



UNIVERSIDAD DE CHILE – FACULTAD DE CIENCIAS – ESCUELA DE PREGRADO

**“CONCENTRACIONES NATURALES DE METALES EN SUELOS DE
LA III REGIÓN DE CHILE”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

QUÍMICO AMBIENTAL

LUIS FELIPE SÁNCHEZ PUENTES

Directora de Seminario de Título: Dra. Isel Cortés Nodarse.

Diciembre 2017
Santiago - Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato:

LUIS FELIPE SÁNCHEZ PUENTES

**“CONCENTRACIONES NATURALES DE METALES EN SUELOS
DE LA III REGIÓN DE CHILE”**

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental.

Dra. Isel Cortés Nodarse

Directora Seminario de Título:

Comisión Revisora y Evaluadora:

Dr. Antonio Galdámez Silva

Presidente Comisión:

Dra. Inés Ahumada Torres

Correctora:

Santiago de Chile, Diciembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

En virtud de todo lo que ha significado este proceso, quisiera agradecer a quienes formaron parte directa e indirectamente. Partiré agradeciendo a la Dra. Isel Cortés por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, el cual significó un gran desafío acompañado de importantes aprendizajes en cada etapa. Al finalizar este proceso reafirmo lo importante que es confiar en las capacidades aprendidas a lo largo de la vida con las que es posible crear, desarrollar ideas, plantearse preguntas, resolverlas, o intentarlo de diversas maneras. Pero, por sobre todo reafirmo la importancia de hacer las cosas con cariño y hacerlas por el simple gusto de hacerlas, querer hacerlas.

No quisiera hacer una lista detallada, puesto que son tantas las personas, amigos y amigas, a quienes quisiera expresar mis palabras de agradecimiento que me vería obligado a dejar este espacio en un apartado anexo o bien, incluirlas dentro de algún capítulo en este trabajo, como por ejemplo en las conclusiones y recomendaciones, se me ocurre que así la ayuda podría ser reciproca puesto que podría brindarles algún consejo, sin embargo, pienso que eso resta la importancia que se merecen. Espero que se presenten otras instancias donde pueda hacerlo como es debido. Mientras tanto, agradezco profundamente a todas las personas que fui conociendo en el camino, a las que estuvieron y ya no están, y por sobre todo a quienes aún siguen presentes, pese a la diversidad de excusas posibles que dificulten nuestro encuentro, gracias por seguir ahí, por los tremendos momentos vividos y que sin duda se vendrán.

Pese a lo anterior, quisiera mencionar a mi amigo George “Cachulo” Andrade, por estar ahí dispuesto a compartir sus saberes en momentos cruciales. Sin tu ayuda este trabajo hubiera sido hartamente más complejo.

Y por último quiero agradecer a mi familia, por su apoyo incondicional, en especial a mi papá y a mi mamá. Si se me permite dedicar este trabajo, sin dudar sería a ustedes.

INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes Generales.....	1
1.1.1. Conceptos Geoquímicos.....	1
1.1.1.1. Anomalías Geoquímicas y Antropogénicas.....	2
1.1.2. Importancia de la determinación del contenido y distribución de metales en los suelos.....	3
1.1.3. Diferentes enfoques para la evaluación del Background Geoquímico.....	4
1.2. Marco teórico estadístico para la evaluación del Background Geoquímico.....	5
1.2.1. Datos composicionales.....	5
1.2.2. Transformación Isometric Log-Ratio (ilr).....	5
1.2.3. Estadística univariable.....	7
1.2.3.1. Diagramas combinados.....	8
1.2.4. Análisis estadístico multivariado.....	11
1.2.4.1. Análisis de Componentes Principales (ACP).....	11
1.2.4.2. Análisis Factorial (AF).....	12
1.3. Antecedentes Específicos.....	13
1.3.1. Descripción de la zona de estudio.....	13
1.3.1.1. Clima.....	14
1.3.1.2. Suelos regionales.....	15
1.3.1.3. Geomorfología.....	17
1.3.1.4. Geología.....	18
1.3.2. Principales actividades económicas de uso del suelo en la III Región.....	19
1.3.2.1. Impactos ambientales asociados.....	20
1.3.3. Normativa ambiental en materia de suelos.....	20
1.3.4. Bibliografía disponible a nivel nacional y regional.....	21
1.4. Objetivo General.....	23

1.5. Objetivos Específicos.....	23
II. METODOLOGÍA.....	24
2.1. Plan de muestreo.....	24
2.2. Análisis químico de las muestras.....	26
2.3. Validación y preparación de los datos	26
2.3.1. Análisis duplicados.....	27
2.3.2. Límite de detección	27
2.3.3. Transformación Isometric Log-Ratio (ilr).....	28
2.4. Estudio de los datos geoquímicos	28
2.4.1. Análisis estadístico univariable	28
2.4.1.1. Diagramas combinados.....	28
2.5. Línea base de concentraciones naturales o background	28
2.5.1. Determinación del rango de concentraciones naturales	28
2.5.2. Elaboración de mapas geoquímicos	29
2.6. Análisis de la distribución espacial de las concentraciones naturales o background	30
2.6.1. Identificación y caracterización de zonas anómalas.....	30
2.6.2. Análisis estadístico multivariado.....	30
2.7. Mapa Geoquímico Referencial	31
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
3.1. Validación de los datos	32
3.2. Estudio de los datos geoquímicos	33
3.2.1. Análisis estadístico univariable	33
3.2.1.1. Diagramas combinados.....	35
3.3. Línea base de concentraciones naturales o background	36
3.3.1. Determinación del rango de concentraciones naturales	37
3.3.2. Mapas geoquímicos	39
3.4. Análisis de la distribución espacial de las concentraciones naturales o background	41
3.4.1. Identificación y caracterización de zonas anómalas.....	41
3.4.2. Análisis estadístico multivariado.....	49

3.4.2.1. Asociaciones químicas o geoquímicas.....	53
3.4.2.2. Posible origen de las distribuciones espaciales.....	59
3.5. Mapa Geoquímico Referencial	62
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
V. BIBLIOGRAFÍA	68
VI. ANEXOS.....	72
6.1. Tipos Geológicos de Suelos en la zona de estudio	72
6.2. Diagramas combinados de los datos transformados	82
6.3. Mapas Geoquímicos.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definiciones algebraicas presentes en Box-Plot.	10
Tabla 2. Resumen resultados de validación de los datos.	32
Tabla 3. Resumen parámetros estadísticos para el conjunto de datos de las variables estudiadas.....	34
Tabla 4. Resumen de datos Box-Plot para cada elemento.	37
Tabla 5. Rango de concentraciones naturales o background por cada elemento.	38
Tabla 6. Número de datos presentes por cada clase.....	39
Tabla 7. Resumen caracterización anomalías positivas destacadas en la zona de estudio.	48
Tabla 8. Resultados análisis de componentes principales.....	49
Tabla 9. Descripción TGS seleccionados (SERNAGEOMIN, 2003).....	72
Tabla 10. Coordenadas de muestreo en los TGS de la zona de estudio.....	76
Tabla 11. Resumen parámetros estadísticos por TGS muestreado.	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo diagrama combinado (Aluminio transformado).....	10
Figura 2. Mapa de la zona de estudio, III Región de Atacama, Chile.	14
Figura 3. Clasificación de suelos regionales según nomenclatura FAO-UNESCO (modificado a partir de a partir Ulloa, R. y Ortiz de Zárate., 1989).....	17
Figura 4. Macrounidades geomorfológicas y salares de la Región de Atacama.....	18
Figura 5. Esquema de muestreo preliminar.	25
Figura 6. Comparación diagrama combinados entre datos originales (1) y transformados (2).....	35
Figura 7. Ejemplo mapa geoquímico del cadmio.	40
Figura 8. Resultados del análisis factorial clásico.	50
Figura 9. Resultados análisis factorial robusto.	51
Figura 10. Distribuciones estadísticas asociación Cd, Co, Fe, (Al).....	53
Figura 11. Distribución espacial asociación Cd, Co, Fe, (Al).	54
Figura 12. Distribuciones estadísticas asociación As, Cu.....	55
Figura 13. Distribución espacial asociación As, Cu.	55
Figura 14. Distribuciones estadísticas asociación Al, Mn, (Co), (Fe).	56
Figura 15. Distribución espacial asociación Al, Mn, (Co), (Fe).....	57
Figura 16. Distribuciones estadísticas asociación As, Pb.	58
Figura 17. Distribución espacial asociación As, Pb.....	58
Figura 18. Mapa geoquímico referencial, distribución UCL 95% As.	62
Figura 19. Diagrama combinado Cadmio.	82
Figura 20. Diagrama combinado Arsénico.	83
Figura 21. Diagrama combinado Cobre.	83
Figura 22. Diagrama combinado Níquel.....	84

Figura 23. Diagrama combinado Plomo.	84
Figura 24. Diagrama combinado Aluminio.	85
Figura 25. Diagrama combinado Manganeso.	85
Figura 26. Diagrama combinado Cobalto.	86
Figura 27. Diagrama combinado Hierro.	86
Figura 28. Diagrama combinado Mercurio.	87
Figura 29. Concentración natural de Cadmio en suelos de la III Región, Chile.	88
Figura 30. Concentración natural de Arsénico en suelos de la III Región, Chile.	89
Figura 31. Concentración natural de Cobre en suelos de la III Región, Chile.	90
Figura 32. Concentración natural de Níquel en suelos de la III Región, Chile.	91
Figura 33. Concentración natural de Plomo en suelos de la III Región, Chile.	92
Figura 34. Concentración natural de Aluminio en suelos de la III Región, Chile.	93
Figura 35. Concentración natural de Manganeso en suelos de la III Región, Chile.	94
Figura 36. Concentración natural de Cobalto en suelos de la III Región, Chile.	95
Figura 37. Concentración natural de Hierro en suelos de la III Región, Chile.	96
Figura 38. Concentración natural de Mercurio en suelos de la III Región, Chile.	97

RESUMEN

En Chile no existen normas de calidad ambiental para suelos, puesto que para su elaboración es necesario contar con líneas de base que contengan las concentraciones naturales *o background* que consideren la complejidad y diversidad geológica de los suelos del país. Según los antecedentes, en la zona de estudio, correspondiente a las comunas de Copiapó, Tierra Amarilla, Chañaral y Diego de Almagro, III Región de Chile; no se han determinado las concentraciones naturales, ni existe una metodología estandarizada para ello. Esto dificulta la identificación de sitios contaminados que pudiesen existir en la zona, teniendo en cuenta que tanto la minería como la agricultura son las principales actividades económicas en la región y que ambas son susceptibles de generar un impacto negativo significativo sobre el suelo.

En este estudio se trabajó con una base de datos correspondiente a los valores de concentración de metales (As, Cu, Mn, Fe, Al, Ni, Co, Cd, Pb y Hg) en suelo superficial (0-20 cm). Las muestras fueron recolectadas y analizadas por personal perteneciente al Laboratorio de Química Ambiental del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). En total, se recolectaron 441 muestras de suelo distribuidas en 63 sitios donde no existe actividad antropogénica evidente actual, es decir, lugares sin uso de suelo conocido.

Se realizó un análisis estadístico univariado, donde se calcularon los parámetros clásicos y robustos que permiten caracterizar la distribución estadística de los datos, la cual se representó mediante diagramas combinados, utilizando previamente sobre la base de datos la transformación matemática *Isometric Log-ratio*. Luego, utilizando el criterio de clasificación de clases del Box-Plot propuesto por Tukey, J. (1977), se determinó el rango de concentraciones naturales y se identificaron los valores anómalos para cada uno de los elementos.

Utilizando el software QGIS versión 2.18.11, se elaboraron mapas geoquímicos que representan la distribución espacial de las concentraciones. Con esto se identificaron las zonas anómalas, correspondientes a aquellos sitios donde la concentración supera los límites establecidos por el rango de concentraciones. Luego, se caracterizaron las zonas

destacadas, centrándose en las anomalías positivas, utilizando información respecto del tipo de suelo, geología y geomorfología de cada sitio.

A partir de las asociaciones químicas resultantes del análisis estadístico multivariado, junto a criterios geológicos correspondientes a la presencia de yacimientos metalíferos en la zona de estudio, se determinó que, posiblemente, los procesos que explican la distribución espacial y la concentración de los metales estudiados son predominantemente geogénicos o naturales, sin descartar fuentes antropogénicas difusas.

Se elaboró un mapa geoquímico referencial que representa la concentración de contacto por exposición más probable en el tiempo, utilizando el valor UCL 95% de cada uno de los sitios de muestreo. Se escogió el arsénico como elemento referencial, ya que es considerado un contaminante prioritario debido a su toxicidad; además, fue el elemento que presentó la mayor cantidad anomalías positivas.

Finalmente, los resultados de este estudio proporcionan información referencial que podría ser utilizada para la toma de decisiones en materias de salud pública, gestión de ciudades, ordenamiento territorial, protección y manejo de suelos.

ABSTRACT

There is no environmental regulation about ground quality in Chile, because is necessary to have a baseline for its elaboration which contains the natural concentrations or background including the geological complexity and diversity of the Chilean grounds. According to the backgrounds, into the investigation area in Copiapó, Tierra Amarilla, Chañaral y Diego de Almagro commune, III region of Chile, the natural concentrations have not been determined and does not exist a standard methodology for it. This makes difficult the identification of contaminated areas what could be exist there, whereas both mining and agriculture industry are the main business activities of the region and both could create a significant negative impact over the ground.

In this investigation, we worked with a database with concentration values for metals (As, Cu, Mn, Fe, Al, Ni, Co, Cd, Pb y Hg) at the surface ground. The employers of the environmental chemical laboratory from the National center of environment (CENMA) collected and analyzed the samples. Four hundred and forty-one samples of the ground were recollected from 63 sites where does not exist anthropogenic activity apparently, that is to say, unused known ground sites.

An univariate statistical analyze was done, where classic and strong parameters were calculated allowing to characterize the statistical distribution piece of information, which is represented by combined diagrams, previously using the mathematical transformation “Isometric Log-ratio” over the database. Then using the class classification criteria of Box-plot suggested by Turkey J. (1977), we determined the natural range of concentration and the abnormal value for each elements.

Using the software called QGIS 2.18.11 version, we developed “geo-chemical” maps, which represent the distribution of the spatial concentration. With this, we identified the abnormal areas, corresponding to sites where concentrations exceed the established limits given by the range of concentrations. After this, we characterize the designated areas, putting focus in the positive anomalies, using the information of the kind of ground, geology and geomorphology of each site.

Based on the chemical association resulting of the multivariate statistical analyze, at the same time with geological criteria's, corresponding to the presence of metal deposits in the investigation area, we determined, as a possibility, the processes that explain the spatial distribution and the concentration of the metal elements investigated are predominantly naturals, non-dismissing diffused anthropogenic sources.

A reference geochemical map was design representing the most likely exposure contact concentration over time using the 95% UCL value of each of the sampling sites. The Arsenic was chosen as a reference element, since it is considered a priority contaminant due to its toxicity; in addition, it was the element that presented the main number of positive anomalies.

Finally, the results of this study provide baseline information that could be used for decision making in public health, city management, land management, soil management and their protection.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

El presente estudio tiene la finalidad de establecer las concentraciones naturales o *background* de metales en los suelos de la tercera Región de Chile. Centrándose específicamente en las comunas aledañas de Copiapó, Tierra Amarilla, Diego de Almagro y Chañaral.

1.1.1. Conceptos Geoquímicos

El concepto de “*background* geoquímico” fue introducido a mediados del siglo XX, aplicado a estudios de prospección geoquímica realizados con el propósito de descubrir depósitos minerales. Originalmente, se utilizó como un valor de referencia, entendiéndose como la concentración normal de un elemento en una muestra de suelo. Así, por sobre dicho valor, las concentraciones representan posibles procesos de mineralización asociados a depósitos minerales subterráneos (de Grys, A., 1961).

Posteriormente, con la introducción hacia las ciencias ambientales, el término “*background* geoquímico” se utilizó para distinguir entre las fuentes antropogénicas y las concentraciones naturales (de origen geogénico y/o biogénico) de un determinado elemento en diferentes muestras ambientales. Adquiriendo con el pasar de los años una gran relevancia, tanto para la geoquímica como para las ciencias ambientales, provocando la ampliación de su significado y una diversificación de su ámbito de aplicaciones. Así, actualmente, el término “*background*” no sólo se aplica a muestras de suelo (rocas, sedimentos, minerales), sino también a muestras de agua, aire, entre otras. A causa de lo anterior, recientemente la comunidad científica ha discutido acerca de los diferentes aspectos y aplicaciones del término; sin embargo, ha habido dificultades, tanto para precisar una definición como también para establecer un método estandarizado para su evaluación. De esta manera, es posible encontrar diferentes definiciones según el área en que se utilice (Galuszka, A., 2007).

En un estudio realizado por Matschullat y col. (2000) se propone una definición para el término *background* geoquímico en el contexto de las ciencias ambientales, refiriéndose a éste como:

“una medida relativa para distinguir entre la concentración natural de un elemento dado y la concentración antropogénicamente influenciada en un conjunto de muestras ambientales” (Matschullat y col., 2000).

Por otra parte, Galuszka propone otra definición, refiriéndose a éste como:

“la concentración teórica ‘natural’ de un elemento en una muestra ambiental específica (o medio), considerando las variables espaciales y temporales, que puede ser determinada por métodos directos, indirectos o integrados”.

Además, sugiere que el término “*background* geoquímico” sea utilizado únicamente en investigaciones geoquímicas o prospecciones mineras; mientras que en el contexto de las ciencias ambientales, éste debiera ser reemplazado por “concentración *background*” (Galuszka, A., 2007).

1.1.1.1. Anomalías Geoquímicas y Antropogénicas

En general, las diferencias en la definición del concepto “*background* geoquímico” o “concentración *background*” están directamente relacionadas con el origen de las anomalías geoquímicas, entendiéndose a éstas como: aquellas concentraciones que son superiores o inferiores a los valores límites (*thresholds*) establecidos para un rango de concentraciones *background*. Así, aquellas concentraciones que se encuentren por sobre los niveles *background* se denominan “*high outliers*” o anomalía positiva, y aquellos valores que se encuentren por debajo de los niveles *background* se denominan “*low outliers*” o anomalía negativa (Reimann, C. y col., 2005).

En los estudios de prospección geoquímica, el objetivo principal no es la determinación del origen de la anomalía, puesto que el foco de atención está dirigido hacia el análisis de las posibilidades de aprovechamiento de una anomalía detectada en la búsqueda de depósitos minerales explotables. En estudios ambientales, en cambio, es fundamental establecer el origen de las anomalías detectadas, ya que esto permite

diferenciar entre fuentes naturales, es decir, anomalías geoquímicas o naturales; y los contaminantes de origen humano que afectan el medio ambiente y constituyen una anomalía antropogénica (Galuszka, A. y Migaszewski, Z. M., 2011).

1.1.2. Importancia de la determinación del contenido y distribución de metales en los suelos

Es importante y sumamente necesario realizar estudios para la determinación del contenido y distribución de metales en los suelos, y con ello establecer líneas de base (*Background* Geoquímico o Concentraciones *Background*, según el enfoque), pues esto proporciona información de gran utilidad que permite, entre otras cosas:

- Evaluar el estado actual de un área determinada tras ocurrir algún evento que pudiera alterar las concentraciones naturales (*background*), posibilitando la toma de medidas pertinentes en caso de que exista algún grado de riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente.
- Establecer normas secundarias de calidad ambiental para suelos, de acuerdo a la definición contenida en la Ley 19.300, sobre bases generales del medio ambiente, donde se establece que una norma secundaria de calidad ambiental es “aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza”. Esto es de suma importancia para la toma de decisiones relacionadas con salud pública, gestión de ciudades y ordenamiento territorial.
- Realizar exploraciones mineras, en el caso de que el estudio contenga información respecto de las concentraciones de minerales metálicos de interés económico, tales como: cobre, molibdeno, oro, plata, hierro, manganeso, plomo y zinc (SERNAGEOMIN, 2015a).

1.1.3. Diferentes enfoques para la evaluación del Background Geoquímico

Si bien existen numerosos estudios publicados en relación a la evaluación de los niveles *background* de metales en suelos en diferentes países, desafortunadamente estos no siguen los mismos protocolos para la obtención de los datos geoquímicos, pese a que se ha demostrado que el valor obtenido para las concentraciones naturales o *background* no solo depende de los factores dominantes de formación del suelo (roca madre, clima, topografía, biota y tiempo); sino que también depende de factores relacionados con la toma, preparación y análisis químico de las muestras (Galán, E. y col., 2008); a su vez, del tipo de tratamiento o análisis estadístico de los datos obtenidos a partir de éstas (Reimann, C. y col., 2005).

Ante esta problemática, diversos autores han presentado propuestas para establecer una metodología oficial, o bien han realizado comparaciones de los diferentes métodos propuestos para determinar los niveles *background* y los valores límites (*threshold*).

Con respecto a las metodologías propuestas en la literatura internacional, éstas pueden clasificarse dentro de tres enfoques principales. Estos son:

- enfoque directo (geoquímico)
- enfoque indirecto (estadístico)
- enfoque integrado

Cada uno presenta ventajas y desventajas, las que se detallan en el estudio realizado por Galuszka (2007) que, a su vez, se complementa con la comparación crítica de diferentes métodos utilizados en la determinación de las concentraciones *background* y los valores límites o anomalías (*Thresholds*), realizada por Reimann y col. (2005).

De los tres, el enfoque integrado resulta ser el más adecuado para estudios de carácter medio ambiental, ya que combina los conocimientos previos de un experto, en cuanto al comportamiento de los diferentes elementos químicos en el medio, con diferentes métodos estadísticos para el análisis de los datos, otorgando una mayor solidez al estudio en términos interpretativos.

1.2. Marco teórico estadístico para la evaluación del Background Geoquímico.

1.2.1. Datos composicionales

En ciencias ambientales generalmente se trabaja con un conjunto de mediciones obtenidas a partir de una matriz ambiental, como es el suelo, el agua y el aire. Posterior al análisis de dichas mediciones se obtiene un conjunto de datos que, en su mayoría, son de carácter composicional cerrado.

Un conjunto de datos cerrados es aquel donde todas las variables involucradas son dependientes entre sí, dado que forman parte de una cantidad total. Dicha propiedad es inherente a un conjunto de datos composicionales, como son los datos de composición geoquímica en una muestra de suelo, donde la suma de cada una de las variables medidas (ej. Concentración de los diferentes metales que componen una muestra de suelo) es igual a un valor constante, siendo los ejemplos más conocidos 100% en peso (% wt.) o 1.000.000 [ppm] (Filzmoser, P. y col., 2009a). Esto significa que, sin importar que no todos los elementos químicos de la composición total sean medidos, si uno de los componentes aumenta, al menos una de las partes restantes debe disminuir, o viceversa. Lo anterior implica una restricción al conjunto de datos que, de no ser considerada en los tratamientos estadísticos, podría significar la obtención de resultados erróneos.

Diversos autores han investigado posibles soluciones al problema de los datos composicionales, siendo una de éstas la “apertura” del conjunto de datos mediante transformaciones matemáticas.

Existen diversas transformaciones, dentro de éstas y en base a estudios comparativos (Reimann, C. y col. 2008; Filzmoser, P. y col., 2009a; Filzmoser, P. y col. 2009b; entre otros), se recomienda el uso de la transformación logarítmica denominada “*isometric logratio transformation*” o “*ilr*” (Egozcue, J. y col., 2003), debido a sus propiedades matemáticas y geométricas.

1.2.2. Transformación *Isometric Log-Ratio (ilr)*

Esta transformación matemática permite analizar de mejor manera la información contenida en un conjunto de datos composicionales, poniendo el foco de atención en las

relaciones entre el conjunto de los datos. A partir de diversos estudios comparativos, se ha visto una evidente mejoría en las representaciones gráficas de los datos transformados versus los datos originales. A su vez, los análisis estadísticos multivariados de los datos previamente transformados (ej. ACP, AF, etc.), proporcionan mejores resultados en términos de interpretación.

En este estudio se considera un conjunto de datos composicionales dividido en dos componentes. El primero, corresponde al valor medido para cada variable, es decir, el dato observado (\bar{x}). El segundo, representará al resto de los datos para una variable determinada ($1 - \bar{x}$). En base a lo anterior, la ecuación de la transformación *ilr* queda definida como:

$$ilr(x) = \sqrt{\frac{1}{2}} * \ln\left(\frac{\bar{x}}{1 - \bar{x}}\right)$$

Ecuación (1)

Donde \bar{x} representa la concentración del elemento normalizado a su fracción equivalente dentro de la muestra. Por lo que, el valor medido (en mg/Kg o ppm) se divide por 10^6 .

