) facies aluvionales, que forman los conos de cabeceras, constituidas por brechas muy gruesas con abundante matriz limoarenosa. Las facies fluviales (a) y aluvionales (b) engranan entre sí y, en parte, se superponen las facies aluvionales sobre las fluviales.

Esta formación se apoya discordantemente sobre rocas mesozoicas. Las facies fluviales engranan con los depósitos de la Formación Coquimbo y los Depósitos Eólicos de Quebrada El Jardín.

La Formación Confluencia se expone con gran continuidad en las quebradas La Caldera-Higuerillas, Talhuén y Camarones y discontinuamente a lo largo de la Quebrada del Ingenio. Se expone extensamente en el valle que se desarrolla desde la Estación Las Cardas hacia el norte. También presenta amplia distribución en las planicies costeras que se desarrollan desde la bahía Guanaquero al sur; en este sector forma parte de la denominada la 'Cuenca Cenozoica' conjuntamente con los depósitos de la Formación Coquimbo y aquí exhibe un sistema de fallamiento normal cenozoico.

Ubicación: Hojas La Serena-La Higuera, Andacollo-Puerto Aldea y Ovalle-Peña Blanca

**DEPÓSITOS ALUVIALES ANTIGUOS (Mioceno-Pleistoceno)**

Secuencia sedimentaria continental. Compuesta por gravas gruesas, bien redondeadas, con intercalaciones de arenisca poco consolidadas, limos lenticulares, de origen fluvial y brechas muy gruesas angulosas con abundante matriz limoarenosa, originadas en eventos de remoción en masa de tipo flujo de detritos. En el área de estudio, están cortados por sedimentos aluviales cuaternarios (Pinerda & Emparan, 2006).

Ubicación: Hojas Vicuña-Pichasca y Monte Patria-El Maqui.

## **2. Unidades sedimentarias no consolidadas**

### **DEPÓSITOS DE REMOCIÓN EN MASA (Pleistoceno)**

Corresponden a depósitos macizos y mal seleccionados, formados por bloques polimícticos, matriz soportados, con moderada consolidación, distribuidos caóticamente en una matriz limo-arcillosa. Producidos por el deslizamiento de roca y material coluvial en laderas abruptas, se ubican en la base de escarpes de laderas y afloran principalmente al oeste de la quebrada Tres Cruces y en el sector La Aguada en la quebrada Uchumi, donde se puede observar su mayor afloramiento con una potencia aproximada de 250 metros. Se los asigna al Pleistoceno (Pinerda & Emparan, 2006).

### **DEPÓSITOS FLUVIALES (Pleistoceno-Holoceno)**

Se exponen en los valles y en el curso medio e inferior de las grandes quebradas. Forman terrazas adyacentes a los cauces actuales y constituyen depósitos estabilizados y también los sedimentos de los cauces, como depósitos activos. Estas características permiten separarlos en dos facies(Pinerda & Emparan, 2006; Emparan & Pinerda, 2006<sup>a</sup>):

- 1) Antiguos. Gravas gruesas y muy gruesas polimícticas con abundante matriz de arena, débilmente consolidadas. Presentan intercalaciones de gravas finas arenosas y arenas de guijarros. Forman terrazas.
- 2) Recientes (Holoceno). Gravas gruesas y muy gruesas polimícticas con abundante matriz de arena, no consolidadas. Presentan clastos orientados y/o imbricados. Constituyen los cauces actuales.

### **DEPÓSITOS ALUVIONALES (Pleistoceno-Holoceno)**

Constituyen el relleno de quebradas y forman conos en la salida de ellas. Son depósitos originados por flujos turbulentos y breves, con cierta incidencia de procesos de remoción en masa. Están constituidos por brechas no consolidadas, polimícticas, con matriz de arena y limo(Pinerda & Emparan, 2006).

### **DEPÓSITOS COLUVIALES (Pleistoceno? Holoceno)**

Constituyen depósitos inconsolidados, adosados a las laderas. En general, son de aspecto macizo, pero localmente, es posible observar una mala estratificación, subparalela, de forma cuneiforme que se engrosa al descender en cota. Están constituidos por clastos oligo- y monomícticos, angulosos, con matriz de limo(Pinerda & Emparan, 2006)..

### **DEPÓSITOS DE PLAYAS MARINAS (Holoceno)**

Constituyen depósitos litorales cuya granulometría varía en las distintas playas. Se reconocen tres facies con variación latitudinal(Pinerda & Emparan, 2006; Emparan & Pinerda, 2000):

- a) Constituida por arenas medias a gruesas arcósico-líticas, no consolidadas, con un contenido variable de bioclastos.
- b) Gravas polimícticas, clasto-soportadas. Escasos bioclastos.
- c) Sedimentos indiferenciados

### **DEPÓSITOS EÓLICOS (Holoceno)**

Constituyen depósitos no consolidados, activos, en áreas vecinas a las playas marinas actuales. Están constituidos por arenas finas arcósicas, no consolidadas, Se distribuyen principalmente en el sector de la bahía Tongoy, en el área vecina a la playa y en la ladera posterior de la planicie costera. Como también en la bahía de Coquimbo y el sector de Quebrada Honda (Pinerda & Emparan, 2006; Emparan & Pinerda, 2006).

### **DEPÓSITOS DE RELLENO ARTIFICIAL (Holoceno)**

Son depósitos líticos originados por actividades mineras extractivas y obras civiles constructivas. Presentan distintas características granulométricas y de selección, de acuerdo a su origen y propósito. Corresponden a ‘botaderos’ de estéril de minas, ‘pilas’ de lixiviación, embalses de relaves abandonados y muros de embalses de regadío. La textura de los depósitos varía desde bloques autoportados, bloques matriz soportados, estables, a depósitos de limos arenosos erosionables (Pinerda & Emparan, 2006).



## **ANEXO D**

### **Matriz de Partición Binaria**



### ANEXO D.1

Orden	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>TOTAL</sub>	S <sub>TOTAL</sub>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
4	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1					
5	1	1	-1	-1									
6	1	-1											
7			1	-1									
8					1	1	-1	-1					
9					1	-1							
1							1	-1					
11									1	1	1	1	-1
12									1	1	-1	-1	
13									1	-1			

## ANEXO D.2

Orden	Sc	Ba	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Zr
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
3	-1	-1														
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11	-1	-1														
12																
13																
14																
15	1	-1														
16	-1															
17			1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
18			1	1	1	1	-1	-1	-1							
19			1	1	-1	-1										
20			1	-1												
21					1	-1										
22							1	1	-1							
23							1	-1								
24										1	1	1	1	-1	-1	-1
25										1	1	-1	-1			
26										1	-1					
27												1	-1			
28														1	1	-1
29														1	-1	

### ANEXO D.3

Orden	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
1															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															
27															
28															
29															

### ANEXO D.4

Orden	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
32	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1							
33	1	1	-1	-1											
34	1	-1													
35			1	-1											
36					1	1	-1	-1							
37					1	-1									
38							1	-1							
39									1	1	1	1	-1	-1	-1
40									1	1	-1	-1			
41									1	-1					
42											1	-1			
43													1	1	-1
44													1	-1	

### ANEXO D.5

Orden	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	Tl	Se
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
1														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														

### ANEXO D.6

Orden	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	Tl	Se
30	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
31														
32														
33														
34														
35														
36														
37														
38														
39														
40														
41														
42														
43														
44														
45	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
46	1	1	1	1	-1	-1	-1							
47	1	1	-1	-1										
48	1	-1												
49			1	-1										
50					1	1	-1							
51					1	-1								
52								1	1	1	1	-1	-1	-1
53								1	1	-1	-1			
54								1	-1					
55										1	-1			
56												1	1	-1
57												1	-1	



## **ANEXO E**

### **Matriz de Variación de Base de Datos Modificada**

# ANEXO E.0

## Total Matriz

Código de color:

	Bajo percentil 5%
	Entre percentiles 5%-25%
	Entre percentiles 75%-95%
	Sobre percentil 95%

Nota 1: Se omite triángulo inferior, correspondiente a medias

Nota 2: Matriz de gran extensión por lo cual es seccionada de modo de hacer posible su inspección. Se presenta la perspectiva general de la matriz (Total Matriz) de modo de facilitar la navegación entre las distintas secciones y visualizar patrones en una escala general. Números del 1 al 6 corresponden a de cada sección del presente anexo: Números del 1 al 6 corresponden a de cada sección del presente anexo.

### ANEXO E.1

<b>Xi\Xj</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	<b>S<sub>TOTAL</sub></b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>		0.0136	0.2978	0.1585	0.3614	0.054	0.0903	0.3894	0.2382	0.3194	0.8865	1.1141	1.6694
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>			0.3012	0.1421	0.3804	0.0579	0.1122	0.4228	0.2561	0.3178	0.9441	1.1132	1.6871
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>				0.253	0.4974	0.3066	0.4522	0.1063	0.2242	0.2057	0.4825	1.5647	1.9099
<b>MgO</b>					0.2754	0.1835	0.3046	0.3556	0.206	0.3011	0.6866	1.0604	1.6755
<b>CaO</b>						0.4337	0.5384	0.5714	0.3643	0.4339	0.9125	0.7136	1.3771
<b>Na<sub>2</sub>O</b>							0.131	0.4294	0.2467	0.3644	0.899	1.174	1.7466
<b>K<sub>2</sub>O</b>								0.5746	0.3584	0.396	1.0551	1.1264	1.7109
<b>TiO<sub>2</sub></b>									0.2969	0.2962	0.3593	1.7811	2.1444
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>										0.2817	0.6702	1.1634	1.6442
<b>MnO</b>											0.7369	1.263	1.686
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>												2.1481	2.5561
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>													1.3711
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>													

## ANEXO E.2

<b>Xi\Xj</b>	<b>Sc</b>	<b>Ba</b>	<b>Co</b>	<b>Cs</b>	<b>Ga</b>	<b>Hf</b>	<b>Nb</b>	<b>Rb</b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>Ta</b>	<b>Th</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Zr</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.1087	0.3122	0.2023	0.5353	0.038	0.7009	0.5479	0.1321	0.5077	0.1333	0.6504	0.5643	0.4873	0.5048	0.769	0.741
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.0918	0.3093	0.1895	0.5173	0.0394	0.8025	0.6385	0.1646	0.5758	0.1304	0.7553	0.6605	0.5833	0.5067	0.8496	0.8456
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1362	0.619	0.1145	1.0776	0.1705	0.424	0.3487	0.518	0.39	0.3286	0.4721	0.4834	0.434	0.0513	0.5311	0.4487
<b>MgO</b>	0.0649	0.4764	0.132	0.7202	0.1128	0.7665	0.6106	0.3506	0.6007	0.1866	0.754	0.6751	0.6048	0.389	0.883	0.8026
<b>CaO</b>	0.3417	0.6036	0.4192	0.9276	0.3402	0.9467	0.8196	0.5859	0.809	0.1674	0.991	0.9219	0.7506	0.6254	1.1527	0.9817
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.1419	0.3285	0.2376	0.6792	0.0884	0.7505	0.5953	0.1903	0.5413	0.1726	0.7081	0.5895	0.5152	0.4907	0.7707	0.7913
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.2564	0.1807	0.3543	0.44	0.1519	0.8507	0.6482	0.0255	0.5915	0.2661	0.75	0.6214	0.5269	0.6919	0.8149	0.8968
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.2244	0.8371	0.2345	1.1863	0.2661	0.289	0.1774	0.5924	0.3335	0.4618	0.2807	0.428	0.4166	0.1208	0.5296	0.2962
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.1975	0.5543	0.1943	0.8756	0.1777	0.5324	0.4155	0.395	0.4348	0.2494	0.5312	0.4597	0.359	0.3347	0.6256	0.561
<b>MnO</b>	0.2326	0.4269	0.1577	0.8078	0.225	0.6973	0.5372	0.4314	0.5013	0.3069	0.6935	0.6757	0.5408	0.3299	0.745	0.7268
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.6539	1.3116	0.5998	1.7322	0.7427	0.5764	0.4756	1.0529	0.7393	0.9363	0.5593	0.7211	0.7147	0.4283	0.8536	0.5679
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	1.2412	1.1172	1.2917	1.3003	1.165	2.1424	1.948	1.1593	1.79	0.9179	2.1338	1.9314	1.567	1.8381	2.2052	2.1992
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	1.7467	1.5136	1.6247	2.0264	1.675	2.5536	2.3433	1.788	2.0953	1.4318	2.5489	2.3896	1.9827	2.1152	2.2578	2.6112
<b>Sc</b>		0.4448	0.0879	0.7323	0.0537	0.6313	0.4948	0.3058	0.468	0.1795	0.6257	0.5812	0.5317	0.2566	0.7194	0.6666
<b>Ba</b>			0.5081	0.4907	0.345	1.2558	1.0036	0.2347	0.8672	0.3298	1.1649	1.0258	0.8561	0.8413	1.1244	1.3141
<b>Co</b>				0.8397	0.109	0.6254	0.4826	0.4019	0.4801	0.2566	0.6109	0.5842	0.499	0.2278	0.6469	0.6529
<b>Cs</b>					0.5976	1.6717	1.3397	0.3981	1.2359	0.6804	1.4762	1.409	1.2598	1.3934	1.7541	1.7323
<b>Ga</b>						0.5883	0.4491	0.1958	0.4338	0.1341	0.5647	0.4995	0.4385	0.3341	0.6805	0.6241
<b>Hf</b>							0.1405	0.8307	0.4226	0.8363	0.1542	0.1676	0.2316	0.4391	0.4968	0.0073
<b>Nb</b>								0.6224	0.3276	0.6938	0.0516	0.2144	0.2286	0.394	0.4513	0.1392
<b>Rb</b>									0.5738	0.3355	0.7146	0.5852	0.5061	0.763	0.8257	0.8726
<b>Sn</b>										0.6572	0.4191	0.4378	0.3843	0.473	0.5625	0.44
<b>Sr</b>											0.8417	0.754	0.5971	0.4925	0.9286	0.8777
<b>Ta</b>												0.2242	0.2572	0.5273	0.4742	0.1531
<b>Th</b>													0.1089	0.5696	0.4559	0.1837
<b>U</b>														0.5482	0.4234	0.2528
<b>V</b>															0.5901	0.4579
<b>W</b>																0.5103
<b>Zr</b>																

### ANEXO E.3

<b>Xi\Xj</b>	<b>Y</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.1168	0.1438	0.1469	0.1404	0.1332	0.1183	0.0534	0.1074	0.1071	0.1095	0.1111	0.1185	0.1257	0.1323	0.1391
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1507	0.1866	0.1879	0.1778	0.1661	0.1448	0.0564	0.1335	0.136	0.1385	0.1421	0.1527	0.1611	0.1703	0.1784
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1849	0.2024	0.1936	0.1817	0.1731	0.1642	0.1676	0.1698	0.1837	0.184	0.1833	0.1852	0.1839	0.1798	0.175
<b>MgO</b>	0.1947	0.2673	0.2583	0.2413	0.2222	0.1927	0.1341	0.1759	0.1856	0.1832	0.1862	0.194	0.2042	0.211	0.2163
<b>CaO</b>	0.4523	0.5087	0.5042	0.4864	0.4699	0.4506	0.3813	0.435	0.4458	0.4555	0.4465	0.4478	0.4646	0.4613	0.4636
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.1729	0.163	0.1697	0.1621	0.1566	0.1475	0.085	0.1493	0.1541	0.163	0.1663	0.1762	0.1833	0.1925	0.1984
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.236	0.2086	0.2224	0.2262	0.2264	0.224	0.1691	0.2243	0.2229	0.2291	0.233	0.2441	0.2496	0.2561	0.2642
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.2053	0.2283	0.2162	0.2089	0.2059	0.2005	0.2425	0.2018	0.2129	0.2063	0.2074	0.2022	0.2022	0.1914	0.1867
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.1712	0.1742	0.1676	0.1528	0.1458	0.1392	0.1703	0.1444	0.1594	0.171	0.1727	0.1788	0.1873	0.1879	0.1921
<b>MnO</b>	0.2667	0.3095	0.3029	0.2935	0.2838	0.2626	0.2317	0.252	0.2626	0.2705	0.2675	0.2731	0.2857	0.2808	0.2853
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.6386	0.628	0.6198	0.6193	0.6212	0.6275	0.701	0.6308	0.6531	0.6414	0.6518	0.6436	0.6514	0.6309	0.6285
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	1.3344	1.3817	1.3884	1.3793	1.36	1.339	1.2272	1.3181	1.3118	1.3431	1.3266	1.3392	1.366	1.3785	1.3799
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	1.8394	1.8777	1.8928	1.8755	1.8587	1.8408	1.7326	1.8252	1.8229	1.8472	1.8298	1.842	1.874	1.8763	1.888
<b>Sc</b>	0.1129	0.1755	0.1649	0.1494	0.1328	0.1078	0.0552	0.0982	0.1044	0.1028	0.1049	0.1116	0.1181	0.1241	0.1284
<b>Ba</b>	0.5337	0.4799	0.5011	0.5002	0.4956	0.4906	0.3857	0.4956	0.5093	0.5235	0.5274	0.5435	0.5525	0.5583	0.5682
<b>Co</b>	0.1514	0.2216	0.2107	0.1958	0.1801	0.1541	0.1173	0.1389	0.1471	0.1477	0.1498	0.1568	0.1651	0.1685	0.1737
<b>Cs</b>	0.7778	0.8254	0.8396	0.8473	0.8339	0.8057	0.6752	0.7734	0.7674	0.7632	0.7692	0.7873	0.7944	0.8036	0.8235
<b>Ga</b>	0.0802	0.1138	0.1121	0.103	0.094	0.0781	0.033	0.0692	0.0738	0.0751	0.0753	0.081	0.0856	0.0894	0.0928
<b>Hf</b>	0.359	0.3447	0.3297	0.3297	0.3463	0.3683	0.5678	0.3895	0.3838	0.3874	0.3779	0.3557	0.3408	0.3178	0.2972
<b>Nb</b>	0.2637	0.2204	0.2162	0.2215	0.2378	0.258	0.4099	0.2754	0.2761	0.2775	0.2769	0.2661	0.26	0.2412	0.2314
<b>Rb</b>	0.2461	0.2246	0.2354	0.243	0.2457	0.2437	0.2136	0.2416	0.2358	0.242	0.2447	0.2543	0.2596	0.2661	0.2742
<b>Sn</b>	0.3162	0.3015	0.2946	0.2948	0.3033	0.3108	0.4096	0.3206	0.3198	0.3293	0.3227	0.322	0.3114	0.3082	0.3024
<b>Sr</b>	0.2727	0.2839	0.2855	0.2723	0.2598	0.2456	0.154	0.2403	0.2527	0.267	0.2647	0.2721	0.285	0.288	0.2929
<b>Ta</b>	0.3413	0.3005	0.2951	0.3017	0.3218	0.3456	0.5209	0.363	0.3585	0.3582	0.3592	0.345	0.3351	0.3145	0.3049
<b>Th</b>	0.3009	0.2437	0.2373	0.2436	0.2646	0.2931	0.4936	0.319	0.3147	0.3208	0.3179	0.3041	0.2943	0.2768	0.2658
<b>U</b>	0.2584	0.204	0.2013	0.2094	0.2278	0.253	0.4154	0.2703	0.2654	0.2821	0.2745	0.2661	0.2605	0.25	0.2414
<b>V</b>	0.3409	0.3444	0.3327	0.3177	0.3077	0.3042	0.3293	0.3204	0.3404	0.342	0.3409	0.3401	0.337	0.3263	0.318
<b>W</b>	0.5234	0.47	0.4686	0.4652	0.4763	0.501	0.6363	0.523	0.5294	0.5339	0.5323	0.5275	0.5265	0.5135	0.5082
<b>Zr</b>	0.385	0.3703	0.3546	0.3554	0.3725	0.3949	0.5991	0.4156	0.4109	0.4134	0.4043	0.3821	0.3687	0.3437	0.3228

### ANEXO E.4

<b>Xi\Xj</b>	<b>Y</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
<b>Y</b>		0.0537	0.0429	0.0356	0.032	0.0192	0.0588	0.0103	0.0062	0.0049	0.0043	0.0047	0.0075	0.0088	0.0114
<b>La</b>			0.0034	0.0066	0.0139	0.024	0.0793	0.0382	0.0453	0.0529	0.0566	0.0606	0.062	0.0606	0.0608
<b>Ce</b>				0.0028	0.0086	0.0159	0.0758	0.029	0.0352	0.0426	0.0462	0.0494	0.0511	0.0506	0.0507
<b>Pr</b>					0.0038	0.0088	0.0664	0.0213	0.0273	0.0351	0.0385	0.0421	0.0434	0.0434	0.0438
<b>Nd</b>						0.0065	0.0578	0.0174	0.0242	0.0307	0.034	0.039	0.0403	0.0406	0.0422
<b>Sm</b>							0.0427	0.0064	0.0117	0.017	0.02	0.0249	0.0279	0.0293	0.0316
<b>Eu</b>								0.0375	0.0452	0.0489	0.0536	0.0629	0.0707	0.0769	0.0825
<b>Gd</b>									0.0063	0.008	0.0105	0.0151	0.0188	0.0223	0.0248
<b>Tb</b>										0.0071	0.0058	0.0087	0.0115	0.0151	0.018
<b>Dy</b>											0.0058	0.0087	0.0124	0.015	0.0179
<b>Ho</b>												0.0052	0.008	0.0109	0.0127
<b>Er</b>													0.008	0.0076	0.0096
<b>Tm</b>														0.0073	0.0082
<b>Yb</b>															0.0057
<b>Lu</b>															

### ANEXO E.5

<b>Xi\Xj</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Sb</b>	<b>Bi</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Se</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.8344	0.861	0.7189	0.6176	0.2845	0.773	1.0997	0.842	0.6864	0.6307	2.3251	1.6512	0.2328	0.4068
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.8805	0.8109	0.6739	0.5674	0.2841	0.7392	1.0922	0.823	0.706	0.6147	2.3061	1.5996	0.2495	0.4283
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.6266	0.9813	1.0562	1.0027	0.2673	1.19	1.6092	0.9536	0.9369	0.8382	2.3749	1.7179	0.4965	0.6374
<b>MgO</b>	0.8907	0.8779	0.892	0.7848	0.2056	1.0165	1.358	1.0548	0.9059	0.6896	2.2399	1.6162	0.3121	0.5246
<b>CaO</b>	1.0426	1.2114	1.0636	1.0316	0.5152	1.1024	1.4052	1.1032	1.1717	0.8623	2.5086	1.8168	0.4593	0.5292
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.8701	0.8666	0.866	0.7145	0.3235	0.9048	1.2916	0.8584	0.7892	0.7353	2.3079	1.6458	0.3164	0.5091
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.8629	0.8743	0.6465	0.5399	0.399	0.7363	1.0889	0.7919	0.7007	0.6537	2.3023	1.6437	0.2909	0.5421
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.7651	1.3235	1.2986	1.2756	0.3182	1.4836	1.804	1.274	1.1442	1.0281	2.7421	2.1585	0.5873	0.8012
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.6142	0.9132	1.0387	0.8938	0.271	1.0525	1.4064	1.0084	0.8788	0.7997	2.2403	1.6807	0.3982	0.482
<b>MnO</b>	0.5864	0.9231	0.8165	0.6618	0.3042	0.8658	1.1676	0.9106	0.9382	0.7712	2.3734	1.7833	0.3666	0.5789
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.109	1.8062	1.9818	1.9464	0.4591	2.2078	2.533	1.8669	1.6438	1.5157	3.0564	2.5862	0.9958	1.2911
<b>CTOTAL</b>	1.7983	1.8142	1.5097	1.2616	1.2981	1.4394	1.6201	1.786	1.6756	1.5062	2.9426	2.1499	1.073	1.0025
<b>STOTAL</b>	1.4584	1.5382	1.9669	1.7603	1.7538	1.5941	1.8843	1.7241	1.6369	1.5978	2.5968	2.093	1.4407	1.1461
<b>Sc</b>	0.8211	0.8428	0.8135	0.7484	0.2064	0.9616	1.3235	0.9151	0.83	0.6469	2.3001	1.6069	0.319	0.4924
<b>Ba</b>	0.9031	0.8125	0.5488	0.5148	0.5905	0.6299	1.0728	0.6442	0.851	0.6019	2.2271	1.4842	0.4012	0.6869
<b>Co</b>	0.5746	0.7456	0.9273	0.7523	0.1397	0.9453	1.2951	0.9271	0.7943	0.7138	2.1777	1.5616	0.3027	0.4757
<b>Cs</b>	1.3991	1.2775	0.5052	0.4718	0.7521	0.5337	0.8841	1.1182	1.0975	0.8952	3.0152	2.1653	0.6008	0.9637
<b>Ga</b>	0.7306	0.8378	0.7243	0.6448	0.2148	0.8154	1.1629	0.8409	0.6981	0.6291	2.2569	1.6066	0.2309	0.4226
<b>Hf</b>	0.9177	1.8226	1.894	1.8395	0.7052	2.0428	2.2606	1.7858	1.4286	1.5279	3.0847	2.5583	0.9093	1.0994
<b>Nb</b>	0.7855	1.5888	1.6149	1.5415	0.4877	1.772	2.0117	1.6107	1.2365	1.2993	2.9101	2.4842	0.7113	0.9802
<b>Rb</b>	0.9194	0.9689	0.702	0.5911	0.4115	0.788	1.1159	0.9098	0.7682	0.7173	2.4468	1.7843	0.2908	0.6
<b>Sn</b>	0.81	1.2979	1.3573	1.3136	0.5515	1.5068	1.8152	1.3839	1.0371	1.1204	2.6839	2.1489	0.6517	0.8131
<b>Sr</b>	0.8594	0.8935	0.7858	0.6851	0.392	0.801	1.1515	0.8074	0.8389	0.657	2.308	1.5793	0.3095	0.3989
<b>Ta</b>	0.8937	1.7433	1.7958	1.7019	0.6071	1.9372	2.1368	1.7956	1.3248	1.4353	3.0593	2.6593	0.8348	1.107
<b>Th</b>	0.8438	1.5502	1.7281	1.5559	0.6347	1.7772	2.0659	1.6062	1.2447	1.3957	2.9006	2.3897	0.7631	0.9897
<b>U</b>	0.6557	1.3236	1.5157	1.2693	0.5426	1.4895	1.7028	1.4065	0.9963	1.2074	2.667	2.1672	0.5998	0.7442
<b>V</b>	0.7204	1.166	1.3445	1.3284	0.3975	1.5222	1.979	1.1314	1.1898	1.0399	2.4981	1.8506	0.7166	0.8417
<b>W</b>	0.6712	1.2615	1.8481	1.6915	0.8073	1.8271	2.179	1.3827	1.0932	1.3563	2.3618	2.0704	0.9227	1.0649
<b>Zr</b>	0.9479	1.8913	1.9709	1.9152	0.726	2.1199	2.3329	1.8552	1.4818	1.5893	3.135	2.6265	0.9483	1.1491

### ANEXO E.6

<b>Xi\Xj</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Sb</b>	<b>Bi</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Se</b>
<b>Y</b>	0.699	0.9825	0.9641	0.8226	0.2381	1.0547	1.2911	1.0767	0.777	0.7837	2.438	1.8274	0.3073	0.4913
<b>La</b>	0.6862	1.0077	1.0232	0.8954	0.2803	1.1112	1.4379	1.0392	0.7964	0.834	2.4254	1.8341	0.3413	0.5625
<b>Ce</b>	0.6936	1.0128	1.036	0.9072	0.2774	1.1273	1.4441	1.0576	0.8086	0.8445	2.4403	1.8337	0.3473	0.5592
<b>Pr</b>	0.6863	0.9885	1.0328	0.902	0.2715	1.1209	1.4374	1.0468	0.8059	0.8287	2.4033	1.8019	0.3431	0.5445
<b>Nd</b>	0.6862	0.9662	1.0131	0.8802	0.2624	1.0998	1.4198	1.0291	0.8031	0.8091	2.386	1.7696	0.3377	0.5314
<b>Sm</b>	0.6929	0.9424	0.9793	0.8443	0.2416	1.065	1.3755	1.0229	0.7916	0.7859	2.3748	1.7506	0.3176	0.5107
<b>Eu</b>	0.7542	0.8548	0.8106	0.6848	0.2128	0.896	1.209	0.8911	0.7392	0.6709	2.316	1.641	0.2631	0.4463
<b>Gd</b>	0.6942	0.9409	0.9515	0.8118	0.2246	1.0383	1.313	1.0343	0.7794	0.7679	2.394	1.7704	0.2989	0.4938
<b>Tb</b>	0.7103	0.9534	0.9585	0.7965	0.2319	1.031	1.2851	1.0543	0.7734	0.7764	2.4285	1.7992	0.2992	0.4807
<b>Dy</b>	0.716	0.9718	0.951	0.8107	0.229	1.0451	1.2953	1.0648	0.7761	0.7745	2.436	1.8205	0.3073	0.5019
<b>Ho</b>	0.7096	0.9732	0.947	0.8152	0.2395	1.0405	1.2899	1.0608	0.7674	0.7707	2.4333	1.8116	0.3061	0.4884
<b>Er</b>	0.7146	0.9928	0.9677	0.8399	0.2471	1.0646	1.3078	1.0826	0.7811	0.7872	2.4533	1.8355	0.3118	0.4941
<b>Tm</b>	0.7184	1.0076	0.9741	0.8504	0.2592	1.0743	1.3175	1.0854	0.7895	0.797	2.4664	1.8369	0.3221	0.5105
<b>Yb</b>	0.7031	1.0238	0.9842	0.8723	0.2619	1.0917	1.3393	1.0883	0.7963	0.8031	2.4627	1.8447	0.3301	0.5158
<b>Lu</b>	0.7124	1.0437	0.9946	0.8931	0.2712	1.1093	1.3582	1.1009	0.8065	0.8165	2.4768	1.854	0.3385	0.5263
<b>Mo</b>		0.9097	1.4027	1.2294	0.7199	1.2319	1.6116	1.0305	0.9273	1.0859	2.0456	1.74	0.8056	0.8366
<b>Cu</b>			1.1622	0.9247	0.9379	0.9287	1.3992	0.8999	0.8983	0.7369	1.728	1.1775	0.8753	0.9806
<b>Pb</b>				0.3978	0.9781	0.5028	0.7118	0.8112	0.9784	0.6659	2.6885	1.8613	0.8276	0.9756
<b>Zn</b>					0.7975	0.3838	0.4676	0.9196	0.9206	0.8321	2.7554	1.9577	0.6667	0.8327
<b>Ni</b>						1.0218	1.3305	1.1624	0.9046	0.8428	2.4559	1.8931	0.3451	0.6176
<b>As</b>							0.7056	0.6666	0.9409	0.9093	2.6279	1.7749	0.7598	0.8826
<b>Cd</b>								1.3571	1.285	1.1457	3.2317	2.549	1.0727	1.1693
<b>Sb</b>									1.0174	0.8946	2.2502	1.1891	1.0184	1.0293
<b>Bi</b>										0.8402	1.9172	1.6317	0.7251	0.7315
<b>Ag</b>											1.9365	1.3825	0.7453	0.7788
<b>Au</b>												1.7983	2.248	2.2477
<b>Hg</b>													1.6721	1.6114
<b>Tl</b>														0.479
<b>Se</b>														

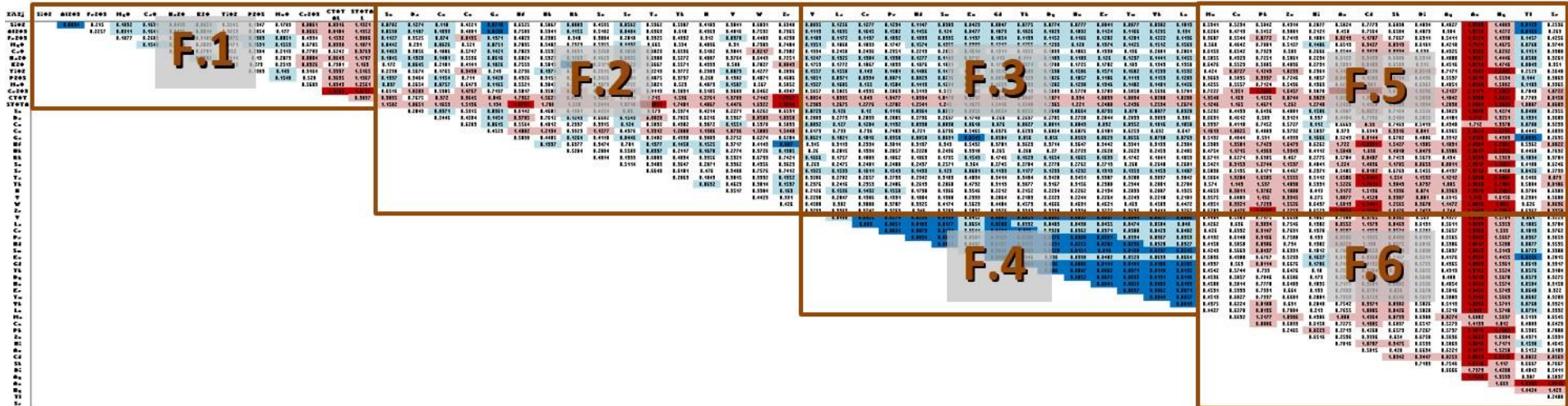


## **ANEXO F**

### **Matriz de Variación de Set de Datos A**

# ANEXO F.0

## Total Matriz



Código de color:

Bajo percentil 5%
Entre percentiles 5%-25%
Entre percentiles 75%-95%
Sobre percentil 95%

Nota 1: Se omite triangulo inferior, correspondiente a medias.