Una de las propiedades más relevantes que presenta la transformación *ilr* y que explica en gran medida las mejorías en los resultado proporcionados por los análisis estadísticos es la “isometría”, la cual relaciona directamente la geometría euclidiana con un espacio geométrico definido para la transformación, donde los datos son redistribuidos guardando proporción con las distancias originales entre éstos (Egozcue, J. y col., 2003). De esta manera, la transformación permite trabajar con los datos adimensionalmente dentro del nuevo espacio geométrico definido y posteriormente, re-transformar los mismos a su espacio original (Filzmoser, P. y col., 2009a). Para ello, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{e^{(\sqrt{2} \cdot z)}}{e^{(\sqrt{2} \cdot z)} + 1}$$

Ecuación (2)

Donde Z y \bar{x} corresponden, respectivamente, al dato transformado ($(x - \bar{x})/s$) y al dato original normalizado a su fracción equivalente dentro de la muestra.

1.2.3. Estadística univariable

Se dispone de una amplia variedad de parámetros estadísticos con los cuales es posible caracterizar una distribución de datos, según la cual, ciertos parámetros serán más significativos que otros. Por ejemplo, para una distribución normal “clásica”, el uso de la media aritmética y la desviación estándar resulta adecuado. Sin embargo, los datos ambientales, por lo general, se desvían de la distribución normal (Reimann, C. y Filzmoser, P., 2000), de modo que los parámetros clásicos, en este caso, pierden significancia estadística, siendo necesario su reemplazo por sus respectivos homólogos robustos, como por ejemplo la “Mediana” y la “Desviación Media Absoluta” (MAD, por sus siglas en inglés).

En cuanto a la robustez del uso de la Mediana como medida de tendencia central para un conjunto de datos ambientales, se sustenta en que este parámetro es resistente al 50% de los datos o valores extremos, siempre que se tenga una cantidad suficiente de datos (Reimann, C. y col., 2008).

Por su parte, la robustez de la MAD se debe a que ésta se obtiene a partir de la Mediana, a diferencia de la desviación estándar, cuyo valor se obtiene a partir del promedio o media aritmética.

Para obtener el valor de la MAD, primero se debe calcular la Mediana del conjunto de datos, luego se obtiene la diferencia absoluta entre cada valor y la Mediana calculada. Posteriormente, se calcula nuevamente la mediana ($mediana_i$), pero esta vez sobre las diferencias absolutas y finalmente, dicho valor se multiplica por una constante (1,4826) para ajustarla a la distribución normal, debido a que la MAD es robusta a las desviaciones con respecto a esta distribución (Reimann, C. y col., 2008). Dicho cálculo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$MAD = 1,4826 \cdot mediana_i(|Mediana - x_i|)$$

Ecuación (3)

Existe, a su vez, un parámetro robusto equivalente al coeficiente de variación. Éste último, se obtiene a partir de la media aritmética y la desviación estándar, a diferencia del coeficiente de variación robusto (CVR), el cual se calcula en base a la mediana y la MAD, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{CVR \%} = 100 \cdot \frac{\text{MAD}}{\text{Mediana}}$$

Ecuación (4)

Finalmente, para representar los diferentes parámetros estadísticos, se aconseja el uso de tablas de resumen, que incluya información auxiliar, como por ejemplo el número de datos, cantidad de muestras perdidas, límites de detección, etc. A su vez, puede ser de gran utilidad comparar los valores obtenidos entre parámetros clásicos y robustos, puesto que grandes desviaciones podrían dar cuenta de la presencia de valores atípicos o anómalos y/o distribuciones sesgadas.

1.2.3.1. Diagramas combinados

Los diagramas combinados corresponden a una representación simultánea de tres tipos de gráficos elaborados para cada variable: Histograma complementado con una curva de densidad, diagrama de densidad y diagrama de caja y bigotes o Box-plot (figura 1). Dicha representación permite extraer la mayor cantidad de información al conjunto de datos, facilitando su comprensión, lo cual se ve favorecido si los diagramas son elaborados a partir de los datos transformados matemáticamente.

Los tres gráficos en conjunto muestran la distribución de los datos, permitiendo observar la dispersión de los mismos y a su vez, identificar diferentes fuentes de origen para una misma variable, lo que se evidencia en los casos donde el conjunto de datos se ajusta a una distribución multimodal, es decir, que la distribución estadística de los datos presente más de un “*peak*” (Reimann, C. y col., 2008).

Uno de los diagramas que destaca, debido a su utilidad, es el diagrama de caja y bigotes (Box-plot). A partir de éste se determina el rango de concentraciones “normales”

que definen el rango de concentraciones naturales o *background*. De igual modo, se establecen los valores límites, por sobre los cuales los valores se consideran anómalos.

El box-Plot se compone de una caja, la cual contiene el 50% de los datos ordenados y acotados por el primer (Q_1) y tercer cuartil (Q_3), los que estadísticamente representan al 25% y 75% de los datos ordenados respectivamente. En función de ambos cuartiles se define el rango intercuartílico (RI), correspondiente a la diferencia entre Q_3 y Q_1 . A su vez, se muestra la Mediana representada por una barra vertical, cuya posición da cuenta de la simetría de los datos, dividiendo al conjunto en la mitad. Además, se encuentran los “bigotes”, los cuales están representados mediante barras verticales conectadas al primer y tercer cuartil, correspondientes al bigote inferior y bigote superior respectivamente.

Para la determinación del rango de concentraciones naturales o *background*, se utiliza el criterio de clasificación del Box-Plot definido por Tukey, J. (1977), donde se incorporan dos variables establecidas a partir de los parámetros del Box-Plot. Estas son el límite inferior y límite superior, cuyos valores se establecen a partir de los parámetros proporcionados por la distribución estadística de los datos. Los valores que se ubiquen fuera de los límites se consideran valores anómalos (*outliers*).

Cabe mencionar que los valores determinados para los límites inferiores y superiores, no necesariamente corresponderán al de los bigotes. De esta manera, el límite superior puede ser mayor o igual al bigote superior, a su vez, el límite inferior puede ser menor o igual al bigote inferior.

En la siguiente tabla se muestran las expresiones algebraicas de algunos de los parámetros antes mencionados.

Tabla 1. Definiciones algebraicas presentes en Box-Plot.

Variable	Expresión
Límite superior (LS)	$Q_3 + 1,5 * RI$
Bigote superior	$Máx(x, [x \leq LS])$
Rango Intercuartílico (RI)	$Q_3 - Q_1$
Bigote inferior	$Mín(x, [x \geq LI])$
Límite inferior (LI)	$Q_1 - 1,5 * RI$

Es importante señalar que si el número de datos clasificados como anómalos supera al 15% del total de los datos, el criterio de discriminación a partir de los límites inferiores y superiores debe ser reemplazado (Reimann, C. y col., 2005).

A continuación se muestra un esquema que ejemplifica un diagrama combinado para una variable determinada, donde además se destacan los componentes mencionados en este punto. En la figura 1 se muestran los tres gráficos que componen el diagrama combinado: histograma de frecuencias (1), diagrama de densidad (2) y diagrama Box-Plot (3). A su vez, se señala la curva de densidad (línea segmentada roja).

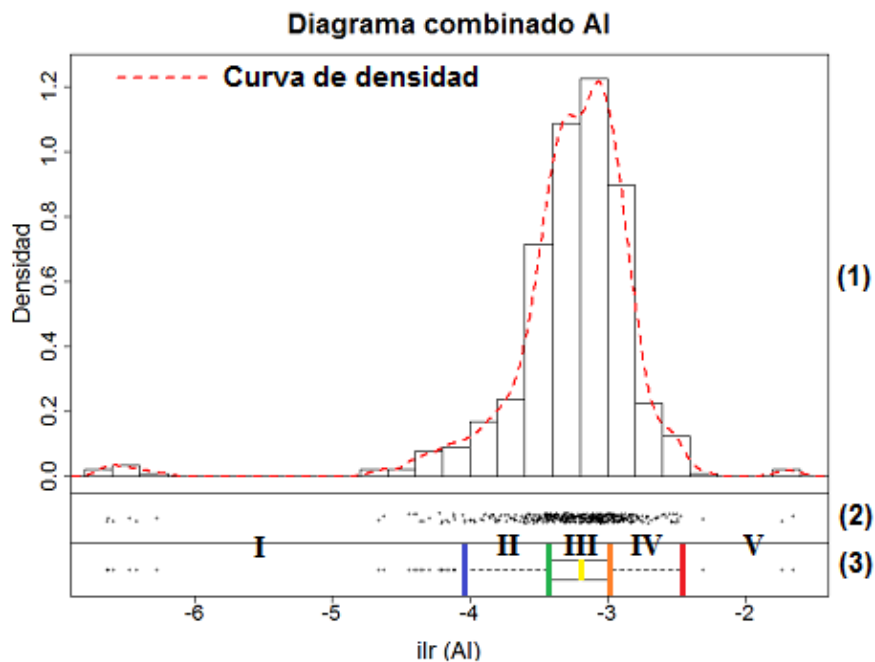


Figura 1. Ejemplo diagrama combinado (Aluminio transformado).

En cuanto al box-Plot, en él se destacan 5 barras verticales correspondientes a: límite inferior (barra azul), primer cuartil Q_1 (barra verde), Mediana (barra amarilla), tercer cuartil Q_3 (barra naranja) y límite superior (barra roja). A partir de ellas se establecen las clases o categorías utilizadas para clasificar los rangos de concentraciones de cada variable, indicadas en números romanos.

1.2.4. Análisis estadístico multivariado

Los análisis estadísticos multivariados son ampliamente utilizados en ciencias ambientales, sobre todo en la evaluación del *background* geoquímico, con la finalidad de estudiar las relaciones existentes entre un grupo de variables, lo cual nos da una idea de los procesos que posiblemente dan origen a las distribuciones de los elementos químicos en una zona determinada.

Dentro de esta categoría se tiene el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el Análisis Factorial (AF), donde ambos buscan reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, generando nuevas variables que estén estrechamente relacionadas con los procesos subyacentes que controlan la distribución de los datos. Sin embargo, ambos análisis deben efectuarse con la precaución de que los supuestos que los sustentan se cumplan de la mejor manera, considerando las características de los datos con los que se trabaja, es decir, datos composicionales cerrados. De modo que, es necesario realizar una transformación de los datos antes de llevarlos a cabo. En este sentido, la transformación ilr resulta ser una de las más adecuadas, de acuerdo a las recomendaciones (Reimann, C. y col., 2008).

1.2.4.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

El ACP es comúnmente utilizado como primer paso dentro de un análisis multivariado, dado que permite reducir la dimensionalidad de la base de datos, transformando el conjunto de variables inicial en otro grupo de variables sintéticas, llamadas componentes principales, que contengan la máxima variabilidad en un nuevo sistema de coordenadas. Esto se logra agrupando la mayor cantidad de información, presente en el conjunto de datos, en el menor número de componentes como sea posible.

Luego, dicho número de componentes representarán, en este caso, el número de factores a utilizar en un posterior AF.

El ACP puede ser considerado como una descomposición de la matriz de covarianza o matriz de correlación (según sea el caso) en lo que se denominan “*eigenvectors*” (vectores propios) y “*eigenvalues*” (valores propios). Los vectores corresponden a la carga o *loading* de los componentes principales que abarcan en el nuevo sistema de coordenadas. A su vez, los valores propios representan la variabilidad contenida en cada componente principal, en términos de la varianza expresada en puntuaciones o “*scores*”.

Existen distintos criterios para escoger el número de componentes principales, los cuales arrojan resultados diferentes. Uno de los criterios comúnmente usados, se basa en la elección del menor número de componentes que en conjunto expliquen un 80% o más de la variabilidad original de la base de datos (Filzmoser, P. y Croux, C., 2003).

1.2.4.2. Análisis Factorial (AF)

El AF, en principio, tiene el mismo funcionamiento y objetivo que el ACP, es decir, reducir la dimensionalidad de los datos. Sin embargo, existen ciertas diferencias. Por ejemplo, la denominación homóloga a los “componentes principales” (ACP) es “factores” (AF), donde el número de factores a extraer se define antes de realizar el análisis. Además, este método busca la existencia de ciertos “factores únicos”, totalmente diferenciables del resto de los factores. De modo que, los resultados del AF, a través de los factores extraídos, son más interpretables desde el punto de vista geoquímico o ambiental, puesto que permiten encontrar estructuras similares entre las variables contenidas en cada factor, lo cual puede contribuir a la identificación de procesos comunes determinados por la distribución de los datos (Reimann, C. y col., 2002).

Al igual que en el ACP, y tal como se menciona en los puntos 1.2.1 y 1.2.2, el AF es sensible a las características y distribución presentada por el conjunto de datos. Ante esto, se recomienda aplicar una transformación adecuada que permita superar las restricciones de los datos composicionales. Además, en ciertos casos es necesario aplicar

un método de rotación de factores, lo cual permite obtener mejores resultados en términos de interpretación. Dentro de éstos, se recomienda el uso del método “*Varimax*” (Reimann, C. y col., 2008), basándose en estudios comparativos. Por último, las variables que serán sometidas al análisis deben ser estudiadas de manera individual (análisis univariable), identificando aquellas que pudieran significar un sesgo en el AF. En este sentido, los criterios pueden ser variados, por lo tanto se recomienda comparar diferentes soluciones. Ya sea, no considerar aquellos datos que presenten problemas, o bien utilizar métodos de análisis robustos.

Existe una variante de mayor robustez para el AF basado en un método robusto de estimación de la matriz de covarianza, denominado “*Minimum Covariance Determinant*” (MCD), el cual a grandes rasgos, puede ser representado como una elipse compacta que contiene un cierto porcentaje de los datos dentro de un diagrama de dispersión, así los datos fuera de dicha elipse no influyen en la estimación del MCD. De modo que el AF robusto no se ve influenciado por datos que presenten una gran desviación (Reimann, C. y col., 2008).

1.3. Antecedentes Específicos

1.3.1. Descripción de la zona de estudio

La III Región de Atacama se extiende entre los 25°17' y 29°11' de latitud Sur y desde 68°17' de longitud Oeste hasta el Océano Pacífico; limita al norte con la II Región de Antofagasta y al sur con la IV Región de Coquimbo; tiene una superficie aproximada de 75.176 [Km²]; a su vez, se divide en tres provincias: Chañaral, Copiapó y Huasco.

- **Provincia de Chañaral:** Se ubica en la franja norte de la III Región, tiene una superficie de 24.436 [Km²] y está constituida por las comunas de Chañaral y Diego de Almagro.
- **Provincia de Copiapó:** Se ubica en la franja central de la III Región, tiene una superficie de 32.538 [Km²] y está constituida por las comunas de Copiapó, Caldera y Tierra Amarilla.

- **Provincia de Huasco:** Se ubica en la franja sur de la III Región, tiene una superficie de 18.201 [Km²] y está constituida por las comunas de Vallenar, alto del Carmen, Freirina y Huasco.

Específicamente, este estudio comprende a las comunas de Chañaral, Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla (figura 2); las que en conjunto abarcan una superficie aproximada de 52.306 [Km²], equivalente al 70% de la superficie regional (SERNAGEOMIN, 2011).

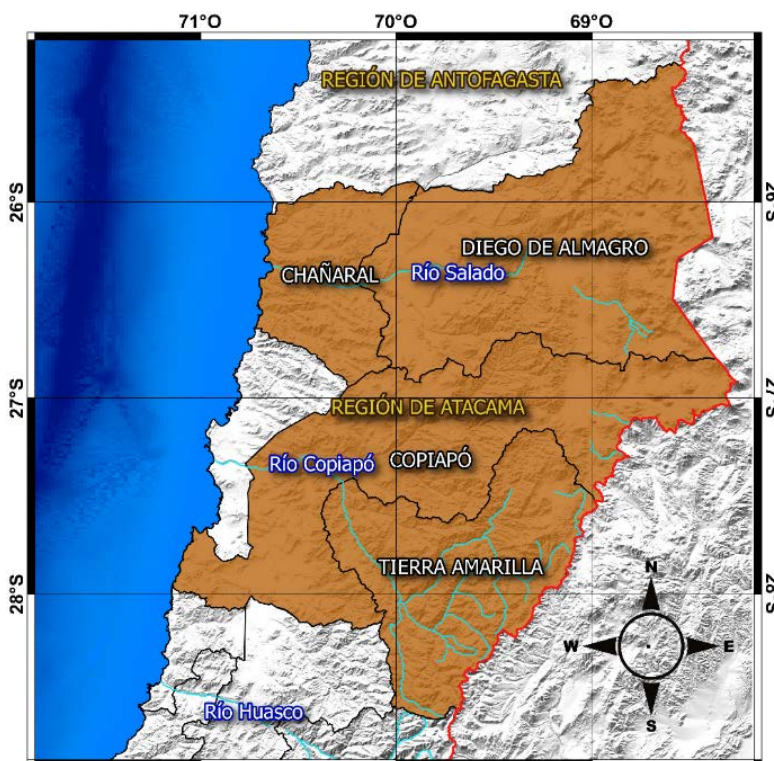


Figura 2. Mapa de la zona de estudio, III Región de Atacama, Chile.

1.3.1.1. Clima

El clima de la Región de Atacama está determinado en gran parte por la corriente fría de Humboldt y la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur. Esto, sumado a las complejas características topográficas de la zona, genera bajas tasas de precipitación anuales, las cuales se concentran en unos pocos días dentro de los meses de invierno, categorizándola como una región árida. En zonas costeras se originan intensas neblinas provocadas por el aire húmedo proveniente del mar. La situación cambia en la medida que

se avanza longitudinalmente, de Oeste a Este, donde en sectores interiores el clima se torna seco, con bajas tasas de humedad relativa, excepto en zonas cultivadas y valles que permiten el ingreso del aire húmedo costero. Las temperaturas son altas y con ciclos diurnos muy marcados. Los flujos de viento a nivel superficial presentan una velocidad promedio en torno a los 2 [m/s] y están influenciados por el Anticiclón semipermanente, la vaguada costera y la Baja Térmica Continental.

Con una frecuencia variable, por lo general dentro de un rango de 3 a 6 años, en la zona se expresa el fenómeno de El Niño, el cual provoca un incremento anómalo en el régimen pluviométrico, generando acumulación de nieve en la alta cordillera y lluvias en sectores medios y bajos; situación que permite la ocurrencia del “Desierto Florido”. Por otro lado, como parte del ciclo global del clima, en ciertos períodos se expresa el fenómeno de La niña, asociado a una disminución del régimen pluviométrico y por tanto, menor precipitación y acumulación de nieve en la alta cordillera en los meses de invierno, lo que condiciona negativamente el volumen de los caudales de los ríos en los meses de primavera y verano siguientes (Juliá, C. y col., 2008).

En resumen, la Región de Atacama se ubica en la zona de transición entre la “zona hiperárida” de la Región de Antofagasta (desierto de atacama) y la “zona mediterránea semiárida” de la Región de Coquimbo, de modo que se observa un aumento paulatino en las precipitaciones invernales hacia el sur de la región, lo que se traduce en un mayor aporte hídrico (pluvionival) para los cursos de agua ubicados en la franja central y sur de la región (río Copiapó y río Huasco) a diferencia del río Salado, ubicado en la zona norte de la región, el cual presenta un régimen seco o muy esporádico. Debido a estas condiciones, hay un mayor desarrollo de la vegetación hacia el sur de la región, permitiendo incluso la subsistencia de faenas agrícolas gracias a la presencia de terrazas fluviales, sectores de vega y embalses artificiales en torno a los ríos que abastecen de suficiente agua para el desarrollo de la actividad.

1.3.1.2. Suelos regionales

Los suelos regionales han sido clasificados dentro de 9 tipos (Ulloa, R. y Ortiz de Zárate., 1989) según la nomenclatura de la FAO-UNESCO (1971-1981), cuyas bases han

sido actualizadas por parte de la misma organización el año 2015 (FAO, 2015). Los 9 tipos son: Protosuelos con costras salinas, Yermosoles Cálcidos, Cambisoles Ócricos, Regosoles con costras salinas, Xerosoles cácidos y Litosoles, Histosoles y Litosoles, Fluvisoles, Xerosoles Cálcidos, Litosoles (Novoa, J. y col., 2008). Éstos son representados en el mapa regional mostrado en la figura 3.

En la zona de estudio, tal como se observa en la figura 3, los Yermosoles Cálcidos (2) se extienden a lo largo de toda la zona costera, mientras que los Xerosoles Cálcidos y Litosoles (5) se encuentran en la precordillera y cordillera regional. El dominio de los Regosoles con costras salinas (4) se extiende entre la franja media del límite con la Región de Antofagasta y la cuenca del río Copiapó. Los Fluvisoles (7) ocupan el fondo del valle del río Copiapó. El dominio de los Cambisoles Ócricos (3) se ubica al norte del valle del río Copiapó, entre los dominios de los Yermosoles Cálcidos y los Regosoles con costras salinas. Al sur del valle del río Copiapó se ubica el dominio de los Xerosoles cácidos (8). Por su parte, los dominios con menor extensión dentro de la región, entre ellos, los Protosuelos con costras salinas (1) y los Histosoles y Litosoles (6). Los primeros se ubican en el límite central con la Región de Antofagasta y los segundos, se ubican en la zona altiplánica limitante con la Región de Antofagasta. Por último, el dominio de los Litosoles (9) queda fuera del área de estudio.

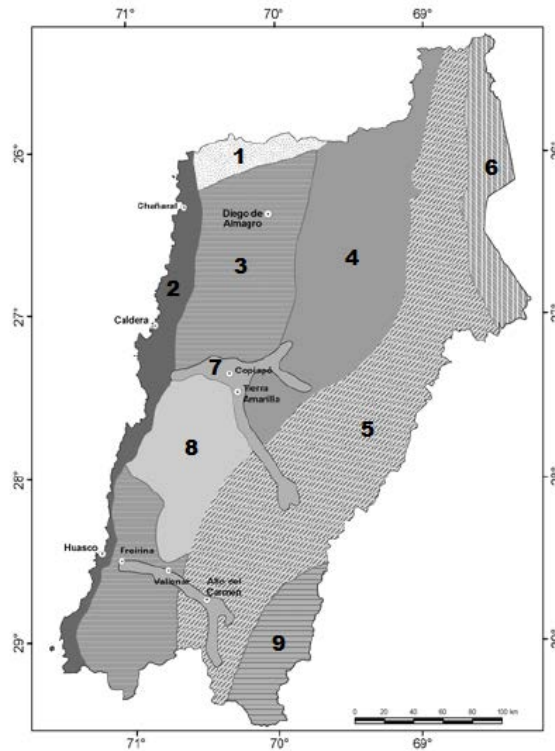


Figura 3. Clasificación de suelos regionales según nomenclatura FAO-UNESCO (modificado a partir de a partir Ulloa, R. y Ortiz de Zárate., 1989).

1.3.1.3. Geomorfología

A partir de la información disponible en la zona es posible distinguir 12 macrounidades geomorfológicas (Borgel, R., 1983; Albers, C., 2012; Ulloa, R. y Ortiz de Zárate., 1989), las cuales se muestran en la figura 4: Cordillera de la Costa, Cordillera Prealtiplánica (unidad equivalente a Cuenca Altiplánica, según mapa de Ulloa, R. y Ortiz de Zárate., 1989), Cordillera Volcánica Activa, Farellón Costero, Gran Fosa Prealtiplánica (unidad equivalente a la Cordillera Domeyko, según mapa de Borgel, R., 1983), Llanos de Sedimentación Fluvial o Aluvional, Pampa austral, Pampa Transicional, Pediplanos-Glaci-Piedemonte, Planicie Marina o Fluviomarina, Precordillera de Domeyko y Sierras Transversales de la cordillera Andina (unidad equivalente a la Cordillera de los Andes, según los mapas de Borgel, R., 1983; Ulloa, R. y Ortiz de Zárate., 1989).

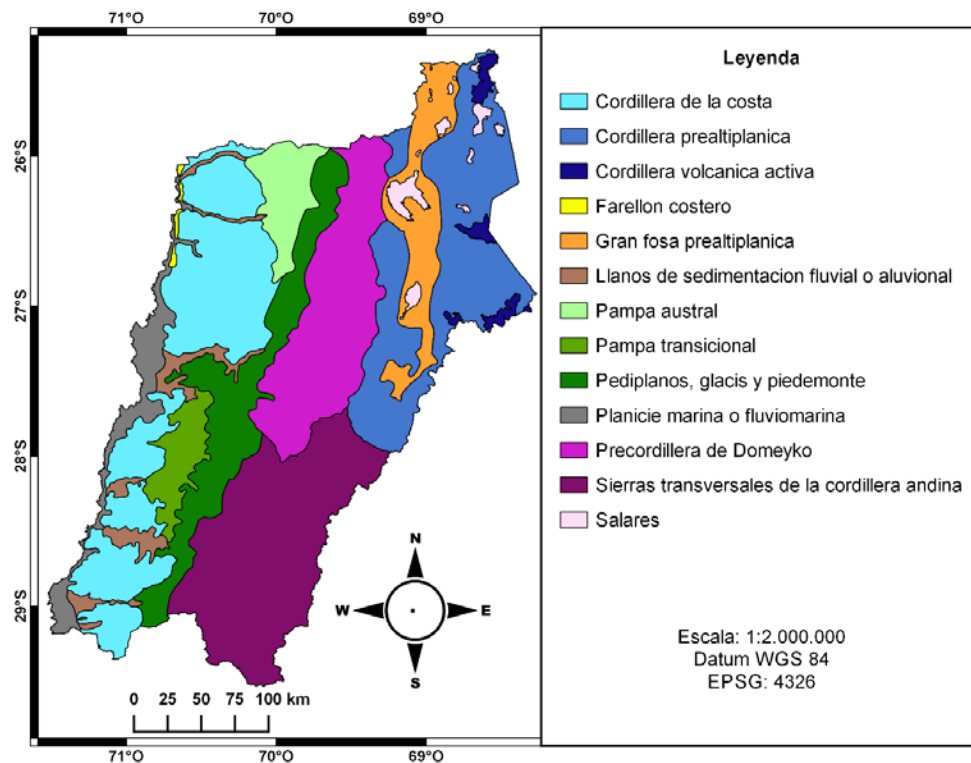


Figura 4. Macrounidades geomorfológicas y salares de la Región de Atacama.

La figura anterior demuestra la compleja topografía de la Región de Atacama, la cual está representada principalmente por los dominios cordilleros y precordilleros, seguido por el dominio de las pampas, pediplanos, glaciares y piedemonte.

1.3.1.4. Geología

En el año 2002 el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) publicó la versión más actualizada del Mapa Geológico de Chile, el cual es incluido posteriormente dentro del “Plan Nacional de Geología”, correspondiendo a uno de los tres mapas cartográficos, denominado específicamente como “Mapa de Geología Básica”. Este mapa recopila dos décadas de mapeo geológico e investigaciones científicas nacionales e internacionales. En él se representan las unidades geológicas más relevantes en función de las características específicas que permiten su segregación.

En la Región de Atacama se observa una distribución heterogénea de las diferentes unidades representadas, lo que da cuenta de su complejidad geológica, la cual debe ser

considerada al momento de realizar un estudio geoquímico de los suelos, sobre todo si se trata de suelos poco desarrollados (SERNAGEOMIN, 2003). A grandes rasgos, la superficie regional, en función del origen del sustrato rocoso, está compuesta principalmente por secuencias de carácter ígneo, tanto intrusivas o plutónicas como extrusivas o volcánicas; seguido por secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias; por último, es posible reconocer secuencias de carácter metamórficas, cuya distribución en la zona de estudio es escasa.

1.3.2. Principales actividades económicas de uso del suelo en la III Región

En primer lugar se encuentra la minería, la cual se ha practicado desde el siglo XIX hasta la actualidad, incluyendo proyectos mineros de pequeña y gran envergadura. Dentro de los minerales metálicos explotados se encuentra el cobre, molibdeno, oro, plata y el hierro. Además, se explotan rocas y minerales industriales como: caliza, coquina, carbonato de calcio, ácido sulfúrico, cuarzo, fosforita, mármol, dolomita y pirofilita.

En la zona de estudio existen alrededor de 1364 faenas mineras (Chañaral: 200; Diego de Almagro: 241; Copiapó: 657; Tierra Amarilla: 266) clasificadas como activas, inactivas, en paralización temporal y faenas mineras irregulares, estas últimas, correspondientes a la pequeña minería en proceso de regularización (SERNAGEOMIN, 2011).

Los desechos provenientes de la actividad minera se han distribuido en relaves ubicados en distintos puntos de la región. Se registran en la zona alrededor de 137 relaves mineros en categoría de activos, no activos y abandonados (SERNAGEOMIN, 2015b). Los que, mayoritariamente, se ubican cercanos a sitios poblados y en torno a cursos de agua.

En segundo lugar se encuentra la actividad agrícola, la que se ha desarrollado principalmente en los valles de Copiapó y Huasco, dadas las condiciones de la zona en cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico. Sin embargo, la implementación de sistemas de riego adecuados han permitiendo el cultivo de diversas especies, lo que ha impulsado el crecimiento del sector agropecuario-silvícola; siendo la fruticultura el recurso que

presenta la mayor importancia en el sector, principalmente la producción de vid o uva de mesa y olivos. En relación a la uva de mesa, su cultivo se desarrolla principalmente en la zona alta de los valles de las comunas de Tierra amarilla y Copiapó. El olivo por su parte, se cultiva principalmente en las comunas de Copiapó, Caldera, Huasco y Freirina (ODEPA, 2017).

1.3.2.1. Impactos ambientales asociados

Según la magnitud y condiciones bajo las cuales se realizan, tanto la minería como la agricultura generan impactos negativos sobre el medio ambiente. Los efectos de dichos impactos son diversos, pues dependerán del tipo de impacto y el componente ambiental afectado. De éstos, cabe destacar aquellos que pueden ser clasificados dentro de las letras a) y b) del artículo 11 de la Ley 19.300:

- a) “Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos.
- b) Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.”

En este sentido, ambas actividades económicas generan efluentes, emisiones o residuos tóxicos que contienen una serie de metales pesados, los cuales finalmente entran en contacto con el suelo y con cuerpos de aguas superficiales o subterráneos; provocando un deterioro en la calidad de éstos y por tanto, generan un riesgo potencial para la salud de la población.

1.3.3. Normativa ambiental en materia de suelos

En Chile no existe una base legal sólida para la protección y manejo del suelo; si no que existe una serie de Leyes y decretos pertenecientes a los distintos organismos del Estado (Ministerio de Agricultura, Ministerio de Salud, Ministerio del Medio Ambiente, entre otros), que se vinculan de manera parcelada en materia de suelos, de acuerdo a los registros de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN).

Es importante señalar la imposibilidad, desde el punto de vista legal, de referirse a contaminación de suelos en territorio chileno, puesto que no se dispone de un estándar o

norma que establezca cuáles son los niveles aceptados para los distintos elementos o compuestos químicos en un suelo que permitan declararlo apto para un determinado uso, sin que ello represente un riesgo para la salud humana. Sin embargo, el Reglamento del Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA) establece en su artículo 11 que, ante la ausencia de normas de calidad y emisión se utilizará como referencia la normativa internacional del listado de países mencionados en el mismo artículo, “priorizando aquel Estado que posea similitud, en sus componentes ambientales, con la situación nacional y/o local” (D.S 40/2003. Art. 11).

A pesar de ello, no se debe perder de vista que el objetivo del RSEIA es utilizar la normativa de estos países como antecedentes para establecer si un determinado proyecto debe ser sometido, o no, a una Evaluación de Impacto Ambiental y no como una norma de calidad ambiental.

1.3.4. Bibliografía disponible a nivel nacional y regional

En Chile, de acuerdo a la tendencia mundial, se han realizado esfuerzos para el establecimiento de las concentraciones naturales de metales en suelos (concentración *background* o *background* geoquímico, dependiendo del enfoque). En cuanto a la bibliografía disponible, principalmente se encuentran estudios correspondientes a tesis, seminarios y memorias de título de distinto grado y en menor medida, investigaciones publicadas en revistas científicas que tratan, generalmente, sobre concentración de metales pesados en suelos de uso agrícolas y áreas mineras (de Gryns, A., 1961; Alfaro, G., 1980; Townley, B. y col., 2000; Higuera, P. y col., 2004; Tume, P., y col., 2008; entre otros).

Por otro lado, existen iniciativas por parte del gobierno como aquella impulsada el año 2009, denominada “Plan Nacional de Geología”. Dicho plan consiste en la elaboración de 3 mapas cartográficos diferentes que contienen información acerca del patrimonio productivo y ambiental del territorio nacional. Específicamente, uno de éstos se denomina Mapa Geoquímico e incluye la presencia y concentración de 59 elementos químicos, obtenidos a partir de muestras de suelo superficial. En primera instancia, el Mapa Geoquímico se compone de 12 “cartas” o mapas que abarcan el territorio nacional de la Cordillera de la Costa y la Depresión Intermedia entre las regiones de Arica y

Parinacota y Coquimbo. Desde el año 2015, se cuenta con los mapas correspondientes a las zonas de Arica, Iquique y Pisagua, mientras que los mapas de Vallenar y La Serena se encuentran en edición. Con respecto al resto de los mapas, su elaboración se proyecta a futuro.

En cuanto a la situación regional, existe muy poca información sistematizada, pese a la existencia del “Plan Nacional de Geología”, ya que sus resultados aún se encuentran en estado de avance y abarcan áreas focalizadas. Esto podría resultar preocupante, considerando las características y contexto actual de la zona de estudio, donde en marzo del año 2015 y mayo del 2017 se registraron inusuales precipitaciones que provocaron el desbordamiento de los ríos Copiapó y Salado, causando inundaciones en diversas localidades donde se ubicaban algunos relaves mineros. Por tanto, es posible que esto provocara la movilización y reactivación de los contaminantes metálicos presentes en los relaves mineros o provenientes de otras fuentes, lo cual podría significar un riesgo potencial para la salud de la población en la zona debido al aumento de la concentración de metales pesados en los suelos.

Si se contara con una línea de base que contenga las concentraciones naturales o *background* de los metales en el suelo de la zona, sería posible comparar dichos niveles con valores obtenidos posterior al evento, y así identificar sitios contaminados, siendo éstos en donde las concentraciones superen los niveles *background* (*high outliers*). A su vez, dicha línea base podría ser utilizada en la elaboración de normas de calidad. Para ello, en su elaboración se debe considerar la complejidad del componente suelo en cuanto a tipos, usos y diversidad geológica. Además, es necesario que los valores utilizados presenten significancia estadística, de modo que éstos sean representativos de cada zona.

1.4. Objetivo General

- Establecer la concentración natural o *background* de metales en los suelos de las comunas de Copiapó, Chañaral, Tierra Amarilla y Diego de Almagro, III región de Chile. En base a las recomendaciones metodológicas internacionales.

1.5. Objetivos Específicos

- Determinar el rango de concentraciones naturales o *Background* de los metales (Cd, As, Cu, Ni, Pb, Al, Mn, Co, Fe, Hg) en los suelos de las comunas de Chañaral, Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla.
- Identificar los valores anómalos existentes para cada uno de los metales estudiados en base al criterio de clases propuesto por Tukey, J. (1977).
- Identificar y caracterizar geoquímicamente las posibles zonas anómalas detectadas mediante la elaboración de mapas geoquímicos que representen la distribución de las concentraciones en los suelos para cada uno de los metales estudiados.
- Determinar la posible fuente u origen de las anomalías detectadas en base a criterios geológicos.
- Elaborar un mapa geoquímico referencial de la zona, seleccionando uno de los elementos estudiados bajo un criterio de riesgo ambiental y utilizando el rango de concentraciones naturales o *background* como referencia.

II. METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolla a partir de una base de datos, correspondiente a las concentraciones de diferentes metales en suelo superficial (0-20 [cm] de profundidad), la cual se obtuvo de acuerdo a un plan de muestreo y posterior análisis realizado por parte del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA).

2.1. Plan de muestreo

El plan de muestreo, elaborado y ejecutado por personal del CENMA, consideró las siguientes etapas:

- **Identificación de Tipos Geológicos de Suelo (TGS) por comuna:**

Se escogieron las unidades geológicas representadas en el Mapa Geológico de Chile, que en este caso se definieron como Tipos Geológicos de Suelo (TGS). A partir de esto, se realizó un análisis cartográfico del mapa y se identificaron los diferentes TGS presentes en la zona de estudio. Este criterio de selección para los sitios de muestreo está fundamentado en que la zona norte del país presenta suelos poco desarrollados, por lo que el factor geológico de la zona podría ser determinante en la composición química del suelo superficial.

- **Asignación de puntos preliminares de muestreo por TGS:**

A partir de los TGS identificados, se realizó una selección de aquellos sitios en donde no existe intervención antropogénica evidente, es decir, sitios sin uso de suelo conocido (agrícola, residencial o industrial) y que además cuenten con vías de acceso adecuadas. Con esto, se asignaron coordenadas preliminares en 63 sitios de muestreo, los que se componen por 43 TGS o unidades geológicas diferentes, 20 de las cuales se repiten en diferentes sectores de la zona de muestreo. En la tabla 9 (Anexo 6.1) se detallan los TGS seleccionados junto a la descripción extraída a partir del Mapa Geológico de Chile.

- **Definición de área de muestreo preliminar:**

A partir de las coordenadas preliminares establecidas, se definió un área circular (figura 5) representativa para cada uno de los 63 sitios de muestreo, cuyo radio, definido según la superficie que abarca cada unidad geológica o TGS, varía entre 50 a 3000 [m] aproximadamente. Posteriormente, se distribuyen 7 puntos de muestreo por sitio, 1 punto al centro y 6 puntos ubicados en el perímetro de la circunferencia, alcanzando un total de 441 puntos.



Figura 5. Esquema de muestreo preliminar.

- **Toma de muestras**

Durante los días 10 y 24 de Mayo del 2016 se realizó la campaña de muestreo en los 441 puntos seleccionados, incluyendo 11 muestras duplicadas adicionales. En terreno, se evaluaron las condiciones en cada sitio de muestreo, verificando que éstos cumplan con los requisitos establecidos anteriormente. En los casos donde se evidenció indicios de actividad antropogénica, o bien se presentaron dificultades para acceder al sitio, no se realizó la toma de la muestra para asegurar la representatividad de los niveles naturales, estableciéndose nuevos puntos de muestreo para el mismo TGS en sectores cercanos, cuyas desviaciones, en cuanto a las coordenadas originales, fueron debidamente

registradas usando un aparato GPS. En la tabla 10 (Anexo 6.1) se muestran las coordenadas de cada sitio de muestreo correspondiente a los TGS seleccionados.

Las muestras fueron recolectadas utilizando una pala plástica. Se tomó una porción aproximada de 300 [g] de suelo superficial (0-20 [cm]) en cada uno de los puntos y se almacenó en bolsas herméticas de polietileno etiquetadas correspondientemente, las cuales se mantienen en recipientes adiabáticos para su posterior traslado al laboratorio de análisis.

2.2. Análisis químico de las muestras

Las muestras fueron analizadas por personal del laboratorio de Química Ambiental en el CENMA, el cual se encuentra acreditado como laboratorio de ensayo de acuerdo con los requisitos previstos en la NCh-ISO 17025.Of 2005, lo que garantiza la trazabilidad y confiabilidad de los resultados.

La determinación de metales en las muestras, con excepción del Hg, se realizó de acuerdo al método analítico ICP – OES (US-EPA SW846- Método 6010D), cuyos resultados se expresan en base materia seca. En cuanto al Hg, se utilizó el método analítico (US-EPA SW846 – Método 7473).

2.3. Validación y preparación de los datos

Antes de realizar los análisis estadísticos univariados y multivariados, descritos en los puntos 1.2.3 y 1.2.4, se hizo una revisión y preparación de la base de datos para verificar que ésta cumpla con las condiciones mínimas que permitan la obtención de resultados con la mayor significancia estadística posible, teniendo en cuenta las características de los datos de composición geoquímica.

Se consideraron dos criterios para la validación de los datos, adicionales a los protocolos internos del laboratorio de análisis. Éstos son:

- La diferencia porcentual relativa (RPD – *Relative Percentage Difference*) entre muestra y duplicado no debiese superar el 20%.
- La cantidad de datos bajo el límite de detección (LDD) para cada elemento no debe superar el 30% del total de los datos.

Cabe destacar que en este estudio no se aplican metodologías de exclusión de datos *outliers*, ya que éstos proporcionan información relevante para el análisis de datos geoquímicos.

2.3.1. Análisis duplicados

Se utilizó la diferencia porcentual relativa (RPD) entre una muestra y su duplicado como un indicador de la precisión de los resultados, según se menciona en ambas metodologías de análisis utilizadas (US-EPA SW846: Métodos 6010D y 7473). Dicha diferencia no debe superar el 20%, en el caso de que no se cumpla con este requisito, el elemento correspondiente no será sometido a los análisis estadísticos multivariados.

Para el cálculo de la RPD entre una muestra y su duplicado se utiliza la siguiente ecuación:

$$RPD = \frac{|D_1 - D_2|}{\left(\frac{D_1 + D_2}{2}\right)} \cdot 100$$

Ecuación (5)

Donde D_1 y D_2 corresponden a la concentración de un elemento en la muestra original y duplicada respectivamente.

2.3.2. Límite de detección

Dada la incerteza del valor que representan los datos bajo el LDD, se establece una cantidad máxima de éstos con respecto al total de los datos para cada elemento, asegurando que se cuente con una cantidad suficiente de datos para los análisis estadísticos y a su vez, reducir el sesgo que representan dichos datos en los resultados obtenidos.

En este estudio se consideró un 30% como límite para los datos bajo el LDD. De modo que, aquellos elementos que no cumplan con este requisito, no serán considerados en los análisis posteriores. Por otro lado, en el caso de aquellos elementos que presenten una cantidad de datos bajo el LDD menor al 30%, se reemplazó el valor de dichos datos por la mitad del LDD correspondiente (Reimann, C. y col., 2008).

2.3.3. Transformación *Isometric Log-Ratio* (ilr)

Una vez que los datos bajo el LDD para cada elemento han sido reemplazados, se procede a la transformación del conjunto de datos. Para ello, se utilizó la ecuación (1). Dada la cantidad de datos contenidos en la base, esta operación se realizó utilizando la aplicación de hojas de cálculo de Microsoft Excel.

2.4. Estudio de los datos geoquímicos

2.4.1. Análisis estadístico univariable

Una vez se ha realizado la validación y preparación de los datos (punto 2.3.), se procede a la estimación de los diferentes parámetros estadísticos clásicos y robustos para el conjunto de datos originales y transformados (según corresponda) de cada uno de los elementos estudiados, en base a lo mencionado en el punto 1.2.3. Para ello, se utilizó el software de fuente abierta R, el cual se puede descargar libremente desde el servidor CRAN (<https://cran.r-project.org>).

2.4.1.1. Diagramas combinados

En base a lo expuesto en el punto 1.2.3.1, se elaboran los diagramas combinados para cada elemento estudiado, utilizando la base de datos transformada. Para ello, se utilizó el software R, incluyendo el paquete R commander (Rcmdr), disponible libremente en el mismo software. Éste incorpora una interfaz gráfica al software R que incluye herramientas que facilitan la elaboración de los diagramas combinados.

2.5. Línea base de concentraciones naturales o background

2.5.1. Determinación del rango de concentraciones naturales

Utilizando el criterio propuesto por Tukey, J. (1977), se estableció el rango de concentraciones naturales o *background* para cada uno de los elementos estudiados. Esto se realizó en base a los diagramas combinados, específicamente el diagrama Box-Plot. A partir del análisis del Box-Plot, realizado con el software R, se extrajeron los valores respectivos a cada clase, según se muestra en la figura 1. Luego, dichos valores son retransformados a la base original, utilizando la ecuación (2).

2.5.2. Elaboración de mapas geoquímicos

Los mapas geoquímicos fueron elaborados utilizando el software computacional QGIS versión 2.18.11, descargable libremente en su página oficial (<https://www.qgis.org/es/site/forusers/download.html>). QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto, licenciado bajo GNU – General Public License. Éste software corre sobre distintos sistemas operativos y soporta una amplia variedad de funciones y formatos de datos vectoriales, datos ráster y bases de datos.

Se elaboró un mapa geoquímico para cada uno de los elementos estudiados. Para ello, se utilizó una serie de capas que contienen la información geográfica de la zona de estudio, como son los límites regionales, comunales, nacionales, etc. Dichas capas, denominadas capas vectoriales, son archivos formato *Shapefile* (.shp) y se encuentran disponibles en el portal IDE Chile, dependiente del Ministerio de Bienes Nacionales (<http://www.ide.cl/descarga/capas.html>). A su vez, se crearon diferentes capas vectoriales a partir de la base de datos transformada, donde se proyectan los diferentes puntos gracias a las coordenadas registradas. Así, se obtuvo la distribución de los puntos de muestreo en la zona de estudio. Luego, se utilizó una herramienta incluida en el programa, llamada “ráster de interpolación”, la cual utiliza un algoritmo matemático para estimar la distribución de las concentraciones de cada elemento en la zona de estudio.

El algoritmo genera áreas de proyección, según la concentración de un elemento en un punto específico, calculando valores promedio para puntos muy cercanos, según la escala espacial utilizada. Por lo mismo, el algoritmo podría presentar limitaciones en el caso de que la distancia entre dos puntos sea demasiada, o bien cuando se encuentren dos puntos muy cercanos con concentraciones totalmente contrapuestas, es decir, un valor muy alto junto a uno muy bajo.

Esta herramienta se utilizó como referencia donde es posible observar, de manera aproximada, como se distribuyen las concentraciones e identificar posibles zonas anómalas. Para ello, el ráster utiliza una escala de colores, cuyos rangos se definen en base a las clases establecidas según el punto 2.5.1. Así, se distinguen zonas de diferentes colores, según la concentración del elemento en un sitio determinado.

2.6. Análisis de la distribución espacial de las concentraciones naturales o background

2.6.1. Identificación y caracterización de zonas anómalas

Con el objetivo de identificar y caracterizar las zonas anómalas detectadas, se realizó un análisis de los mapas geoquímicos elaborados para cada uno de los elementos estudiados. Para ello, utilizando el software QGIS 2.18.11, se realizó un análisis simultáneo de la base de datos, capas vectoriales, imágenes rásters e información bibliográfica pertinente. De esta manera, se consideraron los tipos de suelos regionales, unidades geomorfológicas y unidades geológicas.

2.6.2. Análisis estadístico multivariado

Para el análisis e identificación de las posibles asociaciones entre los elementos estudiados, primero, se realizó un ACP, de acuerdo al punto 1.2.4.1, utilizando la base de datos transformada y dejando fuera aquellos elementos que no cumplen con los criterios establecidos en el punto 2.3.1. A partir de éste análisis, se estableció el número de factores que serán considerados en el posterior AF. Se escogió la cantidad de componentes principales que expliquen al menos el 80% de la variabilidad total del conjunto de los datos. Posteriormente, se realizó el AF sobre los elementos previamente seleccionados, utilizando una cantidad de factores equivalente al número de componentes principales seleccionados. Así, se obtuvo una determinada cantidad de factores que representan diferentes asociaciones entre los elementos estudiados.

Las principales variables o elementos seleccionados en cada factor son aquellos que presentaron un factor de carga o *loading* entre $[+0.5, +1]$, los cuales son considerados como las asociaciones principales. Además, se incluyeron aquellos elementos que presentaron un factor de carga entre $[+0.3, +0.5]$, considerados asociaciones secundarias, los cuales se representan entre paréntesis en cada asociación.

Ambos análisis son realizados utilizando el software R, incluyendo el paquete “*DAS+R*” desarrollado especialmente para estudios geoquímicos (Reimann, C. y col., 2008). Este paquete contiene los análisis estadísticos, tanto clásicos como robustos y sus

respectivas representaciones gráficas, lo que permitió comparar los resultados del AF “clásico” y el AF robusto, según se mencionó en el punto 1.2.4.2.

2.7. Mapa Geoquímico Referencial

Con el propósito de ejemplificar la utilidad de la determinación de las concentraciones naturales o *background* de metales en los suelos, se elaboró un Mapa Geoquímico Referencial de la zona de estudio, el cual muestra la distribución espacial de la concentración de uno de los elementos estudiados. El elemento seleccionado corresponde al arsénico, el cual es considerado un contaminante prioritario, debido a su toxicidad, según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA – *Environmental Protection Agency*) (Galán, E. y Romero, A., 2008). Además, se destacan zonas de riesgo ambiental, las cuales son definidas en función de los niveles de concentración del Arsénico en el suelo superficial.

El criterio de riesgo ambiental se estableció en base a la concentración media de contacto más probable en el tiempo en un sitio específico, considerando la heterogeneidad de la matriz del suelo, incluso en escalas espaciales reducidas. Para ello, la EPA recomienda la utilización del límite superior de confianza del 95 % de la media, denominado Upper Confidence Limit 95% (UCL 95%), cuya estimación se ajusta a la distribución estadística del conjunto de los datos (US EPA, 2002). Así, utilizando el software ProUCL 5.1, descargable de manera gratuita en el sitio web de la EPA (<https://www.epa.gov/land-research/proucl-software>), se determinó el valor del UCL 95% asociado a la distribución mejor ajustada a cada subconjunto de datos, correspondientes a las 7 muestras que componen cada uno de los 63 sitios de muestreo.