Nota 2: Matriz de gran extensión por lo cual es seccionada de modo de hacer posible su inspección. Se presenta la perspectiva general de la matriz (Total Matriz) de modo de facilitar la navegación entre las distintas secciones y visualizar patrones en una escala general. Números del 1 al 6 corresponden a de cada sección del presente anexo: Números del 1 al 6 corresponden a de cada sección del presente anexo.

### ANEXO F.1

<b>X<sub>i</sub>\X<sub>j</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	<b>S<sub>TOTAL</sub></b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>		0.0094	0.215	0.1092	0.1631	0.0439	0.0651	0.3245	0.1947	0.1783	0.8061	0.8316	1.1321
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>			0.2257	0.0911	0.1644	0.0496	0.0814	0.3653	0.2054	0.177	0.8665	0.8104	1.1352
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>				0.1877	0.2689	0.2203	0.3185	0.0875	0.1389	0.0851	0.4334	1.1592	1.3006
<b>MgO</b>					0.1548	0.1261	0.2039	0.3171	0.1591	0.1553	0.6705	0.8398	1.1871
<b>CaO</b>						0.2266	0.2781	0.352	0.2304	0.2119	0.7703	0.6242	0.9763
<b>Na<sub>2</sub>O</b>							0.0882	0.3614	0.19	0.2079	0.8084	0.8649	1.1787
<b>K<sub>2</sub>O</b>								0.4572	0.279	0.2519	0.8926	0.7981	1.163
<b>TiO<sub>2</sub></b>									0.1909	0.149	0.3164	1.3937	1.5165
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>										0.1548	0.528	0.9635	1.1967
<b>MnO</b>											0.5609	1.0349	1.2561
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>												1.8293	1.9727
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>													0.9037
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>													

## ANEXO F.2

<b>Xi\Xj</b>	<b>Sc</b>	<b>Ba</b>	<b>Co</b>	<b>Cs</b>	<b>Ga</b>	<b>Hf</b>	<b>Nb</b>	<b>Rb</b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>Ta</b>	<b>Th</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Zr</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.0702	0.1274	0.118	0.4221	0.0218	0.6525	0.5067	0.0889	0.4535	0.0562	0.5962	0.5307	0.4189	0.3841	0.6831	0.6948
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.0598	0.1187	0.1099	0.4001	0.0206	0.7509	0.5941	0.1155	0.5182	0.0484	0.6963	0.618	0.4969	0.4016	0.7532	0.7965
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1127	0.3525	0.074	0.8195	0.1371	0.4023	0.2905	0.348	0.3084	0.2018	0.3925	0.4332	0.312	0.0378	0.4409	0.4298
<b>MgO</b>	0.0442	0.231	0.0626	0.521	0.0751	0.7095	0.5482	0.2323	0.5355	0.1132	0.665	0.594	0.4836	0.31	0.7309	0.7484
<b>CaO</b>	0.1469	0.3056	0.1886	0.5747	0.1421	0.7023	0.5535	0.3031	0.5568	0.1058	0.6829	0.6536	0.5102	0.3841	0.8217	0.7382
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.1045	0.1328	0.1401	0.5536	0.0616	0.6824	0.5329	0.1269	0.4623	0.0935	0.6308	0.5272	0.4087	0.3764	0.6443	0.7251
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.172	0.0645	0.2181	0.4141	0.1026	0.7559	0.5813	0.0212	0.5171	0.1522	0.6667	0.5571	0.4399	0.508	0.7027	0.8049
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.2238	0.5674	0.1765	0.9498	0.249	0.2796	0.1374	0.4387	0.2615	0.3397	0.2213	0.3772	0.2903	0.0873	0.4277	0.2896
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.1397	0.3464	0.1154	0.711	0.1428	0.4326	0.3151	0.2841	0.3426	0.1901	0.4075	0.3737	0.268	0.1982	0.4871	0.4606
<b>MnO</b>	0.097	0.2654	0.0757	0.6473	0.1165	0.5521	0.3842	0.2748	0.3873	0.1722	0.5021	0.529	0.4073	0.1587	0.567	0.5852
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.6516	1.0283	0.5385	1.4767	0.7137	0.5017	0.3583	0.8557	0.6537	0.8114	0.4113	0.5831	0.5105	0.3683	0.6462	0.4947
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	0.9035	0.7675	0.972	0.9645	0.846	1.7362	1.5629	0.8371	1.4207	0.7834	1.715	1.536	1.2761	1.3703	1.7142	1.7957
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	1.1582	1.0651	1.1653	1.5136	1.134	1.8757	1.708	1.228	1.5411	1.0718	1.8855	1.7481	1.4867	1.4476	1.6922	1.9344
<b>Sc</b>		0.2043	0.0371	0.5315	0.0361	0.6142	0.4681	0.1981	0.4224	0.08	0.579	0.5374	0.4214	0.2271	0.6262	0.6531
<b>Ba</b>			0.2446	0.4284	0.1454	0.9785	0.7612	0.1249	0.6602	0.1543	0.8828	0.7826	0.6216	0.5367	0.8583	1.0358
<b>Co</b>				0.6203	0.0615	0.5564	0.4012	0.2397	0.3915	0.124	0.5092	0.4982	0.3872	0.1551	0.5378	0.5893
<b>Cs</b>					0.4523	1.4802	1.2134	0.3923	1.1277	0.4976	1.3312	1.2808	1.1386	1.0796	1.5889	1.5448
<b>Ga</b>						0.5898	0.4485	0.1264	0.4118	0.0446	0.5482	0.4998	0.3889	0.2752	0.6274	0.6284
<b>Hf</b>							0.1397	0.6977	0.3474	0.701	0.1377	0.1458	0.1525	0.3717	0.4143	0.007
<b>Nb</b>								0.5284	0.2804	0.5503	0.0397	0.2117	0.1678	0.2774	0.3726	0.1385
<b>Rb</b>									0.4814	0.1993	0.6009	0.4894	0.3956	0.5321	0.6739	0.7421
<b>Sn</b>										0.5114	0.3403	0.3647	0.2871	0.3362	0.4356	0.3629
<b>Sr</b>											0.6648	0.6181	0.476	0.3408	0.7576	0.7412
<b>Ta</b>												0.2063	0.1849	0.3815	0.3932	0.1352
<b>Th</b>													0.0632	0.4629	0.3814	0.1597
<b>U</b>														0.3517	0.3384	0.169
<b>V</b>															0.4423	0.391
<b>W</b>																0.426
<b>Zr</b>																

### ANEXO F.3

<b>Xi\Xj</b>	<b>Y</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.0835	0.1256	0.1277	0.1234	0.1147	0.0983	0.0423	0.0847	0.0775	0.0774	0.0777	0.0841	0.0877	0.0982	0.1013
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1119	0.1635	0.1645	0.1582	0.1456	0.124	0.0477	0.1073	0.1026	0.1023	0.1032	0.1124	0.1166	0.1295	0.134
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1189	0.1172	0.1137	0.1092	0.1039	0.0995	0.1137	0.1054	0.1133	0.1152	0.1166	0.1202	0.1201	0.1222	0.1196
<b>MgO</b>	0.1351	0.1868	0.1839	0.1747	0.1574	0.1365	0.0903	0.1217	0.1255	0.1233	0.128	0.1374	0.1425	0.1512	0.1569
<b>CaO</b>	0.1934	0.2458	0.2436	0.2351	0.2219	0.2055	0.1614	0.1911	0.1855	0.1899	0.1865	0.1938	0.196	0.2001	0.2061
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.1247	0.1325	0.1384	0.1338	0.1277	0.1189	0.0717	0.115	0.111	0.1183	0.1189	0.126	0.1297	0.1441	0.1455
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.1753	0.1772	0.1867	0.1893	0.1876	0.1801	0.128	0.1762	0.1671	0.1708	0.1725	0.1782	0.183	0.1943	0.1958
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.1557	0.1558	0.149	0.1481	0.1486	0.1479	0.2072	0.1515	0.1603	0.1538	0.1586	0.1571	0.1602	0.1533	0.1532
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.1051	0.0971	0.0934	0.0871	0.0829	0.0796	0.1199	0.0838	0.0923	0.1026	0.1057	0.1106	0.1113	0.1159	0.1209
<b>MnO</b>	0.1327	0.1605	0.155	0.1504	0.1413	0.1284	0.1111	0.1229	0.1293	0.1282	0.1298	0.1346	0.1402	0.1401	0.1426
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.5657	0.5025	0.4995	0.5063	0.5119	0.533	0.6382	0.5489	0.5713	0.5609	0.5778	0.5783	0.5858	0.5696	0.5701
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	1.0054	1.0395	1.049	1.0477	1.0334	1.0178	0.9217	1.0075	0.9847	1.0071	0.994	1.0039	1.0034	1.0208	1.0208
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	1.2389	1.2675	1.2776	1.2702	1.2541	1.245	1.1672	1.2416	1.2248	1.2365	1.221	1.2408	1.2436	1.2594	1.2674
<b>Sc</b>	0.0729	0.126	0.12	0.1116	0.0964	0.0769	0.0356	0.0654	0.0652	0.0648	0.0664	0.0739	0.078	0.0877	0.0928
<b>Ba</b>	0.2809	0.2773	0.2899	0.2885	0.2796	0.2697	0.1748	0.268	0.2637	0.2705	0.2728	0.2844	0.2899	0.3033	0.306
<b>Co</b>	0.0892	0.127	0.1204	0.1132	0.0998	0.0838	0.0618	0.076	0.0827	0.0811	0.0843	0.092	0.0952	0.1016	0.1058
<b>Cs</b>	0.6173	0.733	0.736	0.7409	0.721	0.6796	0.5465	0.6376	0.6233	0.6064	0.6076	0.6181	0.6253	0.632	0.647
<b>Ga</b>	0.0621	0.1021	0.1016	0.0958	0.0858	0.0691	0.0243	0.0584	0.056	0.056	0.0563	0.0629	0.0656	0.0738	0.0763
<b>Hf</b>	0.345	0.3119	0.2994	0.3014	0.3197	0.343	0.5492	0.3701	0.3629	0.3714	0.3647	0.3442	0.3341	0.3133	0.2984
<b>Nb</b>	0.26	0.2015	0.1994	0.2057	0.2228	0.2436	0.3918	0.265	0.268	0.27	0.2729	0.2628	0.2629	0.2453	0.2405
<b>Rb</b>	0.1666	0.1757	0.1809	0.1862	0.1869	0.1795	0.1543	0.1746	0.1629	0.1654	0.1665	0.1693	0.1742	0.1841	0.1859
<b>Sn</b>	0.269	0.2475	0.2401	0.2408	0.2497	0.2571	0.364	0.2745	0.2704	0.2778	0.2762	0.2719	0.268	0.2648	0.2601
<b>Sr</b>	0.1325	0.1593	0.1611	0.1549	0.1433	0.129	0.0601	0.1193	0.1177	0.1233	0.1232	0.1319	0.1353	0.1459	0.1487
<b>Ta</b>	0.3286	0.2702	0.2657	0.2733	0.2942	0.3183	0.4894	0.3414	0.3404	0.3428	0.3451	0.3307	0.3288	0.3097	0.3042
<b>Th</b>	0.2976	0.2416	0.2353	0.2406	0.2613	0.2868	0.4792	0.3119	0.3077	0.3167	0.3156	0.2988	0.2944	0.2801	0.2704
<b>U</b>	0.2126	0.1536	0.1492	0.1558	0.1738	0.1966	0.3546	0.2212	0.2152	0.2294	0.2262	0.2134	0.2093	0.2007	0.1925
<b>V</b>	0.2238	0.2047	0.1986	0.1931	0.1884	0.1908	0.2399	0.2064	0.2183	0.2229	0.2244	0.2264	0.2249	0.2218	0.2181
<b>W</b>	0.4588	0.382	0.3808	0.3787	0.3925	0.4174	0.5629	0.4484	0.4579	0.4666	0.4691	0.4621	0.463	0.4583	0.4472
<b>Zr</b>	0.3733	0.3369	0.3242	0.3269	0.346	0.3703	0.5832	0.3976	0.3919	0.3998	0.3934	0.3727	0.3636	0.3411	0.3262

### ANEXO F.4

<b>Xi\Xj</b>	<b>Y</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
<b>Y</b>		0.0408	0.0325	0.0274	0.0233	0.0139	0.0452	0.0085	0.0051	0.0042	0.0037	0.0037	0.0044	0.0072	0.0086
<b>La</b>			0.003	0.0051	0.0109	0.0177	0.0654	0.0288	0.0332	0.0403	0.0438	0.0455	0.0474	0.0504	0.048
<b>Ce</b>				0.0024	0.0073	0.0121	0.0641	0.0221	0.026	0.0328	0.0362	0.0371	0.0388	0.0423	0.0402
<b>Pr</b>					0.0034	0.0071	0.0581	0.0169	0.0203	0.0276	0.0308	0.0321	0.0334	0.0367	0.0353
<b>Nd</b>						0.0051	0.0497	0.0127	0.0172	0.0231	0.0255	0.0282	0.0296	0.0328	0.0327
<b>Sm</b>							0.0371	0.0046	0.0083	0.0128	0.0151	0.018	0.0198	0.0237	0.0245
<b>Eu</b>								0.0303	0.0346	0.036	0.0398	0.0482	0.0529	0.0633	0.0664
<b>Gd</b>									0.0054	0.006	0.0086	0.0114	0.0144	0.0188	0.0205
<b>Tb</b>										0.006	0.0047	0.0062	0.0071	0.0118	0.0135
<b>Dy</b>											0.0052	0.0072	0.0092	0.0131	0.0146
<b>Ho</b>												0.0041	0.0053	0.0089	0.0103
<b>Er</b>													0.0037	0.0062	0.0071
<b>Tm</b>														0.0044	0.0057
<b>Yb</b>															0.0049
<b>Lu</b>															

## ANEXO F.5

<b>Xi\Xj</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Sb</b>	<b>Bi</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Se</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.5941	0.5234	0.5842	0.4314	0.2077	0.5024	0.7779	0.6838	0.4834	0.4027	1.8908	1.4809	0.0123	0.2596
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.6264	0.4719	0.5452	0.3801	0.2121	0.458	0.7564	0.6584	0.4873	0.384	1.8523	1.4272	0.0169	0.269
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.3607	0.5544	0.8772	0.7419	0.1881	0.8213	1.1707	0.7667	0.6311	0.5411	1.8554	1.4938	0.1457	0.4256
<b>MgO</b>	0.568	0.4642	0.7081	0.5127	0.1406	0.6519	0.9427	0.8319	0.6161	0.4218	1.7574	1.4675	0.0768	0.3744
<b>CaO</b>	0.6159	0.6542	0.7323	0.589	0.2666	0.6544	0.9028	0.8334	0.698	0.4925	1.9562	1.6232	0.1151	0.3308
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.5855	0.4923	0.7251	0.5061	0.2294	0.6122	0.9499	0.6888	0.5314	0.4808	1.8337	1.4446	0.0508	0.3261
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.6476	0.5529	0.5805	0.4036	0.2791	0.5091	0.8183	0.6583	0.515	0.4516	1.8754	1.4746	0.0843	0.351
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.424	0.8727	1.1249	1.0233	0.2361	1.1107	1.3698	1.077	0.8513	0.7171	2.1901	1.9433	0.2529	0.5648
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.3663	0.5895	0.9337	0.7246	0.1857	0.8488	1.1283	0.8764	0.6496	0.5597	1.8213	1.5594	0.144	0.3863
<b>MnO</b>	0.4255	0.5557	0.7124	0.5496	0.1969	0.6694	0.981	0.7408	0.6362	0.4851	1.8583	1.5802	0.1183	0.3965
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.7222	1.351	1.7886	1.6457	0.3878	1.813	2.0887	1.6594	1.3296	1.2127	2.5171	2.3863	0.7048	1.0722
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	1.3548	1.169	1.1526	0.8744	0.9823	1.0264	1.2153	1.3693	1.2098	1.1042	2.3388	1.8655	0.7789	0.8158
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	1.1246	1.165	1.4671	1.262	1.2748	1.2458	1.4328	1.3139	1.1934	1.2098	2.2001	1.9633	1.0807	0.8603
<b>Sc</b>	0.5232	0.4439	0.6436	0.4881	0.1506	0.5807	0.8872	0.7164	0.5526	0.3829	1.8048	1.4274	0.0408	0.2955
<b>Ba</b>	0.6691	0.4612	0.503	0.3121	0.337	0.4184	0.7936	0.5484	0.5052	0.4181	1.765	1.3251	0.1331	0.3689
<b>Co</b>	0.3997	0.4118	0.7452	0.5727	0.112	0.6669	0.99	0.7469	0.5419	0.4348	1.712	1.3978	0.0708	0.3293
<b>Cs</b>	1.1619	1.0025	0.4089	0.3732	0.5897	0.379	0.6343	0.9316	0.841	0.6365	2.5655	1.9792	0.4445	0.6833
<b>Ga</b>	0.5132	0.4844	0.591	0.4399	0.1666	0.5249	0.8144	0.6702	0.4886	0.3912	1.8169	1.4303	0.0095	0.2635
<b>Hf</b>	0.5903	1.3501	1.7429	1.6473	0.6262	1.722	1.8931	1.5427	1.1905	1.1891	2.4981	2.2305	0.5962	0.8822
<b>Nb</b>	0.4754	1.1715	1.4969	1.3949	0.4112	1.5048	1.696	1.4018	1.0479	0.9906	2.3647	2.2399	0.4468	0.7692
<b>Rb</b>	0.6711	0.6271	0.6305	0.467	0.2775	0.5704	0.8487	0.7453	0.5673	0.494	1.9939	1.5963	0.1094	0.3781
<b>Sn</b>	0.5421	0.9153	1.2744	1.1537	0.4841	1.224	1.4896	1.1705	0.8659	0.8811	2.2017	1.9262	0.4108	0.6246
<b>Sr</b>	0.5898	0.5195	0.6171	0.4467	0.2371	0.5405	0.8182	0.6769	0.5455	0.4137	1.8796	1.4468	0.0426	0.2733
<b>Ta</b>	0.5664	1.3204	1.6505	1.5555	0.5112	1.6586	1.8144	1.554	1.1532	1.1212	2.5098	2.3807	0.5466	0.873
<b>Th</b>	0.574	1.149	1.597	1.4098	0.5391	1.5226	1.7514	1.3849	1.0737	1.085	2.3686	2.1184	0.5004	0.8106
<b>U</b>	0.4653	0.9811	1.3782	1.1888	0.419	1.3172	1.5196	1.1936	0.874	0.9369	2.2016	1.9181	0.3784	0.6383
<b>V</b>	0.3575	0.6883	1.132	0.9945	0.275	1.0877	1.4528	0.9387	0.801	0.6915	1.919	1.6156	0.2901	0.5608
<b>W</b>	0.4951	0.9921	1.7293	1.5526	0.6497	1.6019	1.9441	1.2565	0.9678	1.1472	2.0035	1.889	0.626	0.8636
<b>Zr</b>	0.6203	1.4126	1.8222	1.7259	0.6523	1.8031	1.9716	1.6176	1.2453	1.244	2.5473	2.2961	0.6362	0.9358

## ANEXO F.6

<b>Xi\Xj</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Sb</b>	<b>Bi</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Se</b>
<b>Y</b>	0.4484	0.5983	0.7975	0.6638	0.1867	0.7388	0.9765	0.8302	0.569	0.4977	1.9286	1.5701	0.064	0.3229
<b>La</b>	0.4262	0.636	0.9094	0.7546	0.1982	0.8552	1.1379	0.8463	0.6131	0.5611	1.9203	1.5959	0.1005	0.3784
<b>Ce</b>	0.426	0.6332	0.9147	0.7631	0.1978	0.8607	1.1353	0.8574	0.6202	0.5657	1.9303	1.593	0.1013	0.3762
<b>Pr</b>	0.4192	0.6148	0.9166	0.7588	0.199	0.8535	1.1325	0.8483	0.6131	0.5565	1.8956	1.5667	0.0967	0.3659
<b>Nd</b>	0.4158	0.5858	0.8906	0.734	0.1902	0.8253	1.108	0.8275	0.6016	0.5306	1.8697	1.5288	0.0877	0.3535
<b>Sm</b>	0.4249	0.5663	0.8497	0.6991	0.1812	0.7809	1.0659	0.8134	0.5838	0.5097	1.8629	1.5143	0.0723	0.3388
<b>Eu</b>	0.5096	0.4988	0.6767	0.5239	0.1627	0.6109	0.8968	0.7157	0.5211	0.4176	1.8351	1.4455	0.0256	0.2815
<b>Gd</b>	0.4397	0.563	0.8114	0.6676	0.1706	0.7468	1.0132	0.8151	0.5725	0.4965	1.8863	1.5361	0.0613	0.3317
<b>Tb</b>	0.4542	0.5744	0.799	0.6476	0.18	0.7299	0.9784	0.814	0.5672	0.4919	1.9155	1.5524	0.0576	0.3104
<b>Dy</b>	0.4536	0.5857	0.7846	0.6506	0.173	0.7246	0.9749	0.8176	0.5646	0.488	1.9218	1.5678	0.0579	0.3275
<b>Ho</b>	0.4508	0.5814	0.7778	0.6483	0.1835	0.7177	0.9601	0.8082	0.5556	0.4854	1.9254	1.5574	0.0584	0.3158
<b>Er</b>	0.4531	0.5999	0.7931	0.664	0.193	0.7339	0.9731	0.828	0.5678	0.5016	1.9425	1.5743	0.0648	0.322
<b>Tm</b>	0.4513	0.6027	0.7937	0.6681	0.2001	0.7359	0.9729	0.8246	0.5679	0.5003	1.9413	1.5663	0.0682	0.3203
<b>Yb</b>	0.4375	0.6224	0.8108	0.691	0.2048	0.7542	0.9971	0.8382	0.5826	0.5113	1.9395	1.5741	0.0768	0.3321
<b>Lu</b>	0.4427	0.6278	0.8135	0.7004	0.213	0.7655	1.0005	0.8426	0.5828	0.5218	1.949	1.5748	0.0794	0.3392
<b>Mo</b>		0.6632	1.2177	1.0906	0.4986	1.088	1.4364	0.8733	0.6988	0.8274	1.6802	1.5637	0.5139	0.6545
<b>Cu</b>			0.8886	0.6893	0.6158	0.7275	1.1805	0.6897	0.6517	0.5273	1.4139	1.012	0.4883	0.6429
<b>Pb</b>				0.2465	0.8229	0.2713	0.4268	0.6579	0.7267	0.5737	2.3814	1.7609	0.5905	0.7088
<b>Zn</b>					0.6516	0.2596	0.3936	0.654	0.6758	0.5696	2.2665	1.6984	0.4371	0.5991
<b>Ni</b>						0.7816	1.0787	0.9475	0.6593	0.5863	1.9814	1.7171	0.1598	0.4645
<b>As</b>							0.5815	0.428	0.6694	0.6221	2.1777	1.5258	0.5152	0.6109
<b>Cd</b>								1.0342	0.9447	0.8253	2.8059	2.2415	0.8022	0.8569
<b>Sb</b>									0.7109	0.7546	1.9118	1.117	0.6667	0.7667
<b>Bi</b>										0.6666	1.7373	1.4208	0.4842	0.5411
<b>Ag</b>											1.7523	1.3539	0.387	0.5097
<b>Au</b>												1.669	1.8303	1.8746
<b>Hg</b>													1.4424	1.423
<b>Tl</b>														0.2488
<b>Se</b>														

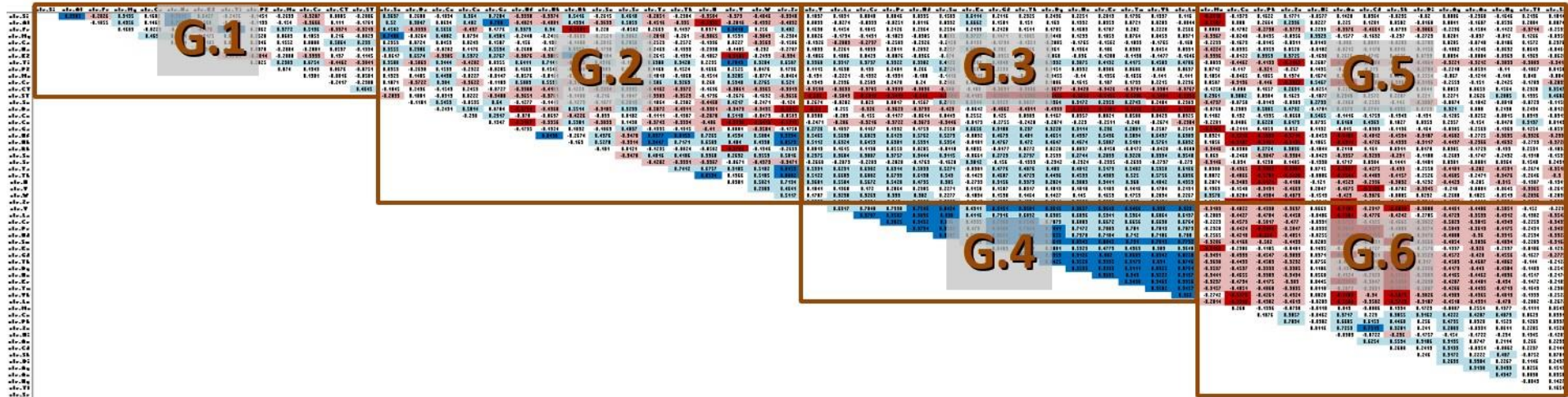


## **ANEXO G**

### **Matriz de Correlación de datos clr-transformados, Base de Datos Modificada**

# ANEXO G.0

## Total Matriz



Código de color:

Signo de correlación

+	Bajo percentil 5%
+	Entre percentiles 5%-25%
-	Entre percentiles 75%-95%
-	Sobre percentil 95%

Nota 1: Se omite triángulo inferior al ser matriz simétrica, Se omite diagonal correspondiente a identidad.

Nota 2: Matriz de gran extensión por lo cual es seccionada de modo de hacer posible su inspección. Se presenta la perspectiva general de la matriz (Total Matriz) de modo de facilitar la navegación entre las distintas secciones y visualizar patrones en una escala general. Números del 1 al 6 corresponden a de cada sección del presente anexo: Números del 1 al 6 corresponden a de cada sección del presente anexo.

### ANEXO G.1

	clr. SiO <sub>2</sub>	clr. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	clr. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	clr. MgO	clr. CaO	clr. Na <sub>2</sub> O	clr. K <sub>2</sub> O	clr. TiO <sub>2</sub>	clr. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	clr. MnO	clr. Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	clr. C <sub>TOTAL</sub>	clr. S <sub>TOTAL</sub>
clr. SiO <sub>2</sub>		0.9309	-0.2826	0.3195	0.1602	0.7617	0.6427	-0.2476	-0.1451	-0.2639	-0.3287	0.0885	-0.2006
clr. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			-0.1855	0.4356	0.1463	0.7527	0.568	-0.2638	-0.1193	-0.154	-0.3666	0.111	-0.1761
clr. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				0.1609	-0.0223	-0.0863	-0.478	0.7482	0.2062	0.3772	0.5136	-0.3971	-0.3219
clr. MgO					0.463	0.3354	-0.0175	0.0841	0.2528	0.0689	0.1859	0.216	-0.0829
clr. CaO						0.0674	-0.1185	0.0028	0.2346	0.1552	0.0808	0.5864	0.293
clr. Na <sub>2</sub> O							0.5344	-0.1747	0.0378	-0.2004	-0.2001	0.0537	-0.1934
clr. K <sub>2</sub> O								-0.4791	-0.2814	-0.2088	-0.3939	0.137	-0.1145
clr. TiO <sub>2</sub>									0.2025	0.2909	0.6754	-0.4462	-0.3841
clr. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>										0.074	0.1943	0.0676	-0.0751
clr. MnO											0.1381	-0.0016	-0.0581
clr. Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>												-0.2417	-0.2308
clr. C <sub>TOTAL</sub>													0.4645
clr. S <sub>TOTAL</sub>													

## ANEXO G.2

	clr.Sc	clr.Ba	clr.Co	clr.Cs	clr.Ga	clr.Hf	clr.Nb	clr.Rb	clr.Sn	clr.Sr	clr.Ta	clr.Th	clr.U	clr.V	clr.W	clr.Zr
clr.SiO <sub>2</sub>	0.3637	0.2688	-0.1034	0.364	0.7284	-0.3338	-0.3374	0.5416	-0.2615	0.4618	-0.2851	-0.2304	-0.3584	-0.373	-0.4046	-0.3348
clr.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.52	0.3047	0.0694	0.402	0.788	-0.4821	-0.4881	0.4394	-0.3633	0.5053	-0.4516	-0.395	-0.5399	-0.2816	-0.4932	-0.4832
clr.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4582	-0.3333	0.5656	-0.497	0.1776	0.3973	0.34	-0.5384	0.228	-0.0582	0.2663	0.1437	0.0371	0.9418	0.256	0.402
clr.MgO	0.7488	-0.0264	0.4802	0.0734	0.4901	-0.2448	-0.2406	-0.0609	-0.2521	0.3862	-0.2818	-0.261	-0.3865	0.1531	-0.3843	-0.2384
clr.CaO	0.2353	0.0724	0.0453	0.0249	0.1587	-0.156	-0.194	-0.1408	-0.2012	0.7056	-0.2529	-0.2572	-0.1936	0.0227	-0.3563	-0.1506
clr.Na <sub>2</sub> O	0.3555	0.2906	-0.0282	0.1176	0.5594	-0.2688	-0.267	0.3952	-0.1738	0.3957	-0.2469	-0.1333	-0.2338	-0.1405	-0.232	-0.2707
clr.K <sub>2</sub> O	-0.0617	0.6574	-0.3985	0.5372	0.2767	-0.3876	-0.3085	0.928	-0.2184	0.137	-0.2615	-0.1394	-0.1867	-0.5403	-0.2499	-0.394
clr.TiO <sub>2</sub>	0.3588	-0.5069	0.3444	-0.4282	0.0955	0.6411	0.7141	-0.4043	0.4316	-0.1693	0.6308	0.3428	0.2235	0.7849	0.3284	0.6587
clr.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0959	-0.2698	0.1593	-0.2322	-0.0205	0.1669	0.1546	-0.2738	0.0803	0.1238	0.1168	0.1524	0.1666	0.2525	0.0476	0.1736
clr.MnO	0.1323	0.1405	0.4498	-0.0227	-0.0147	-0.0576	-0.0161	-0.2019	0.0303	0.0765	-0.1018	-0.1868	-0.1514	0.3285	-0.0774	-0.0464
clr.Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1871	-0.3722	0.304	-0.3622	-0.1189	0.5009	0.5535	-0.3105	0.2709	-0.1955	0.506	0.3263	0.268	0.5948	0.2765	0.521
clr.C <sub>TOTAL</sub>	-0.1045	0.2436	-0.1543	0.2459	-0.0727	-0.3908	-0.4109	0.1229	-0.2994	0.3935	-0.4162	-0.3372	-0.1636	-0.3861	-0.3965	-0.3919
clr.S <sub>TOTAL</sub>	-0.2839	0.1881	-0.0913	0.0222	-0.3408	-0.3651	-0.3761	-0.1488	-0.216	0.1847	-0.3903	-0.3523	-0.1796	-0.2676	-0.1632	-0.3656
clr.Sc		-0.1101	0.5453	-0.0535	0.64	-0.1277	-0.1443	-0.1273	-0.1077	0.2819	-0.1864	-0.2382	-0.4468	0.4217	-0.2471	-0.124
clr.Ba			-0.2431	0.5014	0.0784	-0.5724	-0.4968	0.5514	-0.3185	0.3233	-0.5072	-0.4311	-0.3961	-0.3479	-0.3495	-0.5815
clr.Co				-0.238	0.2917	-0.078	-0.0697	-0.4226	-0.099	0.0102	-0.1111	-0.1987	-0.2878	0.5118	-0.0473	-0.0589
clr.Cs					0.1947	-0.5167	-0.3956	0.5981	-0.3039	0.1498	-0.3749	-0.3934	-0.406	-0.5398	-0.5416	-0.5215
clr.Ga						-0.1795	-0.1924	0.1832	-0.1869	0.4037	-0.1995	-0.1915	-0.41	0.0801	-0.3584	-0.1758
clr.Hf							0.8438	-0.2674	0.4976	-0.3478	0.8377	0.8153	0.7265	0.4594	0.5084	0.9934
clr.Nb								-0.169	0.5278	-0.3914	0.9447	0.7171	0.6503	0.404	0.4938	0.8573
clr.Rb									-0.101	0.0121	-0.1235	-0.0024	-0.0582	-0.5763	-0.1946	-0.2693
clr.Sn										-0.3478	0.4816	0.4106	0.3968	0.2692	0.3559	0.5016
clr.Sr											-0.4202	-0.3931	-0.3367	-0.0671	-0.4373	-0.3471
clr.Ta												0.7412	0.6757	0.3185	0.5182	0.8459
clr.Th													0.8534	0.1966	0.5105	0.8082
clr.U														0.0901	0.5021	0.7194
clr.V															0.2983	0.4641
clr.W																0.5117
clr.Zr																