Por último, se elaboró el mapa replicando el método mencionado en el punto 2.5.2. A partir del valor del UCL 95 % del arsénico en cada sitio, se creó un ráster de interpolación, cuyos intervalos de concentraciones se definieron en base al rango de concentraciones naturales del arsénico previamente establecido.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Validación de los datos

A continuación se muestra el resumen de los resultados de la validación de los datos. Utilizando la ecuación (5), se procedió al cálculo de la diferencia porcentual relativa (RPD) de cada uno de los elementos estudiados en los 11 pares de muestras duplicadas. Luego, se calculó el valor promedio de la RPD para cada una de las variables, lo cual se muestra en la tabla 2. Adicionalmente, se incluye el límite de detección (LDD) experimental para cada uno de los elementos, junto con el número de datos bajo el LDD (N) y su equivalente porcentual con respecto al número total de datos por variable (N %).

Tabla 2. Resumen resultados de validación de los datos.

Elemento	Promedio RPD (%)	LDD [mg/kg]	N	N % *
Cd	4,28	1,02	28	6,35
As	16,44	1,66	8	1,81
Cu	7,91	2,06	5	1,13
Ni	39,97	2,24	59	13,38
Pb	12,29	2,09	98	22,22
Al	10,83	1,58	0	0
Mn	10,24	2,51	0	0
Co	7,00	0,08	5	1,13
Fe	3,17	1,80	0	0
Hg	23,27	0,0015	1	0,23

* Porcentaje calculado en base al número total de muestras (441).

Con respecto a la RPD, de los 10 elementos estudiados, 2 no cumplen con el criterio de aceptación establecido. Estos son el Ni (39,97 %) y el Hg (23,27 %). En cuanto al resto, todos presentan resultados aceptables, destacando los casos del Cd, Cu, Co y Fe; quienes, en promedio, presentan una RPD menor al 10%.

En base al criterio de aceptación establecido, el Ni y el Hg no serán considerados en los análisis estadísticos multivariados dado que pueden significar un sesgo en los

resultados. Más aún, los resultados mostrados en la tabla 2, corresponden a las diferencias porcentuales relativas promedio. Sin embargo, si analizamos los resultados para cada par duplicado, en el caso del Ni, 7 de los 11 pares superan el 20 %, alcanzando incluso una diferencia superior al 138%. En cuanto al Hg, si bien el valor promedio supera levemente el criterio establecido; 6 de los 11 pares superan el 20 %, donde 5 pares presentan una diferencia porcentual superior al 30 %, alcanzando incluso un 50 %. Pese a lo anterior, ambos elementos sí serán sometidos a los análisis estadísticos univariados, ya que tal como se mencionó en el punto 1.3.4, en la zona existe muy poca información sistematizada con respecto al contenido y distribución de metales en los suelos. Por lo tanto, su análisis contribuye en ese sentido.

Con respecto al LDD, en la literatura internacional no se establece un porcentaje límite determinado, pues éste dependerá de la cantidad de datos y de los objetivos del estudio. Es común encontrar porcentajes en torno al 50%. En este caso, pese a que se consideró un porcentaje aún menor, todos los elementos estudiados presentaron un equivalente porcentual de datos bajo el LDD inferior al 30 %. De modo que no se excluye ninguna variable en base a este criterio.

3.2. Estudio de los datos geoquímicos

3.2.1. Análisis estadístico univariable

La tabla 3, que se muestra a continuación, resume los diferentes parámetros estadísticos que representan la distribución del conjunto de datos para cada variable. Se incluyen parámetros “clásicos” y robustos, los cuales fueron calculados en base a lo mencionado en el punto 1.2.3. Tal como se ve en la tabla, los resultados correspondientes a los parámetros estadísticos robustos, es decir, la desviación media absoluta (MAD) y coeficiente de variación porcentual robusto (CVR%), presentan menores valores en comparación a sus homólogos clásicos, desviación estándar (SD) y coeficiente de variación porcentual (CV%), respectivamente.

Tabla 3. Resumen parámetros estadísticos para el conjunto de datos de las variables estudiadas.

Elemento	Mín. [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	Media [mg/kg]	Media-ilor [mg/kg]	Máx. [mg/kg]	SD [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV%	CVR%
Cd	0,51	7,36	7,84	6,4	53,5	4,82	2,7	61,47	36,68
As	0,83	14,8	21,67	14,86	244,47	28,1	7,95	129,69	53,72
Cu	1,03	65,94	143,09	63,24	3969,86	430,29	51,21	300,72	77,66
Ni	1,12	13,48	15,84	10,77	152,05	14,51	7,61	91,56	56,45
Pb	1,05	7,88	18,7	7,13	840,09	57,81	8,01	309,16	101,65
Al	83,7	10768,16	11615,02	9669,25	88524	7292,86	4702,48	62,79	43,67
Mn	4,74	706,55	732,18	610,37	3387,55	396,63	263,62	54,17	37,31
Co	0,4	13,4	14,66	12,54	90,87	9,27	4,33	63,25	32,31
Fe	235,4	32565,01	33448,67	29681,19	92381,14	13099,72	9930,45	39,16	30,49
Hg	0,0008	0,0186	0,0297	0,0167	0,3999	0,0381	0,0197	128,26	105,91

Para los casos de MAD y CVR%, los menores valores se obtienen debido a que se calculan en base a la mediana, la cual no se ve afectada por los valores extremos. Sin embargo, sus homólogos clásicos SD y CV% se calculan en base a la media, cuyo valor se ve fuertemente afectado por la dispersión de los datos. Esto también se observa al comparar el valor de la media con la media-ilor. En este caso, la media-ilor se obtiene a partir de los datos transformados en el espacio ilr y posteriormente retransformada a la base original (ecuación 2). De modo que al momento de ser calculada, los datos presentan una mejor distribución debido a las propiedades de la transformación ilr mencionadas en el punto 1.2.2 y que se detallan en el estudio de Egozcue, J. y col. (2003).

Por otra parte, destaca la variación que presentan los diferentes elementos estudiados, que da cuenta de la heterogeneidad de los datos, lo cual es común cuando se trabaja con datos geoquímicos o ambientales, en donde interfieren múltiples procesos, tanto en el origen como en la distribución de los diferentes elementos. Esto se refleja en los valores obtenidos en SD, MAD, CV%, CVR% y en las diferencias entre valores mínimos y máximos. En algunos casos el CV% supera el 100%, alcanzando valores

superiores al 300%, como sucede con el Pb y el Cu. Por otra parte, el Fe presentó los menores porcentajes de variación.

3.2.1.1. Diagramas combinados

A continuación se muestra, a modo de ejemplo, una comparación entre un diagrama elaborado a partir del conjunto de datos transformado y otro a partir de la base de datos original. Luego, se realiza un análisis general del conjunto de diagramas combinados elaborados a partir de los datos transformados, los cuales se muestran en el Anexo 6.2.

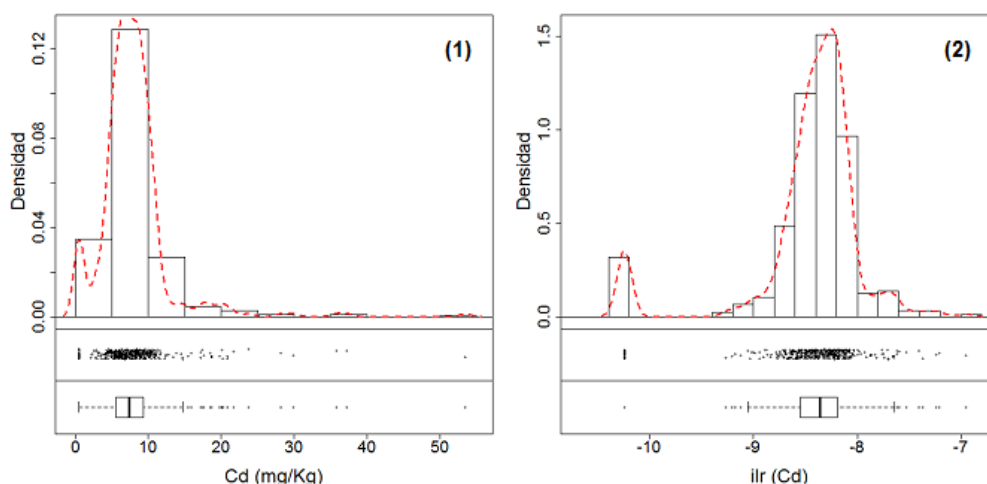


Figura 6. Comparación diagrama combinados entre datos originales (1) y transformados (2).

En la figura 6 se observa un ejemplo de las propiedades de la transformación ilr . En el diagrama (1) los datos se muestran aglomerados hacia la izquierda del eje de las abscisas, de tal manera que no es posible distinguir adecuadamente subgrupos dentro del conjunto de datos. Por ejemplo, los 28 datos con valores bajo el LDD del Cd (tabla 2), en este caso superan el límite inferior, por lo que no serían clasificados como valores anómalos, según los criterios establecidos por Tukey, J. (1977), quedando dentro de la misma categoría junto a datos de mayor concentración.

Por el contrario, en el diagrama (2) la distribución se muestra más centrada, con un ligero desplazamiento del conjunto de datos hacia la derecha del eje de las abscisas. En

este caso, se distinguen claramente los valores anómalos tanto negativos como positivos, puesto que la distribución se encuentra “expandida” y por tanto, los *peaks* se muestran mejor definidos.

En definitiva, la transformación ilr muestra de mejor manera la distribución de los datos, lo que permite una mejor clasificación de éstos. Sin embargo, para su interpretación es necesario retransformar los datos a la base original (ecuación 2).

Con respecto al conjunto de diagramas combinados elaborados a partir de los datos transformados, en todos los casos, excepto para el Hg, se observan datos por sobre el límite superior, los cuales se clasifican como anomalías positivas. En cuanto a estos datos, en algunos casos se encuentran dispersos dentro del rango de anomalías positivas, y en otros se encuentran agrupados, resultando en un *peak* definido. Dichas agrupaciones en el rango de anomalías podrían explicarse por un mismo origen o fuente de procedencia, como son los TGS o unidades geológicas.

En cuanto al rango de anomalías negativas, en todos los casos, salvo en el Pb y el Hg, se observan datos bajo el límite inferior. Cabe destacar los casos del As y el Ni, donde el conjunto de datos presentes en este rango corresponden únicamente a los valores bajo el LDD. Por otra parte, en los casos del Pb y el Hg, ambos presentan datos cuyas concentraciones superan ligeramente el límite inferior, correspondientes a valores bajo el LDD. Según la tabla 2, el Pb presenta 98 datos bajo el LDD y el Hg sólo 1. Considerando la incertidumbre asociada a los valores bajo el LDD, cabe la posibilidad de que representen realmente valores anómalos. Por lo tanto, sólo en caso de ser necesario, se deberían utilizar métodos de análisis químico más sensibles, es decir, que presenten LDD menores, que permitan determinar con mayor exactitud su concentración, lo cual conlleva un mayor costo económico.

3.3. Línea base de concentraciones naturales o background

A partir de la información contenida en los diagramas combinados y los criterios de clasificación de Tukey, J. (1977), se procede a la determinación del rango de concentraciones geoquímicas para cada elemento estudiado, lo cual constituye la línea de

base de las concentraciones naturales o *background* estadísticamente significativa para el conjunto de datos estudiado. Luego, con la elaboración de mapas geoquímicos, donde se representa la distribución espacial de las concentraciones; se identifican zonas anómalas en el área de estudio. Información que es contrastada con las características de la zona y análisis estadísticos multivariados, permitiendo la determinación de los posibles orígenes o fuentes de procedencia de las anomalías detectadas.

3.3.1. Determinación del rango de concentraciones naturales

Tabla 4. Resumen de datos Box-Plot para cada elemento.

	Valores expresados en [mg/kg]					
	Mín.	Lím. inf.	Q ₁	Q ₃	Lím. sup.	Máx.
Cd	0,51	2,59	5,59	9,33	20,12	53,50
As	0,83	3,02	9,42	20,09	62,57	244,47
Cu	1,03	6,08	33,75	105,94	587,56	3970*
Ni	1,12	2,65	8,75	19,40	64,04	152,02
Pb	1,05	0,87	4,69	14,48	78,29	840,09
Al	83,70	3110*	7761*	14228*	34921*	88525*
Mn	4,74	212,64	493,63	865,29	2007*	3388*
Co	0,40	5,51	10,60	16,40	31,56	90,87
Fe	235,40	14128*	26401*	39833*	72787*	92381*
Hg	0,0008	0,0004	0,0066	0,0369	0,4911	0,3999

*Decimales correspondientes a valores superiores a 1000 [mg/kg] aproximados al entero.

En la tabla 4, se muestran numéricamente los casos del Pb y el Hg, mencionados en el análisis de los diagramas combinados. En cuanto al Pb, la concentración mínima (1,05 [mg/kg]) supera el límite inferior (0,87 [mg/kg]). Sin embargo, el mínimo corresponde al subconjunto de datos bajo el LDD, cuyo valor fue reemplazado por la mitad del LDD, por lo que no corresponde a su valor real, sino a una aproximación. Por lo tanto, cabe la posibilidad de que su valor real sea menor al límite inferior, constituyendo un subconjunto anómalo. Lo mismo ocurre para el caso del Hg, donde además el valor máximo (0,3999 [mg/kg]) es menor al límite superior (0,4911 [mg/kg]).

Luego, a partir de la información contenida en la tabla 4, se procede a la determinación del rango de concentraciones naturales o *background*, utilizando el criterio de clasificación propuesto por Tukey, J. (1977).

En la tabla 5 se muestra el rango de concentraciones naturales o *background* subdividido en las clases mostradas en la figura 1.

Tabla 5. Rango de concentraciones naturales o background por cada elemento.

Valores expresados en [mg/kg]					
	I	II	III	IV	V
Cd	≤ 2,59	(2,59 – 5,59]	(5,59 – 9,33]	(9,33 – 20,12]	> 20,1
As	≤ 3,02	(3,02 – 9,42]	(9,42 – 20,09]	(20,09 – 62,57]	> 62,57
Cu	≤ 6,08	(6,08 – 33,75]	(33,75 – 105,94]	(105,04 – 587,56]	> 587,56
Ni	≤ 2,65	(2,65 – 8,75]	(8,75 – 19,40]	(19,40 – 64,04]	> 64,04
Pb	≤ 0,87	(0,87 – 4,69]	(4,69 – 14,48]	(14,48 – 78,29]	> 78,29
Al	≤ 3110	(3110 – 7761]	(7761 – 14228]	(14228 – 34921]	> 34921
Mn	≤ 212,64	(212,64 – 493,63]	(493,63 – 865,29]	(865,29 – 2007]	> 2007
Co	≤ 5,51	(5,51 – 10,60]	(10,60 – 16,40]	(16,40 – 31,56]	> 31,56
Fe	≤ 14128	(14128 – 26401]	(26401 – 39833]	(39833 – 72787]	> 72787
Hg	≤ 0,0004	(0,0004 – 0,0066]	(0,0066 – 0,0369]	(0,0369 – 0,4911]	> 0,4911

En sentido estricto, el rango de concentraciones naturales o *background* se define por los límites inferior y superior. Por lo tanto, todo valor fuera de dicho rango se considera anómalo. Tal como se destaca en la tabla 5, las clases II, III y IV representan el rango de concentraciones naturales propiamente tal. De modo que, las clases I y V constituyen las anomalías negativas y positivas respectivamente.

Para complementar la información contenida en las tablas 4 y 5, se elabora una tabla adicional que contiene el número de datos presentes en cada clase, junto al porcentaje de datos anómalos de cada uno de los elementos estudiados.

Tabla 6. Número de datos presentes por cada clase.

	I	II	III	IV	V	% anomalías
Cd	32	79	219	101	10	9,52
As	8	103	219	85	26	7,71
Cu	8	103	219	104	7	3,40
Ni	59	52	220	103	7	14,96
Pb	0	109	221	98	13	2,95
Al	22	88	220	108	3	5,67
Mn	29	81	221	104	6	7,94
Co	23	87	221	96	14	8,39
Fe	21	90	220	101	9	6,80
Hg	0	112	218	111	0	0

De acuerdo a lo mencionado en el punto 1.2.3.1, el criterio para discriminar valores anómalos pierde validez si el porcentaje de datos anómalos supera el 15 %. En este caso, todos los elementos cumplen con dicho requisito, sin embargo, el Ni queda a un 0,05% de no hacerlo. Por otra parte, el Pb pese a que no presenta datos en la clase I, 98 de los 109 datos de la clase II corresponden a valores bajo el LDD, lo cual es una cantidad de datos importante que podría significar la invalidez del rango establecido para este elemento, puesto que los 98 datos bajo el LDD sumados a los 13 datos presentes en la clase V, dan un total de 111 datos, equivalente a un 25 % de datos anómalos. Por lo tanto, debido a la relevancia ambiental del Pb producto de su toxicidad; sería recomendable la utilización de un método analítico que permita determinar pequeñas concentraciones con mayor certeza.

3.3.2. Mapas geoquímicos

A partir de los rangos de concentraciones naturales establecidos y a lo descrito en el punto 2.5.2, se elaboraron los mapas geoquímicos que representan la distribución espacial de las concentraciones naturales de los metales en los suelos de la zona de estudio.

En la figura 7 se muestra, a modo de ejemplo, el mapa geoquímico correspondiente al Cd. El conjunto de los mapas geoquímicos se muestran en el Anexo 6.3.

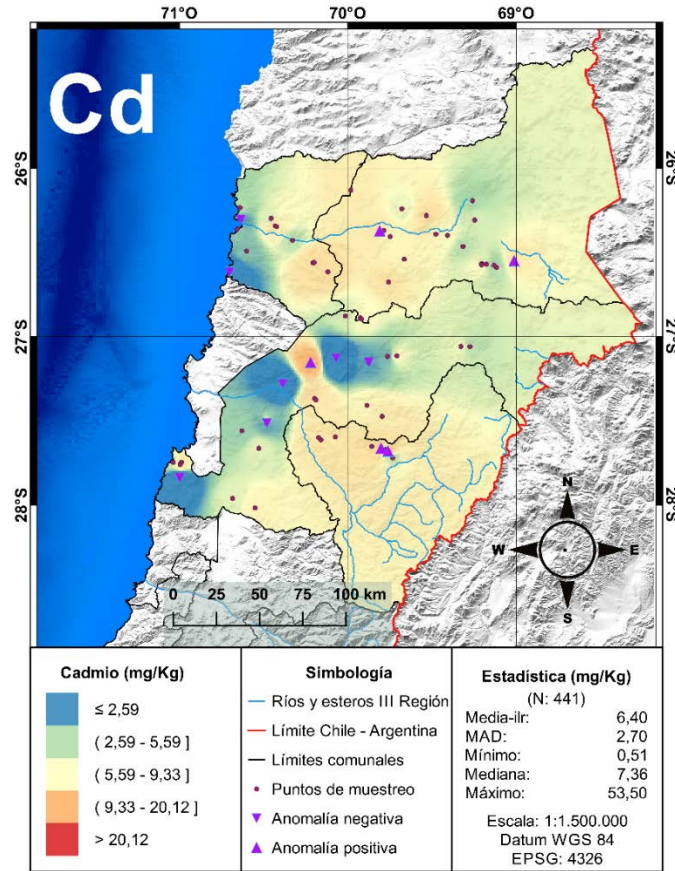


Figura 7. Ejemplo mapa geoquímico del cadmio.

El mapa geoquímico muestra la distribución espacial de las concentraciones del elemento en suelo superficial mediante una capa coloreada que representa las clases en las que se subdivide el rango de concentraciones naturales (tabla 5). En azul se muestran las zonas que representan anomalías negativas (clase I) y en rojo, aquellas que representan anomalías positivas (clase V). Los colores centrales (verde, amarillo y naranja. Clases II, III y IV) representan el rango “normal” de concentraciones del elemento en la zona. Esto no quiere decir que las concentraciones anómalas no formen parte del rango natural de concentraciones, pues esto debe ser evaluado para definir si las anomalías detectadas corresponden a fuentes naturales o antropogénicas. En ese caso, las anomalías geogénicas

o naturales en una zona determinada, deben ser consideradas al momento de utilizar el rango de concentraciones naturales o *background* como línea base o valores de referencia.

Por otra parte, la simbología del mapa incluye, entre otras cosas, los puntos correspondientes a los sitios de muestreos. Donde, por motivos de escala, no es posible distinguir los 7 puntos de muestreos ubicados en cada sitio. A su vez, los triángulos destacan los puntos en donde se encontraron valores anómalos.

Por último, se incluye un resumen estadístico del conjunto de datos del elemento correspondiente. En este caso, se reemplazaron los valores de la media y la desviación estándar por sus homólogos robustos, media-*ilr* y desviación media absoluta (MAD).

3.4. Análisis de la distribución espacial de las concentraciones naturales o background

3.4.1. Identificación y caracterización de zonas anómalas

A partir del análisis de los mapas geoquímicos, se identificaron y caracterizaron las zonas anómalas presentes en las distribuciones espaciales de las concentraciones de los elementos estudiados. Si bien se encontraron anomalías negativas y positivas, este estudio se centra en las positivas, debido a que éstas revisten, potencialmente, un mayor riesgo para la salud humana por exposición a elevadas concentraciones de ciertos metales.

Cadmio (Cd): De los 441 datos, tan sólo 10 superan el límite superior establecido para este elemento (20,12 [mg/kg]). Éstos se distribuyen en 5 sitios de muestreo, por lo que en algunos casos representan anomalías puntuales y no constituyen una zona anómala.

A partir del mapa se destacan 2 zonas anómalas. Una ubicada en la comuna de Copiapó y la otra en Tierra amarilla. En cuanto a la anomalía de Copiapó, la concentración promedio de Cd es 18,65 [mg/kg], de modo que no supera el límite del rango establecido. Sin embargo, el valor de su UCL 95% es 20,32 [mg/kg], por lo que según este parámetro sí constituye una zona anómala. Este sitio se ubica en la cordillera de la costa, el suelo corresponde al dominio de los Cambisoles Ócricos y de acuerdo al Mapa geológico, la unidad geológica a la que pertenece se denomina “Qa”, compuesta por material sedimentario correspondientes a depósitos aluviales.

La segunda zona anómala se compone de dos sitios de muestreo colindantes. Ambos se encuentran en la Precordillera Domeyko, con un suelo correspondiente al dominio de los Xerosoles Cálcidos y Litosoles. Sin embargo, difieren en el contenido de Cd y en la unidad geológica sobre la cual se desarrollan. Por un lado se encuentra la unidad denominada “Eg”, la cual está compuesta por rocas intrusivas. La concentración promedio de Cd es igual a 24,25 [mg/kg] y su UCL 95% es igual a 36,51 [mg/kg], por lo que ambos valores sobrepasan el límite superior. Cabe destacar que en éste sitio se encontró la mayor concentración de Cd (53,50 [mg/kg]). En cuanto a la otra unidad geológica, denominada “PE3i”, se compone por material volcánico. La concentración promedio de Cd en este sitio es igual a 17,27 [mg/kg], cuyo valor está bajo el límite superior del rango natural, sin embargo, el valor de su UCL 95% es igual a 25,71 [mg/kg], por lo que puede ser considerado como una zona anómala.

Arsénico (As): De los 441 datos, 26 superan el límite superior establecido para este elemento (62,57 [mg/kg]). Éstos se distribuyen en 5 sitios de muestreo. En general, la concentración de As en los 5 sitios es alta, de modo que serán considerados como zonas de anomalía positiva.

La zona que más destaca, se ubica en la comuna de Diego de Almagro, sobre la gran fosa prealtiplánica. El tipo de suelo corresponde al dominio de los Regosoles con costras salinas. La unidad geológica a la que pertenece se denomina “MQs” y está compuesta por material sedimentario, correspondientes a depósitos evaporíticos. En este sitio se registró la concentración más alta de As en la zona (244,47 [mg/kg]). El promedio es igual a 162,34 [mg/kg] y su UCL 95% es 201 [mg/kg]. Por tanto, supera considerablemente el límite superior del rango establecido.

Otro sitio que destaca se ubica en la comuna de Chañaral, sobre planicies marinas y fluvio-marinas. El suelo representa al dominio de los Yermosoles Cálcidos. La unidad geológica a la cual pertenece se denomina “Qe” y se compone de secuencias sedimentarias, correspondientes a depósitos eólicos (arenas de granulometría fina a media). La concentración promedio de As es igual a 143,83 [mg/kg] y su UCL 95% es igual a 157,5 [mg/kg].

En la comuna de Copiapó se encuentran otra zona anómala, compuesta por dos sitios de muestreo colindantes. Ambos se encuentran en la unidad geomorfológica denominada pediplanos, glacis y piedemonte; con un suelo correspondiente al dominio de los Fluvisoles. Sin embargo, difieren en el contenido de As y en la unidad geológica a la que pertenecen. Uno de estos sitios se desarrolla sobre la unidad denominada “Ki1m”, compuesta por secuencias marinas litorales (calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas). La concentración promedio de As en este sitio es igual a 60,24 [mg/kg] y el valor del UCL 95% es 67,58 [mg/kg]. Si bien el promedio no supera el límite superior establecido para el As, su UCL si lo hace. Además, de las 7 muestras que conforman este sitio, 5 presentan concentraciones de As entre 64,66 y 77,76 [mg/kg].

En cuanto al otro sitio, éste se desarrolla sobre la unidad geológica denominada “Ki2c”, compuesta por secuencias sedimentarias y volcánicas continentales. La concentración promedio de As es igual a 56,44 [mg/kg] y el valor de su UCL 95% es 70,01 [mg/kg]. En base al promedio, no sería considerado una zona anómala, sin embargo, su UCL está por sobre el límite superior. Además, de las 7 muestras que componen el sitio, 2 se ubican en el rango de las anomalías y el resto pertenecen a la clase IV (20,09 – 62,57 [mg/kg]), por lo que las concentraciones, en general, son altas para el rango establecido.

Por último, tenemos el sitio ubicado en la comuna de Tierra Amarilla, cuya geomorfología corresponde a los pediplanos, glacis y piedemonte. Con un suelo perteneciente al dominio de los Fluvisoles. La unidad geológica donde se desarrolla el sitio se denomina “Ksg”, la cual se constituye por rocas intrusivas (ej. Monzodioritas, granodioritas, biotita y hornblenda). La concentración promedio de As en el sitio es igual a 68,61 [mg/kg] y el valor del UCL 95% es 74,79 [mg/kg]. A su vez, las 7 muestras que componen el sitio, presentaron concentraciones sobre el límite, de modo que el sitio constituye claramente una zona anómala.

Cobre (Cu): Del total de datos, sólo 7 presentaron concentraciones superiores al límite establecido para este elemento (587,56 [mg/kg]), los cuales se encuentran agrupados en un único sitio de muestreo, ubicado en la comuna de Chañaral. La unidad

geomorfológica del sitio corresponde a las planicies marinas o fluvio-marinas. El suelo pertenece al dominio de los Yermosoles Cálcidos, desarrollados sobre la unidad geológica denominada “Qe”, la cual se compone por secuencias sedimentarias correspondientes a depósitos eólicos. La concentración promedio de Cu en el sitio es 3424 [mg/kg] y su UCL 95% es igual a 3769 [mg/kg], por lo que ambos valores superan significativamente el límite establecido para el rango de concentraciones.

Níquel (Ni): De los 441 datos, sólo 7 superan el límite establecido para este elemento (64,04 [mg/kg]). Éstos se distribuyen en 5 sitios de muestreo, por lo que en algunos casos dichos datos representan anomalías puntuales y no constituyen una zona anómala.

De los 5 sitios donde se registraron concentraciones anómalas, destaca aquel donde se encontró la concentración máxima de Ni (152,02 [mg/kg]). Éste se ubica en la comuna de Diego de Almagro, en la unidad geomorfológica correspondiente a la precordillera de Domeyko. El suelo pertenece al dominio de los Regosoles con costras salinas. El sitio se desarrolla sobre la unidad geológica denominada “JK1m”, compuesta por secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales (ej. Calizas, lutitas, areniscas calcáreas y coquinas). La concentración promedio de Ni en el sitio es igual a 58,11 [mg/kg], lo cual es inferior al límite establecido. Sin embargo, el valor del UCL 95% es 94,92 [mg/kg], el cual excede en un 48% el límite superior.

Plomo (Pb): Del total de los datos, 13 superan el límite establecido para este elemento (78,29 [mg/kg]). Éstos se distribuyen en 6 sitios de muestreo, de los cuales 4 se consideran anomalías puntuales. En base a esto se define una zona anómala, compuesta por dos sitios de muestreo colindantes ubicados en la comuna de Tierra Amarilla. Su unidad geomorfológica corresponde a la precordillera Domeyko. El suelo pertenece al dominio de los Xerosoles Cálcidos y Litosoles. Ambos sitios difieren en el contenido de Pb y la unidad geológica sobre la cual se desarrollan. Uno de los sitios se desarrolla sobre la unidad denominada “PE3i”, constituida por secuencias y complejos volcánicos continentales. La concentración promedio de Pb y su UCL 95% es igual a 167,38 y 295,6 [mg/kg] respectivamente. Ambos valores superan considerablemente el límite establecido

en el rango de concentraciones. El otro sitio que conforma esta zona anómala se desarrolla sobre la unidad geológica denominada “Eg”, compuesta por rocas intrusivas. La concentración promedio de Pb y su UCL 95% es 280,58 y 494,6 [mg/kg] respectivamente, cuyos valores superan ampliamente el límite superior establecido para este elemento.

Aluminio (Al): De los 441 datos, tan sólo 3 superan el límite establecido para este elemento (34921 [mg/kg]), los cuales se distribuyen en 2 sitios de muestreo. Debido a esta cantidad de datos, no es correcto hablar de zonas anómalas, ya que estos valores no representan la concentración de Al en los sitios de muestreo. Sin embargo, cabe destacar al sitio ubicado en la cordillera de la costa de la comuna de Copiapó. El tipo de suelo corresponde al dominio de los Cambisoles Ócricos. La unidad geológica sobre la cual se desarrolla se denomina “Qa” y se compone por secuencias sedimentarias correspondientes a depósitos aluviales. En este sitio, 2 de las 7 muestras superan el límite, sin embargo, las diferencias en las concentraciones entre las dos muestras que superan el límite y aquellas que no, son considerables. La concentración de Al en las 2 muestras anómalas es 79877 y 88528 [mg/kg], mientras que las concentraciones en el resto de las muestras que componen el sitio varían entre 7500 y los 9000 [mg/kg] aproximadamente. La concentración promedio de Al es igual a 29450 [mg/kg], lo cual no supera el límite establecido para este elemento. Sin embargo, el valor de su UCL 95% es 71963 [mg/kg], cuyo valor supera ampliamente el límite superior. En este caso, podría ser cuestionable la significancia del UCL 95%, pero se debe tener en cuenta que dicho parámetro representa la concentración promedio de exposición o contacto más probable en el tiempo, de modo que considera un criterio preventivo de riesgo.

Manganeso (Mn): De los 441 datos, sólo 6 superan el límite determinado para este elemento (2007 [mg/kg]). Éstos se distribuyen en 3 sitios de muestreo, 2 de los cuales representan anomalías puntuales. Así, para el caso del manganeso, destaca el sitio ubicado en la comuna de Tierra Amarilla. La unidad geomorfológica del sitio corresponde a los pediplanos, glacia y piedemonte. El tipo de suelo pertenece al dominio de los Fluvisoles y se desarrolla sobre la unidad geológica denominada “Kia2”, la cual se compone por secuencias sedimentarias y volcánicas (ej. Rocas epiclásticas, piroclásticas, lavas

andesíticas y basálticas). La concentración promedio de Mn en el sitio es 2016 [mg/kg] y su UCL 95% es igual a 2666 [mg/kg], por lo que en ambos casos excede el límite superior del rango de concentraciones.

Cobalto (Co): De los 441 datos, 14 superan el límite determinado para este elemento (31,56 [mg/kg]), los cuales se distribuyen en 5 sitios de muestreo. De éstos, 2 representan anomalías puntuales y 3 pueden ser considerados como sitios o zonas anómalas.

Por cercanía, dos sitios serán agrupados en una misma zona anómala. Ésta se ubica en la cordillera de la costa, comuna de Chañaral. El tipo de suelo pertenece al dominio de los Cambisoles Ócricos. Ambos sitios difieren en el contenido de Co y en la unidad geológica sobre la cual se desarrollan. Por un lado, se encuentra la unidad denominada “J3i”, formada por secuencias volcánicas continentales y marinas. La concentración promedio de Co en el sitio es 52,41 [mg/kg] y su UCL 95% es 67,08 [mg/kg], donde ambos valores exceden en más del 60% el límite superior. El otro sitio ubicado en la zona, se desarrolla sobre la unidad geológica denominada “JK3”, la cual está formada por secuencias volcánicas. La concentración promedio de Co es 29,10 [mg/kg], cuyo valor no supera el límite establecido. Sin embargo, el valor de su UCL 95% es 33,77 [mg/kg], lo cual lo define como zona anómala.

La otra zona anómala destacada se ubica en la precordillera Domeyko, comuna de Tierra Amarilla. El suelo pertenece al dominio de los Xerosoles Cálcicos y Litosoles. La unidad geológica sobre la cual se desarrolla se denomina PE3a, compuesta por secuencias y complejos volcánicos continentales de carácter ácido. Cabe destacar que en este sitio se registró la concentración más alta de Co de la zona de estudio (90,87 [mg/kg]). A su vez, la concentración promedio de Co es 47,87 [mg/kg] y su UCL 95% es igual a 65,28 [mg/kg], por lo que ambos valores superan el límite superior.

Hierro (Fe): De los 441 datos, 9 superan el límite determinado para este elemento (72787 [mg/kg]), los cuales se distribuyen en 3 sitios de muestreo. De ellos, 2 serán considerados zonas anómalas debido al contenido de Fe en el suelo.

La zona más destacada se ubica en la cordillera de la costa, comuna de Copiapó. El tipo de suelo corresponde al dominio de los Cambisoles Ócricos. La unidad geológica sobre la cual se desarrolla se denomina “Qa” y se compone por secuencias sedimentarias correspondientes a depósitos aluviales. En este sitio se registró la concentración más alta de Fe en la zona de estudio (92381 [mg/kg]). A su vez, la concentración promedio de Fe es 83681 [mg/kg] y su UCL 95% es igual a 90451 [mg/kg], por lo que ambos valores superan el límite superior del rango de concentraciones establecido para el Fe.

El otro sitio destacado se ubica en la cordillera de la costa, comuna de Chañaral. El suelo pertenece al dominio de los Cambisoles Ócricos y la unidad geológica sobre la cual se desarrolla se denomina “J3i”, la cual se compone por secuencias volcánicas continentales y marinas. La concentración promedio de Fe en el sitio es igual a 62149 [mg/kg], cuyo valor no supera el límite establecido para las anomalías. Sin embargo, el valor de su UCL 95% es 74515 [mg/kg], el cual si está dentro del rango de las anomalías. Además, en este sitio se registró la segunda concentración más alta de Fe en la zona de estudio (91348 [mg/kg]).

Mercurio (Hg): En el caso del Hg, no se registraron valores anómalos, tal como se puede observar en la tabla 6.

A continuación se muestra una tabla que resume la caracterización de las anomalías destacadas anteriormente.

Tabla 7. Resumen caracterización anomalías positivas destacadas en la zona de estudio.

Comuna	Unidades geomorfológica	Tipo suelo*	Unidad geológica	Secuencia	Anomalías positivas
Tierra Amarilla	Precordillera Domeyko	5	Eg	Rocas intrusivas	Pb; Cd
Chañaral	Cordillera de la costa	3	J3i	Volcánicas	Fe; Co
Diego de Almagro	Precordillera Domeyko	4	JK1m	Sedimentarias	Ni
Chañaral	Cordillera de la costa	3	JK3	Volcánicas	Co
Copiapó	Pediaplano, glacis y piedemonte	7	Ki1m	Sedimentarias	As
Copiapó	Pediaplano, glacis y piedemonte	7	Ki2c	volcanosedimentarias	As
Tierra Amarilla	Pediaplano, glacis y piedemonte	7	Kia2	Volcanosedimentarias	Mn
Tierra Amarilla	Pediplanos, glacis y piedemonte	7	Ksg	Rocas intrusivas	As
Diego de Almagro	Gran fosa pre altiplánica	4	MQs	Sedimentarias	As
Tierra Amarilla	Precordillera Domeyko	5	PE3a	volcánicas	Co
Tierra Amarilla	Precordillera Domeyko	5	PE3i	Volcánicas	Pb; Cd
Copiapó	Cordillera de la costa	3	Qa	Sedimentarias	Fe; Al; Cd
Chañaral	Planicie marina o fluvio marina	2	Qe	Sedimentarias	Cu; As

*Los tipos de suelo están enumerados de acuerdo descripción realizada en el punto 1.3.1.2 (Suelos Regionales).

A partir de la tabla 7 se desprende que, Tierra Amarilla es la comuna que concentra la mayor cantidad de zonas anómalas destacadas, correspondientes a los diferentes elementos estudiados. Las unidades geomorfológicas que concentran la mayor cantidad de anomalías son la precordillera de Domeyko y la cordillera de la costa. En cuanto al tipo de suelo, destaca el dominio de los Cambisoles Ócricos (3), seguido por el dominio de los Xerosoles cálcicos y Litosoles (5). Por último, en cuanto al origen del sustrato rocoso, destacan las secuencias sedimentarias, seguidas por las volcánicas.

3.4.2. Análisis estadístico multivariado

Según lo mencionado en el punto 2.6.2, se realizó un ACP, considerando sólo aquellas variables que cumplen con los criterios de validación definidos. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 2, tanto el Ni como el Hg no fueron incluidos en este análisis.

A continuación se muestra una tabla que resume los resultados obtenidos a partir del ACP, los cuales incluyen la desviación estándar (SD) y la proporción de la varianza asociada a cada componente principal (CP). Además, se expresa la proporción acumulada de la varianza con respecto a cada componente.

Tabla 8. Resultados análisis de componentes principales.

Importancia de los componentes								
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
SD	1,8522	1,2963	0,9591	0,9052	0,6978	0,6382	0,407	0,2999
proporción de la varianza	0,4288	0,2100	0,1150	0,1024	0,0609	0,0509	0,0207	0,0112
proporción acumulada	0,4288	0,6389	0,7539	0,8563	0,9171	0,9681	0,9888	1,0000

En base a los resultados mostrados en la tabla 8, se escogen 4 componentes principales que constituirán los factores que serán utilizados en el AF, debido a que estos son el menor número de componentes que logran explicar más del 80% de la variabilidad total del conjunto de datos, la cual se expresa en función de la proporción acumulada. Con 4 componentes se tiene una proporción acumulada igual a 0,8563 que equivale a un 85,63% de la variabilidad total de la base de datos.

Luego, a partir del número de factores escogido (4) se realizaron dos AF, uno en base a parámetros estadísticos “clásicos” y otro robusto, los cuales fueron sometidos a comparación, según lo mencionado en el punto 2.6.2.

Los resultados de ambos análisis se representan gráficamente a través de los factores de carga de cada variable. Primero se muestran los resultados correspondientes al AF clásico (Figura 8) y luego se sigue con el AF robusto (figura 9).

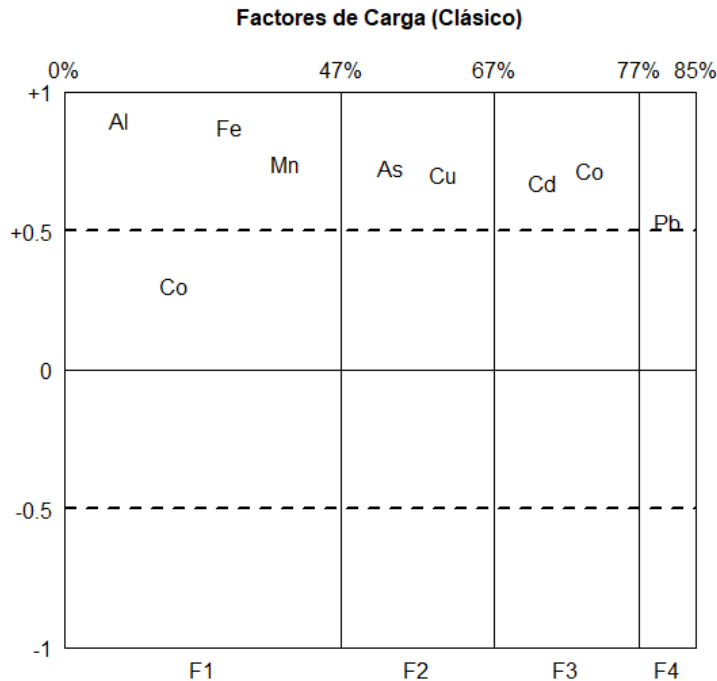


Figura 8. Resultados del análisis factorial clásico.

A partir de los resultados del AF clásico, mostrados en la figura anterior, se establecen 3 asociaciones correspondientes a los factores 1, 2 y 3. En cuanto al factor 4, éste no muestra ningún tipo de asociación química, por lo cual será analizado por separado.

Factor 1: Al, Fe, Mn, (Co)

Este factor por sí solo, explica el 47% de la variabilidad presente en el conjunto de los datos. Se compone por las señales o asociaciones principales entre Al, Fe y Mn. Además, se incluye la señal secundaria del Co.

Factor 2: As, Cu

Este factor por sí solo, explica el 20% de la variabilidad presente en el conjunto de datos. Se compone por las señales o asociaciones principales entre As y Cu.

Factor 3: Cd, Co

Este factor por sí solo, explica el 10% de la variabilidad presente en el conjunto de datos. Se compone por las señales o asociaciones principales entre Cd y Co.

Factor 4: Pb

Este factor por sí solo explica el 8% de la variabilidad presente en el conjunto de datos. Se compone únicamente por una señal principal de Pb.

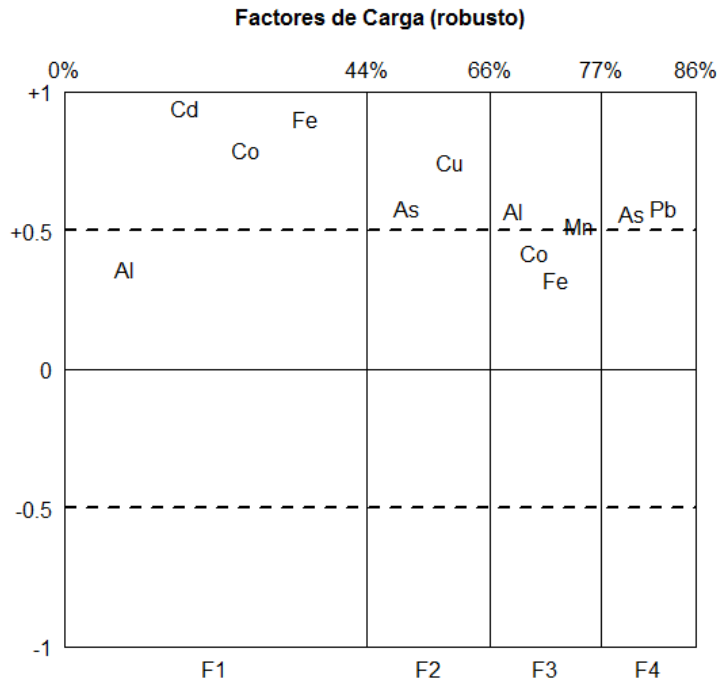


Figura 9. Resultados análisis factorial robusto.

A partir de los resultados del AF robusto, mostrados en la figura anterior, se establecen 4 asociaciones correspondientes a los factores 1, 2, 3 y 4.

Factor 1: Cd, Co, Fe, (Al)

Este factor por sí solo, explica el 44% de la variabilidad presente en el conjunto de los datos. Se compone por las señales o asociaciones principales entre Cd, Co y Fe. Además se incluye la señal secundaria del Al.

Factor 2: As, Cu

Este factor por sí solo, explica el 22% de la variabilidad presente en el conjunto de los datos. Se compone por las señales o asociaciones principales entre As y Cu.

Factor 3: Al, Mn, (Co), (Fe)

Este factor por sí solo, explica el 11% de la variabilidad presente en el conjunto de los datos. Se compone por las señales o asociaciones principales entre Al y Mn. Además se incluyen las señales secundarias correspondientes al Co y al Fe.

Factor 4: As, Pb

Este factor por sí solo, explica el 9% de la variabilidad presente en el conjunto de los datos. Se compone por las señales o asociaciones principales entre As y Pb.

Al comparar las diferentes asociaciones extraídas a partir de los AF clásicos y robustos, se puede observar que los factores obtenidos a partir del método robusto contienen a los obtenidos con el método clásico. Además, con el método robusto se detectaron asociaciones que no se observan en el método clásico, como la asociación presente en el factor 4 entre As y Pb.

Tal como se mencionó en el punto 1.2.4.2, el AF robusto no se ve afectado por valores extremos, puesto que considera las relaciones presentes en los segmentos centrales de las distribuciones de los datos. A su vez, en el AF robusto se ve disminuida la ponderación, o “peso”, de las variables que presentan rangos de concentraciones de mayor magnitud, lo cual mejora la comparabilidad de las variables analizadas. Lo anterior se ve reflejado en el reordenamiento de las variables consideradas en algunos factores. Por ejemplo, el factor 1 (clásico) se compone de los tres elementos con mayor “peso” debido a la magnitud de sus concentraciones (Al, Fe y Mn). Sin embargo, en el AF robusto se observa un reordenamiento de dichas variables y una combinación con el factor 3.

En base a los resultados, se utilizarán los factores extraídos a partir del AF robusto, con los cuales se analizarán las posibles asociaciones geoquímicas existentes que den cuenta de procesos u orígenes comunes, observables tanto en las distribuciones estadísticas como en las distribuciones espaciales.

3.4.2.1. Asociaciones químicas o geoquímicas

Es importante reiterar que, tanto el ACP como el AF son métodos estadísticos cuyos resultados dependen de las características del conjunto de los datos. Ambos análisis se deben efectuar con la precaución de que los supuestos que los sustentan se cumplan de la mejor manera, sobre todo considerando las características de los datos ambientales o de composición geoquímica. Pese a la mejoría en los resultados proporcionados por los métodos estadísticos robustos, éstos no pueden superar del todo los problemas de multimodalidad presentes en este tipo de datos, los cuales evidencian la existencia de múltiples procesos que influyen en los datos. Por lo tanto, al momento de interpretar los resultados, no se consideraron éstos como absolutos o definitivos, sino que dan cuenta de posibles asociaciones presentes en los datos, las cuales deben ser confirmadas con estudios focalizados en los sitios de interés.

Asociación 1: Cd, Co, Fe, (Al)

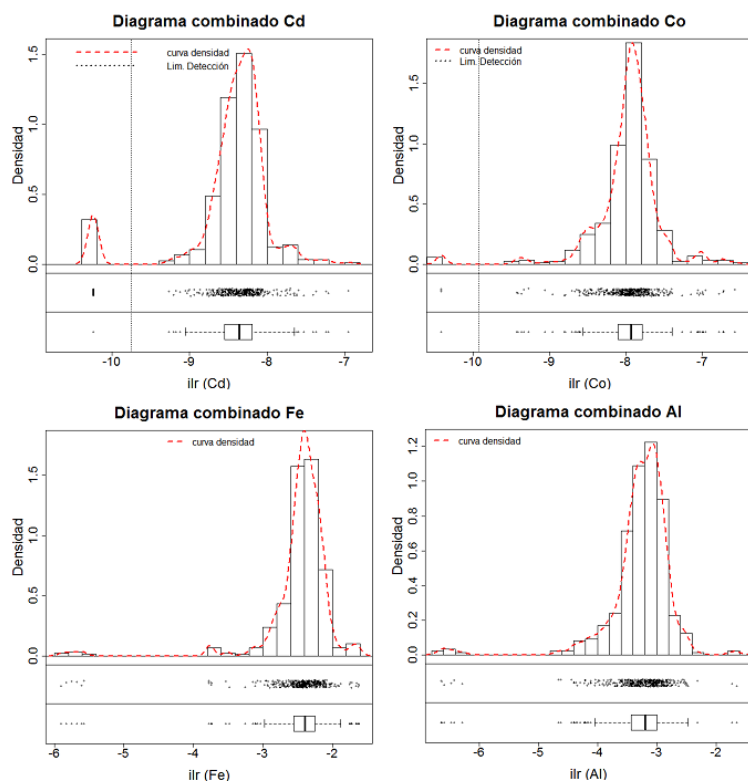


Figura 10. Distribuciones estadísticas asociación Cd, Co, Fe, (Al).

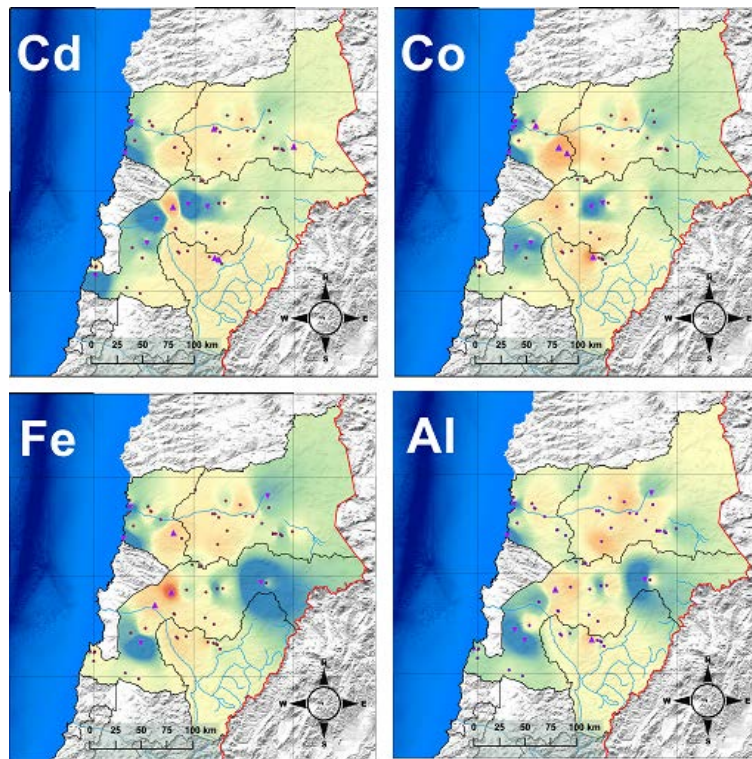


Figura 11. Distribución espacial asociación Cd, Co, Fe, (Al).