### ANEXO G.3

	clr.Y	clr.La	clr.Ce	clr.Pr	clr.Nd	clr.Sm	clr.Eu	clr.Gd	clr.Tb	clr.Dy	clr.Ho	clr.Er	clr.Tm	clr.Yb	clr.Lu
<b>clr.SiO<sub>2</sub></b>	0.1897	0.1091	0.0848	0.0846	0.0995	0.1503	0.6114	0.2116	0.2325	0.2436	0.2251	0.2019	0.1796	0.1397	0.116
<b>clr.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.0839	-0.0274	-0.0399	-0.0251	0.0116	0.0932	0.6662	0.1501	0.151	0.163	0.1332	0.0959	0.0721	0.0209	-0.0044
<b>clr.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1638	0.1454	0.1815	0.2126	0.2364	0.2534	0.2139	0.2128	0.1511	0.1705	0.1689	0.1787	0.202	0.2228	0.2566
<b>clr.MgO</b>	0.0826	-0.1794	-0.1431	-0.1023	-0.0385	0.0695	0.3727	0.1471	0.1085	0.1448	0.1233	0.1059	0.0764	0.0459	0.0371
<b>clr.CaO</b>	-0.1926	-0.2889	-0.2797	-0.2589	-0.2326	-0.2128	0.0139	-0.1734	-0.1951	-0.2005	-0.1765	-0.1562	-0.1893	-0.1765	-0.168
<b>clr.Na<sub>2</sub>O</b>	0.1033	0.2261	0.1899	0.2011	0.2092	0.2257	0.5834	0.202	0.1876	0.161	0.1364	0.106	0.0909	0.0454	0.0331
<b>clr.K<sub>2</sub>O</b>	-0.1066	0.1086	0.0423	-0.0076	-0.0366	-0.074	0.1948	-0.0955	-0.0678	-0.068	-0.096	-0.1208	-0.1198	-0.1477	-0.1646
<b>clr.TiO<sub>2</sub></b>	0.3968	0.3317	0.3737	0.3922	0.3982	0.4125	0.2204	0.4048	0.3603	0.3932	0.3875	0.4132	0.4175	0.4589	0.4786
<b>clr.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.1115	0.1698	0.199	0.2481	0.266	0.2724	0.0581	0.2299	0.1556	0.1151	0.0992	0.0906	0.0686	0.068	0.0637
<b>clr.MnO</b>	-0.131	-0.2221	-0.1992	-0.1991	-0.188	-0.1416	-0.0213	-0.1083	-0.141	-0.1455	-0.14	-0.1356	-0.1656	-0.141	-0.141
<b>clr.Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1949	0.2336	0.2509	0.2478	0.24	0.2186	0.0149	0.2078	0.1533	0.1886	0.1615	0.187	0.1739	0.2215	0.2296
<b>clr.C<sub>TOTAL</sub></b>	-0.3538	-0.3633	-0.3785	-0.3933	-0.3836	-0.388	-0.189	-0.3631	-0.3336	-0.3677	-0.3428	-0.3426	-0.3701	-0.3901	-0.3767
<b>clr.S<sub>TOTAL</sub></b>	-0.536	-0.5049	-0.5312	-0.5413	-0.545	-0.5701	-0.4185	-0.5647	-0.5386	-0.5455	-0.5252	-0.5152	-0.5396	-0.5404	-0.5393
<b>clr.Sc</b>	0.2674	-0.0282	0.029	0.0817	0.1567	0.2789	0.6344	0.3323	0.3027	0.3364	0.3172	0.2953	0.2749	0.2404	0.2303
<b>clr.Ba</b>	-0.54	-0.255	-0.326	-0.3623	-0.3799	-0.423	-0.0642	-0.4662	-0.4911	-0.4993	-0.5243	-0.5401	-0.5356	-0.5507	-0.5574
<b>clr.Co</b>	0.0908	-0.209	-0.155	-0.1177	-0.0614	0.0443	0.2552	0.125	0.0903	0.1167	0.0957	0.0821	0.0588	0.0423	0.0325
<b>clr.Cs</b>	-0.2471	-0.286	-0.3216	-0.3722	-0.3679	-0.3446	-0.0179	-0.2755	-0.2428	-0.2074	-0.229	-0.2511	-0.248	-0.2674	-0.2984
<b>clr.Ga</b>	0.2726	0.1097	0.1167	0.1392	0.1759	0.2558	0.6656	0.3188	0.297	0.3228	0.3114	0.296	0.2881	0.2587	0.2543
<b>clr.Hf</b>	0.5465	0.5638	0.6029	0.6129	0.5762	0.5273	-0.0892	0.4679	0.481	0.4651	0.4937	0.5496	0.5834	0.6437	0.6909
<b>clr.Nb</b>	0.5112	0.6324	0.6459	0.6381	0.5931	0.5354	-0.0181	0.4767	0.472	0.4647	0.4674	0.5007	0.5181	0.5761	0.6032
<b>clr.Rb</b>	0.0013	0.1615	0.1138	0.0553	0.0205	-0.0118	0.1095	-0.0177	0.0272	0.0228	0.0037	-0.0158	-0.0172	-0.0428	-0.0608
<b>clr.Sn</b>	0.2975	0.3604	0.3807	0.3757	0.3444	0.3115	-0.0661	0.2729	0.2797	0.2539	0.2744	0.2833	0.3228	0.3334	0.3548
<b>clr.Sr</b>	-0.2668	-0.2079	-0.2203	-0.2028	-0.1769	-0.1628	0.3012	-0.156	-0.1993	-0.2342	-0.2324	-0.2335	-0.2633	-0.2737	-0.273
<b>clr.Ta</b>	0.5331	0.6231	0.6382	0.6314	0.5839	0.5271	-0.0301	0.4776	0.4876	0.483	0.4812	0.5173	0.5402	0.5958	0.6166
<b>clr.Th</b>	0.5122	0.6609	0.6802	0.6733	0.6198	0.543	-0.1429	0.4607	0.4723	0.4496	0.4593	0.4989	0.525	0.5756	0.6036
<b>clr.U</b>	0.3681	0.5584	0.5672	0.5428	0.4795	0.385	-0.2739	0.3156	0.3379	0.2824	0.3083	0.3441	0.368	0.4042	0.4353
<b>clr.V</b>	0.1041	0.1368	0.172	0.2064	0.2305	0.2271	0.1158	0.1587	0.0917	0.1019	0.1018	0.1189	0.1416	0.1784	0.2131
<b>clr.W</b>	0.1707	0.3238	0.3269	0.333	0.302	0.2277	-0.1894	0.1598	0.1464	0.1427	0.145	0.1659	0.1753	0.2094	0.2267
<b>clr.Zr</b>	0.5528	0.5676	0.6071	0.616	0.5802	0.5335	-0.0745	0.4782	0.4874	0.4741	0.5009	0.5538	0.582	0.6451	0.691

### ANEXO G.4

	clr.Y	clr.La	clr.Ce	clr.Pr	clr.Nd	clr.Sm	clr.Eu	clr.Gd	clr.Tb	clr.Dy	clr.Ho	clr.Er	clr.Tm	clr.Yb	clr.Lu
clr.Y		0.6317	0.7048	0.7398	0.7546	0.8424	0.4911	0.9151	0.9501	0.9615	0.9657	0.9649	0.9466	0.938	0.923
clr.La			0.9787	0.9582	0.9096	0.838	0.4116	0.7316	0.6832	0.6385	0.6096	0.5941	0.5964	0.6064	0.6137
clr.Ce				0.9825	0.9452	0.896	0.4335	0.7988	0.7546	0.7079	0.6803	0.6672	0.6656	0.6698	0.6764
clr.Pr					0.9734	0.9382	0.473	0.8408	0.7964	0.7441	0.7172	0.7003	0.701	0.7019	0.7073
clr.Nd						0.9507	0.5185	0.8621	0.8088	0.7655	0.7378	0.7104	0.712	0.7106	0.708
clr.Sm							0.6125	0.9439	0.8994	0.8613	0.8343	0.8045	0.791	0.7813	0.7732
clr.Eu								0.6483	0.5901	0.5801	0.5329	0.4773	0.4369	0.389	0.3648
clr.Gd									0.945	0.9353	0.9126	0.882	0.8603	0.8342	0.8228
clr.Tb										0.9425	0.9528	0.9335	0.9173	0.891	0.8746
clr.Dy											0.9539	0.9339	0.9111	0.8925	0.8761
clr.Ho												0.9605	0.943	0.9222	0.9137
clr.Er													0.9438	0.9463	0.9356
clr.Tm														0.9502	0.9457
clr.Yb															0.962
clr.Lu															

## ANEXO G.5

	clr.Mo	clr.Cu	clr.Pb	clr.Zn	clr.Ni	clr.As	clr.Cd	clr.Sb	clr.Bi	clr.Ag	clr.Au	clr.Hg	clr.Tl	clr.Se
clr.SiO <sub>2</sub>	-0.5616	-0.1373	0.1622	0.1771	-0.0577	0.1428	0.0964	-0.0235	-0.02	0.0086	-0.2368	-0.1646	0.2196	0.1014
clr.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.5587	0.008	0.2664	0.2996	0.0227	0.225	0.1281	0.0502	-0.0168	0.0841	-0.1687	-0.0536	0.2084	0.0874
clr.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0888	-0.1702	-0.2798	-0.3779	0.2233	-0.3976	-0.4661	-0.0733	-0.3066	-0.2236	-0.1504	-0.1122	-0.3714	-0.2599
clr.MgO	-0.3967	-0.0248	-0.0435	-0.0356	0.3929	-0.1577	-0.1692	-0.237	-0.2723	0.0201	-0.037	-0.012	0.1266	-0.0356
clr.CaO	-0.2233	-0.1679	-0.0145	-0.0911	0.0149	-0.006	0.0031	-0.0203	-0.2709	0.0285	-0.0748	-0.0186	0.1572	0.2376
clr.Na <sub>2</sub> O	-0.4224	-0.0395	-0.0353	0.0528	-0.0182	-0.0212	-0.1178	0.0316	-0.1156	-0.1002	-0.1246	-0.0692	0.0643	-0.0464
clr.K <sub>2</sub> O	-0.3336	-0.0122	0.3359	0.3725	-0.1698	0.2626	0.1716	0.1626	0.0799	0.0894	-0.0884	-0.0363	0.1969	-0.0628
clr.TiO <sub>2</sub>	-0.0033	-0.4462	-0.4133	-0.5463	0.2607	-0.5616	-0.4808	-0.3354	-0.4064	-0.3221	-0.3212	-0.3899	-0.3089	-0.341
clr.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0712	-0.117	-0.321	-0.267	0.1495	-0.258	-0.273	-0.2109	-0.2784	-0.2218	-0.0591	-0.11	-0.1867	0.0158
clr.MnO	0.1854	-0.0465	0.1065	0.1974	0.1674	0.0999	0.0966	0.0206	-0.2554	-0.067	-0.1214	-0.148	0.048	-0.084
clr.Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0587	-0.3196	-0.446	-0.5322	0.5467	-0.5587	-0.4782	-0.3301	-0.3136	-0.2553	-0.151	-0.2425	-0.1783	-0.2835
clr.CTOTAL	-0.1258	-0.008	0.1657	0.2691	-0.0251	0.225	0.2505	0.0275	0.0044	0.0859	0.0653	0.1564	0.2328	0.3547
clr.STOTAL	0.2961	0.3082	0.0984	0.1623	-0.1077	0.2948	0.2572	0.2287	0.221	0.2271	0.2626	0.2805	0.1995	0.4602
clr.Sc	-0.4797	-0.0758	-0.0143	-0.0903	0.2799	-0.2068	-0.2535	-0.145	-0.3087	-0.0074	-0.1842	-0.0818	-0.0723	-0.1156
clr.Ba	-0.0768	0.2303	0.5085	0.4732	-0.1701	0.4579	0.2741	0.4335	0.0729	0.321	0.088	0.2138	0.2434	-0.0128
clr.Co	0.1102	0.132	-0.1995	-0.0668	0.5465	-0.1416	-0.1753	-0.1343	-0.191	-0.1205	-0.0252	-0.0015	0.0313	-0.0315
clr.Cs	-0.2281	0.0406	0.6228	0.6173	0.0795	0.6168	0.4963	0.1827	0.0959	0.2357	-0.154	-0.0478	0.3137	0.0149
clr.Ga	-0.5165	-0.2111	0.1053	0.052	0.1132	-0.015	-0.0909	-0.1196	-0.164	-0.0905	-0.2569	-0.1969	0.1254	-0.0593
clr.Hf	0.0921	-0.5256	-0.5838	-0.6714	-0.0459	-0.6489	-0.4812	-0.4534	-0.3187	-0.4682	-0.2725	-0.3635	-0.3326	-0.299
clr.Nb	0.1056	-0.5187	-0.5421	-0.6135	0.1065	-0.6311	-0.4726	-0.4933	-0.3117	-0.4437	-0.2966	-0.4692	-0.2739	-0.3728
clr.Rb	-0.3446	-0.0988	0.2724	0.3096	-0.1044	0.2118	0.161	0.0311	0.0178	0.0305	-0.1729	-0.139	0.2591	-0.1092
clr.Sn	0.063	-0.2468	-0.3047	-0.3904	-0.0429	-0.3957	-0.3299	-0.291	-0.1108	-0.2609	-0.1747	-0.2492	-0.1918	-0.1599
clr.Sr	-0.3146	-0.034	0.1298	0.1405	-0.1338	0.1717	0.0984	0.1441	-0.1401	0.0901	-0.0881	0.0364	0.1548	0.2491
clr.Ta	0.0908	-0.4965	-0.5399	-0.5884	0.0715	-0.6027	-0.4275	-0.499	-0.2558	-0.4181	-0.282	-0.4531	-0.2674	-0.3516
clr.Th	0.0872	-0.4066	-0.5703	-0.5428	-0.0806	-0.5544	-0.4489	-0.4157	-0.2526	-0.4685	-0.2471	-0.3476	-0.2646	-0.3
clr.U	0.2074	-0.3409	-0.5471	-0.4188	-0.121	-0.4529	-0.2936	-0.3832	-0.1232	-0.4423	-0.205	-0.315	-0.1907	-0.1341
clr.V	0.1363	-0.1548	-0.3431	-0.4669	0.2047	-0.4675	-0.5193	-0.0782	-0.3345	-0.218	-0.0881	-0.0645	-0.3965	-0.2619
clr.W	0.3578	-0.0204	-0.4984	-0.4879	-0.1519	-0.429	-0.3876	-0.0885	0.0232	-0.2608	0.1025	-0.0519	-0.2896	-0.2096
clr.Zr	0.0936	-0.5352	-0.598	-0.6843	-0.0218	-0.66	-0.4896	-0.4654	-0.3241	-0.4767	-0.2706	-0.3701	-0.3273	-0.3057

## ANEXO G.6

	clr.Mo	clr.Cu	clr.Pb	clr.Zn	clr.Ni	clr.As	clr.Cd	clr.Sb	clr.Bi	clr.Ag	clr.Au	clr.Hg	clr.Tl	clr.Se
clr.Y	-0.3103	-0.4822	-0.4338	-0.3637	0.0669	-0.5195	-0.2917	-0.6058	-0.3008	-0.4461	-0.4486	-0.5051	-0.152	-0.223
clr.La	-0.2009	-0.4427	-0.4704	-0.4458	-0.0406	-0.5384	-0.4776	-0.4242	-0.2705	-0.4723	-0.3599	-0.4312	-0.1982	-0.3547
clr.Ce	-0.2223	-0.4579	-0.5017	-0.477	-0.0331	-0.5759	-0.4925	-0.4662	-0.3022	-0.5023	-0.3815	-0.4343	-0.2259	-0.3495
clr.Pr	-0.2328	-0.4424	-0.5348	-0.5047	-0.0399	-0.6054	-0.5171	-0.4809	-0.3274	-0.5049	-0.3613	-0.4175	-0.2491	-0.3433
clr.Nd	-0.2565	-0.4218	-0.524	-0.4851	-0.0255	-0.5953	-0.5153	-0.473	-0.3476	-0.4888	-0.36	-0.3915	-0.2594	-0.3327
clr.Sm	-0.3206	-0.4168	-0.502	-0.4499	0.0289	-0.5784	-0.4831	-0.515	-0.3666	-0.4854	-0.3836	-0.4034	-0.2283	-0.3167
clr.Eu	-0.5455	-0.2306	-0.1105	-0.0481	0.1435	-0.2039	-0.1727	-0.2274	-0.2576	-0.1937	-0.326	-0.2397	-0.0106	-0.1237
clr.Gd	-0.3431	-0.4333	-0.4547	-0.3833	0.0971	-0.5376	-0.3751	-0.5658	-0.3523	-0.4572	-0.428	-0.4556	-0.1627	-0.2773
clr.Tb	-0.3698	-0.4433	-0.4503	-0.3232	0.0756	-0.497	-0.3019	-0.5894	-0.317	-0.4583	-0.4607	-0.4862	-0.144	-0.2127
clr.Dy	-0.3537	-0.4537	-0.3999	-0.3305	0.1106	-0.494	-0.2972	-0.5745	-0.2956	-0.4179	-0.443	-0.4904	-0.1489	-0.2549
clr.Ho	-0.3441	-0.4655	-0.3983	-0.3494	0.0568	-0.4924	-0.2929	-0.5751	-0.2803	-0.4165	-0.4462	-0.4836	-0.1517	-0.2174
clr.Er	-0.3297	-0.4794	-0.4175	-0.383	0.0445	-0.5141	-0.3047	-0.5888	-0.2898	-0.4287	-0.4481	-0.494	-0.1472	-0.2103
clr.Tm	-0.3157	-0.4851	-0.4068	-0.3835	0.0118	-0.5072	-0.3031	-0.5644	-0.2887	-0.4266	-0.4435	-0.4719	-0.1643	-0.2388
clr.Yb	-0.2742	-0.5175	-0.4261	-0.4324	0.0028	-0.5409	-0.34	-0.5675	-0.3026	-0.4389	-0.4365	-0.4813	-0.1939	-0.2527
clr.Lu	-0.2814	-0.5396	-0.4302	-0.4613	-0.0209	-0.5568	-0.3582	-0.5723	-0.3107	-0.4518	-0.4391	-0.478	-0.2082	-0.2672
clr.Mo		0.268	-0.1336	-0.0798	-0.0118	0.043	-0.0086	0.1934	0.1723	-0.0087	0.2554	0.1377	-0.1111	0.0543
clr.Cu			0.1876	0.3057	-0.0462	0.3717	0.223	0.3855	0.3162	0.4222	0.4287	0.4873	0.0623	0.0931
clr.Pb				0.7034	-0.0982	0.6605	0.6153	0.4468	0.256	0.4795	0.0328	0.1529	0.1263	0.0997
clr.Zn					0.0116	0.7259	0.7519	0.3281	0.241	0.2889	-0.0391	0.0611	0.2205	0.1526
clr.Ni						-0.0909	-0.0722	-0.296	-0.1757	-0.154	-0.1722	-0.234	0.1345	-0.1289
clr.As							0.6254	0.5594	0.3106	0.3135	0.0747	0.2114	0.266	0.2299
clr.Cd								0.2608	0.2419	0.3133	-0.0351	-0.0062	0.2237	0.2144
clr.Sb									0.246	0.3172	0.2222	0.487	-0.0752	0.0781
clr.Bi										0.2699	0.3304	0.2267	0.1146	0.2437
clr.Ag											0.3138	0.3499	0.0256	0.1517
clr.Au												0.4947	0.0098	0.0958
clr.Hg													-0.0049	0.1427
clr.Tl														0.1654
clr.Se														

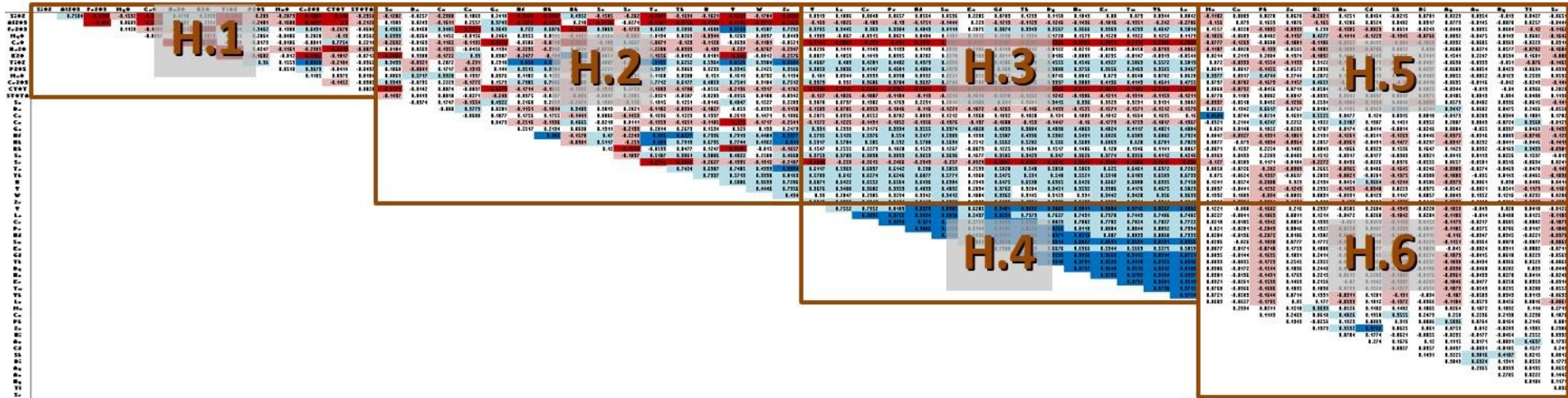


## **ANEXO H**

**Matriz de Correlación de datos ‘crudos’, Base de Datos Modificada**

# ANEXO H.0

## Total Matriz



Código de color:

Signo de correlación

+	Bajo percentil 5%
+	Entre percentiles 5%-25%
-	Entre percentiles 75%-95%
-	Sobre percentil 95%

Nota 1: Se omite triangulo inferior al ser matriz simétrica, Se omite diagonal correspondiente a identidad.

Nota 2: Matriz de gran extensión por lo cual es seccionada de modo de hacer posible su inspección. Se presenta la perspectiva general de la matriz (Total Matriz) de modo de facilitar la navegación entre las distintas secciones y visualizar patrones en una escala general. Números del 1 al 6 corresponden a de cada sección del presente anexo: Números del 1 al 6 corresponden a de cada sección del presente anexo.

### ANEXO H.1

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>TOTAL</sub>	S <sub>TOTAL</sub>
SiO <sub>2</sub>		0.7504	-0.5236	-0.1532	-0.6719	0.4718	0.5339	-0.4245	-0.209	-0.2073	-0.4002	-0.544	-0.2356
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			-0.484	0.0683	-0.6218	0.4402	0.2994	-0.5163	-0.2481	-0.1608	-0.4817	-0.5	-0.2126
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				0.1128	-0.1489	-0.1923	-0.3392	0.7684	0.3462	0.1908	0.6491	-0.2678	-0.0606
MgO					-0.0097	0.0398	-0.2079	0.0961	0.2064	-0.0406	0.2828	-0.13	-0.0562
CaO						-0.4321	-0.398	-0.0638	-0.0173	-0.0186	-0.0041	0.7754	0.2214
Na <sub>2</sub> O							0.2979	-0.2707	0.0247	-0.1161	-0.2385	-0.3419	-0.0875
K <sub>2</sub> O								-0.328	-0.1602	-0.012	-0.2982	-0.1817	-0.0712
TiO <sub>2</sub>									0.36	0.1553	0.8328	-0.2104	-0.0362
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>										0.0518	0.3673	-0.0414	-0.0437
MnO											0.1185	0.0379	0.0184
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>												-0.1452	-0.0305
C <sub>TOTAL</sub>													0.0828
S <sub>TOTAL</sub>													

## ANEXO H.2

	Sc	Ba	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Zr
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-0.1282	-0.0257	-0.2388	0.1869	0.2418	-0.3558	-0.3367	0.4952	-0.1505	-0.262	-0.2947	-0.1634	-0.1621	-0.5523	-0.1784	-0.3632
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1389	0.0249	-0.1611	0.2557	0.3749	-0.5379	-0.5375	0.218	-0.3158	-0.0274	-0.5281	-0.3766	-0.4126	-0.5343	-0.2715	-0.5426
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.4363	-0.0468	0.3405	-0.2871	0.3649	0.722	0.6876	-0.3369	0.3869	-0.1723	0.6607	0.5036	0.4608	0.9528	0.4507	0.7232
<b>MgO</b>	0.6999	-0.0264	0.1452	-0.0156	0.2464	0.0355	0.0315	-0.1461	-0.0564	-0.082	0.0134	0.0263	-0.0944	0.1269	0.0037	0.0449
<b>CaO</b>	-0.2632	-0.0163	-0.1165	-0.1195	-0.6259	-0.0586	-0.0748	-0.3365	-0.108	0.4657	-0.0871	-0.129	-0.1128	-0.0698	-0.1181	-0.0521
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.0104	0.0269	-0.1355	-0.0456	0.1194	-0.2295	-0.2342	0.1834	-0.0756	-0.0626	-0.2208	-0.0993	-0.109	-0.227	-0.0767	-0.2347
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-0.2807	0.3308	-0.1722	0.39	0.0307	-0.2477	-0.194	0.8965	-0.0051	-0.2516	-0.1656	-0.0492	0.0181	-0.366	-0.0012	-0.2576
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.3433	-0.0921	0.2072	-0.231	0.2318	0.858	0.9355	-0.2372	0.4887	-0.2228	0.9135	0.6252	0.5364	0.8526	0.3984	0.8684
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.1868	-0.0841	0.1717	-0.1313	0.144	0.3515	0.3904	-0.1084	0.2251	-0.0987	0.3817	0.3069	0.3299	0.3945	0.2425	0.3566
<b>MnO</b>	0.0063	0.5717	0.3928	0.1397	0.0976	0.1102	0.1292	0.0593	0.5778	0.0295	0.1168	0.0588	0.151	0.1613	0.0732	0.1134
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.3343	-0.0735	0.2223	-0.1772	0.1579	0.7385	0.7886	-0.1988	0.367	-0.2094	0.7712	0.6177	0.4853	0.7541	0.3104	0.7512
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	-0.4171	-0.0142	0.0074	-0.0097	-0.6273	-0.1714	-0.1812	-0.1395	-0.1319	0.2759	-0.1883	-0.1708	-0.0556	-0.2196	-0.1317	-0.1702
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	-0.1437	0.0419	0.0018	-0.0271	-0.248	-0.0375	-0.0287	-0.084	-0.0097	0.2005	-0.0321	-0.0587	-0.0289	-0.0356	0.0188	-0.0342
<b>Sc</b>		-0.0374	0.1747	-0.1554	0.4922	0.2168	0.2099	-0.2471	0.1083	-0.116	0.1815	0.1251	-0.0146	0.4047	0.1527	0.2209
<b>Ba</b>			-0.008	0.3779	0.0201	-0.1151	-0.1014	0.3489	0.3013	0.2021	-0.1102	-0.0994	-0.1027	-0.053	-0.0399	-0.1158
<b>Co</b>				-0.0688	0.1877	0.1756	0.1755	-0.1441	0.0866	-0.1459	0.1636	0.1223	0.1337	0.2613	0.1471	0.1806
<b>Cs</b>					0.0473	-0.2516	-0.1936	0.4665	-0.0218	0.0111	-0.1953	-0.1651	-0.1185	-0.279	-0.1717	-0.2541
<b>Ga</b>						0.2517	0.2194	0.0698	0.1911	-0.2193	0.2014	0.2673	0.1534	0.323	0.193	0.2473
<b>Hf</b>							0.902	-0.1578	0.47	-0.2243	0.896	0.8277	0.7396	0.7913	0.4404	0.9977
<b>Nb</b>								-0.0901	0.5117	-0.253	0.989	0.7319	0.6795	0.7744	0.4362	0.911
<b>Rb</b>									0.12	-0.2999	-0.0593	0.0477	0.1247	-0.3385	-0.015	-0.1657
<b>Sn</b>										-0.1837	0.5107	0.3861	0.3886	0.4022	0.2508	0.4668
<b>Sr</b>											-0.2744	-0.2851	-0.2627	-0.1395	-0.1915	-0.2187
<b>Ta</b>												0.7424	0.6987	0.7405	0.4399	0.9034
<b>Th</b>													0.7997	0.5719	0.3398	0.8163
<b>U</b>														0.5006	0.3639	0.7286
<b>V</b>															0.4446	0.7956
<b>W</b>																0.434
<b>Zr</b>																

### ANEXO H.3

	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.0919	0.1086	0.0848	0.0657	0.0564	0.0596	0.2285	0.0789	0.1239	0.1158	0.1049	0.08	0.073	0.0344	0.0042
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-0.169	-0.1825	-0.189	-0.19	-0.1751	-0.1444	0.229	-0.1213	-0.1123	-0.1246	-0.1436	-0.1816	-0.1951	-0.242	-0.2706
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.3765	0.3445	0.369	0.3984	0.4049	0.4114	0.2875	0.3874	0.3349	0.3567	0.3666	0.3963	0.4239	0.4647	0.5014
<b>MgO</b>	0.1383	-0.067	-0.0315	0.0021	0.0404	0.1101	0.1912	0.1598	0.1394	0.1728	0.1579	0.1528	0.1322	0.1252	0.1173
<b>CaO</b>	-0.3154	-0.3004	-0.293	-0.291	-0.2917	-0.3131	-0.4927	-0.3287	-0.3296	-0.3366	-0.3235	-0.3071	-0.3116	-0.2903	-0.2805
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-0.0296	0.1411	0.1149	0.1193	0.1149	0.0933	0.2406	0.0448	0.0312	-0.0122	-0.0213	-0.0405	-0.0458	-0.0789	-0.0862
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.0077	0.1859	0.1419	0.0995	0.0702	0.0278	-0.0108	-0.0011	0.0296	0.0106	-0.0003	-0.0235	-0.0147	-0.0319	-0.0544
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.4687	0.403	0.4281	0.4402	0.4373	0.4394	0.242	0.4506	0.4048	0.4555	0.4546	0.4927	0.5069	0.5572	0.5813
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.3853	0.3836	0.4147	0.4601	0.4804	0.4978	0.2568	0.468	0.4036	0.3888	0.3756	0.3656	0.3463	0.3565	0.3467
<b>MnO</b>	0.101	0.0344	0.0399	0.0398	0.0332	0.0551	0.055	0.0962	0.0939	0.0746	0.0842	0.079	0.0648	0.0702	0.0628
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.3979	0.332	0.3606	0.3704	0.3697	0.3744	0.1708	0.3914	0.3416	0.3937	0.3803	0.4136	0.4143	0.4641	0.4755
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	-0.2998	-0.2756	-0.2804	-0.2963	-0.3044	-0.3269	-0.4904	-0.3293	-0.3037	-0.3286	-0.3111	-0.3072	-0.3196	-0.3168	-0.3111
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	-0.127	-0.1026	-0.1087	-0.1104	-0.113	-0.1211	-0.1614	-0.1278	-0.1265	-0.1242	-0.1306	-0.1211	-0.1314	-0.1159	-0.1211
<b>Sc</b>	0.3078	0.0797	0.1302	0.1763	0.2231	0.3014	0.4989	0.341	0.3081	0.3415	0.336	0.3323	0.3231	0.3131	0.3082
<b>Ba</b>	-0.1503	-0.0785	-0.0959	-0.1046	-0.116	-0.1221	-0.1072	-0.1265	-0.146	-0.1499	-0.1525	-0.1571	-0.1571	-0.1512	-0.1579
<b>Co</b>	0.2075	0.0358	0.0552	0.0702	0.0833	0.1212	0.1368	0.1832	0.1828	0.191	0.1883	0.1812	0.1664	0.1635	0.16
<b>Cs</b>	-0.1572	-0.1225	-0.1491	-0.1852	-0.1956	-0.1976	-0.137	-0.1688	-0.153	-0.1447	-0.16	-0.1779	-0.1723	-0.1817	-0.1967
<b>Ga</b>	0.391	0.2993	0.3176	0.3394	0.3555	0.3974	0.4828	0.4099	0.3884	0.4038	0.4063	0.4024	0.4117	0.4021	0.4084
<b>Hf</b>	0.5795	0.5126	0.5376	0.554	0.5477	0.5383	0.1938	0.5307	0.4996	0.5382	0.5491	0.6026	0.6389	0.6882	0.7324
<b>Nb</b>	0.5917	0.5704	0.585	0.592	0.5788	0.5694	0.2512	0.5662	0.5282	0.566	0.5689	0.6069	0.628	0.6781	0.7023
<b>Rb</b>	0.1547	0.2555	0.2273	0.1828	0.1523	0.1267	-0.0079	0.1225	0.1684	0.1517	0.1486	0.128	0.1346	0.1141	0.0867
<b>Sn</b>	0.3753	0.3789	0.3838	0.3839	0.3659	0.3636	0.1677	0.3505	0.3429	0.347	0.3626	0.3774	0.3956	0.4112	0.4246
<b>Sr</b>	-0.4008	-0.259	-0.2615	-0.2466	-0.2343	-0.257	-0.0929	-0.3047	-0.3435	-0.3912	-0.3949	-0.3986	-0.4083	-0.4017	-0.392
<b>Ta</b>	0.6117	0.5963	0.6097	0.6142	0.598	0.5859	0.2533	0.5828	0.548	0.5858	0.5863	0.625	0.6461	0.6972	0.7202
<b>Th</b>	0.5789	0.612	0.6274	0.6246	0.6077	0.5771	0.1368	0.5475	0.531	0.548	0.5521	0.5918	0.6183	0.6589	0.6793
<b>U</b>	0.6871	0.6422	0.6552	0.6564	0.6436	0.6384	0.2349	0.6475	0.6598	0.6365	0.6426	0.6667	0.6808	0.6995	0.7158
<b>V</b>	0.3676	0.3408	0.3682	0.3959	0.4033	0.4032	0.2094	0.3762	0.3204	0.3451	0.3532	0.3906	0.4176	0.4675	0.5029
<b>W</b>	0.33	0.2847	0.2985	0.3234	0.3342	0.3412	0.1804	0.3362	0.3145	0.3123	0.331	0.3442	0.3428	0.356	0.3693
<b>Zr</b>	0.5746	0.5058	0.5312	0.5474	0.5412	0.5332	0.1975	0.5285	0.4934	0.5336	0.5433	0.5965	0.6314	0.6811	0.7247