A partir de las figuras 10 y 11, se puede observar una gran concordancia entre los elementos presentes en la asociación 1. En cuanto a las distribuciones estadísticas, los cuatro elementos presentan grandes similitudes, observables de mejor manera a través de la curva de densidad (línea segmentada roja). En ella es posible identificar una serie de *peaks* semejantes en los 4 elementos, salvo por la altura del *peak* correspondiente a los datos bajo el LDD en el caso del Cd. Esto, a grandes rasgos, da cuenta de un posible origen común o proceso que explique la aparición de estos *peaks*, o bien de subpoblaciones dentro de cada conjunto de datos.

Lo anterior se complementa con las distribuciones espaciales de los 4 elementos presentes en esta asociación. En la figura 11, se puede observar un patrón de distribución muy similar entre los elementos asociados. La diferencia más notoria corresponde a la ubicación de las anomalías negativas (zonas azules). Por ejemplo, la zona azul detectada hacia el Sur-Oeste de Copiapó en el mapa del Cd, la cual no se observa en el resto de los elementos.

En general, se ve una tendencia de las concentraciones medias y altas a distribuirse en las unidades geomorfológicas correspondientes a la cordillera de la costa, pampa austral, pediplanos y precordillera de Domeyko.

Asociación 2: As, Cu

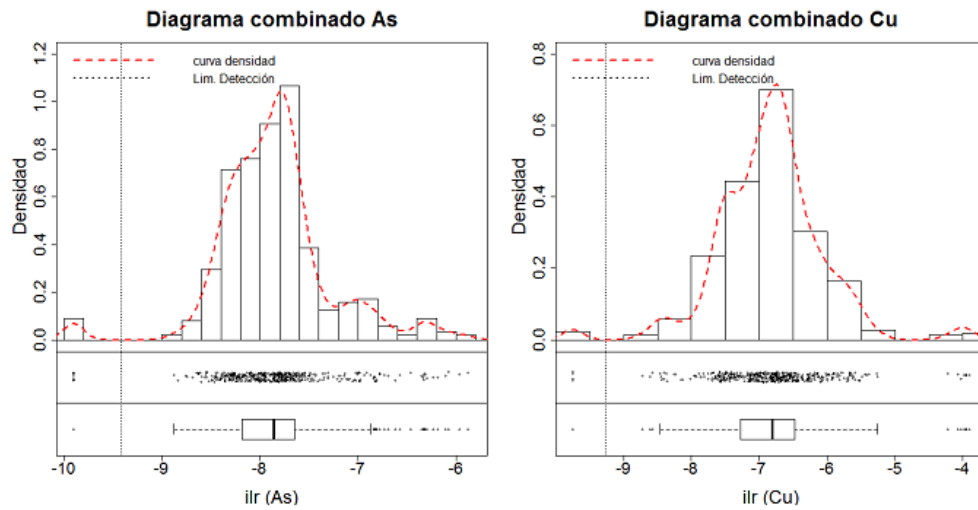


Figura 12. Distribuciones estadísticas asociación As, Cu.

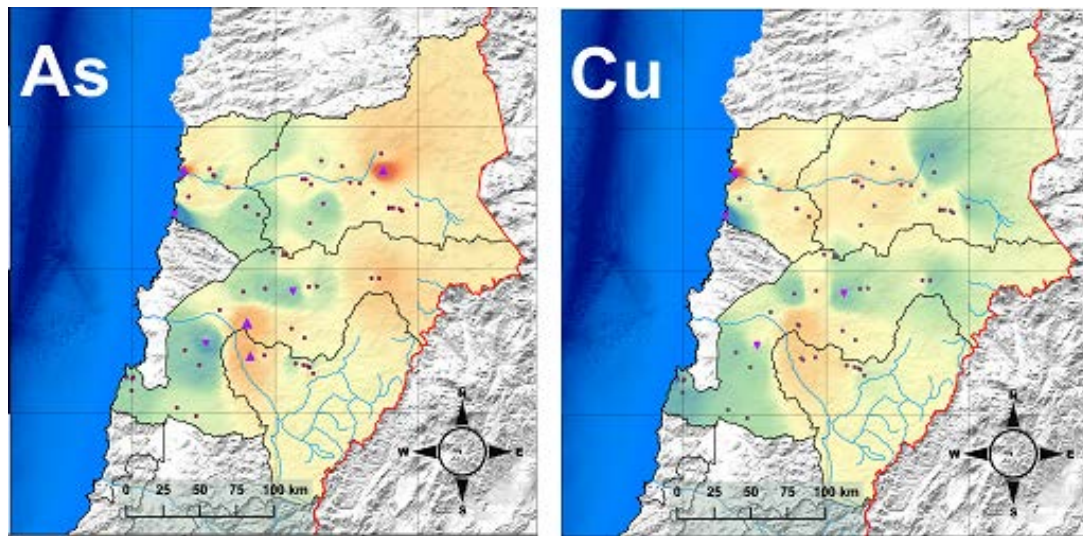


Figura 13. Distribución espacial asociación As, Cu.

En cuanto a las distribuciones estadísticas de los elementos presentes en la asociación 2, se puede observar concordancia entre los *peaks* de la curva de densidad. Sin embargo, en el caso del As se muestran dos *peaks* definidos en la zona de altas

concentraciones, mientras que en el diagrama del cobre sólo se ve uno. Comparando esta información con sus distribuciones espaciales (figura 13), se observa en ambos mapas el mismo patrón de distribución, salvo en el caso del As, donde se registra una zona anómala de carácter positiva adicional, ubicada en la comuna de Diego de Almagro. Dicha zona concuerda con el *peak* adicional observado en la distribución estadística del As.

En general, las concentraciones medias y altas tienden a distribuirse entre las comunas de Chañaral, Diego de Almagro y Tierra Amarilla. En las unidades geomorfológicas correspondientes a la cordillera de la costa, planicies marinas o fluvio-marinas, pampa austral, pediplanos, precordillera de Domeyko y prealtiplánica.

Asociación 3: Al, Mn, (Co), (Fe)

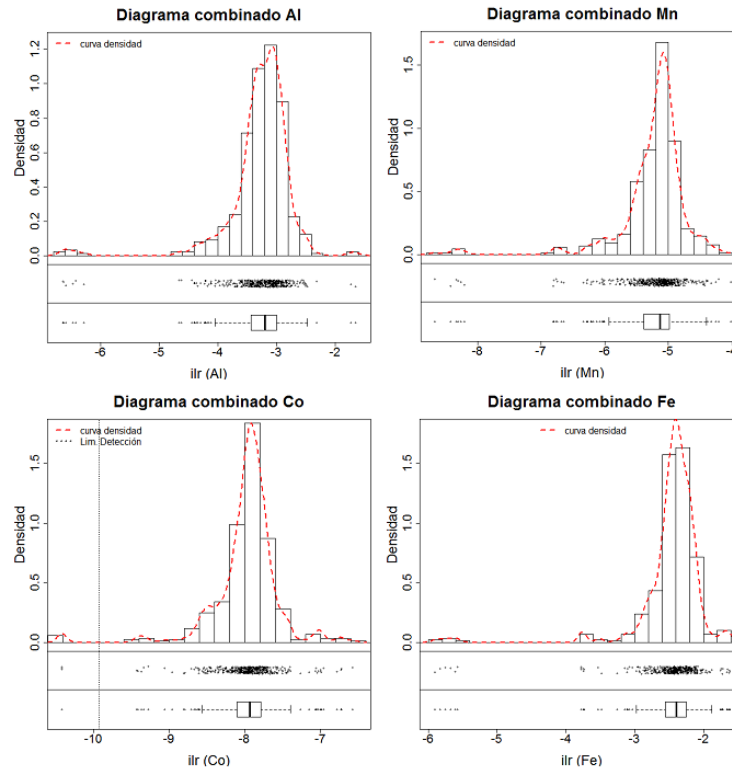


Figura 14. Distribuciones estadísticas asociación Al, Mn, (Co), (Fe).

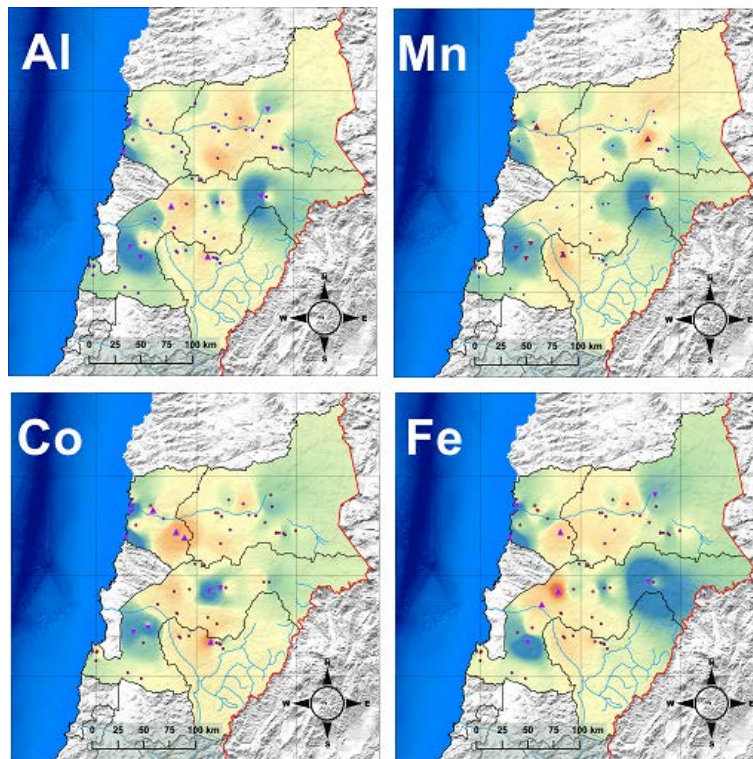


Figura 15. Distribución espacial asociación Al, Mn, (Co), (Fe).

En las figuras 14 y 15 se observa una gran concordancia en las distribuciones, tanto estadísticas como espaciales, entre los 4 elementos presentes en la asociación 3. Las tendencias son similares a las observadas en la asociación 1, puesto que participan casi los mismos elementos, salvo por el Cd (asociación 1) y el Mn (asociación 3). En este caso, es donde se observa la mayor similitud en cuanto a los patrones de distribución espacial de las concentraciones. Hay concordancia con las ubicaciones de las anomalías negativas, las cuales se distribuyen principalmente en las comunas de Chañaral y Copiapó. En cuanto a las concentraciones medias y altas, éstas tienden a distribuirse en las unidades geomorfológicas correspondientes a la cordillera de la costa, pampa austral, pediplanos y precordillera de Domeyko.

Asociación 4: As, Pb

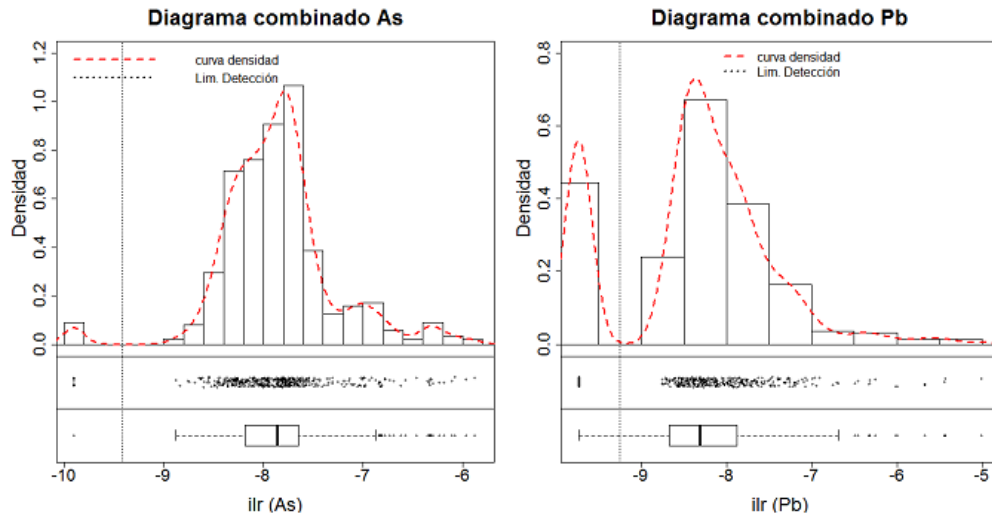


Figura 16. Distribuciones estadísticas asociación As, Pb.

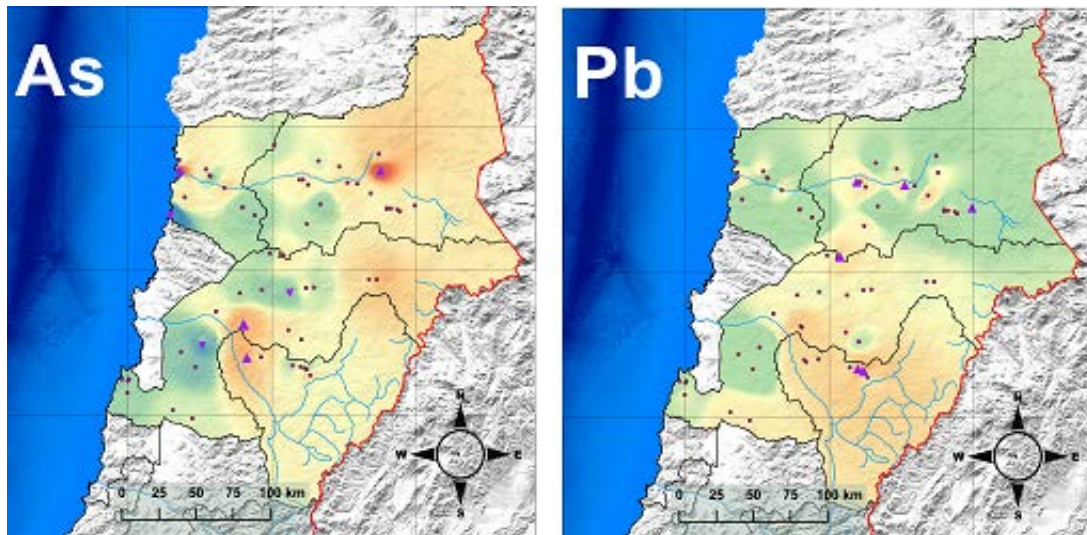


Figura 17. Distribución espacial asociación As, Pb.

Las distribuciones estadísticas de los elementos presentes en la asociación 4 presentan ciertas similitudes, sin embargo, no son tan claras como en el caso de las asociaciones 1, 2 y 3. En este caso, la mayor concordancia se da entre los datos centrales de ambas distribuciones. En cuanto a los datos extremos, se observa un *peak* pronunciado a la izquierda de la distribución del Pb, el cual también se encuentra en la distribución del As, pero de menor tamaño (figura 16). En ambos casos, corresponde a los datos bajo el

LDD. Sin embargo, la cantidad de datos bajo el LDD del Pb es mucho mayor. Dada la distribución estadística de los datos del Pb, aquellos que se encuentran debajo del LDD no quedan clasificados como datos anómalos, a diferencia del As. Esto, sin duda afecta el patrón de colores que representa la distribución espacial de los elementos, ya que los rangos de concentraciones del Pb y el As se dividen en 4 y 5 clases respectivamente.

En cuanto a la distribución espacial de los elementos presentes en la asociación 4 (figura 17), se observan claras diferencias hacia el norte de la zona de estudio, correspondiente a las comunas de Chañaral y Diego de Almagro. Por el contrario, hacia el sur de la zona de estudio, comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, el patrón de distribución presenta mayores similitudes, sobre todo en la comuna de Tierra Amarilla.

3.4.2.2. Posible origen de las distribuciones espaciales

La Región de Atacama se caracteriza por albergar diversos tipos de yacimientos metalíferos distribuidos en franjas casi paralelas, orientadas en dirección Norte-Sur, cuyas edades decrecen hacia el Este. La asociación entre yacimientos, según tipo y edad, permite dividir a la región en tres provincias metalogénicas: Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa (PMCC), Provincia Metalogénica de la Cordillera de Domeyko (PMCD) y Provincia Metalogénica de la Cordillera de los Andes (PMCA) (Vivallo, W. y col., 2009).

Por otra parte, desde hace un tiempo se ha estudiado la metalogénesis de la zona norte del país, a través de análisis geoquímico de muestra de menas, yacimientos metalíferos y sedimentos; dada la estrecha relación entre estos. Todo esto en el marco de la elaboración del “Mapa Metalogénico de Chile”, que forma parte de uno de los 3 mapas cartográficos incluidos en el “Plan Nacional de Geología” desarrollado por el SERNAGEOMIN.

En base a lo anterior, se podrían inferir los posibles orígenes o fuentes que explican la distribución espacial y las concentraciones de los elementos, a través de las asociaciones resultantes del análisis estadístico multivariado y los yacimientos metalíferos existentes en la zona de estudio.

Por lo general, las concentraciones medias y altas están distribuidas principalmente en la PMCC y la PMCD, específicamente, entre las unidades geomorfológicas correspondientes a la cordillera de la costa, pampa austral, pediplanos, planicies marinas o fluvio-marinas y precordillera de Domeyko. En este sentido, aquellas unidades que presentan alturas y pendientes más pronunciadas (sectores cordilleranos), se ven más afectadas por agentes erosivos como el agua y el viento, los que, sumados a los procesos de mineralización, provocan la movilización de los metales que posteriormente serán depositados y acumulados en sectores de pendiente menos pronunciada, como planicies y fondos de quebradas. Estos procesos, potenciados durante el período del invierno altiplánico y la compleja topografía de la zona, se evidenciaron en el caso del As, Pb y Cu, para los que se definieron zonas anómalas en sitios cuya geomorfología propicia la acumulación de detritos ricos en estos elementos provenientes desde la precordillera y cordillera de los Andes, a través de sistemas de drenajes endorreicos (quebradas) y desde la cordillera de la costa, a través de sistemas de drenaje exorreico.

En cuanto al As, su origen está asociado a yacimientos o depósitos mesotermales de oro, relacionados a rocas intrusivas y volcanosedimentarias, los cuales se presentan en la PMCC y en menor medida en la PMCD. En estos sitios, además se encuentran yacimientos ricos en Cu, como son los yacimientos de óxido de hierro-cobre-oro presentes en la cordillera de la costa y los pórfidos cupríferos presentes en la PMCD. (Vivallo, W. y col., 2009). A su vez, el Pb, según estudios (Astudillo, F. y col., 2015) en altas concentraciones se correlaciona con zonas mineralizadas de rocas intrusivas asociadas a depósitos de cobre o pórfidos cupríferos. Esta información concuerda con las anomalías destacadas en la tabla 7 y las asociaciones 2 (As, Cu) y 4 (As, Pb), lo cual da cuenta de que probablemente el proceso predominante que explica la distribución espacial de estos elementos sea de origen geogénico.

En cuanto al Fe, su origen está asociado a los yacimientos de hierro y óxidos de hierro-cobre-oro distribuidos principalmente en la PMCC (Vivallo, W. y col., 2009). Esto explicaría las anomalías positivas destacadas de Fe en la cordillera de la costa, las que a su vez, concuerdan con las anomalías destacadas de Co, Al y Cd (tabla 7). Todos estos

elementos están presentes en la asociación 1 (figuras 10 y 11), lo que da cuenta de un proceso de origen común para estos elementos, que en este caso es predominantemente geogénico o natural. Lo mismo ocurre con el Mn, el cual comparte en la asociación 3 con Al, Co y Fe (figuras 14 y 15), presentando una distribución estadística y espacial bastante similar.

Cabe destacar que el Ni y el Hg no fueron incluidos en este análisis, dado que no fueron sometidos al análisis estadístico multivariado por los motivos señalados en el punto 3.1. Sin embargo, si se comparan las distribuciones estadísticas y espaciales es posible distinguir una gran similitud entre el Hg y el Pb por una parte. Mientras que el Ni, no presenta concordancias estadísticas y espaciales con el resto de los elementos. En base a esto, se puede inferir que posiblemente el Hg esté asociado al Pb tal como se registró en el estudio realizado en las Regiones de Tarapacá y Arica y Parinacota (Astudillo, F. y col., 2015). En cuanto al Ni, no es posible establecer una asociación clara, pese a que en el mismo estudio se menciona que altas concentraciones de este elemento estarían asociadas a detritos derivados de fuentes máficas ricas en minerales ferromagnesianos, por lo que podría existir una asociación entre Ni y Fe, lo cual no se evidencia claramente en las distribuciones estadísticas y espaciales obtenidas.

Por último, se debe considerar que estos resultados son una interpretación de los análisis estadísticos y por tanto no son concluyentes. Si bien, se determinó que el origen de las concentraciones y distribuciones espaciales de los elementos estudiados es predominantemente geogénico; no se debe olvidar que la formación del suelo es resultante de la combinación de múltiples factores, como son el clima, relieve (morfología), material parental (geológico), tiempo y organismos vivos, incluidos los humanos. De modo que, no es posible descartar la existencia de fuentes antropogénicas difusas que no se evidenciaron al momento de tomar las muestras. Por lo tanto, es recomendable realizar estudios confirmatorios a menor escala, que se focalicen en aquellas zonas anómalas que presenten algún tipo de interés ambiental, ya sea por representar un riesgo potencial para la salud humana, o bien su presencia dé cuenta de algún grado de daño o deterioro del medio ambiente.

3.5. Mapa Geoquímico Referencial

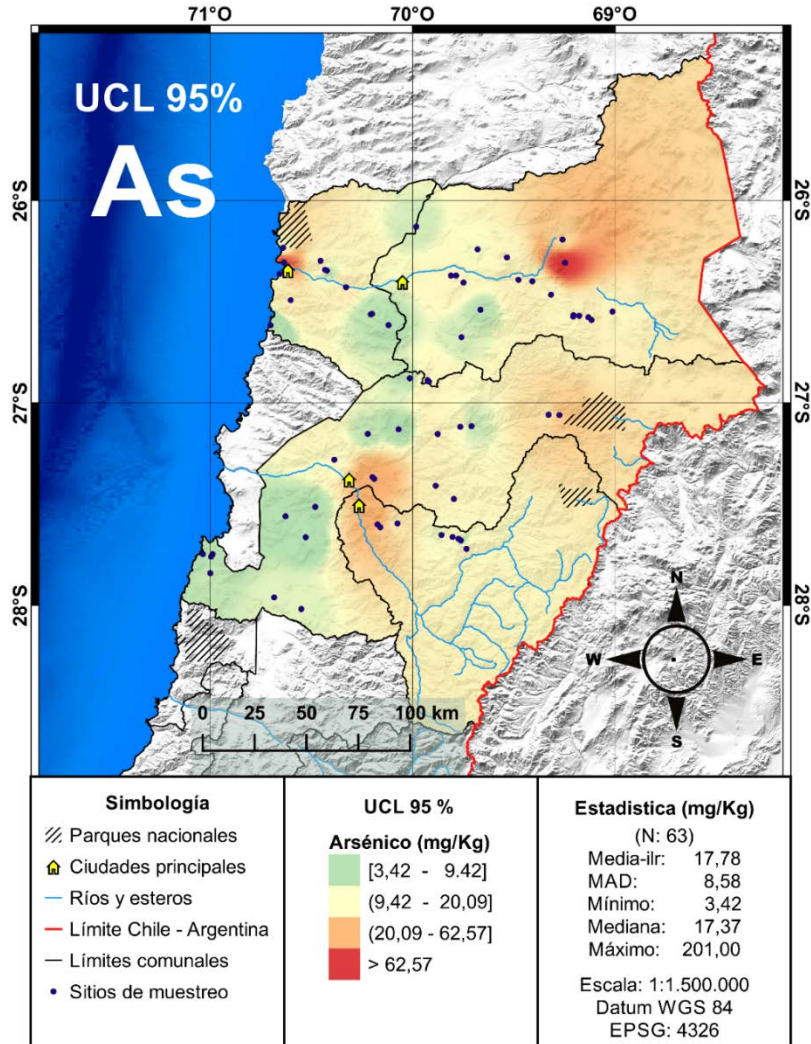


Figura 18. Mapa geoquímico referencial, distribución UCL 95% As.

En la figura 18 se muestra el mapa geoquímico referencial elaborado en base al valor del UCL 95% del As en cada uno de los sitios de muestreo. Este mapa representa un ejemplo de la utilidad de la determinación del rango de concentraciones naturales o *background* de metales en el suelo.