### ANEXO H.4

	<b>Y</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>	<b>La</b>
<b>Y</b>		0.7552	0.7952	0.8189	0.8278	0.8905	0.6205	0.9481	0.9692	0.9803	0.9811	0.9804	0.9715	0.9557	0.9382
<b>La</b>			0.9895	0.9752	0.9494	0.9058	0.5497	0.8294	0.7979	0.7627	0.7491	0.7378	0.7449	0.7486	0.7402
<b>Ce</b>				0.9899	0.971	0.9393	0.5759	0.8688	0.8366	0.8029	0.7882	0.7782	0.7824	0.7827	0.7722
<b>Pr</b>					0.9886	0.9669	0.6144	0.8984	0.8623	0.8266	0.8118	0.8004	0.8044	0.8032	0.7934
<b>Nd</b>						0.9755	0.6436	0.9121	0.8704	0.8371	0.8216	0.807	0.8099	0.8068	0.7933
<b>Sm</b>							0.7062	0.9648	0.9296	0.9014	0.8867	0.8691	0.8634	0.8531	0.8366
<b>Eu</b>								0.7388	0.6869	0.6676	0.6366	0.5944	0.5669	0.5275	0.5053
<b>Gd</b>									0.969	0.9599	0.9456	0.9263	0.9112	0.8914	0.8721
<b>Tb</b>										0.9648	0.9704	0.9539	0.9418	0.9159	0.8936
<b>Dy</b>											0.9757	0.9648	0.9515	0.9312	0.9108
<b>Ho</b>												0.9789	0.9709	0.9494	0.9337
<b>Er</b>													0.9795	0.9681	0.9549
<b>Tm</b>														0.9798	0.9715
<b>Yb</b>															0.9794
<b>Lu</b>															

## ANEXO H.5

	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	Tl	Se
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-0.1182	0.0809	0.0278	0.0678	-0.2021	0.1251	0.0464	-0.0215	0.0701	0.0223	0.0354	-0.019	0.0427	-0.0651
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-0.156	0.073	0.1653	0.1076	-0.165	0.1286	0.0524	0.0402	0.0317	0.0773	-0.0145	-0.0078	0.0257	-0.0444
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.1557	-0.0228	-0.1005	-0.0993	0.298	-0.1385	-0.0823	0.0654	-0.0243	-0.0448	0.0095	0.0604	-0.12	-0.1162
<b>MgO</b>	-0.1026	-0.0603	-0.0402	-0.1137	0.4277	-0.1414	-0.1223	-0.1345	-0.0766	0.0092	-0.0475	0.0143	0.0602	-0.1642
<b>CaO</b>	-0.0777	-0.1269	-0.0608	-0.1081	-0.1106	-0.0957	-0.0639	-0.084	-0.1059	-0.0332	-0.0685	-0.0369	-0.0229	0.0914
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-0.1107	-0.0028	-0.139	-0.0565	-0.1089	-0.1009	-0.0786	0.0052	0.038	-0.0688	0.0274	0.0577	-0.0782	-0.1604
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.0214	0.2113	0.2084	0.1374	-0.1097	0.1414	0.0643	0.3126	0.2141	0.1541	0.2247	0.0594	0.1681	-0.086
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.072	-0.0993	-0.1554	-0.1193	0.3122	-0.1273	-0.073	-0.1047	-0.0497	-0.0698	-0.0339	-0.051	-0.076	-0.1465
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.0641	0.0017	-0.1455	-0.0572	0.2838	-0.056	-0.0373	-0.0535	-0.0237	-0.0603	-0.0054	0.0429	-0.0634	0.0336
<b>MnO</b>	0.3977	0.0317	0.4744	0.2744	0.2072	0.1035	0.2813	0.0325	-0.0105	0.0055	-0.0052	-0.0123	0.2533	0.0592
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.0737	-0.0782	-0.1679	-0.1157	0.4659	-0.136	-0.0731	-0.12	-0.0418	-0.0695	-0.0116	-0.042	-0.0249	-0.144
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>	0.0868	-0.0792	-0.0456	0.0714	-0.0504	-0.0248	0.0886	-0.0707	0.0023	-0.0344	-0.019	-0.04	0.0366	0.2828
<b>S<sub>TOTAL</sub></b>	0.0778	0.1189	0.0002	0.0017	-0.0395	0.0342	0.0097	0.0917	0.0375	0.0185	0.0813	0.084	0.0488	0.1196
<b>Sc</b>	-0.0937	-0.0518	0.0432	-0.1296	0.2534	-0.1804	-0.1364	0.0046	-0.0892	0.0579	-0.0482	0.0336	-0.0615	-0.141
<b>Ba</b>	0.0622	0.1342	0.6617	0.0767	0.0104	0.1195	0.0363	0.3344	0.0241	0.3417	0.0602	0.0475	0.2466	-0.0558
<b>Co</b>	0.8603	0.0744	-0.0294	0.1631	0.5525	0.0477	0.124	0.0315	0.0018	-0.0173	0.0203	0.0344	0.1001	0.1702
<b>Cs</b>	-0.0321	0.2144	0.4247	0.2252	0.1322	0.5187	0.1387	0.1451	0.0952	0.2007	0.0049	-0.0724	0.3568	-0.0129
<b>Ga</b>	0.024	0.0148	0.1022	-0.0203	0.1707	0.0174	-0.0414	-0.0014	-0.0246	0.0084	-0.055	0.0397	0.0463	-0.1433
<b>Hf</b>	0.0847	-0.0927	-0.1991	-0.1061	0.2191	-0.1261	-0.0511	-0.1263	-0.0446	-0.0975	-0.0316	0.0809	-0.0746	-0.123
<b>Nb</b>	0.0877	-0.073	-0.1894	-0.0964	0.2857	-0.0961	-0.0491	-0.1477	-0.0297	-0.0917	-0.0292	-0.0411	-0.0446	-0.1413
<b>Rb</b>	-0.0071	0.1597	0.2254	0.1485	0.0043	0.1866	0.0923	0.1596	0.1647	0.1429	0.0932	-0.0169	0.3433	-0.0981
<b>Sn</b>	0.0963	0.0439	0.2203	-0.0489	0.1512	-0.0317	-0.0177	-0.0303	0.0321	-0.0413	0.0113	0.0226	0.1537	-0.019
<b>Sr</b>	-0.127	-0.0589	0.1171	-0.0104	-0.2272	0.0436	-0.0226	0.0376	-0.0555	0.0657	-0.0581	0.0516	-0.0694	0.0241
<b>Ta</b>	0.0858	-0.0726	-0.202	-0.0903	0.2665	-0.0965	-0.0406	-0.1645	-0.0246	-0.0909	-0.0274	-0.0463	-0.0478	-0.143
<b>Th</b>	0.075	-0.0624	-0.1937	-0.0637	0.2033	-0.0821	-0.0281	-0.1375	-0.0308	-0.1003	-0.035	0.0143	-0.0465	-0.1098
<b>U</b>	0.1241	0.0574	-0.2008	0.323	0.2134	0.0454	0.3664	-0.1244	0.0586	-0.0979	0.0061	0.038	0.0406	0.0414
<b>V</b>	0.0897	-0.0441	-0.1292	-0.1243	0.2932	-0.1459	-0.0948	0.0223	-0.0375	-0.0542	-0.0021	0.0541	-0.1173	-0.1161
<b>W</b>	0.1992	0.1803	-0.094	-0.0095	0.0891	-0.0391	0.0123	0.1147	0.0857	0.0043	0.1952	0.1216	-0.0232	0.0288
<b>Zr</b>	0.0867	-0.0951	-0.2031	-0.1101	0.228	-0.128	-0.0537	-0.1306	-0.0447	-0.0985	-0.0303	0.0756	-0.0739	-0.1284

## ANEXO H.6

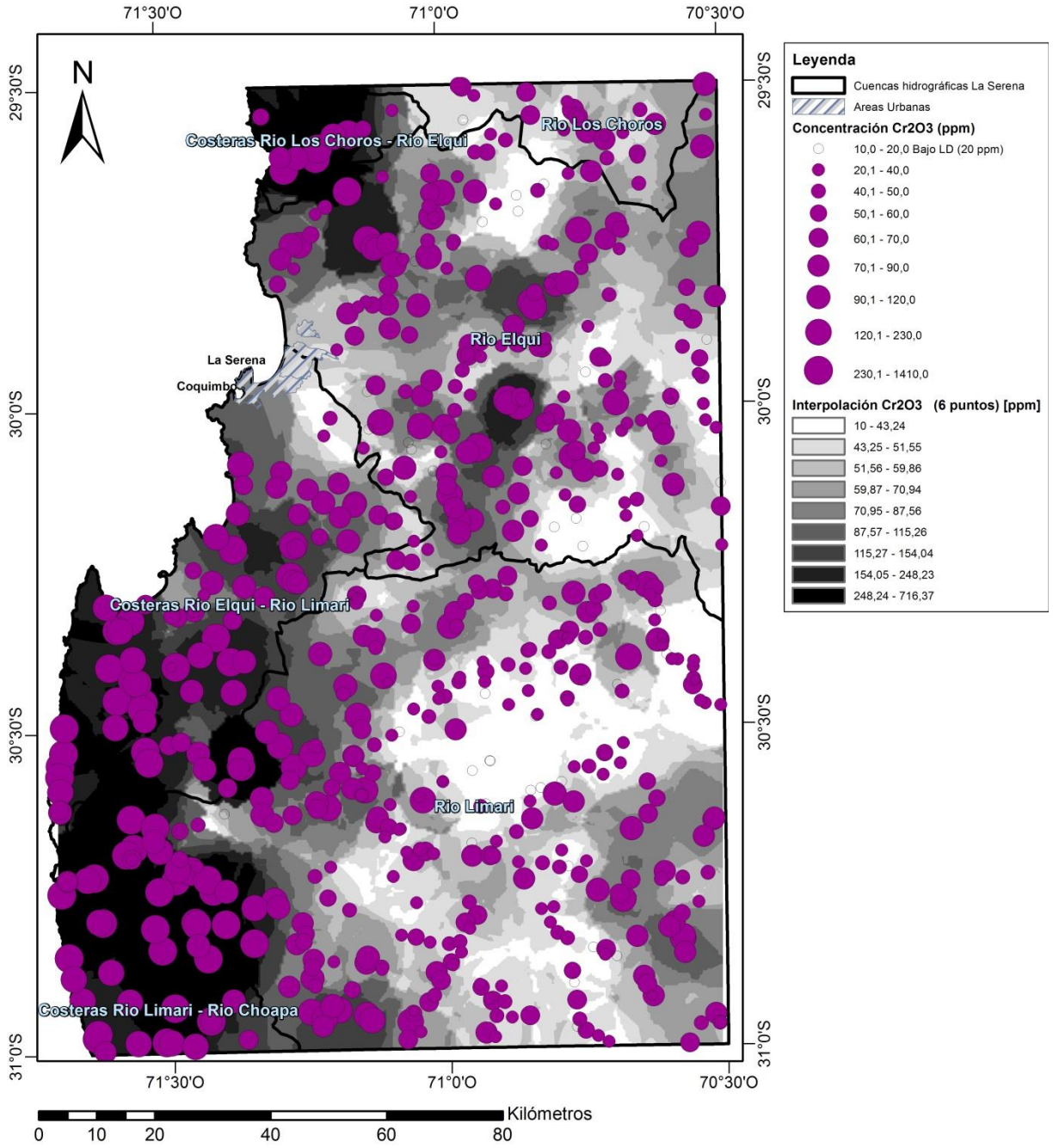
	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	Tl	Se
<b>Y</b>	0.1221	-0.008	-0.1602	0.216	0.2397	-0.0505	0.2604	-0.1943	-0.0228	-0.1059	-0.043	0.028	0.0418	-0.0122
<b>La</b>	0.0227	-0.0041	-0.1863	0.0011	0.1214	-0.0472	0.0268	-0.1042	0.0284	-0.1109	-0.014	0.0488	0.0125	-0.1109
<b>Ce</b>	0.0218	-0.0185	-0.1942	0.0054	0.1333	-0.061	0.0359	-0.1168	0.0152	-0.1179	-0.0217	0.0605	-0.0002	-0.1079
<b>Pr</b>	0.021	-0.0201	-0.2049	0.0046	0.1327	-0.0753	0.0387	-0.1203	-0.0017	-0.1185	-0.0275	0.0786	-0.0147	-0.1046
<b>Nd</b>	0.0204	-0.0196	-0.2072	0.0186	0.1387	-0.0783	0.0514	-0.1112	-0.0115	-0.116	-0.0347	0.0945	-0.0221	-0.0976
<b>Sm</b>	0.0286	-0.026	-0.1898	0.0777	0.1772	-0.0791	0.1146	-0.1316	-0.0223	-0.1151	-0.0364	0.0878	-0.0077	-0.0863
<b>Eu</b>	0.0077	0.0171	-0.0748	0.1759	0.1808	-0.0341	0.1877	-0.058	-0.0024	-0.045	-0.0024	0.0911	-0.0082	-0.0711
<b>Gd</b>	0.0835	-0.0144	-0.1635	0.1831	0.2414	-0.0594	0.2242	-0.1554	-0.0274	-0.1073	-0.0415	0.0618	0.0223	-0.0563
<b>Tb</b>	0.0893	-0.0035	-0.1723	0.2545	0.2355	-0.0277	0.2924	-0.1817	-0.0237	-0.1098	-0.0434	0.0366	0.0529	-0.0069
<b>Dy</b>	0.0986	-0.0172	-0.1544	0.1896	0.2448	-0.0557	0.2298	-0.1918	-0.0198	-0.0998	-0.0468	0.0202	0.033	-0.0448
<b>Ho</b>	0.0981	-0.0196	-0.1491	0.1769	0.2219	-0.0612	0.2203	-0.1882	-0.0176	-0.0961	-0.0433	0.0278	0.0414	-0.0246
<b>Er</b>	0.0921	-0.0261	-0.1593	0.1469	0.2156	-0.07	0.1942	-0.1987	-0.0269	-0.1046	-0.0477	0.0258	0.0359	-0.0314
<b>Tm</b>	0.0768	-0.0366	-0.1606	0.1095	0.1898	-0.0733	0.1554	-0.1977	-0.0324	-0.1073	-0.0549	0.0295	0.0288	-0.0557
<b>Yb</b>	0.0721	-0.0509	-0.1644	0.0714	0.1931	-0.0911	0.1201	-0.191	-0.034	-0.107	-0.0509	0.0343	0.0113	-0.0699
<b>Lu</b>	0.0609	-0.0627	-0.1705	0.05	0.177	-0.0999	0.1012	-0.1972	-0.0366	-0.1104	-0.0573	0.0456	0.0016	-0.0861
<b>Mo</b>		0.2334	0.0211	0.1518	0.3699	0.0526	0.1182	0.1482	0.1065	0.0264	0.1872	0.1032	0.114	0.2713
<b>Cu</b>			0.1143	0.2463	0.0618	0.4826	0.1958	0.3555	0.2479	0.258	0.2296	0.2198	0.2298	0.1876
<b>Pb</b>				0.1349	-0.0256	0.1929	0.0803	0.313	0.0886	0.5036	0.0764	0.0164	0.2146	0.081
<b>Zn</b>					0.1973	0.3592	0.9702	0.0625	0.061	0.0759	0.012	-0.0203	0.1905	0.2308
<b>Ni</b>						0.0784	0.1774	-0.0621	-0.0055	-0.0235	-0.0177	-0.0464	0.2552	0.0397
<b>As</b>							0.274	0.1676	0.12	0.1115	0.0171	-0.0031	0.4697	0.1797
<b>Cd</b>								0.0027	0.0357	0.0437	-0.0031	-0.0185	0.1577	0.241
<b>Sb</b>									0.1491	0.3225	0.3816	0.4107	0.0215	0.0812
<b>Bi</b>										0.3043	0.6324	0.1341	0.0553	0.1779
<b>Ag</b>											0.2965	0.0993	0.0195	0.0659
<b>Au</b>												0.2785	0.0222	0.1442
<b>Hg</b>													0.0104	0.1171
<b>Tl</b>														0.092
<b>Se</b>														



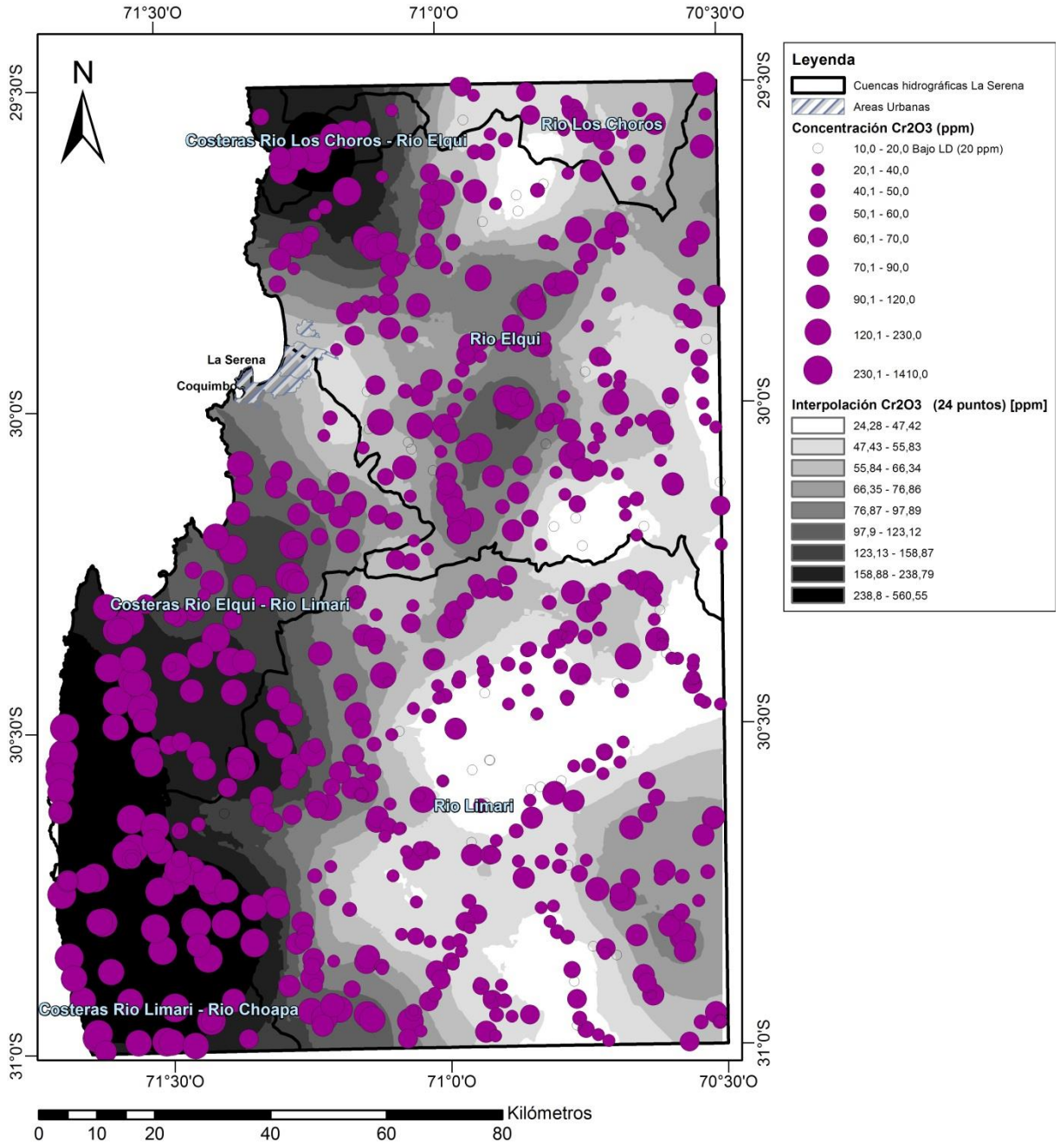
## **ANEXO I**

### **Mapas de concentración de parámetros Fuera de Rango**

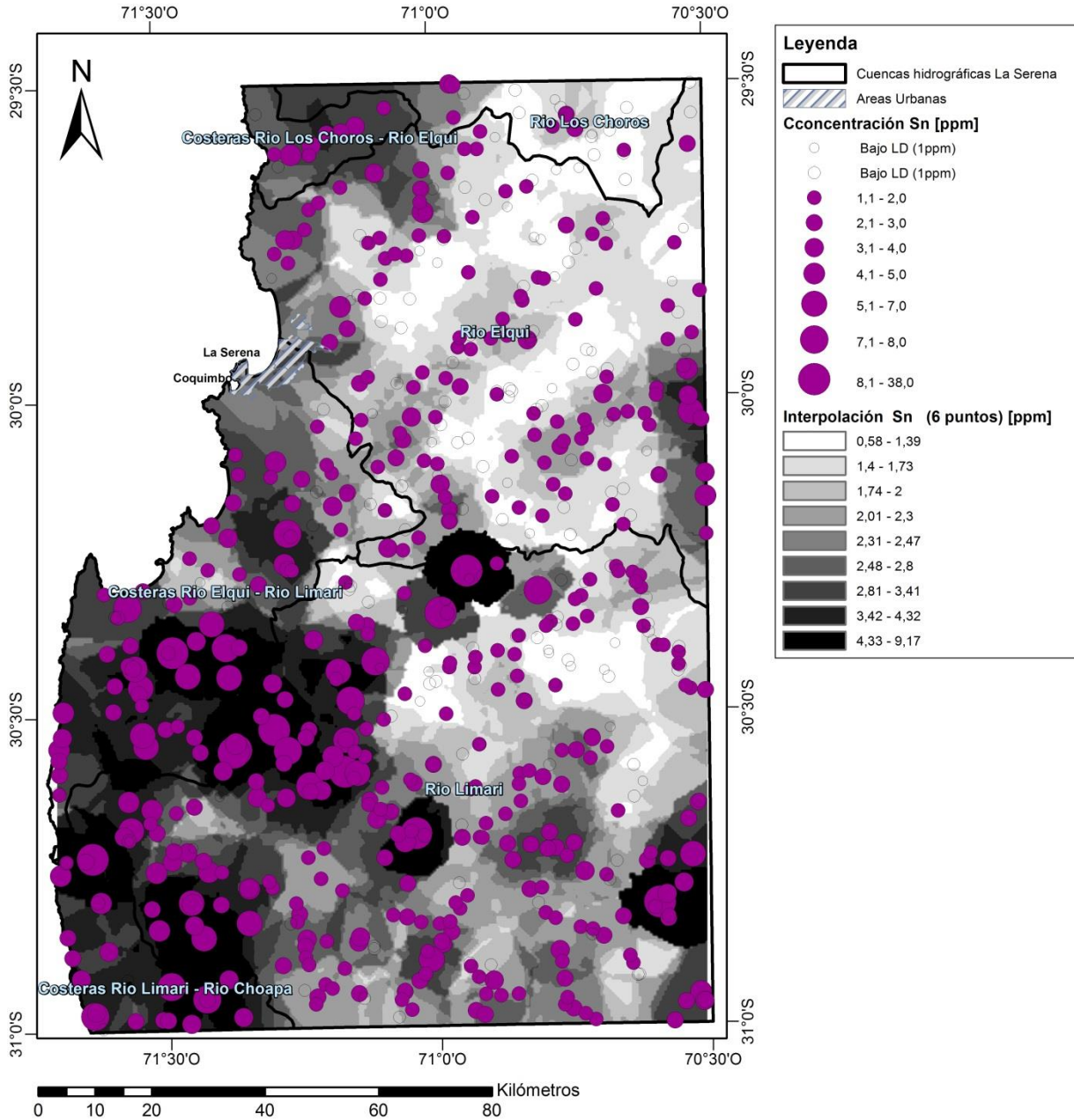
# ANEXO I.1



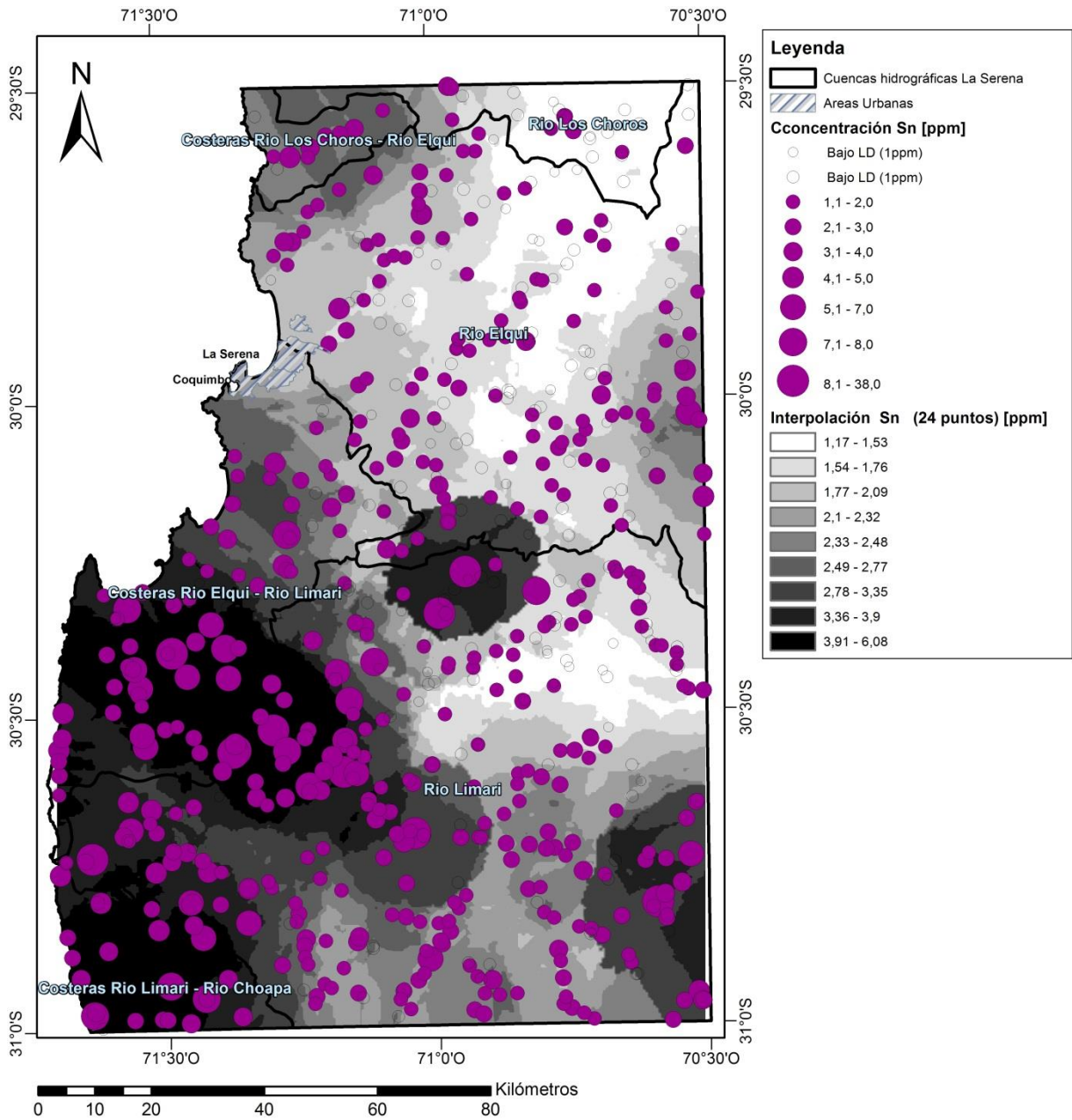
# ANEXO I.2



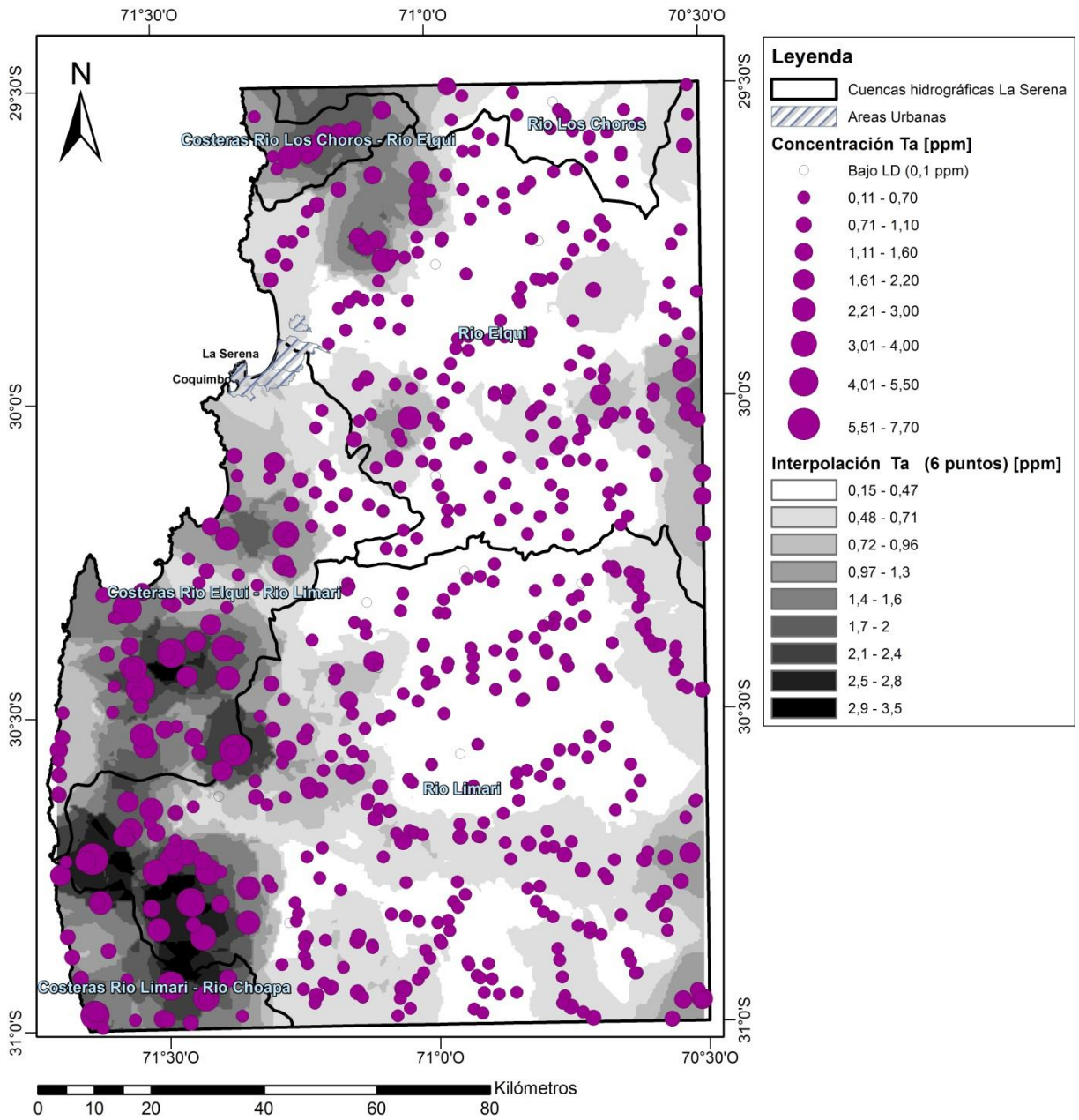
### ANEXO I.3



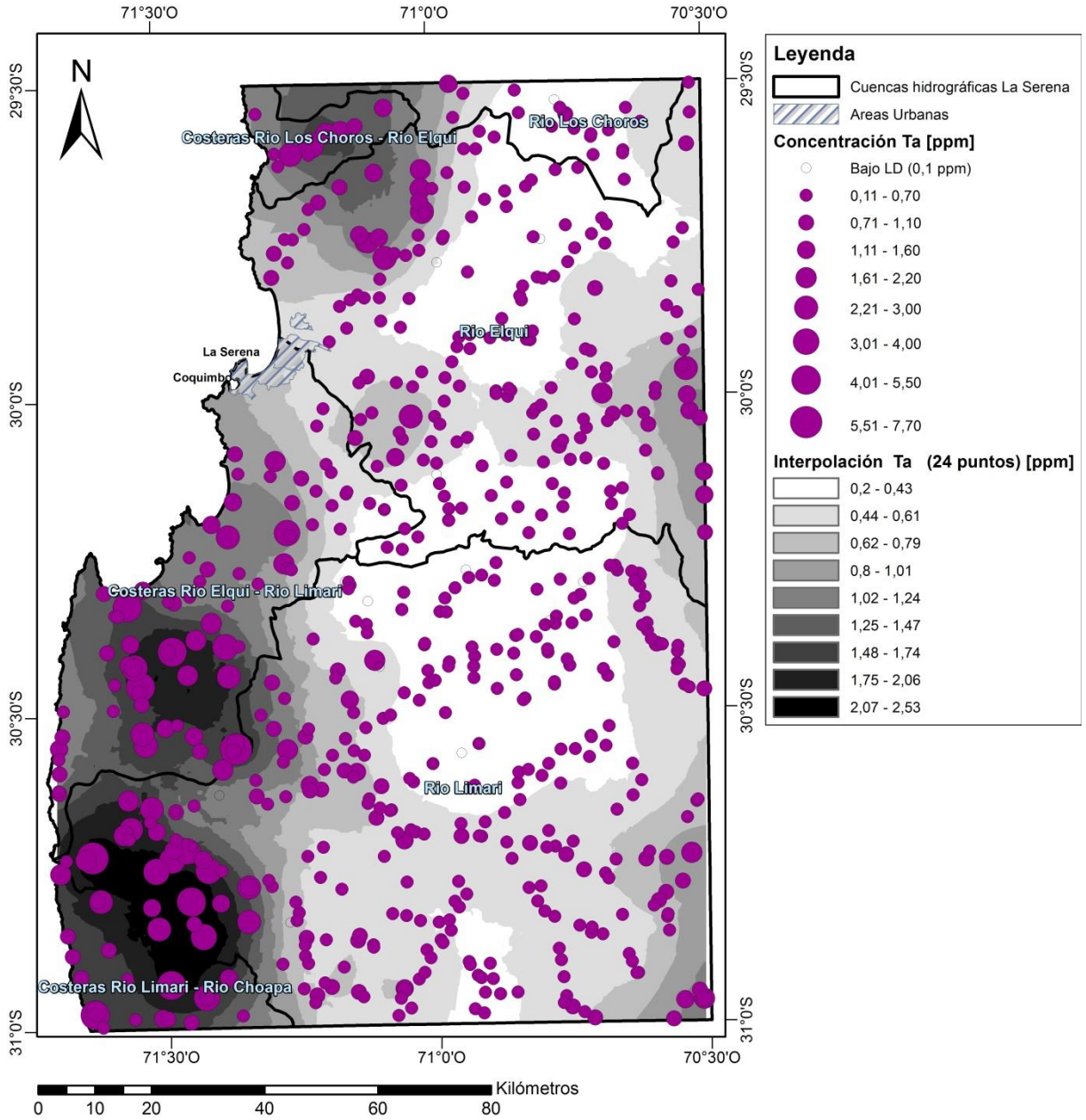
# ANEXO I.4



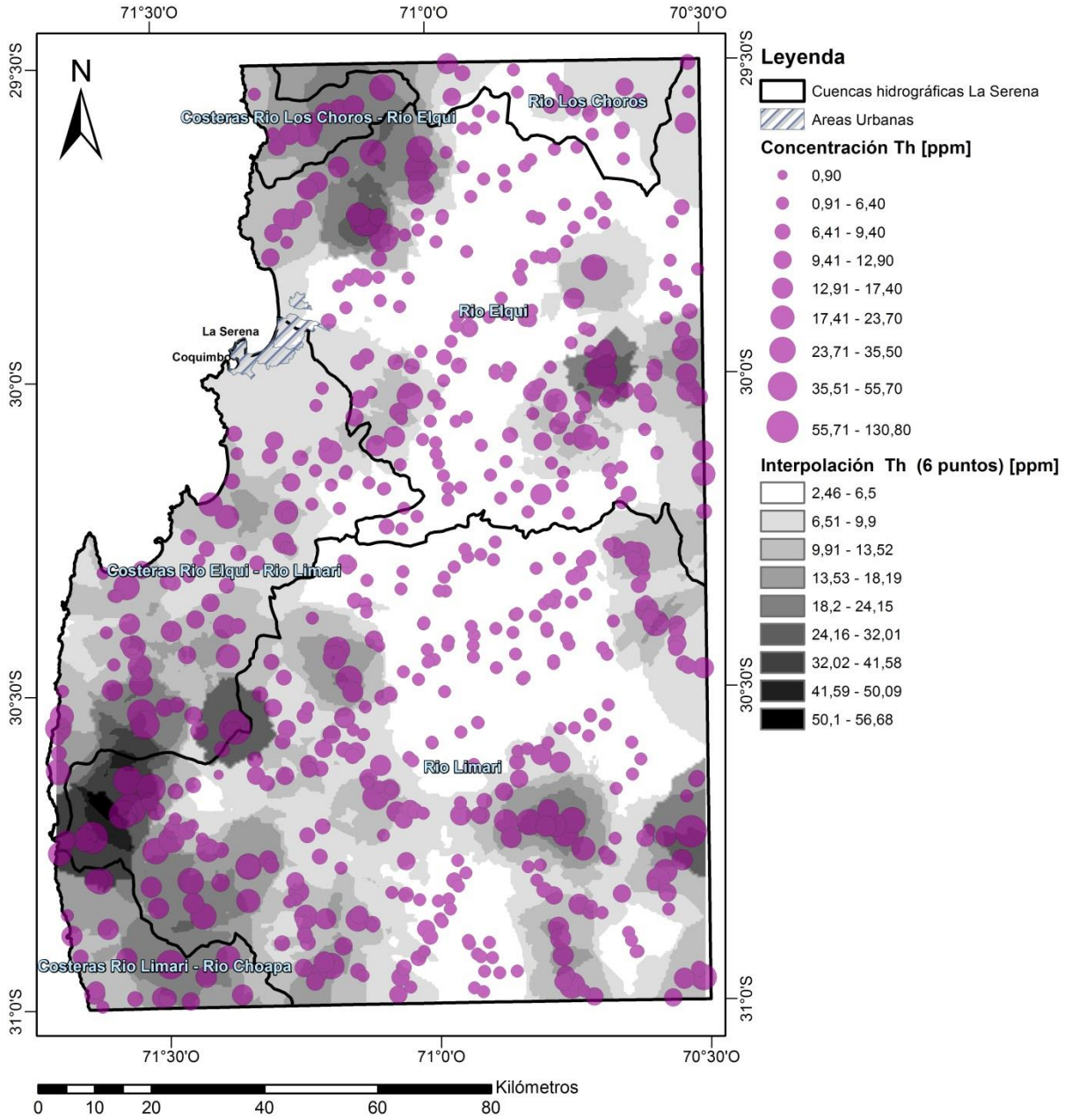
## ANEXO I.5



# ANEXO I.6

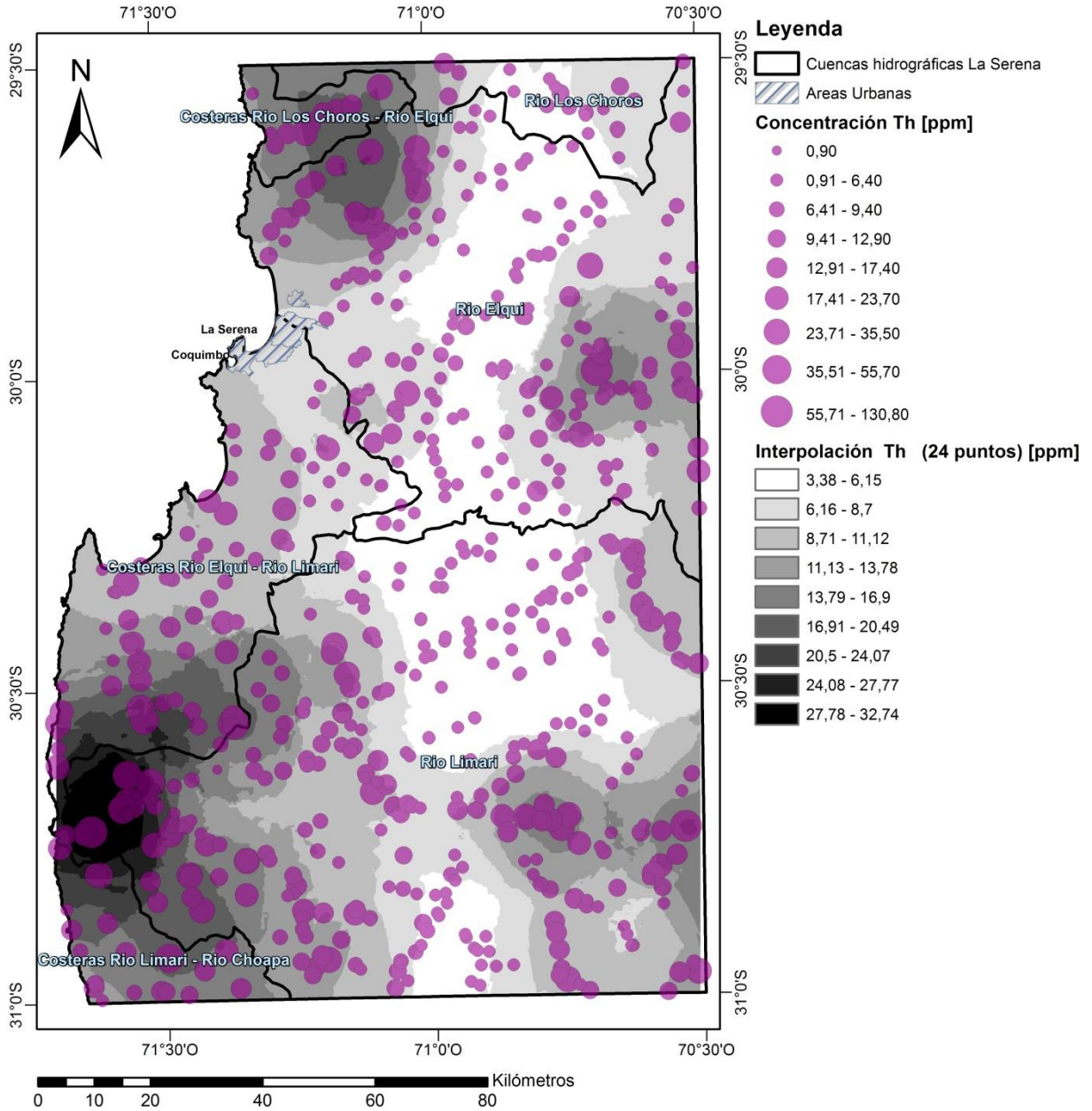