En este caso, se utilizó el valor UCL 95% como medida de la concentración de contacto más probable en el tiempo. Este considera, como criterio preventivo, una concentración cercana al límite superior dentro del rango de concentraciones presentes en un sitio. Esto explica las pequeñas diferencias observadas en el patrón de colores presentes

en la figura 18 (Mapa referencial UCL 95% As) y la figura 30 (Mapa Geoquímico As). En el caso de la figura 18, no se observan zonas de color azul correspondientes a las anomalías negativas, puesto que en dichos sitios el valor del UCL 95% supera el límite inferior del rango establecido para el As.

Pese al significado atribuido al UCL 95%, este no constituye un criterio de riesgo concreto, puesto que para establecer el riesgo potencial debido a la presencia de metales u otros compuestos en el suelo, se deben considerar otros factores, como por ejemplo: la especie química o forma en que se encuentra un determinado elemento, el uso actual y futuro del suelo, las características físicas de la zona, entre otros. Ante esto, existen guías metodológicas relacionadas con la evaluación del riesgo de sitios contaminados, que no son abordados en este estudio. Sin embargo, es común encontrar en ellas la necesidad del establecimiento de valores base o de referencia para los distintos elementos evaluados, ya sea en agua, aire o suelo. Estos valores representan las concentraciones naturales o *background*, cuya determinación, junto a otros estudios, puede ayudar a definir concentraciones de riesgo y luego, a partir de éstas, se podrían establecer normas de calidad de suelo, inexistentes en nuestro país.

Si se contara con normas de calidad de suelos, el mapa mostrado en la figura 18 podría ser modificado. Así, en lugar de las clases en las que se divide el rango de concentraciones naturales o *background*, se podría utilizar el límite considerado por la norma para la clasificación de las bandas de colores representadas en el mapa. Esta norma incluiría criterios de riesgo establecidos de manera específica considerando los valores base o referencia, por lo que permitiría identificar de mejor manera las zonas de riesgo existentes en un área determinada.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se determinó el rango de concentraciones naturales o *background* de los metales (Cd, As, Cu, Ni, Pb, Al, Mn, Co, Fe y Hg) a partir de la base de datos proporcionada por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), compuesta por 441 muestras de suelo superficial (0-20 [cm]) distribuidas en 63 sitios, correspondientes a las unidades geológicas extraídas a partir del Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003). Los sitios se distribuyen en las comunas de Chañaral, Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla. Abarcando casi el 70% de la superficie total de la III Región. Previo a los análisis estadísticos respectivos, se aplicó la transformación matemática *Isometric Log-ratio* sobre la base de datos, pues se ha demostrado que el uso de esta transformación proporciona mejores resultados desde el punto de vista estadístico, tal como se grafica en la figura 6.
- Se elaboraron mapas geoquímicos para cada uno de los metales, los cuales representan la distribución espacial del rango de concentraciones naturales o *background*, con ello se identificaron las zonas anómalas, correspondientes a aquellos sitios en donde la concentración del elemento queda fuera de los límites establecidos. Se encontraron zonas anómalas para todos los elementos, salvo el Hg quien no presentó datos fuera de los límites establecidos en el rango de concentraciones, tal como se muestra en la tabla 6 y en la figura 28, correspondiente al diagrama combinado del Hg. Posteriormente, se caracterizaron las zonas anómalas destacadas, centrándose en las anomalías positivas, puesto que la exposición a altas concentraciones representa un mayor riesgo potencial para la salud de la población. Esto no quiere decir que el hecho de que un determinado elemento no presente anomalías, sus concentraciones en la zona de estudio no impliquen un riesgo potencial para la salud; puesto que las anomalías se definen en función de la distribución estadística de los datos y es posible que las concentraciones naturales o “normales” de un determinado elemento en la zona sean predominantemente elevadas, en cuyo caso no sería posible definir zonas anómalas. Por lo tanto, los análisis estadísticos, por sí solos, no son suficientes para la elaboración de una línea

base de las concentraciones naturales o *background* de metales en los suelos. Es por esto que para la caracterización de las zonas anómalas destacadas se consideró: tipo de suelo, unidad geomorfológica y unidad geológica o Tipo Geológico de Suelo (TGS). A su vez, se presentó la concentración media y el valor UCL 95% de cada sitio, complementando los análisis estadísticos univariados con las características de la zona, lo cual permite una mejor interpretación de los resultados. En cuanto a éstos, de todos los elementos estudiados, el As fue quién presentó la mayor cantidad de zonas anómalas destacadas, cuyos suelos se desarrollan, principalmente, sobre depósitos aluviales correspondientes a secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias. Con respecto a las comunas incluidas en este estudio, Tierra Amarilla es donde se concentra la mayor cantidad de zonas anómalas destacadas (7 zonas), considerando los diferentes elementos analizados, luego siguen Copiapó y Chañaral (5 zonas) y en último lugar Diego de Almagro (2 zonas). En general, la mayor parte de las anomalías destacadas se ubican en sitios asociados a las unidades geomorfológicas de la cordillera de la costa y la precordillera de Domeyko, donde se depositan los detritos movilizados por la acción erosiva, tanto del agua como del viento, cuya intensidad aumenta en la franja costera (Oeste de la cordillera de la costa) y en el sector sur de la Región, que es justamente hacia donde se ubican las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla.

- Se determinó la posible fuente u origen que explica la distribución espacial y las concentraciones, incluyendo las anomalías detectadas. Para ello, se utilizaron las asociaciones químicas resultantes del análisis estadístico multivariado junto a la información geológica relacionada con la ubicación de yacimientos mineralógicos en la zona de estudio. Esto, en base a los estudios metalogénicos realizados con anterioridad en la zona norte del país que consisten en análisis geoquímicos de muestras de mena, yacimientos metalíferos y sedimentos, debido a su estrecha relación. En este sentido, con el objetivo de encontrar procesos de origen común entre los diferentes elementos estudiados, se definieron 4 asociaciones químicas a partir del análisis estadístico multivariado, las cuales mostraron una gran similitud en las distribuciones estadísticas y espaciales entre los elementos asociados. Estas

son: [1) Cd, Co, Fe, (Al)]; [2) As, Cu]; [3) Al, Mn, (Co), (Fe)] y [4) As, Pb]. Tanto el Hg como el Ni no fueron incluidos en el análisis multivariado puesto que no cumplen con los criterios de validación establecidos. Luego, a través de dichas asociaciones y la información metalogénica de la zona, se determinó que los procesos que explican la distribución espacial y la concentración de los metales estudiados son principalmente de carácter geogénico o natural, debido a la concordancia entre las asociaciones químicas y la ubicación de los diferentes yacimientos metalíferos distribuidos en cada una de las tres provincias metalogénicas en las cuales se ha clasificado la III Región. Cabe destacar que, pese a que sea un factor predominante, la unidad geológica sobre la cual se desarrolla un sitio de muestreo no es suficiente para explicar los resultados, si bien podría resultar una buena aproximación, es necesario considerar otros factores adicionales, como la geomorfología, el clima, tipo de suelo, actividad biológica y la posible existencia de fuentes antropogénicas difusas.

- Se elaboró un mapa geoquímico referencial de la zona de estudio que muestra la concentración de contacto más probable en el tiempo del As, representado mediante el valor del UCL 95% en cada sitio de muestreo. El As fue seleccionado debido a que presentó la mayor cantidad de datos anómalos y a su vez, es considerado un contaminante prioritario debido a su toxicidad. Los sitios del mapa fueron clasificados según el valor correspondiente del UCL 95% del As, utilizando los intervalos definidos por el rango de concentraciones naturales o *background* previamente establecido. Dado que el criterio de clasificación es el mismo en ambos casos, no se visualizaron cambios notorios entre el mapa geoquímico (figura 30) y el mapa de carácter referencial (figura 18), salvo por la desaparición de las zonas azules (anomalías negativas) en el caso del segundo mapa. Esto se debe a que el valor del UCL 95% supera el límite inferior establecido para el As en dichos sitios. Pese a las similitudes entre ambos mapas, su significado y utilidad es distinto. En este caso, el mapa referencial UCL 95% del As incorpora un criterio general para la evaluación del riesgo. Sin embargo, es recomendable modificar el mapa referencial, utilizando límites establecidos a partir de normas de calidad de suelo que consideren

criterios de riesgo específico y su vez, utilicen los valores de referencia establecidos por el rango de concentraciones naturales o *background* de la zona.

Por último, dada la necesidad del establecimiento de valores de referencia para la elaboración de normas de calidad de suelo, se mencionan algunas recomendaciones que permitan realizar una mejor evaluación de las concentraciones naturales y *background* en la zona:

- Se recomienda tomar una mayor cantidad de muestras duplicadas, de modo que los criterios de validación de la base de datos y los resultados sean más significativos.
- Para mejorar la representación gráfica de los mapas elaborados, se recomienda realizar una red de muestreo que posicione los puntos de muestreo lo más equidistante posible. De esta manera, se resuelven los problemas asociados al ráster de interpolación utilizado para representar la distribución espacial de las concentraciones.
- Para una mejor interpretación de los resultados, sobre todo en la identificación de las fuentes u orígenes que expliquen la distribución espacial y las concentraciones de los metales en el suelo, se recomienda la realización de estudios complementarios que consideren los múltiples procesos involucrados. Por ejemplo: monitoreos de calidad de agua; monitoreos de calidad de aire, que consideren dirección y velocidad del viento; caracterización geológica más detallada, al menos en las zonas anómalas detectadas y por último, un análisis de la composición química de las capas de suelo más profundas en los mismos sitios de muestreo superficial.
- Si bien, para la evaluación de las concentraciones naturales o *background* es necesario que las muestras sean tomadas en sitios sin intervención humana. Es recomendable tomar muestras en sitios contaminados o con evidentes indicios de actividad humana, los cuales podrían estar clasificados por tipo según la actividad predominante. Así, estos valores pueden ser comparados con las anomalías detectadas en la evaluación del *background*, permitiendo una mejor clasificación del origen de dicha anomalía.

V. BIBLIOGRAFÍA

- Albers, C. (2012). Coberturas SIG para la enseñanza de la Geografía en Chile. Universidad de La Frontera, Temuco. http://www.rulamahue.cl/mapoteca/fichas/chile_geo/ficha03geo.html
- Alfaro, G. (1980). Aplicación de dos técnicas estadísticas en la interpretación de datos geoquímicos en prospección minera. *Revista geológica de Chile*, 11, pp. 70-90.
- Astudillo, F., Lacassie, J., Baeza, L., Barrera, J., Carrasco, F., Castillo, P., Espinoza, F., Figueroa, M., Miralles, C., Muñoz, N., Ramírez, C., Salinas, P. (2015). Principales características geoquímicas en los sedimentos de la hoja Pisagua, Regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota, Chile. *XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena*, pp. 272-276.
- BCN. Información de legislación ambiental sobre el tema suelo. <http://www.leychile.cl/Consulta/listaMasSolicitadasxmat?agr=1020&sub=500&tipCat=1>
- Borgel, R. (1983). Geomorfología. *Colección Geográfica de Chile, Ediciones Instituto Geográfico Militar*.
- De Gryns, A. (1961). Prospección geoquímica preliminar de suelos y sedimentos en áreas seleccionadas de Chile central. *Anales de la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 18 (18), pp. 243-273.
- DS40/2013. Aprueba Reglamento Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. <http://bcn.cl/1uvqa>.
- Egozcue, J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., Barceló-Vidal, C. (2003). Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology*, 35(3), pp. 279-300.
- FAO–UNESCO. (1971–1981). Soil map of the world 1:5.000.000. Volume 4, South America. Paris, *UNESCO*.
- FAO. (2015). Base Referencial del Recurso Suelo 2014, actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre recursos mundiales de suelo*, 106.
- Filzmoser, P., & Croux, C. (2003). Dimension reduction of the explanatory variables in multiple linear regression. *Pliska Studia Mathematica Bulgarica*, 14, pp.59-70.

- Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009a). Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: Problems and possibilities. *Science of the Total Environment*, 407(23), pp. 6100-6108.
- Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009b). Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics*, 20(6), pp. 621-632.
- Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla*, 10, pp. 48-60.
- Galán, E., Fernández-Caliani, J. C., González, I., Aparicio, P., Romero, A. (2008). Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. Application to soils of South-West Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 98(3), pp. 89-106.
- Galuszka, A. (2007). Different approaches in using and understanding the term “geochemical background” – practical implications for environmental studies. *Polish Journal of Environmental Studies*, 16(3), pp. 389-395.
- Galuszka, A., & Migaszewski, Z. M. (2011). Geochemical background – an environmental perspective. *Mineralogía*, 42(1), pp. 7-17.
- Higuera, P., Oyarzún, R., Oyarzún, J., Maturana, H., Lillo, J., Mora, D. (2004). Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. *Applied Geochemistry*, 19(11), pp. 1855-1864.
- Juliá, C., Montecinos, S., & Maldonado, A. (2008). Cap. 3: Características climáticas de la Región de Atacama. En Squeo, F., Arancio, G., Gutiérrez, J., eds. (2008). Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Atacama. *Ediciones Universidad de La Serena*, pp. 25-42.
- Ley N° 19.300/1994. Aprueba Ley sobre bases generales del medio ambiente. Recuperado el 29 de Noviembre de 2016, de <http://bcn.cl/1ux38>
- Matschullat, J., Ottenstein, R., & Reimann, C. (2000). Geochemical background—can we calculate it?. *Environmental Geology*, 39(9), pp. 990-1000.
- NCh-ISO 17025.Of2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. [http://grassau.cl/intranet/webiso/sgi/Procedimientos/OTROS%20DOCUMENTO S/OTROS%20DOCUMENTOS/DOCUMENTOS/NORMA%20CHILENA%20 OFICIAL%20NCh-ISO%2017025.Of2005.pdf](http://grassau.cl/intranet/webiso/sgi/Procedimientos/OTROS%20DOCUMENTO%20S/OTROS%20DOCUMENTOS/DOCUMENTOS/NORMA%20CHILENA%20OFICIAL%20NCh-ISO%2017025.Of2005.pdf)

- Novoa, J., Tracol, Y., & López, D. (2008). Cap. 2: Paisajes eco-geográficos de la Región de la Región de Atacama. En Squeo, F., Arancio, G., Gutiérrez, J., eds. (2008). Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Atacama. *Ediciones Universidad de La Serena*, pp. 13-24.
- ODEPA. (2017). Región de Atacama. Información Regional, actualización Junio 2017. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Ministerio de Agricultura. http://www.odepa.gob.cl/wp-content/files_mf/1498769097Atacamajunio.pdf
- Reimann, C., & Filzmoser, P. (2000). Normal and lognormal distribution in geochemistry: Death of a myth. Consequences for statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, 39(9), pp. 1001-1014.
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garret, R. (2002). Factor analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17(3), pp. 185-206.
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garret, R. G. (2005). Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 346(1-3), pp. 1-16.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garret, R. G., Dutter, R. (2008). Statistical data analysis explained: Applied Environmental Statistics with R. *Wiley, Chichester*.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital, base geológica escala 1:1.000.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Publicación Geológica digital*, 3. <http://www.ipgp.fr/~dechabal/Geol-millon.pdf>
- SERNAGEOMIN. (2011). Atlas de faenas mineras: Regiones de Antofagasta y Atacama (Versión Actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería. *Mapas y Estadística de Faenas Mineras en Chile*, N°7, pp. 45-152.
- SERNAGEOMIN. (2015a). Anuario de la minería de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. pp. 33-53.
- SERNAGEOMIN. (2015b). Catastro de depósitos de relaves en Chile <http://www.sernageomin.cl/mineria-relaves.php>
- Townley, B., Makshev, V., Palacios, C., Lahsen, A., Parada, M. (2000). Base and precious metals geochemistry of rock units of the mainland Aysén region, Chilean Patagonia. *Journal of Geochemical Exploration*, 68(1-2), pp. 21-46.
- Tukey, J. (1977). Exploratory data analysis. *Addison-Wesley*, pp. 533.

- Tume, P., Bech, J., Sepúlveda, B., Tume, L., Bech, J. (2008). Concentrations of heavy metals in urban soils of Talcahuano (Chile): a preliminary study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 140(1), pp. 91-98.
- Ulloa, R., & Ortiz de Zárate, P. (1989) Geografía III Región de Atacama. *Colección Geográfica de Chile, Ediciones Instituto Geográfico Militar*.
- US-EPA. (2002). Calculating Upper Confidence Limits for exposure point concentrations at hazardous waste sites. United States Environmental Protection Agency. *OSWER 9285.6-10*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/upper-conf-limits.pdf>
- US-EPA. (2007). SW846 - Method 7473. Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry. United States Environmental Protection Agency. *Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/7473.pdf>
- US-EPA. (2014). SW846 - Method 6010D. Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). United States Environmental Protection Agency. *Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6010d.pdf>
- Vivallo, W., Díaz, A., & Jorquera, R. (2009). Provincias metalogénicas en la Región de Atacama, Chile. *XII Congreso Geológico Chileno, Santiago*, pp. 1-4.

VI. ANEXOS

6.1. Tipos Geológicos de Suelos en la zona de estudio

Tabla 9. Descripción TGS seleccionados (SERNAGEOMIN, 2003).

N°	Nombre	Secuencia	Definición
1	CP1	Sec. Sedimentarias	Carbonífero Superior-Pérmico Secuencias sedimentarias continentales y marinas: areniscas, conglomerados, lutitas, calizas y mármoles. En las regiones I a IV: formaciones Juan de Morales, Diablo, Cerro del Arbol, Huentelauquén; en la región XII: Calizas Tarlton, Complejo Duque de York; en la península Antártica: Grupo Whiteout.
2	CP3	Sec. Volcánicas	Carbonífero-Pérmico Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos, tobas y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas. Incluye cuerpos hipabisales riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: formaciones Quipisca, Collahuasi, Cas y La Tabla.
3	CPg	Rocas intrusivas	Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma) Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: Batolitos compuestos, 'stocks' y cuerpos hipabisales (Sierra Moreno, Cordillera de Domeyko, Batolito Elqui-Limarí); en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Batolito Panguipulli-Riñihue y 'Stock' Leones.
4	DC1	Sec. Sedimentarias	Devónico-Carbonífero Secuencias sedimentarias marinas, en parte transicionales: areniscas cuarzo-feldespáticas, lutitas micáceas, conglomerados. En la Precordillera, regiones II a III: formaciones Lila y Chinchas; en la Cordillera Principal, regiones II y IV: formaciones Zorritas y Hurtado.
5	DC4	Rocas metamórficas	Devónico-Carbonífero Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange'. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: Formación El Toco, Complejo Epimetamórfico Chañaral; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: Complejo Metamórfico Oriental de Aisén y Magallanes.
6	E3	Sec. volcánicas	Eoceno Secuencias y centros volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas con intercalaciones de rocas piroclásticas y domos riolíticos. En la Precordillera, regiones I y II: Formación Icanche y Estratos del Cerro Casado; en la Cordillera Patagónica, región XI: domos de Lago Chacabuco y alto Río Cisnes.
7	Eg	Rocas intrusivas	Eoceno (52-33 Ma) Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a V; en la Cordillera Patagónica, región XI: archipiélago de los Chonos.
8	J2m	Sec. volcanosedimentarias	Jurásico Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas y brechas, andesíticas y basálticas, calizas y areniscas marinas fosilíferas. En la Cordillera de la Costa, región I: Formación Caleta Ligate; en la Depresión Central, regiones II a III: formaciones Sierra Candeleros y Sierra Fraga.
9	J3i	Sec. Volcánicas	Jurásico Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: formaciones Camaraca y La Negra; en la Cordillera Principal, región VIII: Formación Nacientes del Biobío (Miembro Icalma).
10	Jig	Rocas intrusivas	Jurásico Inferior (202-178 Ma) Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. En la Cordillera de la Costa, regiones II a III: plutones Flamenco y Caldera-Pajonales.

Continuación Tabla 9.

N°	Nombre	Secuencia	Definición
11	JK1c	Sec. sedimentarias	Jurásico Superior-Cretácico Inferior Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y eólicas, en parte transicionales: areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados rojos. En la Precordillera, regiones I a III: formaciones Chacarilla, Quinchamale y Quehuita (superior), Cerritos Bayos, Llanura Colorada y Quebrada Monardes; en la Cordillera de la Costa, regiones I a II: formaciones Atajaña y Caleta Coloso
12	JK1m	Sec. sedimentarias	Jurásico Superior-Cretácico Inferior Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas. En la Precordillera, región III: Formación Pedernales; en la Cordillera Principal, regiones Metropolitana y VI: formaciones Lo Valdés, Baños del Flaco; en las regiones XI a XII: Grupo Coihaique y formaciones La Paciencia, Erezcano, Zapata, Sutherland, Río Jackson, Vicuña y Yaghán.
13	JK3	Sec. Volcánicas	Jurásico Superior-Cretácico Inferior Secuencias volcánicas: lavas basálticas a riolíticas, domos, brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marinas. En la Precordillera, regiones I, III y IV: formaciones Punta del Cobre y Arqueros; en la Cordillera Patagónica, región XII: Formación Hardy.
14	Jsg	Rocas intrusivas	Jurásico Medio-Superior (180-142 Ma) Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. En la Cordillera de la Costa, regiones I a VI; en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Plutón Panguipulli y borde oriental del Batolito Norpatagónico; en la península Antártica.
15	Ki1m	Sec. sedimentarias	Cretácico Inferior (Neocomiano) Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas. En las regiones I a IV: formaciones Blanco, El Way, Grupo Chañarillo y Río Tascadero.
16	Ki2c	Sec. volcanosedimentarias	Cretácico Inferior-Cretácico Superior Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas: brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoítas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fósil; localmente calizas fosilíferas marinas en la base. En Cordillera de la Costa, regiones IV, V y Metropolitana: formaciones Quebrada Marquesa y Veta Negra.
17	Ki2m	Sec. volcanosedimentarias	Cretácico Inferior (Neocomiano) Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas. En la Precordillera, región III: Estratos Cerro El Aguila; en la Cordillera Principal, región IV: Formación Los Pelambres; en la Cordillera de la Costa, regiones V y Metropolitana: Formación Lo Prado.
18	Kia2	Sec. Volcanosedimentarias	Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas. En la Precordillera y Cordillera de la Costa, regiones III a Metropolitana: formaciones Cerrillos, Viñita (occidental) y Las Chilcas.
19	Kiang	Rocas intrusivas	Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (123-85 Ma) Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. En la Cordillera de la Costa, regiones II a IV, al este del Sistema de Fallas Atacama-El Romeral y asociados a mineralización de Fe-Cu-Au (Candelaria) y Cu-Au (Andacollo); en la Cordillera de la Costa, regiones V a X.
20	Kibg	Rocas intrusivas	Cretácico Inferior bajo (144-124 Ma) Monzodioritas y dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodioritas y tonalitas. En la Cordillera de la Costa, regiones II a IV, asociados al Sistema de Fallas Atacama-El Romeral y mineralización de Fe (Cerro Imán, Algarrobo).

Continuación Tabla 9.

N°	Nombre	Secuencia	Definición
21	Ks1c	Sec. sedimentarias	Cretácico Superior Secuencias sedimentarias continentales aluviales y lacustres: conglomerados, brechas, areniscas y limolitas rojas con intercalación de tobas riolíticas y lavas andesíticas. En la Precordillera, regiones I a III: formaciones Guaviña, Cerro Empexa (inferior) y Purilactis (inferior); Estratos del Leoncito.
22	Ks2c	Sec. volcanosedimentarias	Cretácico Superior Secuencias volcanosedimentarias continentales: rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas. En la Precordillera, región I a III: formaciones Quebrada Mala, Llanta, Hornitos; en las regiones IV a Metropolitana: formaciones Quebrada Seca, Viñita (oriental), Los Elquinos y Lo Valle.
23	Ks3i	Sec. volcánicas	Cretácico Superior Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos y brechas basálticos a dacíticos con intercalaciones piroclásticas y epiclásticas. En la Precordillera, regiones I a IV: Formación Cerro Empexa (superior), Estratos del Estanque, Cerro Los Carneros; en la Cordillera Patagónica, región XI: Grupo Ñireguao.
24	Ksg	Rocas intrusivas	Cretácico Superior (90-65 Ma) Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda; pórfidos andesíticos y dioríticos. En la Precordillera, regiones I a III y entre las cordilleras de la Costa y Principal, regiones IV, V y Metropolitana; en la región XII: granitoides de las islas Wollaston y Navarino, Cordillera Darwin.
25	KT2	sec. volcanosedimentarias	Cretácico Superior-Terciario Inferior Secuencias volcanosedimentarias: areniscas, paraconglomerados, lavas andesíticas y dacíticas, intercalaciones de ignimbritas, limolitas y calizas. En la Precordillera, regiones II y III: Estratos Cerro Totola y Formación Venado.
26	M1c	Sec. Sedimentarias	Mioceno Inferior-Medio Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas. En las regiones I a III: formaciones Diablo, Chucal, Altos de Pica (superior) y Gravas de Atacama; en las regiones VIII a IX: Formación Cura-Mallín (superior); en la región XI: Formación Las Dunas.
27	M3t	Sec. volcánicas	Mioceno Inferior-Medio Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso. En la Cordillera Principal, regiones I a III: ignimbritas Huasco, Maricunga y Vega Helada
28	MP1m	Sec. Sedimentarias	Mioceno Superior-Plioceno Secuencias sedimentarias marinas transgresivas: areniscas, limolitas, coquinas, conglomerados, calizas y fangolitas. En la costa, regiones II a VIII: formaciones La Portada, Bahía Inglesa, Coquimbo, Navidad y Tubul.
29	MQs	Sec. sedimentarias	Mioceno-Cuaternario Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos, localmente con bórax y/o litio. En los salares, regiones I a III: salares de Surire, Huasco, Coposa, Pintados, Bellavista, Grande, Atacama, Pedernales y Maricunga
30	OM2c	sec. volcanosedimentarias	Oligoceno-Mioceno Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. En la Cordillera Principal, regiones I a IX: formaciones Lupica, Escabroso, Abanico, Coya-Machalí, CuraMallín (inferior).
31	OM3	sec. volcánicas	Oligoceno-Mioceno Secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesíticos a riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones III y IV: complejos volcánicos de la 'Franja de Maricunga', Complejo Volcánico Cerros Bravos y Formación Tilito.