# ANEXO I.7

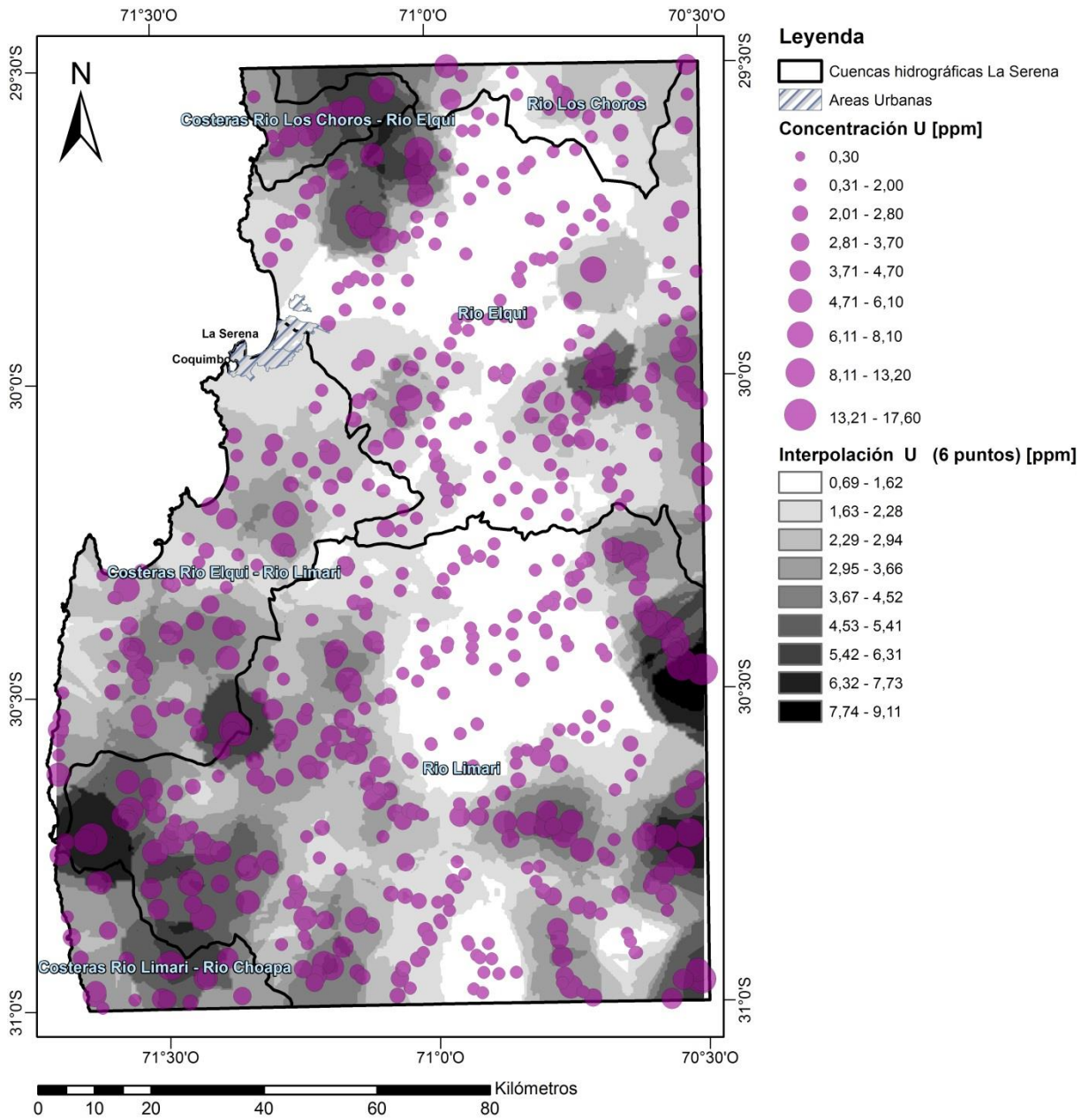




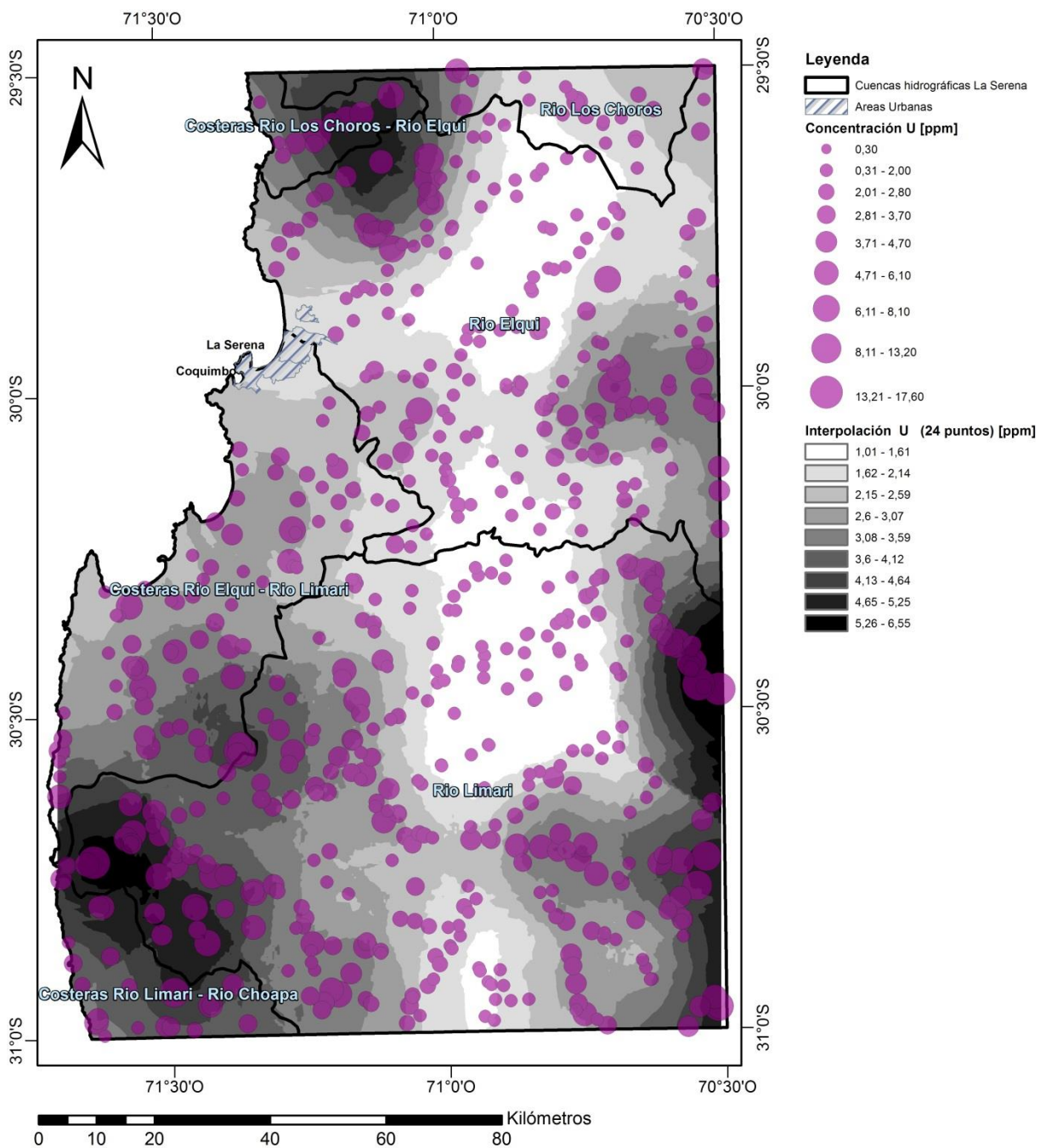
# ANEXO I.8



## ANEXO I.9

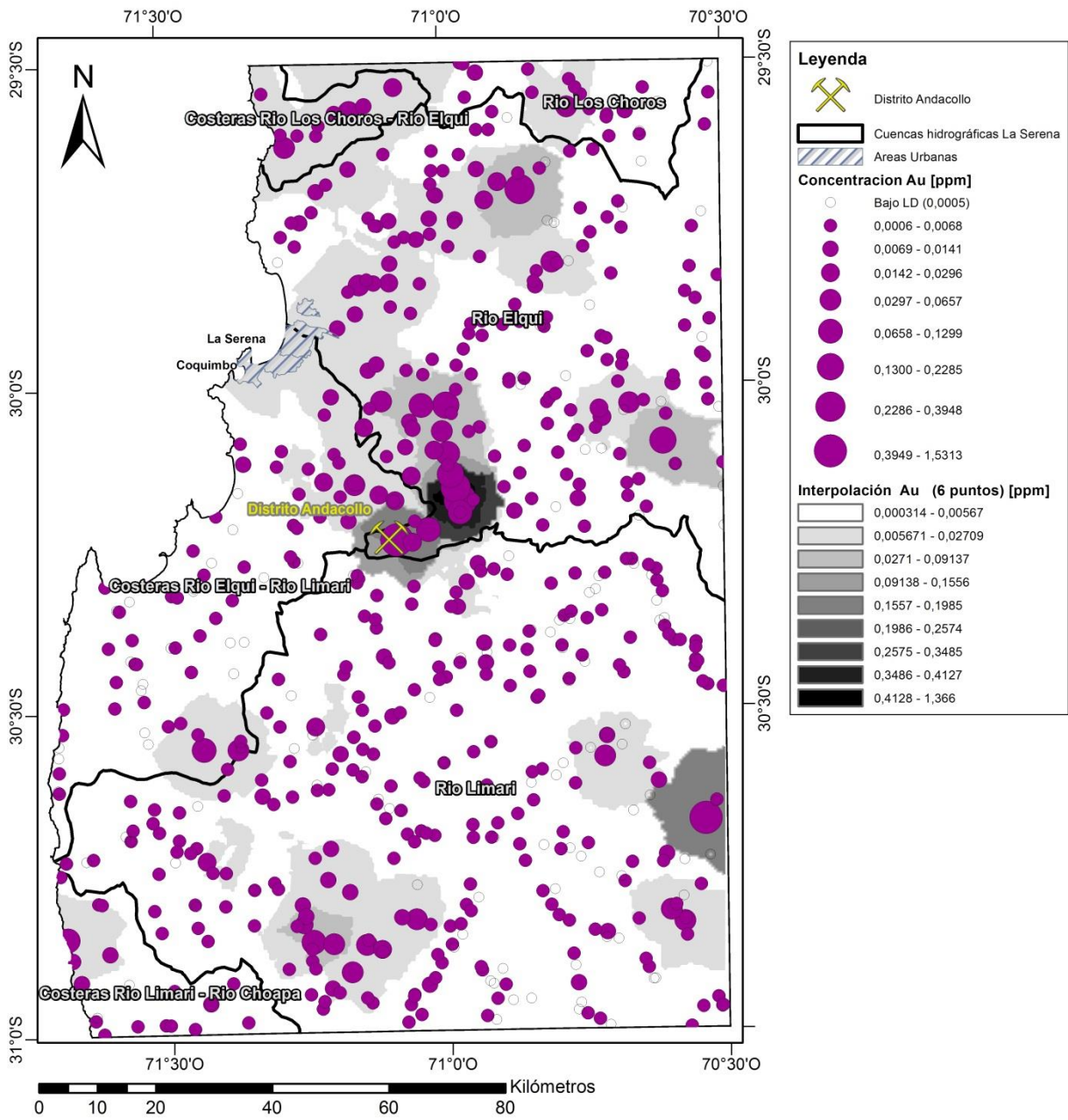


# ANEXO I.10



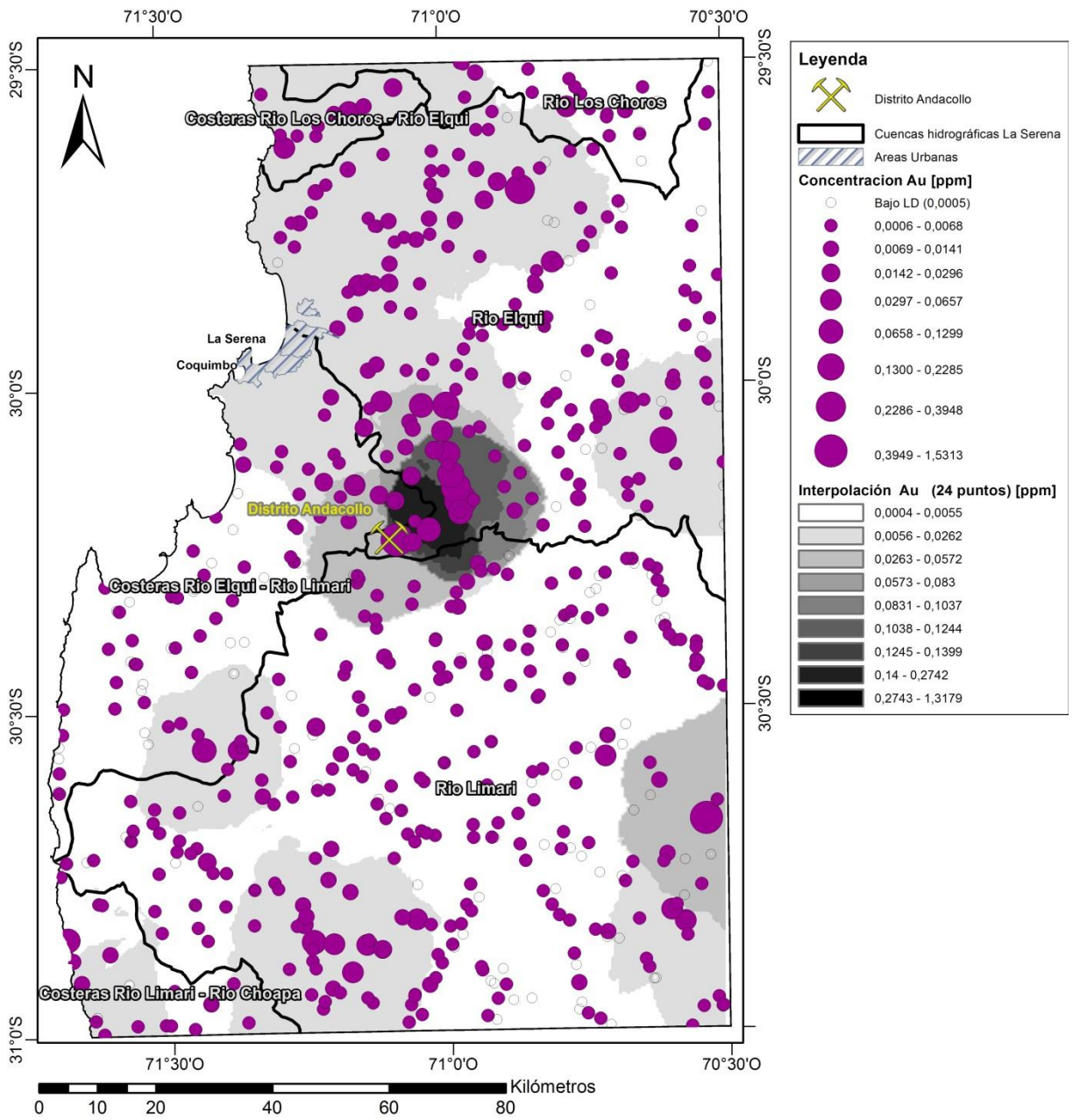
# ANEXO I.11

## Concentraciones Au (6 puntos de estimación)

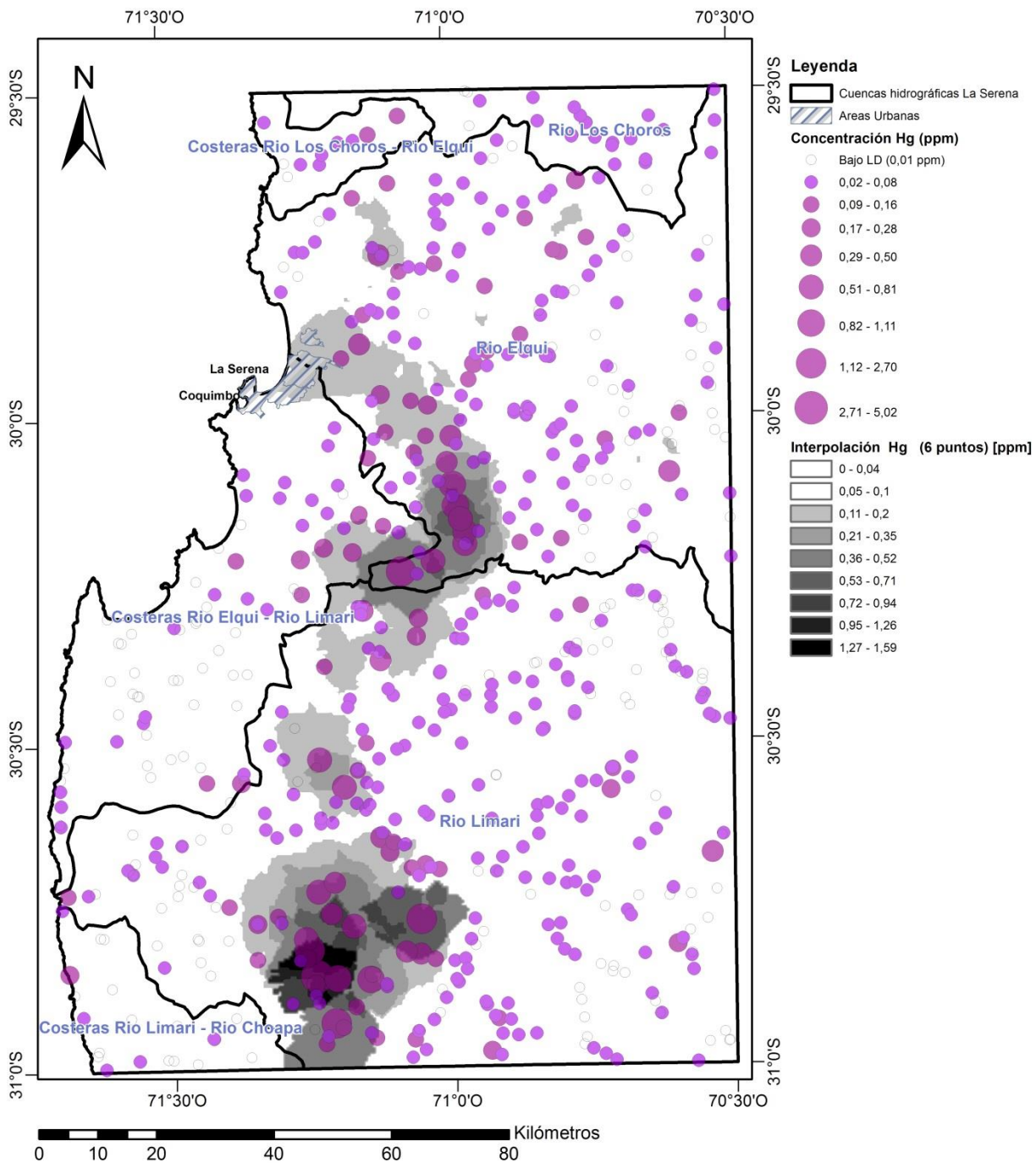


# ANEXO I.12

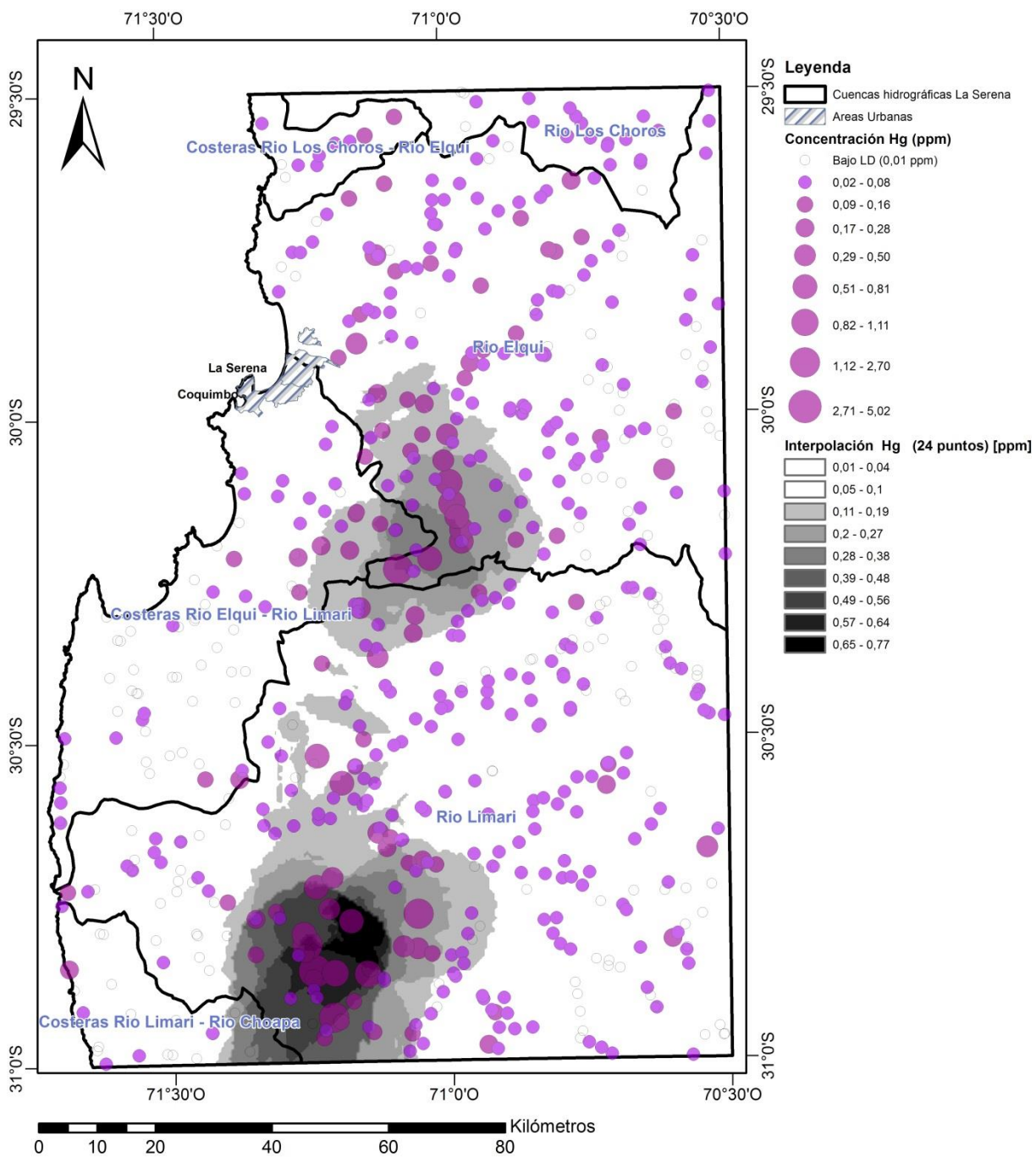
## Concentraciones Au (24 puntos de estimación)



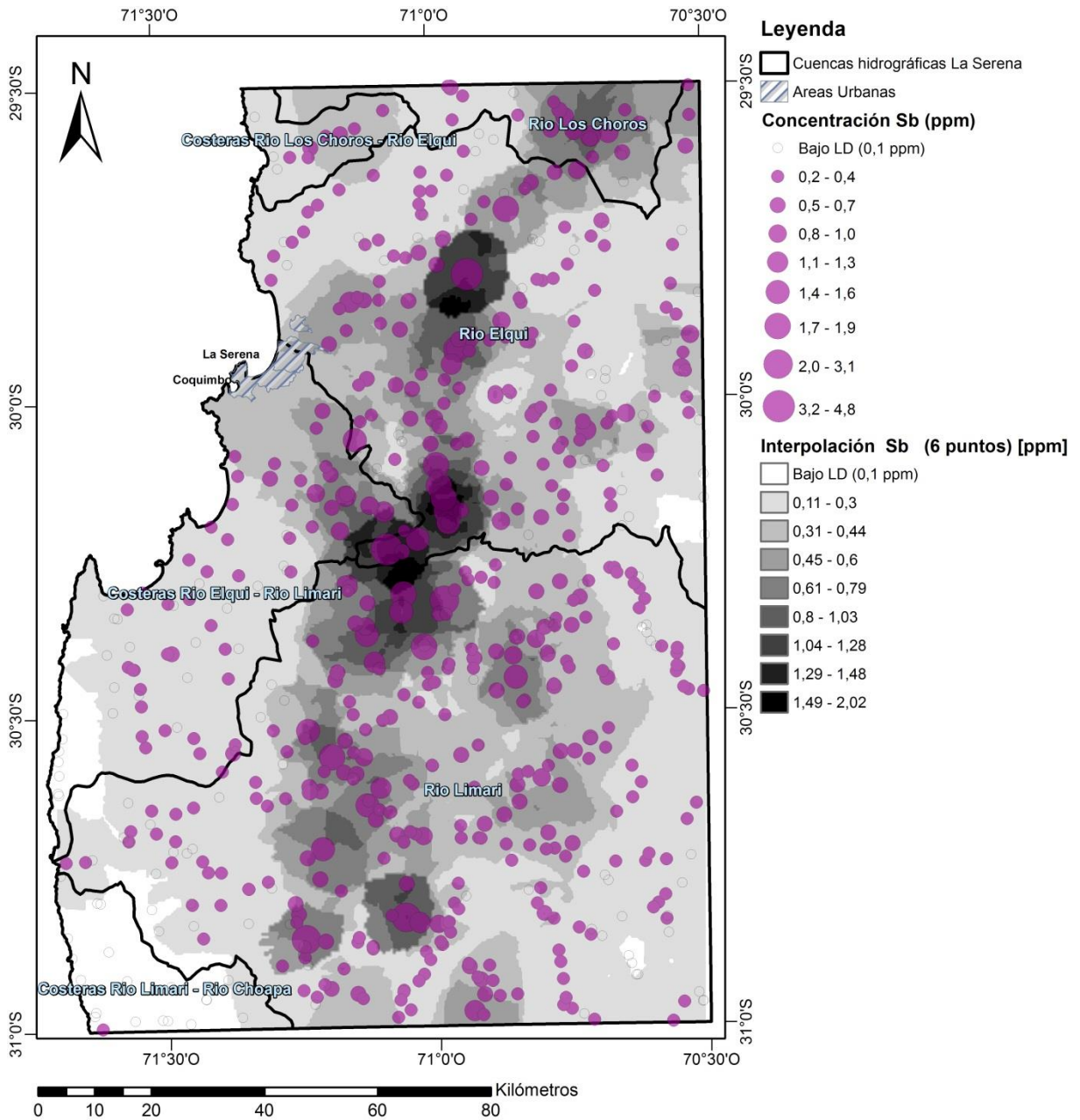
# ANEXO I.13



# ANEXO I.14

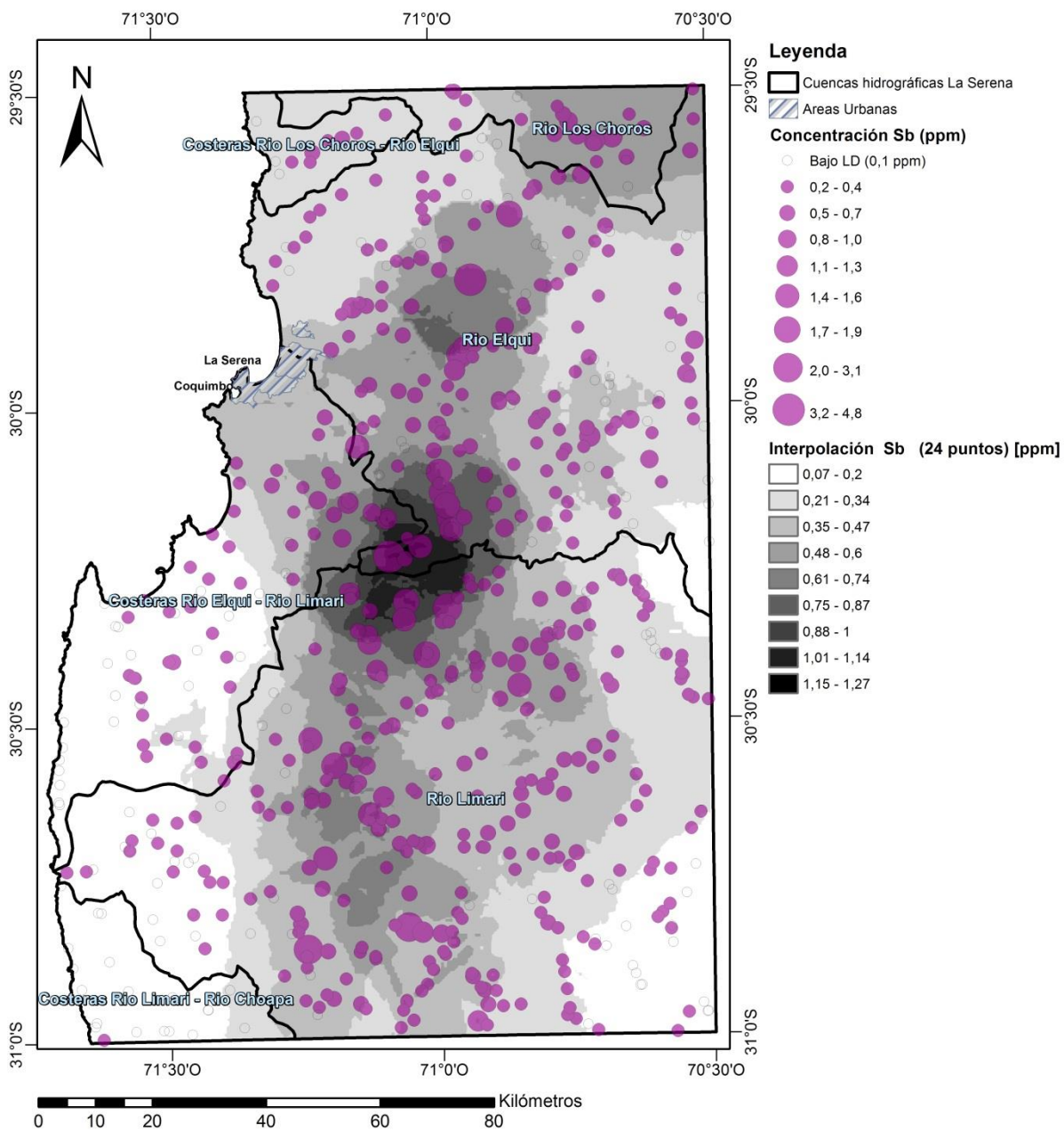


# ANEXO I.15

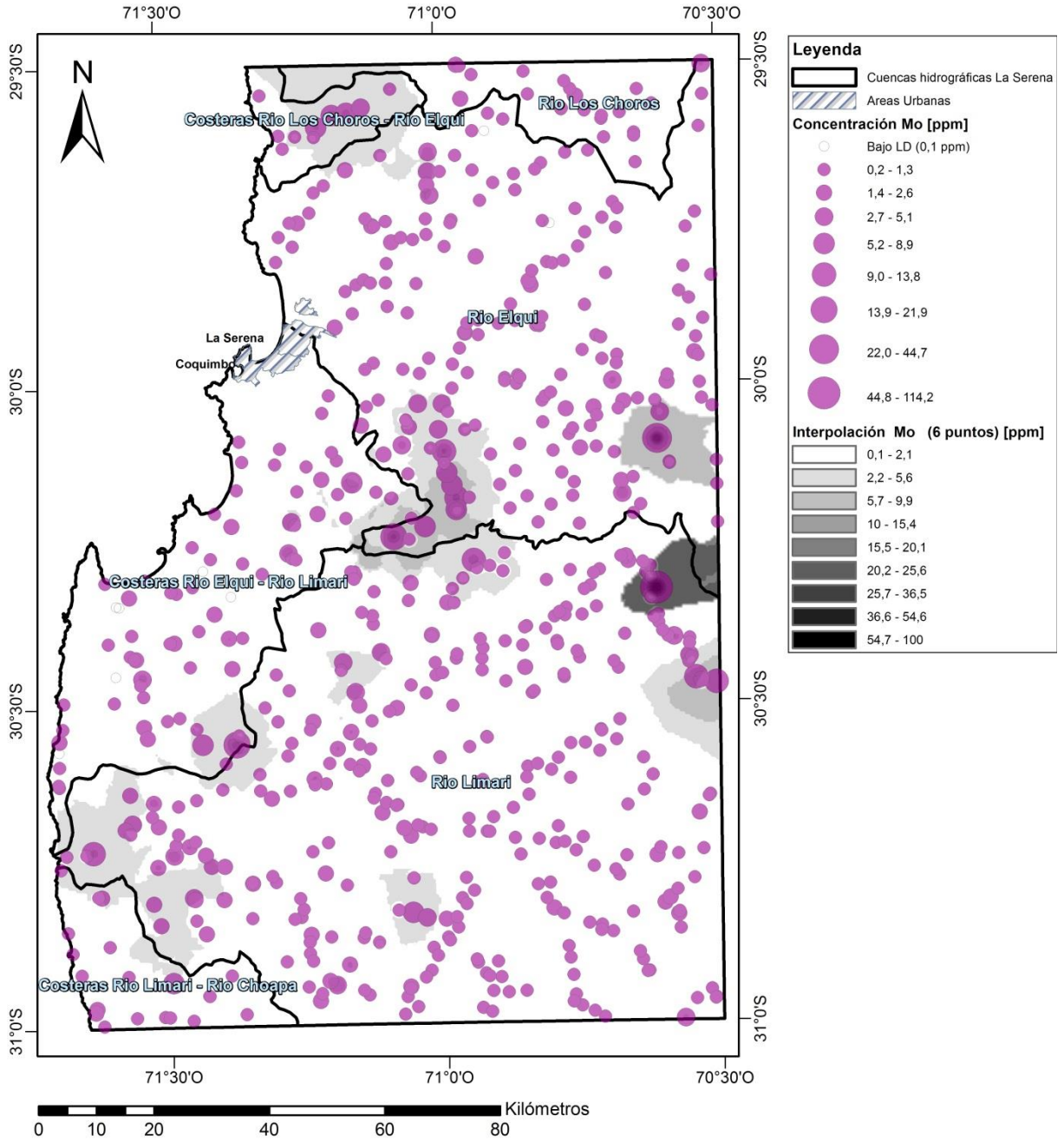




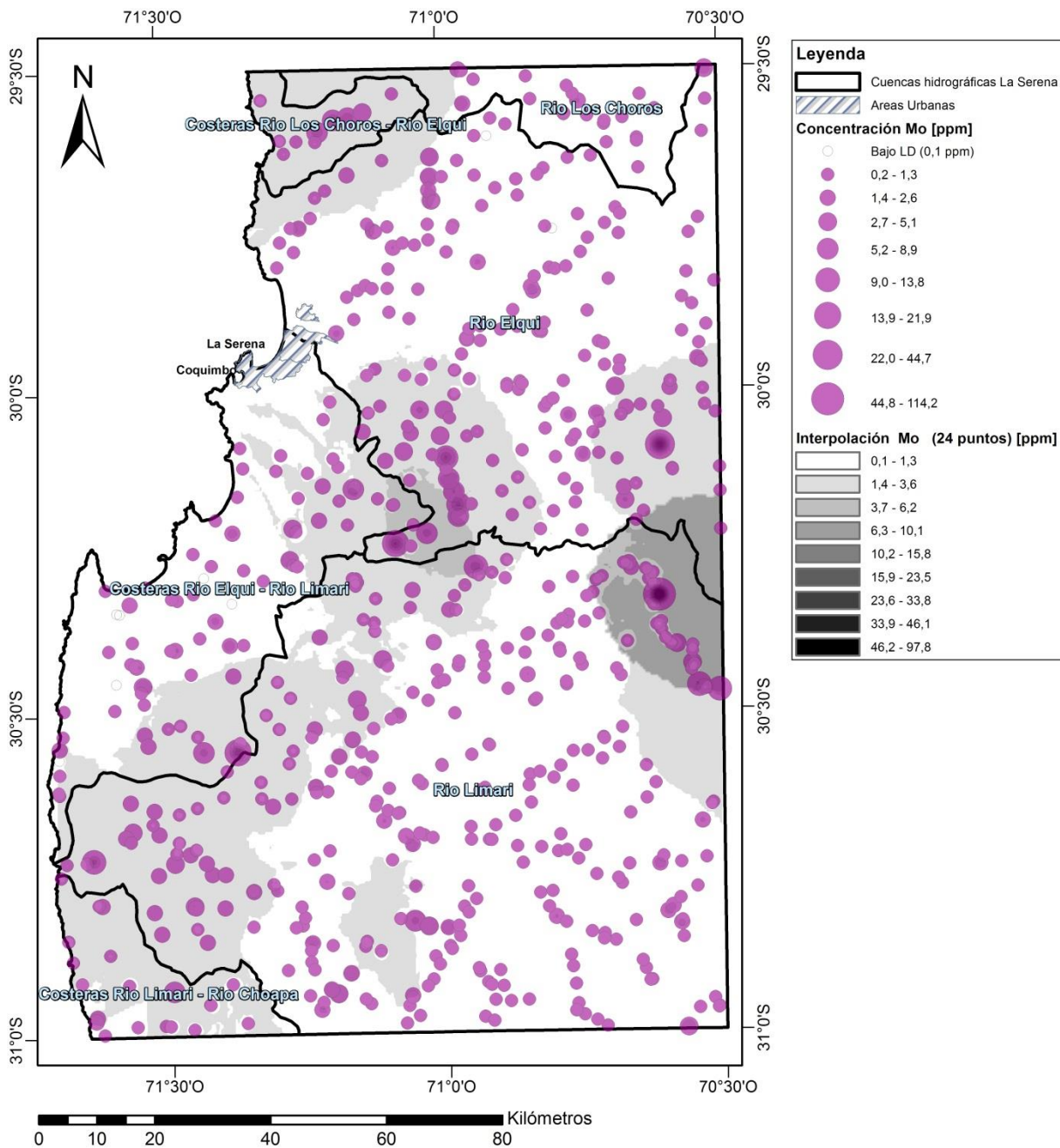
## ANEXO I.16



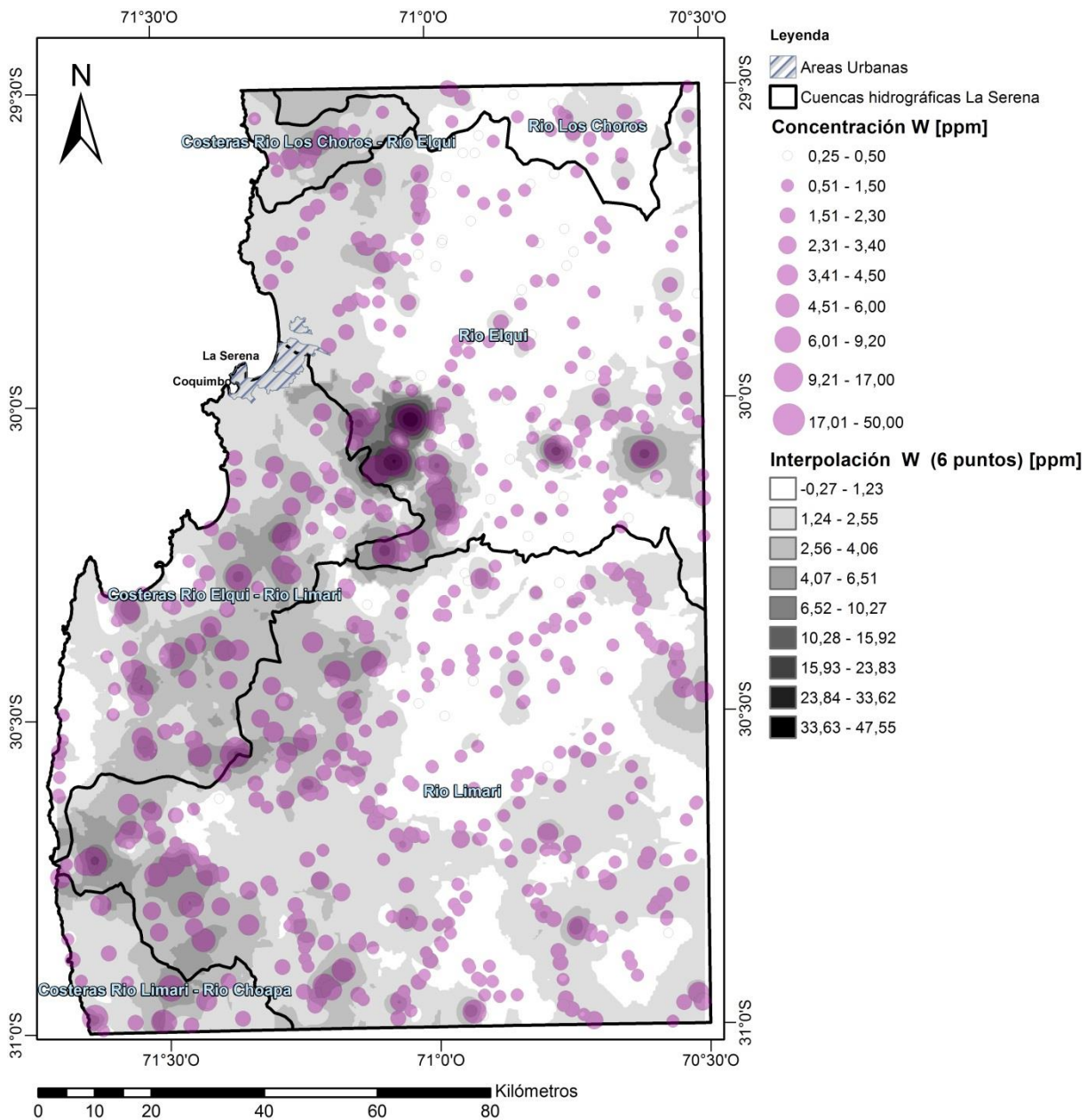
# ANEXO I.17



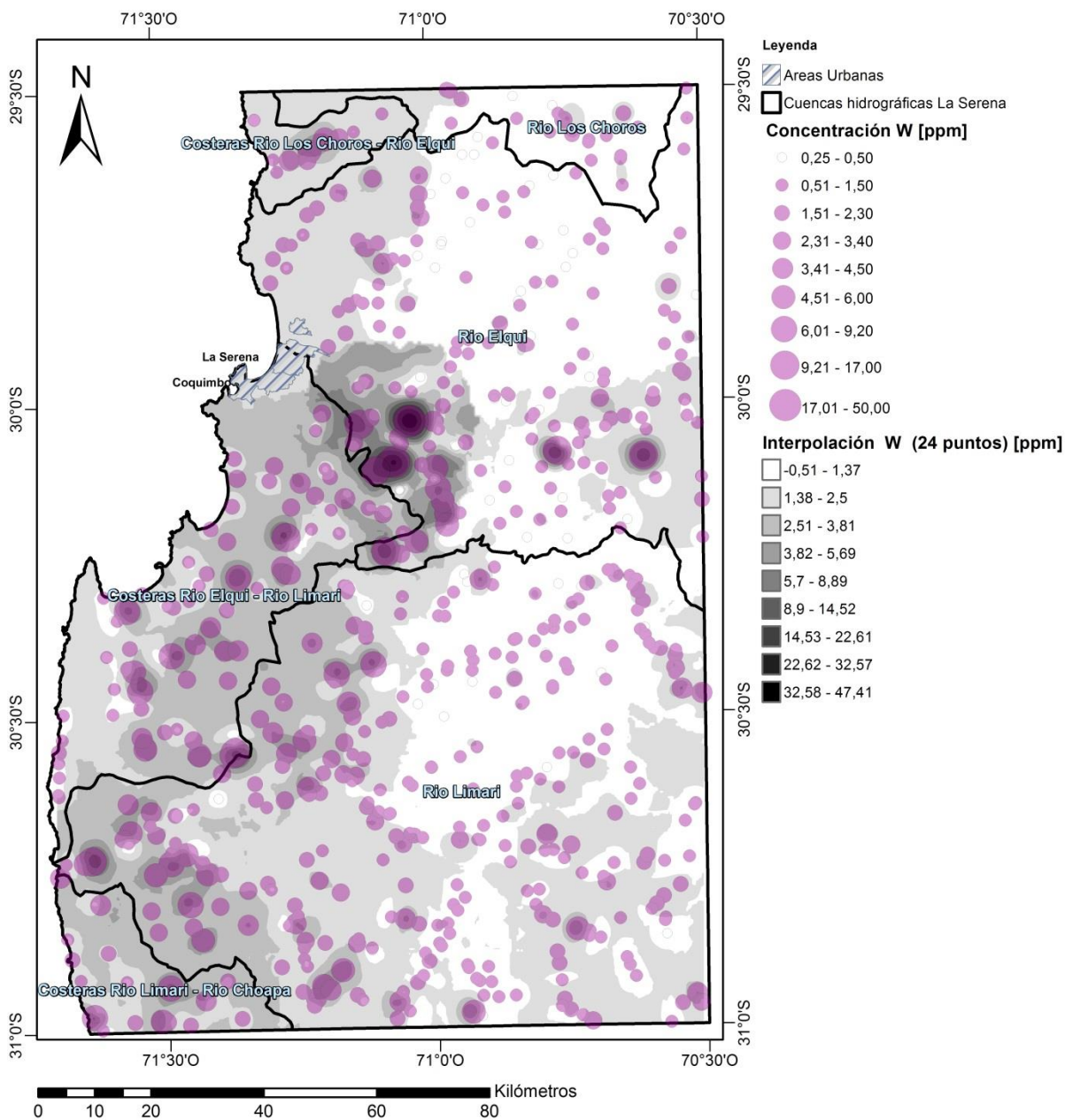
# ANEXO I.18



# ANEXO I.19

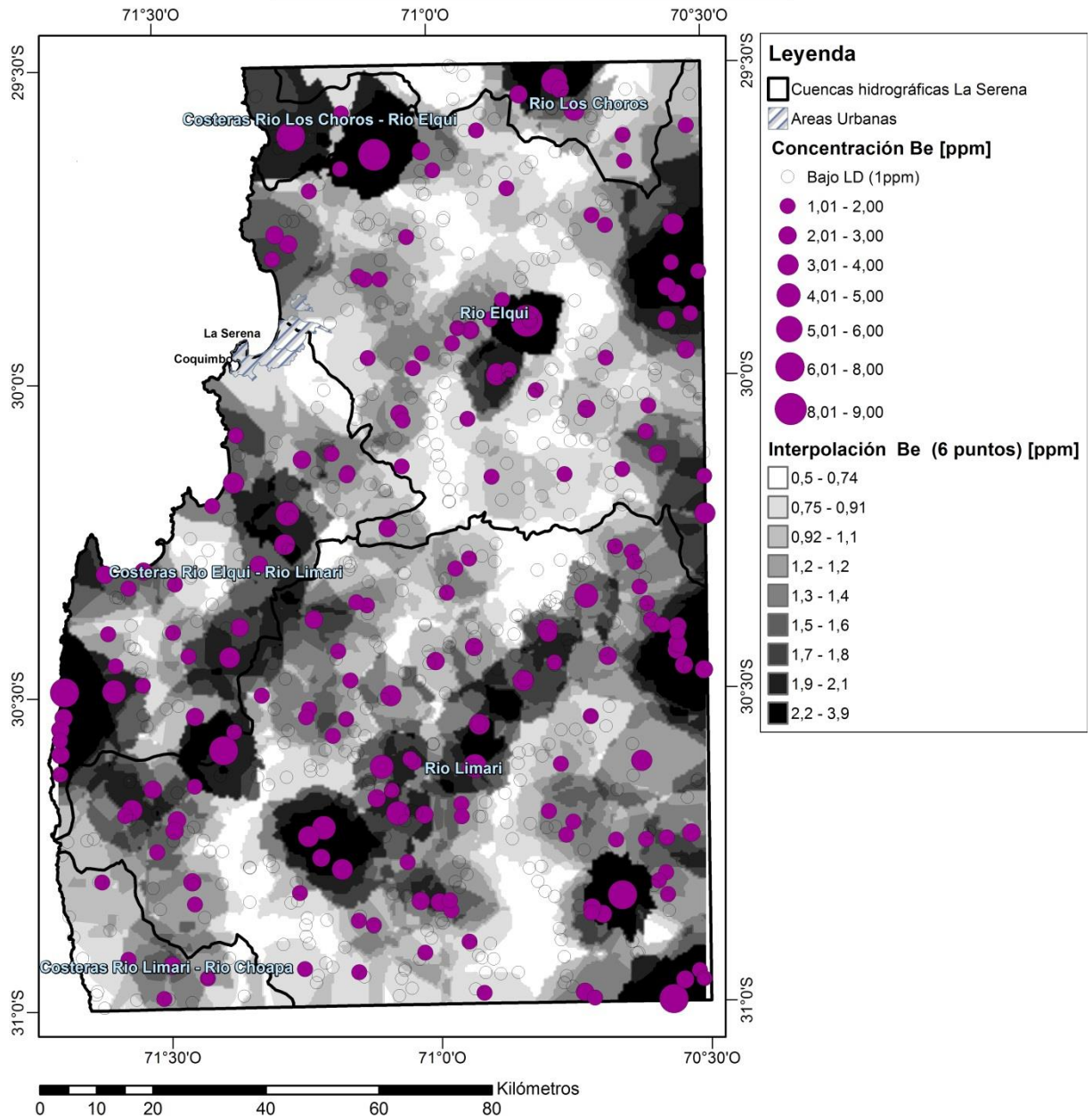


## ANEXO I.20



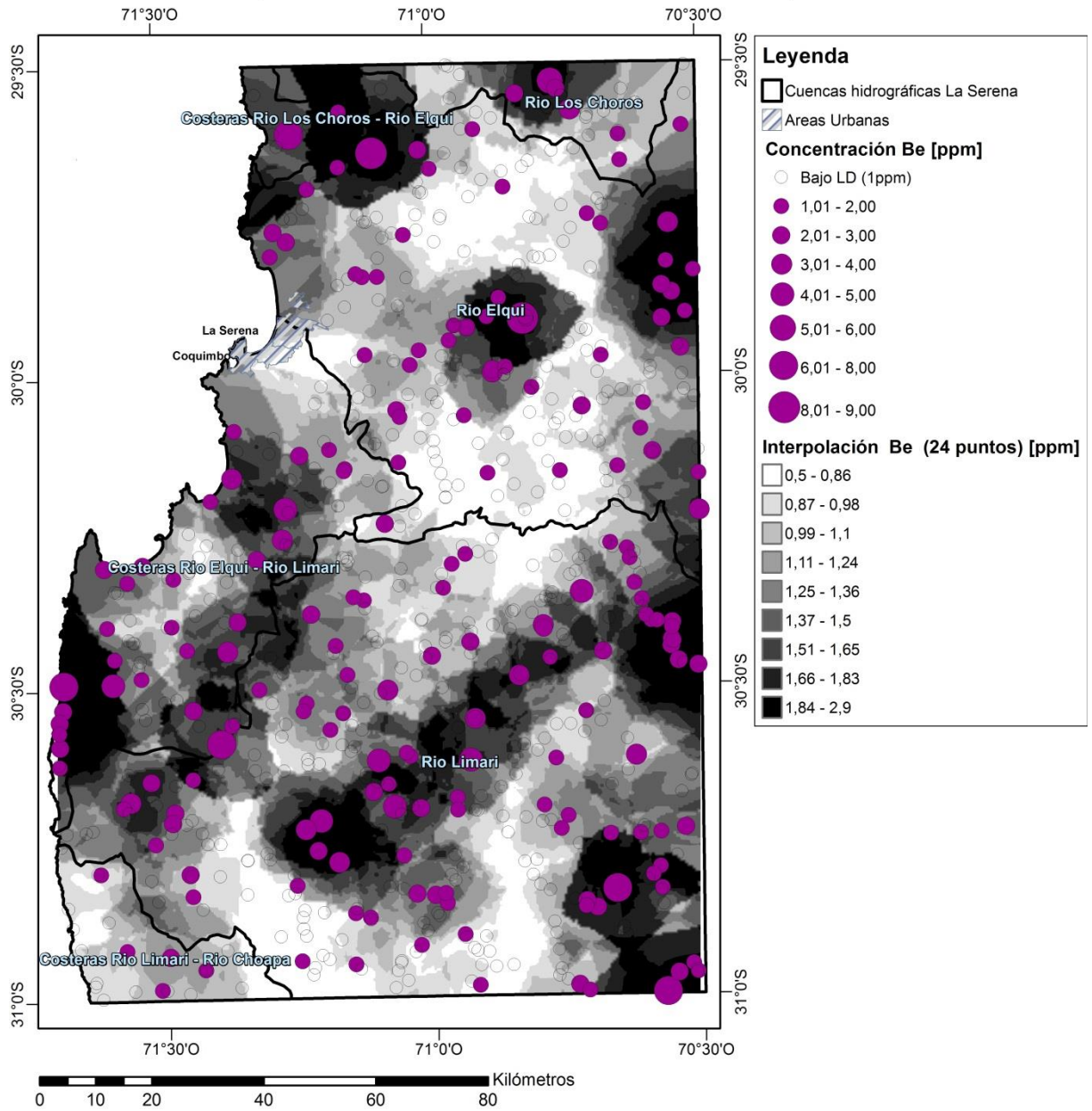
# ANEXO I.21

## Concentraciones Be (6 puntos de estimación)



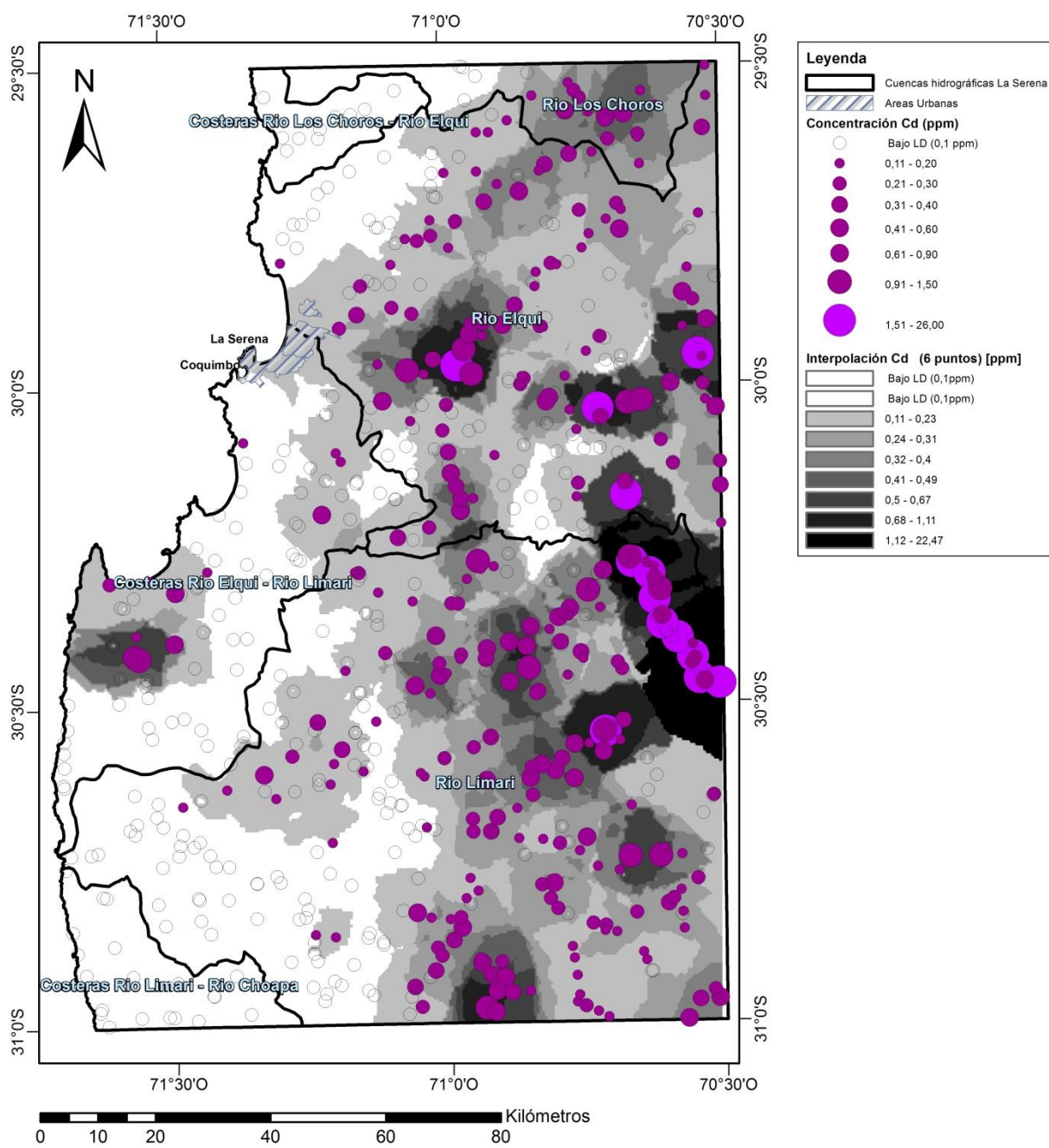
## ANEXO I.22

### Concentraciones Be (24 puntos de estimación)



## ANEXO I.23

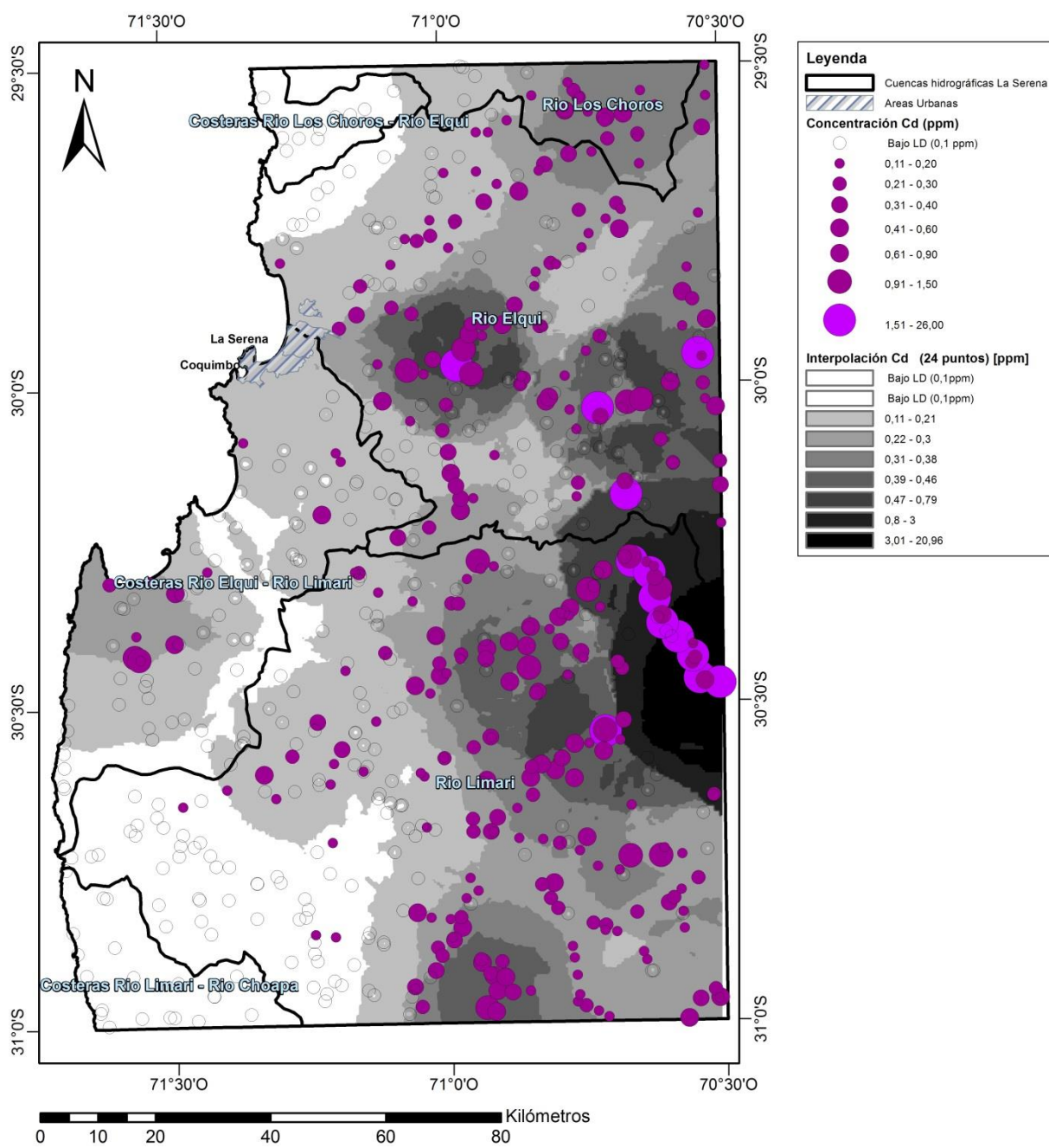
### Concentraciones Cd (6 puntos de interpolación)



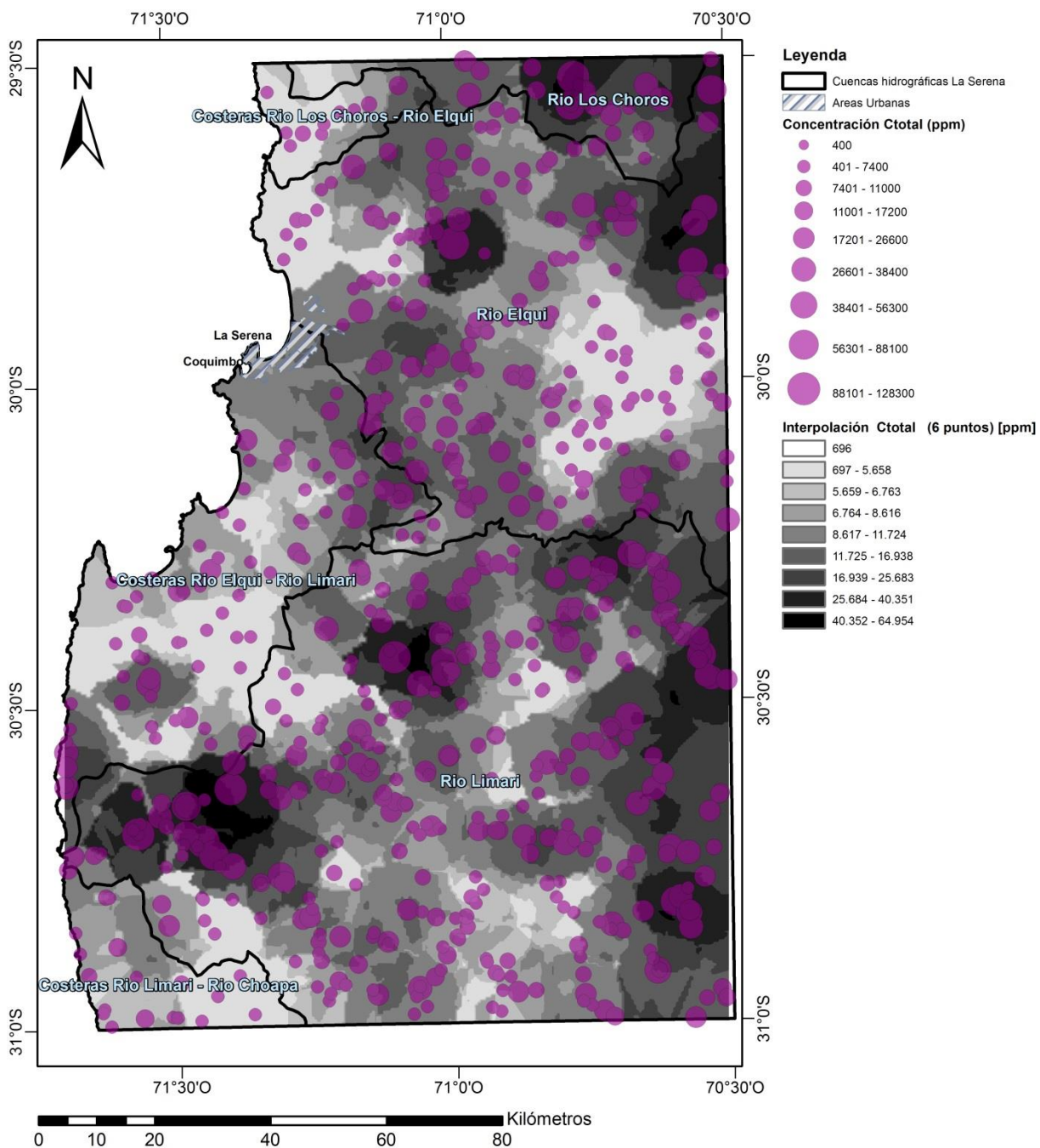


## ANEXO I.24

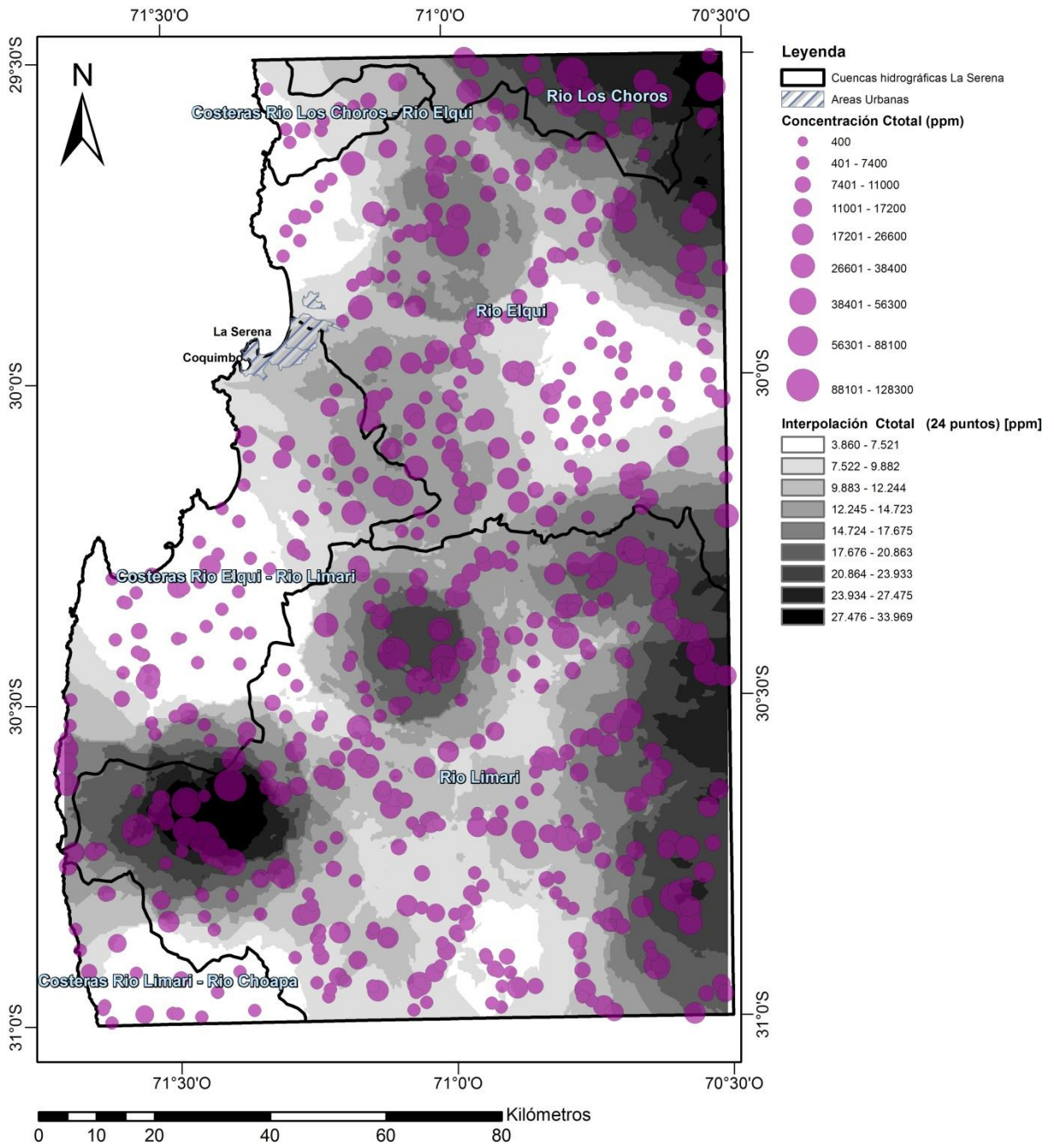
### Concentraciones Cd (24 puntos de interpolación)



## ANEXO I.25



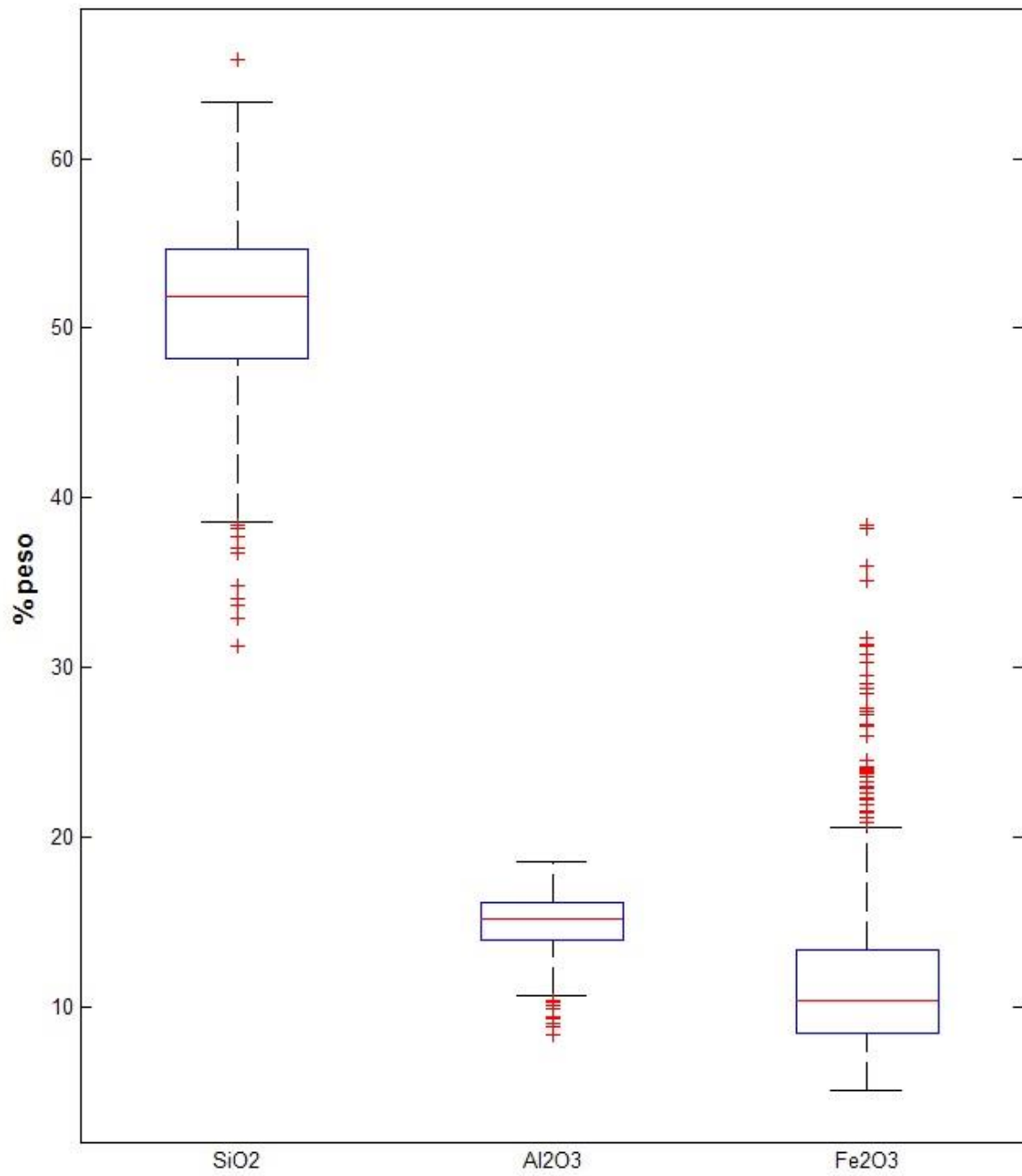
# ANEXO I.26



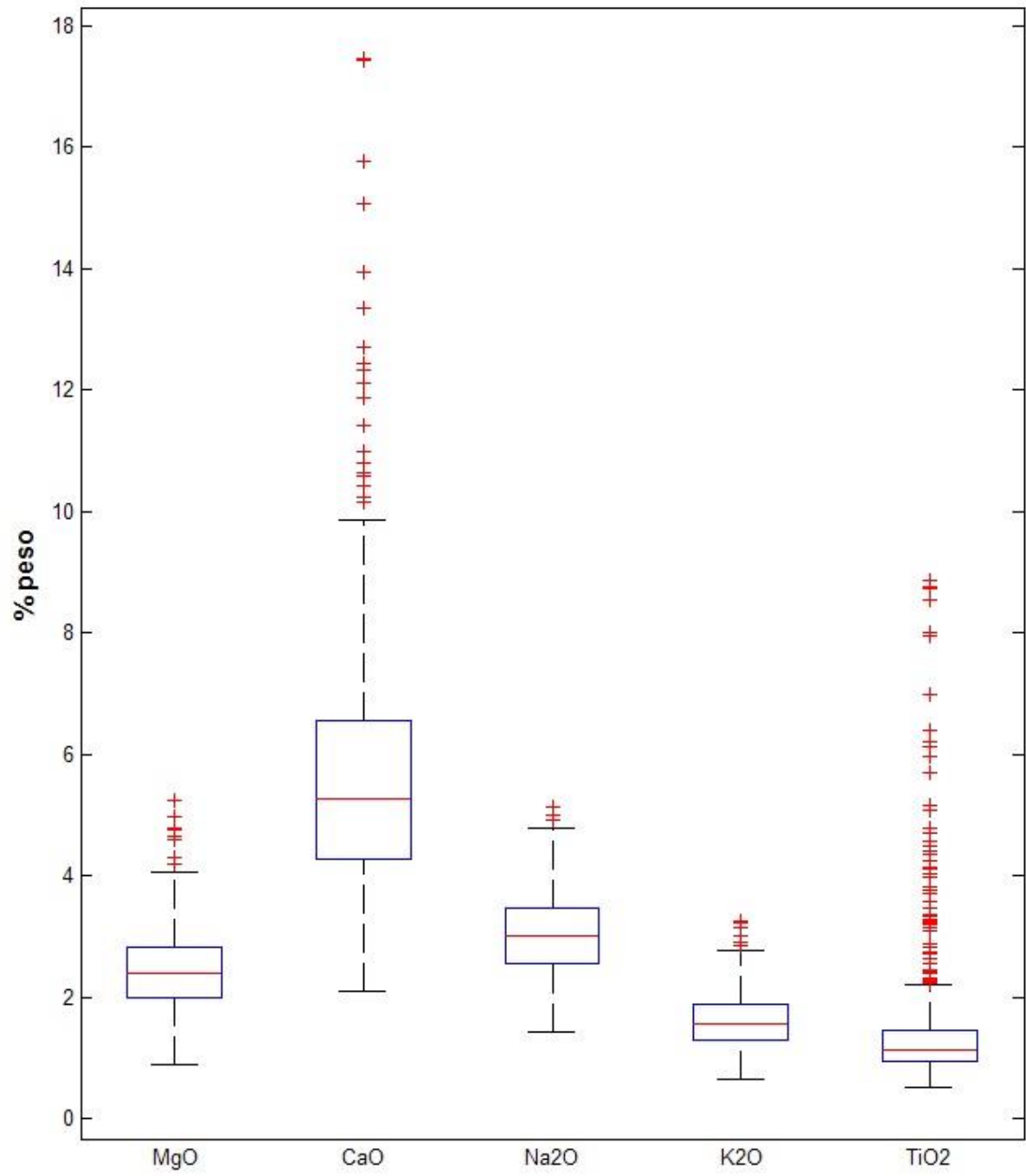
## **ANEXO J**

### **Box Plot por parámetro de Set de Datos A**

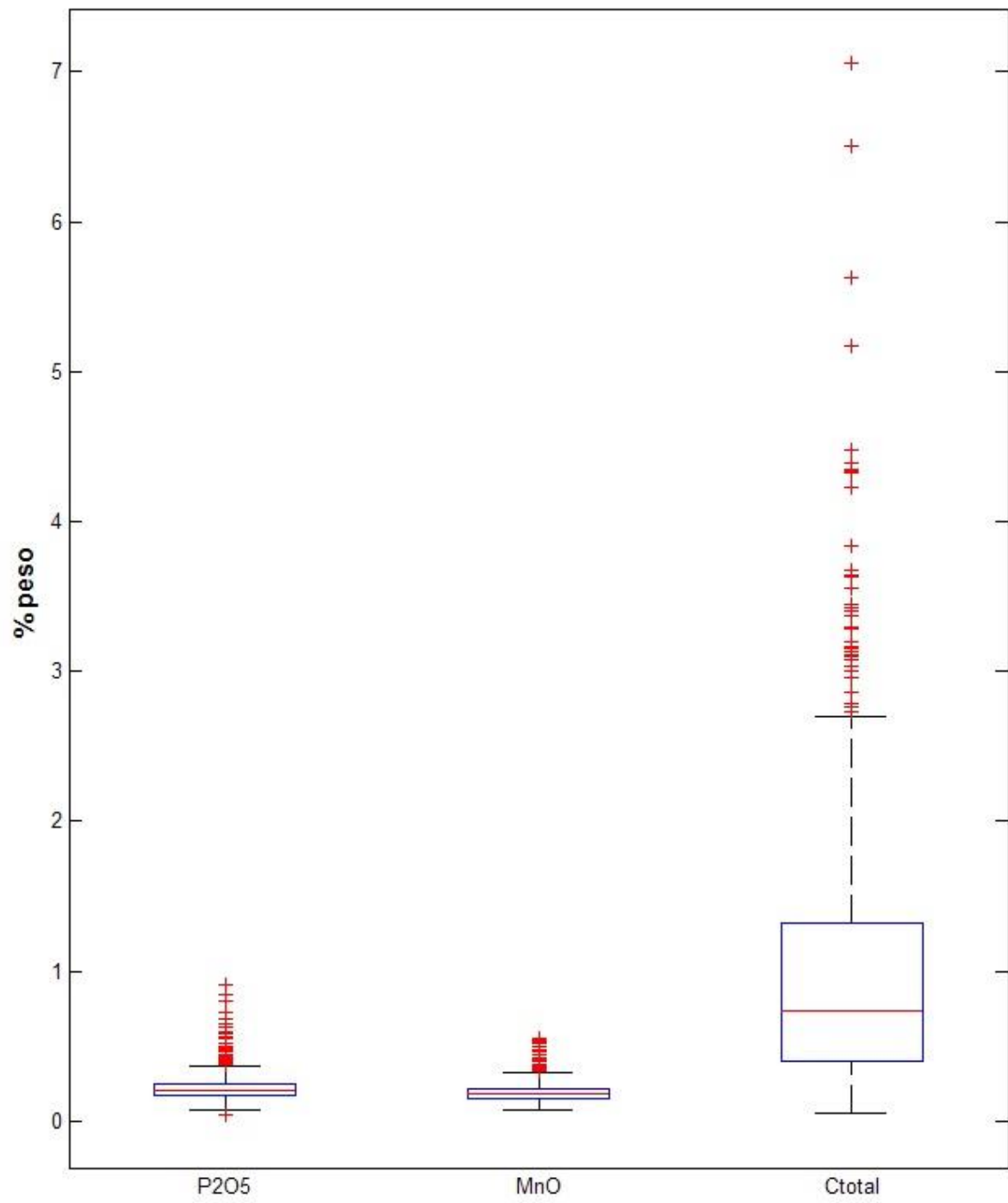
## ANEXO J.1



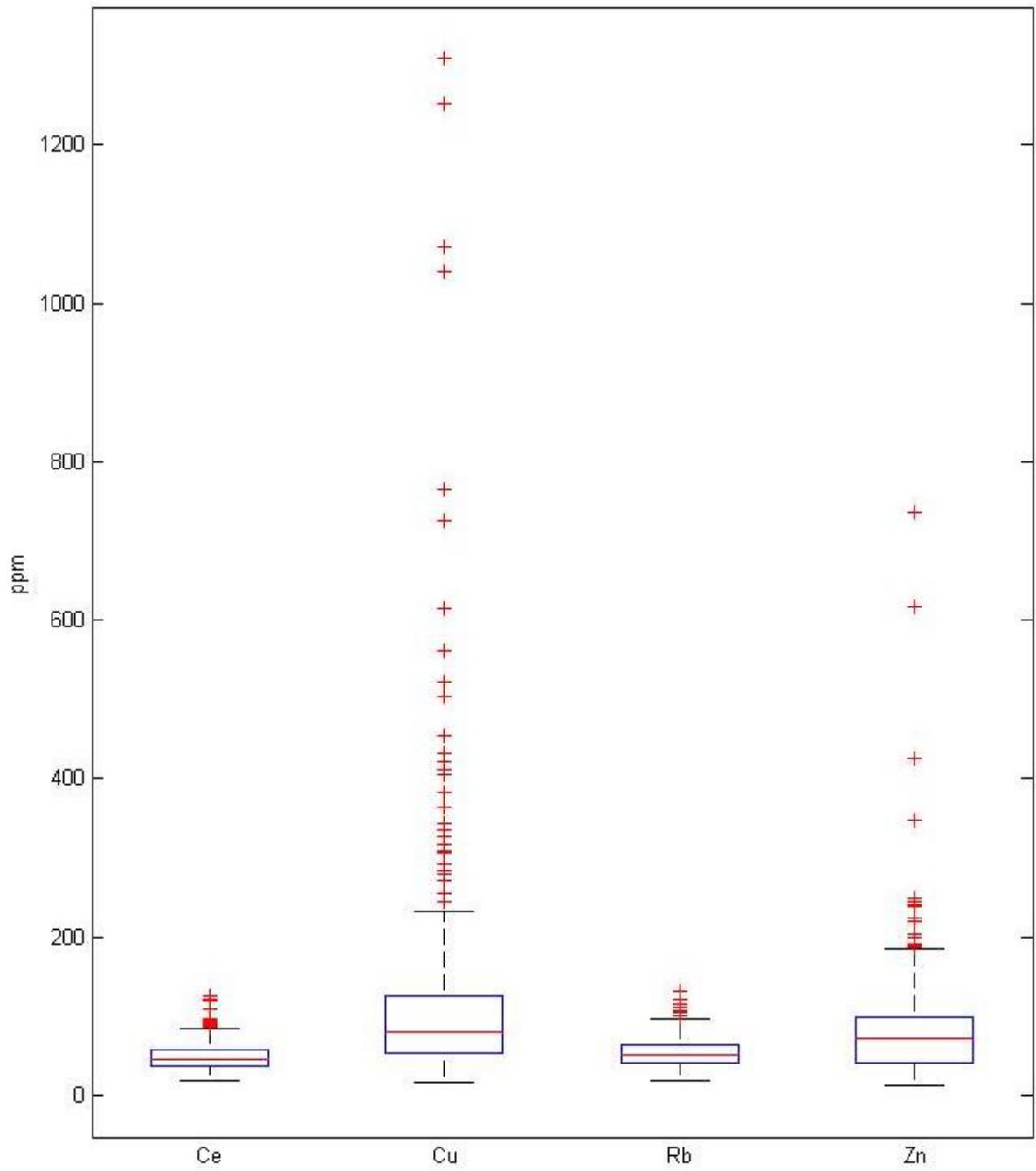
## ANEXO J.2



### ANEXO J.3

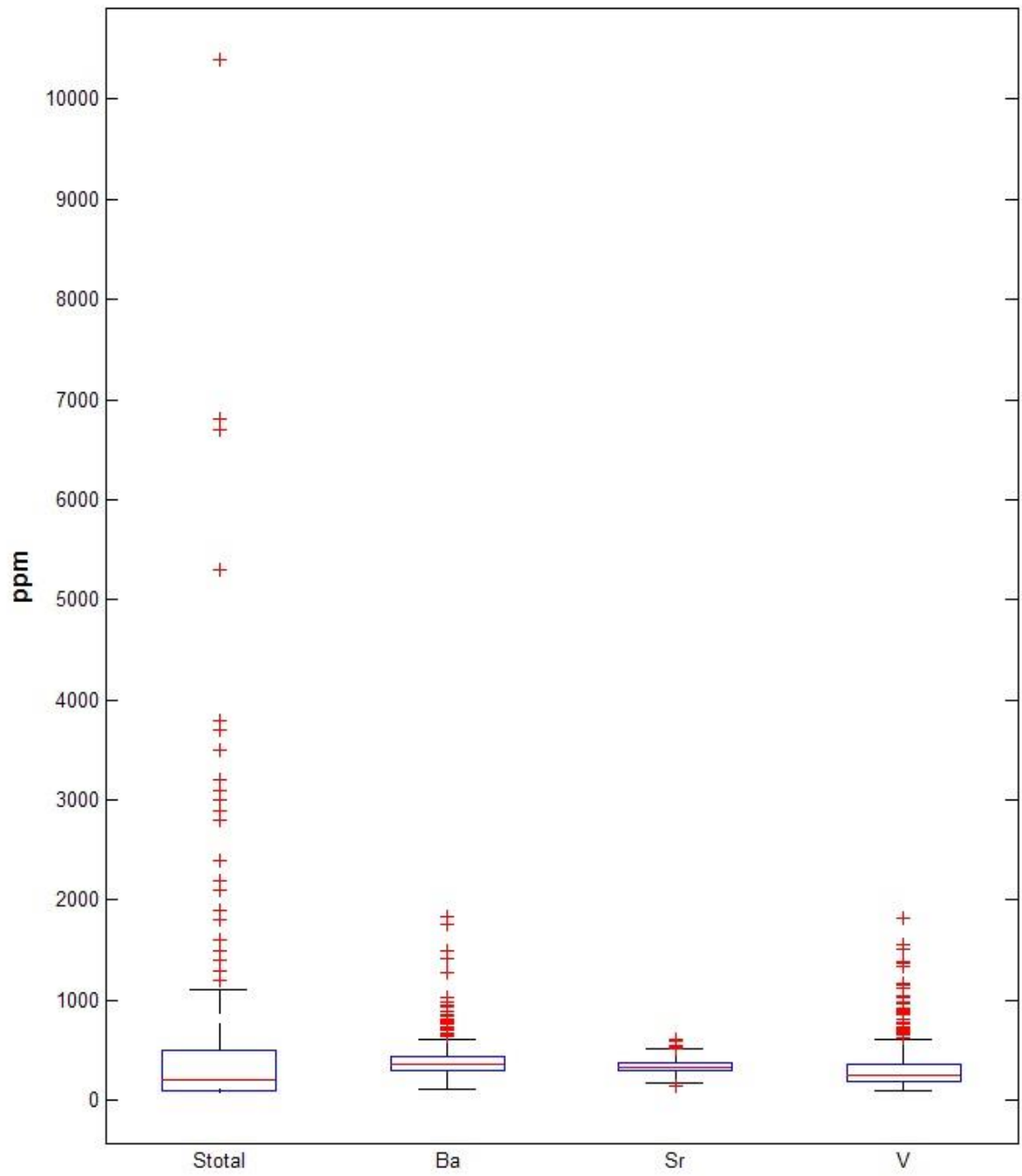


## ANEXO J.4

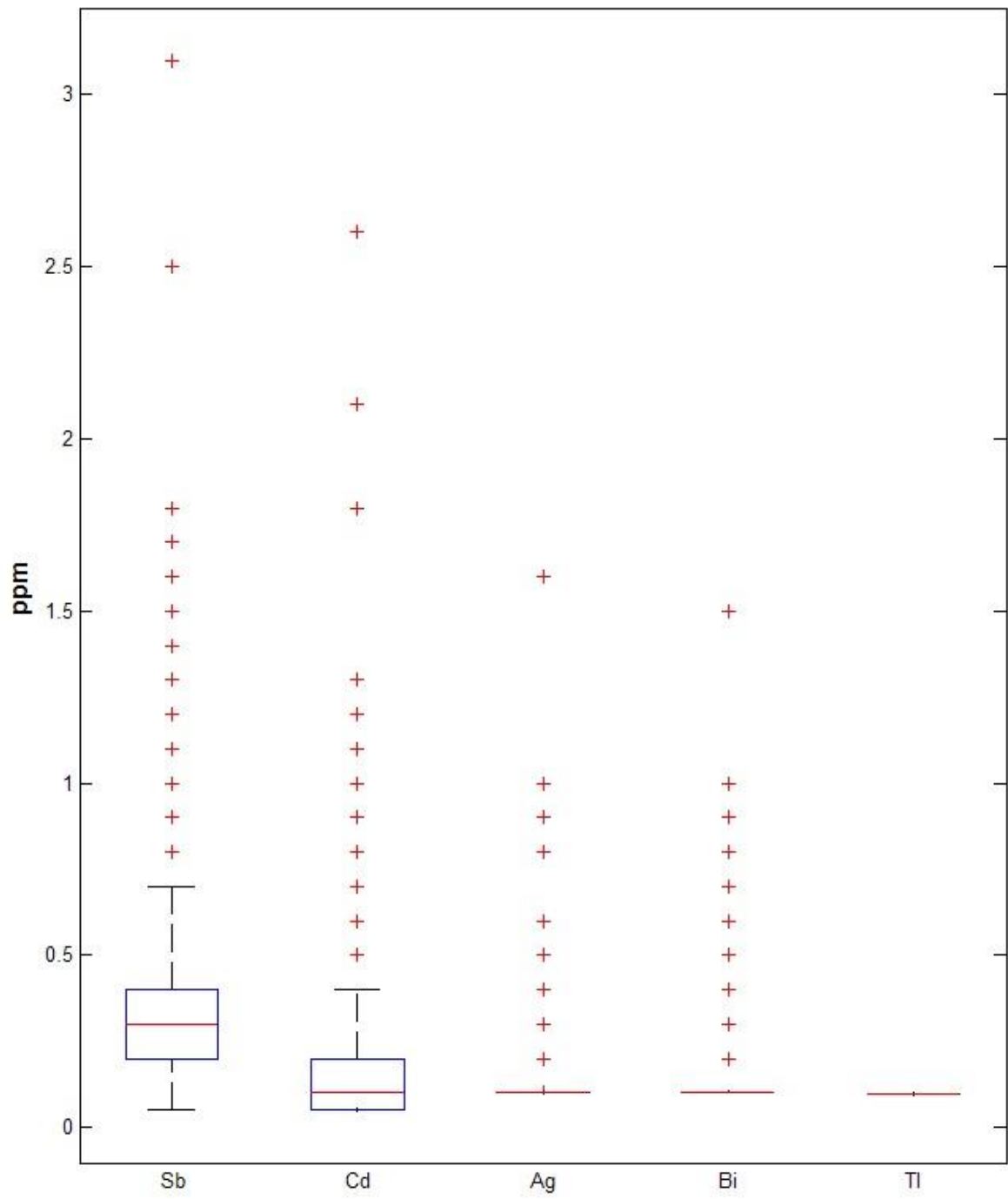




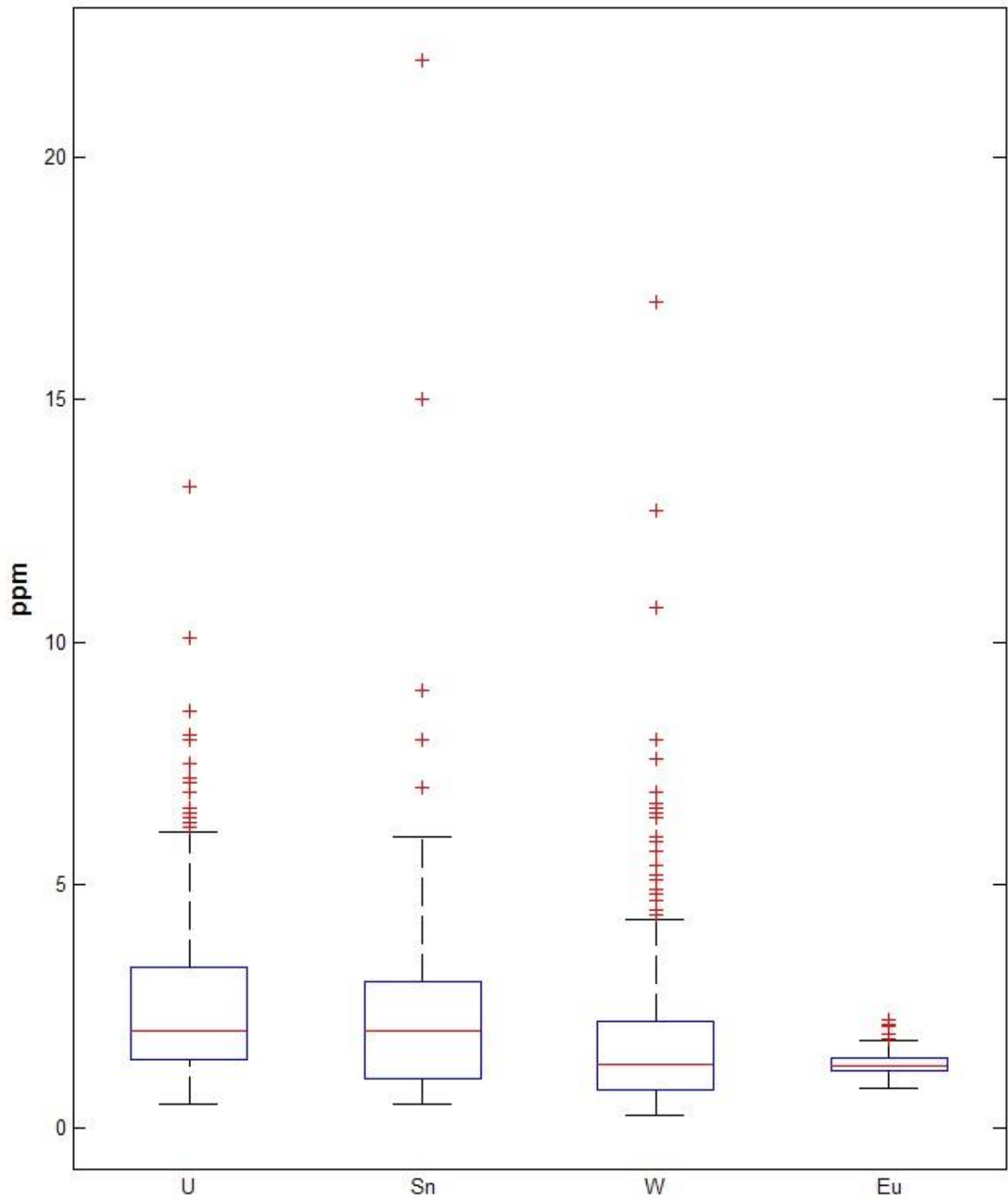
## ANEXO J.5



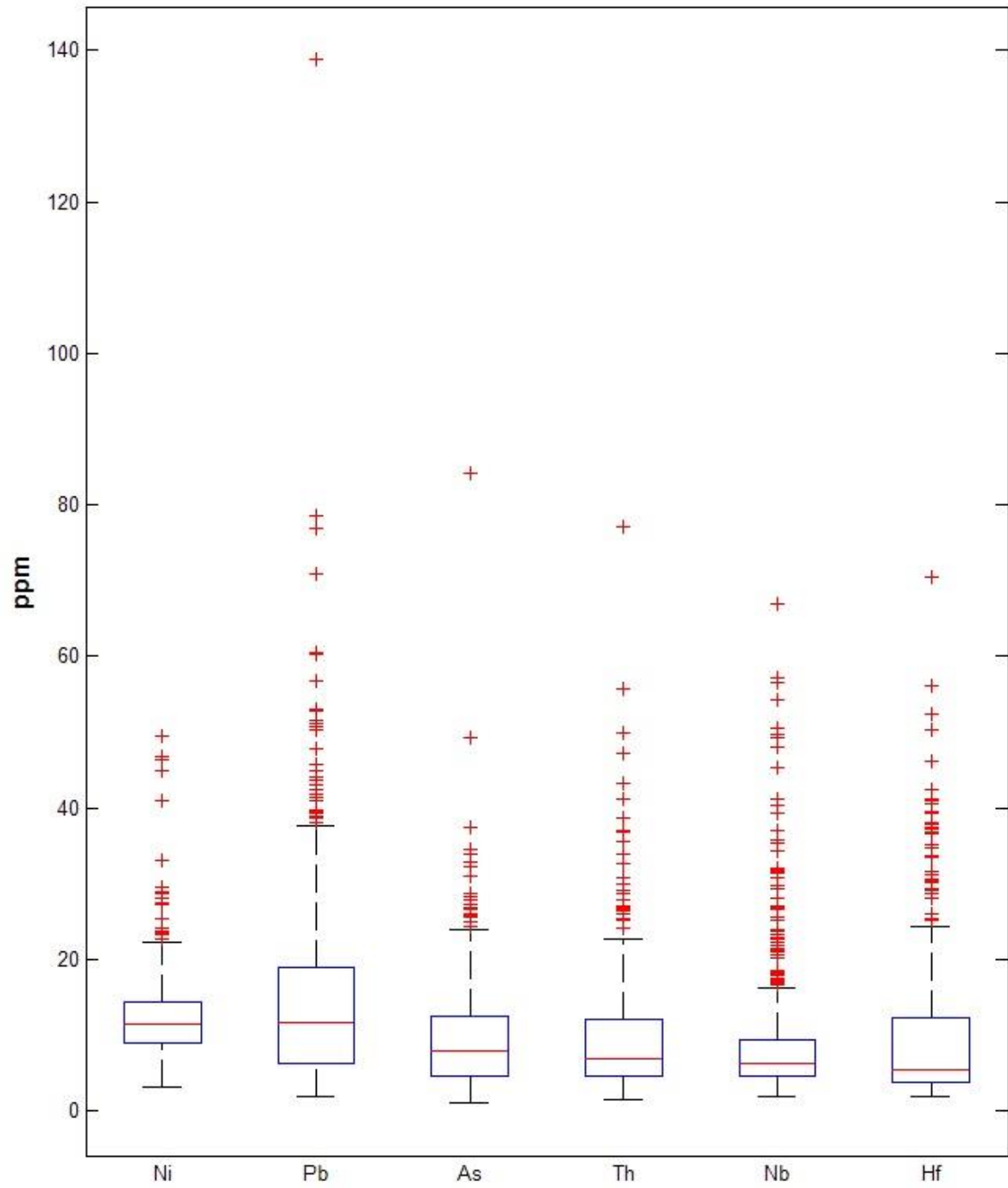
## ANEXO J.6



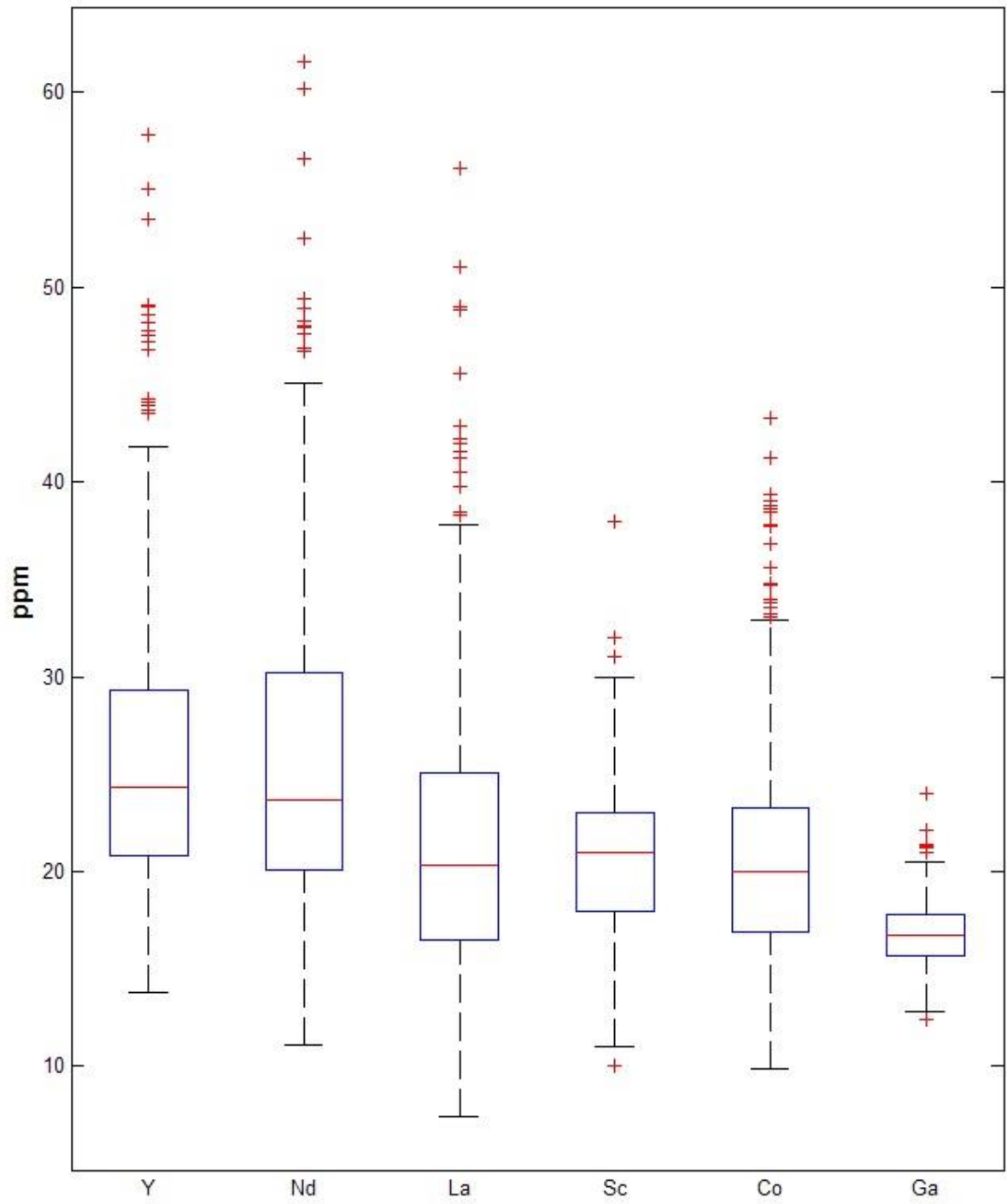
**ANEXO J.7**



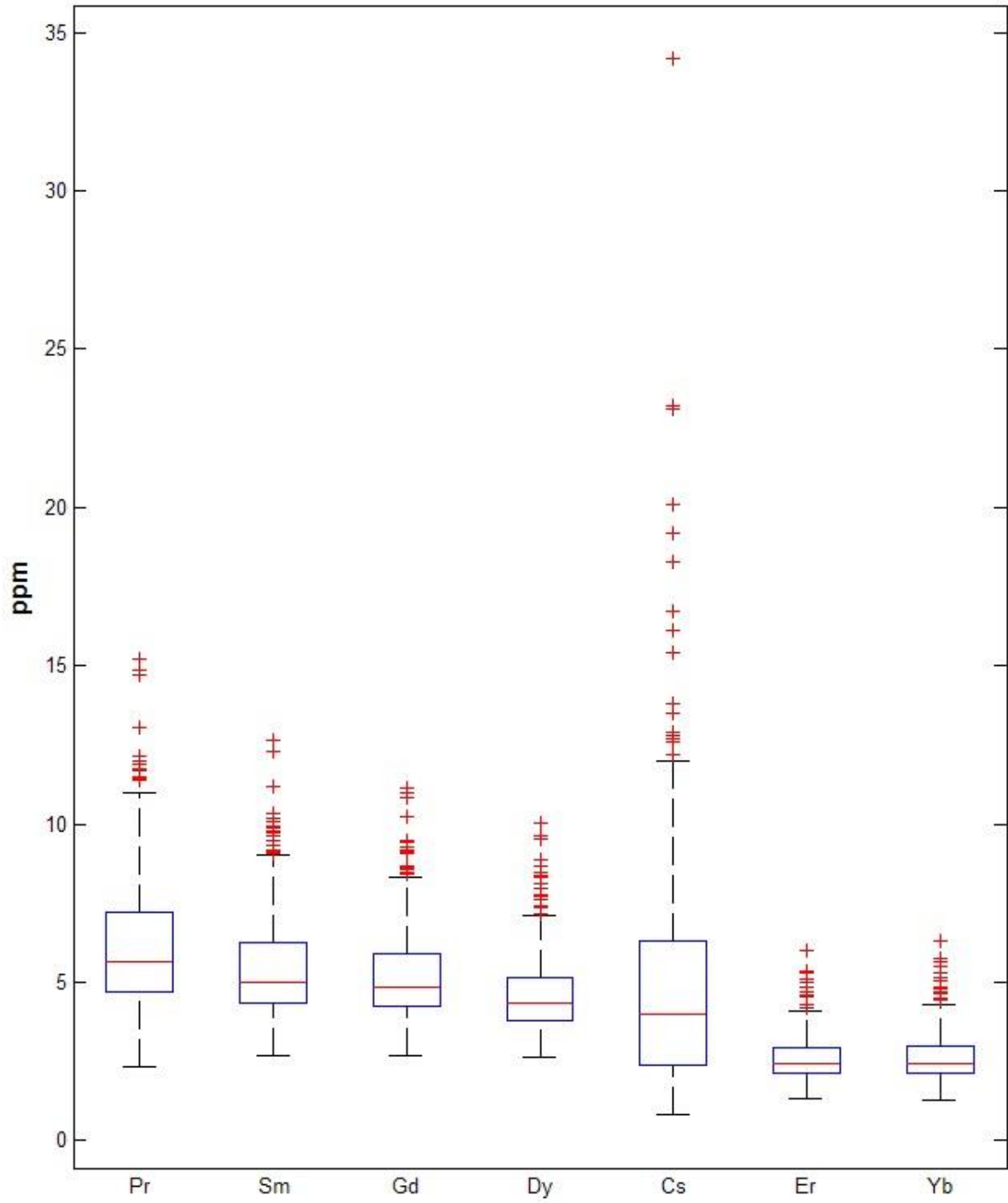
## ANEXO J.8



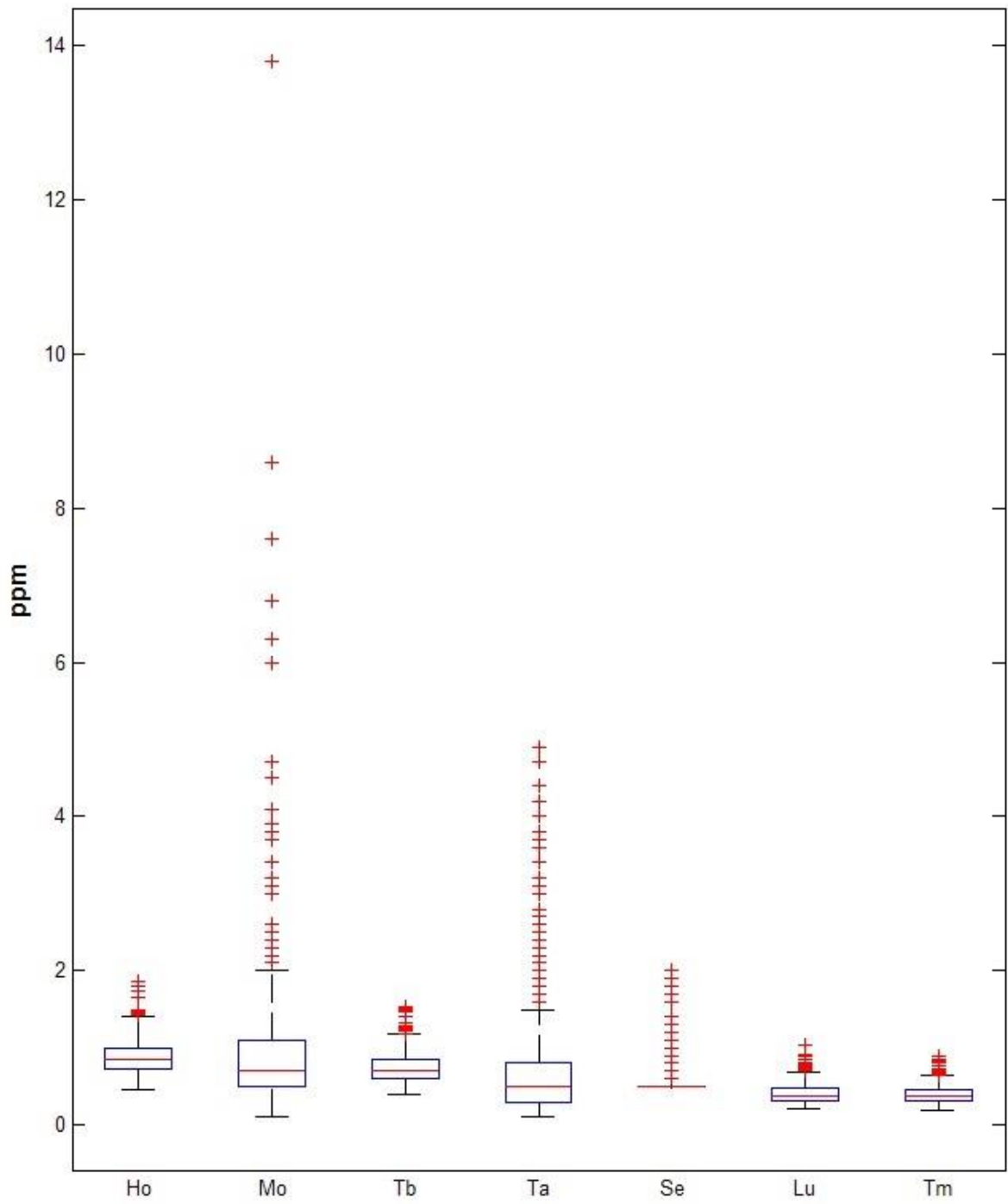
## ANEXO J.9



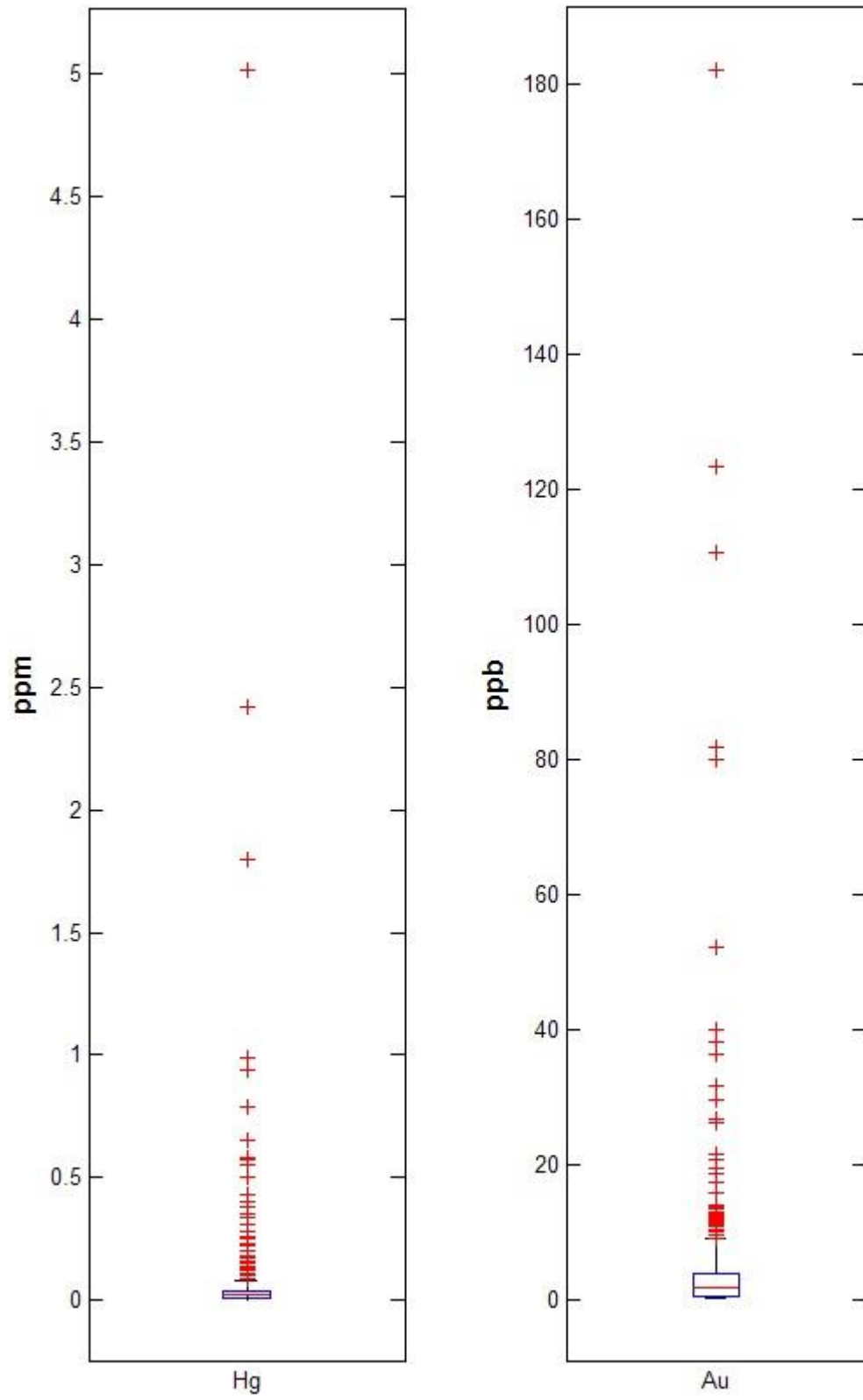
**ANEXO J.10**



**ANEXO J.11**



**ANEXO J.12**



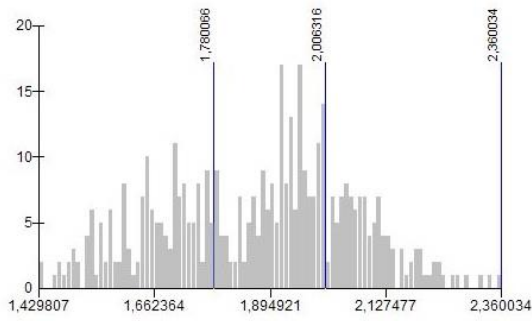


## **ANEXO K**

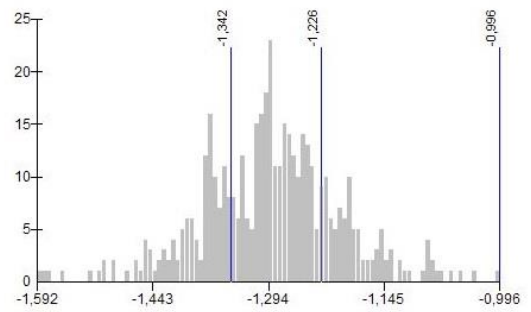
**Histograma y cortes por natural Jenks de mapas de cocientes**

# ANEXO K.1

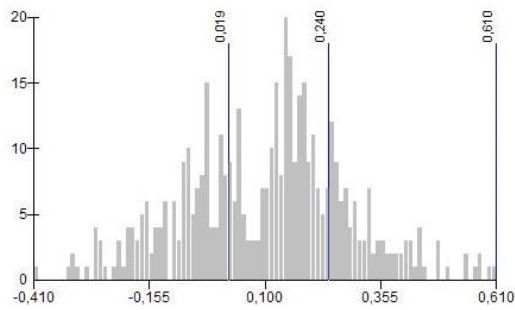
**MnO/(Zr+Hf+Ta+Nb)**



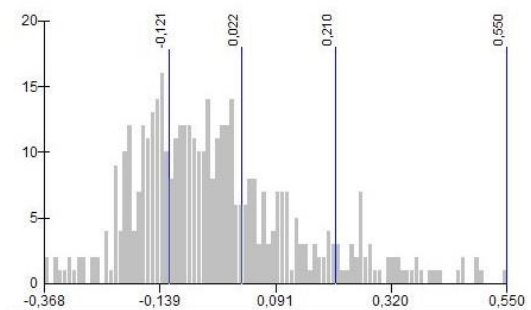
**MnO/(Fe+Ti+Cr+V)**



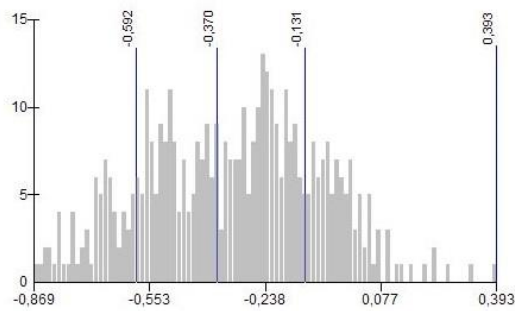
**(Cr+V+Co)/(Zr+Hf+Ta+Nb)**



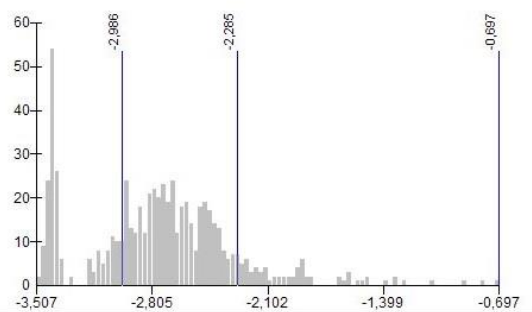
**V/V\_LB**



**Ni/Co**



**Au/Ga**



**Hg/Ga**