Continuación Tabla 9.

N°	Nombre	Secuencia	Definición
32	Pag	Rocas intrusivas	Paleoceno (65-53 Ma) Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y granitos de hornblenda y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos, asociados a mineralización tipo pórfido cuprífero y chimeneas de brechas. En la Precordillera, regiones I a III: Cerro Colorado, Sierra Gorda, Cabeza de Vaca.
33	PE3a	sec. volcánicas	Paleoceno-Eoceno Inferior Secuencias y complejos volcánicos continentales ácidos: domos y rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas asociados a calderas de colapso. En la Precordillera, región III: calderas El Salvador, San Pedro de Cachiyuyo y Lomas Bayas.
34	PE3i	sec. Volcánicas	Paleoceno-Eoceno Inferior Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y domos, andesítico-basálticos a dacíticos, con intercalaciones de rocas piroclásticas y epiclásticas. En la Precordillera, regiones II y III: formaciones Cinchado, Augusta Victoria y Chile-Alemania.
35	Peg	Rocas intrusivas	Paleoceno-Eoceno (63-38 Ma) Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita, dioritas, gabros y pórfidos riolíticos y dacíticos, asociados a mineralización de Cu-Au. En la Precordillera, regiones II y III: San Cristóbal, Inca de Oro; en la Cordillera Principal, región IV; en la Cordillera Patagónica, región XII: islas Hoste y Londonderry.
36	Pl1m	Sec. Sedimentarias	Pleistoceno Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas: coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos. En la costa, regiones II y III: Estratos de Mejillones y de Caldera; en la región X: Estratos de Niebla (Cancagua).
37	Qa	Sec. Sedimentarias	Pleistoceno-Holoceno Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. En la Depresión Central, regiones I a III: abanicos aluviales.
38	Qe	Sec. Sedimentarias	Pleistoceno-Holoceno Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes tanto activos como inactivos. En las regiones I a VII: dunas de Santo Domingo y Quivolgo.
39	Qm	Sec. Sedimentarias	Pleistoceno-Holoceno Depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales.
40	Trg	Rocas intrusivas	Triásico (240-205 Ma) Granitos leucocráticos, monzo y sienogranitos de biotita y muscovita, granodioritas y dioritas de biotita y hornblenda, pórfidos hipabisales. En la Cordillera de la Costa y Precordillera, regiones II y III: cerros de Paqui, granodioritas Este y Elena, Plutón Cerros del Vetado; en la Cordillera Principal, región IV.
41	TrJ1c	Sec. Sedimentarias	Triásico-Jurásico Inferior Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres: conglomerados, areniscas cuarcíferas y feldespáticas y lutitas carbonosas con intercalación de tobas riolíticas y lavas basálticas. En la Precordillera, región III: Formación La Ternera y Estratos El Mono.
42	TrJ3	Sec. Volcánicas	Triásico-Jurásico Inferior Secuencias volcánicas continentales y transicionales: lavas, domos, brechas, basálticos a riolíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados. En la Precordillera, regiones II y III: Estratos Las Lomas y Formación La Ternera; en la Cordillera Principal, región IV: Estratos de los Tilos; en la Cordillera de la Costa, región IV: Formación Pichidangui.
43	TrJg	Rocas intrusivas	Triásico-Jurásico (212-180 Ma) Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, dioritas y gabros de piroxeno y hornblenda; sienogranitos. En Cordillera de la Costa, regiones III a V.

Tabla 10. Coordenadas de muestreo en los TGS de la zona de estudio.

TGS	Coordenadas Datum WGS-84		TGS	Coordenadas Datum WGS-84	
	X (Este)	Y (Norte)		X (Este)	Y (Norte)
CP1	424274	7000198	Ks2c	427678	6933434
CP3	468483	7072709	Ks3i	479455	7060763
CPg	336206	7097340	Ksg *	425334	7079159
DC1 *	482372	7061175	Ksg	384229	6946479
DC1	467448	7006957	kT2 *	408771	7024816
DC4 *	340342	7068742	KT2	394026	6998629
DC4	304102	6929197	M1c	401804	7109547
E3	421356	6960683	M3t *	472747	7006814
Eg *	424949	6938028	M3t	488426	7058896
Eg	433792	7064332	MP1m	303153	6918737
J2m *	452424	7080782	MQs	475394	7090159
J2m	423742	6938922	OM2c	498722	7063486
J3i *	380447	7061670	OM3	486853	7060383
J3i	362772	6981683	Pag *	421671	7082973
Jig *	334675	7083020	Pag	393972	6947084
Jig	339324	6950422	PE3a *	415425	6940955
JK1c	479555	7061523	PE3a	446715	7093036
JK1m	459256	7080038	PE3i *	420876	6939896
JK3 *	388642	7055608	PE3i	432208	7097396
JK3	347652	6899750	Peg	424534	7049241
Jsg *	357962	7085138	Pl1m	303360	6927803
Jsg	399296	7026600	Qa *	357117	7085585
Ki1m *	408051	7025595	Qa	378983	6996005
Ki1m	381526	6972333	Qe *	336785	7089281
Ki2c	382408	6971377	Qe	334371	6905924
Ki2m	413206	6996198	Qm	330626	7054866
Kia2	385611	6944940	Trg	354742	7090441
Kiag *	379885	7061419	TrJ1c	412429	6967871
Kiag	353748	6955738	TrJ3	429719	7000602
Kibg *	349288	6939086	TrJg	299335	6929108
Kibg	367516	7076124			
Ks1c	474064	7102874			
Ks2c *	419148	7082933			

*TGS equivalentes en tabla 11.

Tabla 11. Resumen parámetros estadísticos por TGS muestreado.

TGS	Parámetros [mg/kg]	Cd	As	Cu	Ni	Pb	Al	Mn	Co	Fe	Hg
CP1	Promedio	3,93	14,26	30,46	4,43	7,60	4447,29	434,94	6,14	17347,74	0,04
	Desviación	0,50	2,09	8,63	5,87	1,44	880,87	64,20	0,72	2114,80	0,01
	UCL 95%	4,30	15,79	36,80	14,10	8,66	5094,00	482,10	6,66	18901,00	0,05
CP3	Promedio	5,87	16,49	50,34	5,34	17,53	13004,43	1898,35	11,18	29235,01	0,01
	Desviación	0,27	3,14	16,89	4,84	5,94	1730,33	88,92	0,28	926,83	0,00
	UCL 95%	6,07	18,79	62,75	8,90	21,89	14275,00	1964,00	1964,00	29916,00	0,02
CPg	Promedio	5,86	13,17	65,04	14,31	4,04	9722,41	801,42	12,31	28590,21	0,00
	Desviación	1,27	3,16	8,83	5,00	3,72	1135,88	118,18	1,03	2164,05	0,00
	UCL 95%	6,79	15,49	71,53	17,98	6,77	10557,00	888,20	13,07	30180,00	0,01
DC1 *	Promedio	6,34	19,68	87,94	25,78	9,69	15747,89	1021,95	13,25	31700,42	0,04
	Desviación	0,51	3,21	32,20	46,52	1,46	1446,92	111,25	1,42	3050,08	0,01
	UCL 95%	6,72	22,03	111,60	102,40	10,76	16811,00	1104,00	14,30	33941,00	0,04
DC1	Promedio	6,94	24,59	58,83	23,51	7,47	4943,91	396,05	15,90	13711,64	0,08
	Desviación	1,41	10,20	11,79	6,57	1,73	6085,39	490,96	3,52	17100,29	0,03
	UCL 95%	7,98	32,08	67,49	28,34	8,73	6997,00	565,10	18,48	21097,00	0,10
DC4 *	Promedio	4,35	20,14	49,67	16,63	2,05	9108,11	406,08	14,30	27275,55	0,01
	Desviación	0,94	6,22	4,77	2,93	2,65	950,22	60,04	1,96	1622,25	0,00
	UCL 95%	5,04	24,71	53,18	18,79	6,42	9806,00	450,20	15,75	28467,00	0,01
DC4	Promedio	9,25	7,97	24,22	12,96	5,17	7370,57	605,79	14,96	37738,45	0,01
	Desviación	1,15	0,50	2,04	12,91	0,46	1367,88	65,82	0,93	3025,43	0,00
	UCL 95%	10,09	8,34	25,72	22,45	5,51	8375,00	654,10	15,64	39960,00	0,01
E3	Promedio	8,91	15,43	72,05	25,18	6,54	13724,38	887,77	18,99	34929,25	0,06
	Desviación	0,73	2,64	17,78	2,97	2,83	2759,32	71,68	0,90	1766,04	0,03
	UCL 95%	9,45	17,37	85,11	27,37	8,62	15751,00	940,40	19,65	36226,00	0,08
Eg *	Promedio	24,25	6,79	45,92	10,70	280,58	7969,61	284,11	10,52	36298,18	0,01
	Desviación	16,70	1,10	13,81	2,56	291,38	1368,83	44,47	3,50	10279,71	0,01
	UCL 95%	36,51	7,60	56,93	12,58	494,60	9051,00	316,80	13,30	43848,00	0,02
Eg	Promedio	8,06	8,46	118,56	10,22	1,69	14706,54	386,88	13,90	40672,80	0,03
	Desviación	1,67	2,15	32,75	10,35	1,69	1699,87	99,55	2,98	8454,29	0,01
	UCL 95%	9,29	10,04	142,60	17,82	4,48	15955,00	460,00	15,94	46882,00	0,03
J2m *	Promedio	8,79	21,49	174,01	12,22	37,26	17991,37	645,91	13,61	34510,26	0,03
	Desviación	3,24	2,00	35,34	2,21	52,70	956,13	28,07	1,00	2177,83	0,01
	UCL 95%	12,48	22,96	200,00	13,85	124,10	18694,00	666,50	14,34	36110,00	0,04
J2m	Promedio	5,17	18,74	57,38	22,21	26,71	10709,22	716,69	10,36	25444,26	0,04
	Desviación	0,31	2,48	9,42	9,51	13,13	2308,64	307,37	1,41	2440,77	0,02
	UCL 95%	5,40	20,57	64,30	29,19	36,73	12405,00	955,00	11,39	27237,00	0,05

Continuación Tabla 11

TGS	Parámetros [mg/kg]	Cd	As	Cu	Ni	Pb	Al	Mn	Co	Fe	Hg
J3i *	Promedio	12,66	7,76	85,46	17,13	1,05	7781,22	791,44	52,41	62149,76	0,01
	Desviación	4,06	1,87	14,37	4,78	0,00	1130,20	44,83	19,97	16836,51	0,00
	UCL 95%	15,64	9,14	96,01	20,83	N/D	8611,00	824,40	67,08	74515,00	0,02
J3i	Promedio	5,41	13,96	51,29	14,02	8,17	4959,01	782,37	16,41	49068,63	0,01
	Desviación	8,58	2,60	6,10	1,75	1,61	920,94	170,69	2,74	14392,34	0,00
	UCL 95%	19,54	15,87	55,77	15,31	9,35	5635,00	907,70	18,42	59639,00	0,01
Jig *	Promedio	4,62	11,19	267,01	15,33	13,55	6796,13	658,36	5,87	18655,43	0,02
	Desviación	0,65	3,56	129,43	6,82	4,60	1231,03	135,52	0,80	2020,54	0,00
	UCL 95%	5,09	13,80	362,10	20,34	16,93	7700,00	757,90	6,46	20139,00	0,02
Jig	Promedio	4,94	7,31	24,49	2,34	1,05	2879,77	170,33	6,19	18864,12	0,01
	Desviación	0,30	1,18	2,70	2,12	0,00	608,21	34,46	0,82	1602,28	0,01
	UCL 95%	5,16	8,18	26,63	5,84	N/D	3326,00	195,60	6,79	20041,00	0,02
JK1c	Promedio	6,17	13,77	85,15	40,17	5,20	10977,50	677,89	13,54	29506,80	0,03
	Desviación	0,40	2,19	20,27	16,87	0,50	2670,78	142,37	0,94	2042,89	0,01
	UCL 95%	6,46	15,37	100,00	53,58	5,57	13039,00	782,50	14,23	31007,00	0,03
JK1m	Promedio	7,33	20,28	124,12	58,11	1,05	12404,74	952,55	13,70	38529,19	0,02
	Desviación	0,94	3,81	42,43	50,12	0,00	1107,43	100,52	1,82	4506,34	0,01
	UCL 95%	8,02	23,08	171,80	94,92	N/D	13218,00	1026,00	15,04	41839,00	0,03
JK3 *	Promedio	10,67	8,13	174,67	27,25	2,47	9408,26	762,04	29,10	45204,39	0,02
	Desviación	0,85	1,39	30,26	5,75	1,77	1315,29	37,03	6,35	4376,86	0,01
	UCL 95%	11,30	9,15	196,90	31,48	3,77	10374,00	789,20	33,77	48419,00	0,03
JK3	Promedio	8,05	11,66	32,77	37,45	14,12	8282,73	698,76	13,45	31775,91	0,00
	Desviación	0,43	1,51	1,43	23,89	0,93	705,65	85,68	0,68	1105,11	0,00
	UCL 95%	8,37	12,77	33,82	54,99	14,80	8801,00	789,30	13,95	32588,00	0,00
Jsg *	Promedio	7,79	7,32	28,31	9,88	2,39	15811,21	1725,04	14,35	36719,42	0,01
	Desviación	1,67	1,78	12,06	3,78	2,39	4229,71	412,98	4,04	8784,11	0,00
	UCL 95%	9,02	8,63	37,17	12,66	6,33	18722,00	2040,00	17,32	43171,00	0,01
Jsg	Promedio	6,61	8,74	66,78	11,78	8,05	7932,49	541,52	12,01	29808,40	0,03
	Desviación	2,32	1,86	6,99	1,96	1,23	1011,22	123,43	1,84	9950,16	0,01
	UCL 95%	9,16	10,11	71,92	13,22	8,95	8675,00	632,20	13,36	37116,00	0,03
Kilm *	Promedio	7,46	16,00	47,57	15,93	37,83	10801,62	790,22	11,56	28269,84	0,03
	Desviación	2,84	3,61	4,12	3,32	35,12	1936,07	50,40	0,55	2278,27	0,00
	UCL 95%	9,55	18,65	50,60	18,37	63,63	12224,00	827,20	11,97	29943,00	0,03
Kilm	Promedio	11,76	60,25	342,83	12,60	32,31	15506,94	863,34	18,22	46511,28	0,09
	Desviación	1,77	9,98	43,14	0,93	5,18	1722,66	63,35	0,87	8683,84	0,04
	UCL 95%	13,10	67,58	374,50	13,28	36,11	16772,00	906,90	18,86	52889,00	0,12

Continuación Tabla 11

TGS	Parámetros [mg/kg]	Cd	As	Cu	Ni	Pb	Al	Mn	Co	Fe	Hg
Ki2c	Promedio	8,55	56,44	293,32	14,39	33,97	15739,12	808,64	15,55	34048,10	0,15
	Desviación	0,51	18,48	140,37	1,27	9,05	2595,48	47,02	1,08	1391,78	0,06
	UCL 95%	8,92	70,01	396,40	15,39	40,61	17645,00	843,20	16,35	35070,00	0,20
Ki2m	Promedio	5,03	14,09	58,95	11,06	20,58	10393,54	671,74	9,89	34092,76	0,17
	Desviación	3,11	10,53	49,70	6,97	16,78	1584,62	98,17	6,59	3289,63	0,11
	UCL 95%	6,35	21,83	95,45	13,78	32,90	11557,00	744,70	12,59	36509,00	0,29
Kia2	Promedio	9,94	37,89	209,52	13,67	20,55	14332,08	2106,30	12,14	50819,54	0,06
	Desviación	1,21	6,93	151,75	3,30	7,75	2047,66	761,64	2,62	7045,82	0,05
	UCL 95%	10,83	42,98	321,00	16,09	26,25	15836,00	2666,00	14,07	55994,00	0,10
Kiag *	Promedio	9,75	9,82	70,52	16,15	6,19	12964,85	989,06	22,71	43309,10	0,01
	Desviación	0,61	1,75	2,31	3,91	0,42	1216,78	33,38	10,57	3064,55	0,00
	UCL 95%	10,20	11,10	72,21	19,02	6,50	13859,00	1014,00	31,07	45560,00	0,02
Kiag	Promedio	6,37	7,35	147,83	8,46	2,06	11941,79	563,92	12,63	38341,24	0,01
	Desviación	4,11	4,59	106,87	5,12	1,74	3573,80	257,19	8,67	6014,92	0,00
	UCL 95%	8,24	9,31	226,30	10,58	4,92	14567,00	662,50	19,00	42759,00	0,01
Kibg *	Promedio	6,65	6,14	29,90	10,93	3,24	7032,25	538,04	9,09	18716,78	0,00
	Desviación	1,02	1,21	6,63	5,06	2,10	5238,02	273,59	1,88	12766,07	0,00
	UCL 95%	7,40	7,04	34,77	14,65	4,78	10879,00	739,00	10,46	23986,00	0,01
Kibg	Promedio	6,07	23,04	152,52	8,94	8,01	12881,38	1029,41	11,85	24718,30	0,01
	Desviación	1,42	2,34	50,46	2,65	1,74	3535,94	472,58	1,88	6221,99	0,00
	UCL 95%	7,08	24,76	189,60	10,89	9,29	15478,00	1377,00	13,23	29288,00	0,01
Ks1c	Promedio	5,90	32,59	19,07	18,18	4,53	7300,71	1043,39	10,89	22447,87	0,01
	Desviación	2,18	12,02	8,40	5,02	4,25	3186,92	287,87	3,88	9515,29	0,00
	UCL 95%	7,50	41,42	25,24	21,87	7,65	9641,00	1255,00	13,73	29436,00	0,01
Ks2c *	Promedio	10,73	16,31	73,10	11,86	18,89	13774,17	904,85	14,42	40742,85	0,02
	Desviación	4,50	2,89	18,63	2,37	36,83	1360,92	108,42	3,14	6360,81	0,01
	UCL 95%	14,31	18,43	86,78	13,60	79,56	14774,00	984,50	16,73	45415,00	0,03
Ks2c	Promedio	6,15	18,34	45,42	15,26	12,66	11963,50	835,55	14,06	29242,97	0,04
	Desviación	0,46	3,66	3,49	3,82	2,04	3873,29	169,00	0,82	2071,73	0,01
	UCL 95%	6,49	21,03	47,98	18,06	14,26	14808,00	969,50	14,66	30765,00	0,05
Ks3i	Promedio	8,29	15,39	81,89	39,35	1,05	14272,24	681,46	12,94	32189,84	0,02
	Desviación	0,58	3,12	30,05	2,68	0,00	2065,95	43,33	0,64	1092,96	0,01
	UCL 95%	8,72	17,68	104,00	41,32	N/D	15790,00	713,30	13,41	32993,00	0,02
Ksg *	Promedio	7,70	15,63	94,97	12,31	14,76	11415,55	687,30	12,84	37673,75	0,02
	Desviación	0,59	2,22	30,13	2,47	7,66	1545,23	150,55	1,40	3328,66	0,01
	UCL 95%	8,13	17,26	117,10	14,13	20,85	12550,00	794,20	13,87	40118,00	0,02

Continuación Tabla 11

TGS	Parámetros [mg/kg]	Cd	As	Cu	Ni	Pb	Al	Mn	Co	Fe	Hg
Ksg	Promedio	9,49	68,62	291,97	16,70	22,77	9079,22	1138,94	22,82	41342,09	0,06
	Desviación	1,24	8,41	133,41	4,44	8,12	923,08	185,76	3,12	6562,70	0,02
	UCL 95%	10,40	74,79	389,90	19,96	32,72	9757,00	1275,00	25,12	46162,00	0,07
kT2 *	Promedio	7,44	18,93	34,66	16,89	16,87	13602,50	892,67	15,46	36655,83	0,03
	Desviación	0,62	2,15	16,86	5,81	4,66	2093,22	94,08	0,86	3014,64	0,01
	UCL 95%	7,89	20,57	47,04	21,46	21,91	15140,00	961,80	16,09	38870,00	0,04
KT2	Promedio	0,51	7,95	90,21	14,47	7,54	22209,66	650,71	13,51	28444,80	0,02
	Desviación	0,00	1,26	11,09	2,49	0,83	3023,52	41,16	0,84	2220,06	0,01
	UCL 95%	N/D	8,88	98,35	16,30	8,15	24430,00	680,90	14,13	30075,00	0,02
M1c	Promedio	8,99	10,52	59,06	16,40	7,15	8679,11	551,69	14,00	36335,24	0,01
	Desviación	0,74	1,45	16,04	3,35	1,03	2021,27	82,00	1,00	1599,61	0,00
	UCL 95%	9,54	11,58	70,84	18,86	7,91	10164,00	611,90	14,73	37510,00	0,01
M3t *	Promedio	5,92	49,17	26,53	19,96	8,58	12525,82	1011,19	9,02	23916,33	0,04
	Desviación	0,93	2,45	7,40	8,98	2,11	2265,58	117,94	1,58	3974,86	0,02
	UCL 95%	6,61	50,97	31,97	27,06	10,13	14190,00	1098,00	10,13	26836,00	0,05
M3t	Promedio	6,11	22,90	70,22	18,84	3,77	10958,66	537,07	11,08	25891,24	0,03
	Desviación	0,66	4,22	25,64	4,89	3,41	1479,85	99,69	1,01	2109,73	0,01
	UCL 95%	6,59	26,00	89,05	22,43	6,28	12046,00	610,30	11,82	27441,00	0,04
MP1m	Promedio	0,51	8,97	13,90	5,00	6,88	7706,73	381,86	11,16	31436,20	0,00
	Desviación	0,00	2,81	1,40	2,85	0,60	1421,07	66,70	1,94	5316,39	0,00
	UCL 95%	N/D	11,04	14,93	7,09	7,32	8750,00	430,80	12,59	35341,00	0,00
MQs	Promedio	6,52	162,34	24,35	15,00	16,14	15095,67	633,56	8,62	24035,98	0,00
	Desviación	1,83	52,57	3,13	4,66	18,07	2030,35	88,25	1,13	2669,09	0,00
	UCL 95%	7,92	201,00	26,65	20,25	36,63	16587,00	698,40	9,45	25996,00	0,00
OM2c	Promedio	10,37	17,30	26,19	1,12	31,83	6362,64	467,30	12,37	33820,09	0,01
	Desviación	6,15	1,92	6,74	0,00	74,90	1148,12	76,29	2,35	6294,39	0,00
	UCL 95%	17,78	18,71	31,15	N/D	155,20	7206,00	547,50	14,10	38443,00	0,01
OM3	Promedio	4,93	16,86	76,12	11,07	8,43	6190,94	477,74	9,52	20187,37	0,02
	Desviación	0,76	2,54	22,33	16,90	5,86	1016,25	36,60	1,75	2211,57	0,00
	UCL 95%	5,49	18,72	92,52	38,92	13,09	6937,00	504,60	10,88	21812,00	0,02
Pag *	Promedio	8,46	17,71	323,83	14,26	29,01	12754,70	797,91	12,61	34644,46	0,05
	Desviación	0,51	3,60	47,69	3,64	4,45	802,86	66,65	0,61	2497,18	0,04
	UCL 95%	8,86	20,36	358,90	16,94	32,28	13344,00	846,90	13,05	36570,00	0,12
Pag	Promedio	9,53	24,88	226,13	23,29	28,14	8497,49	726,48	17,57	40672,08	0,08
	Desviación	0,68	5,62	166,46	7,49	11,57	1190,82	76,51	0,67	3897,06	0,05
	UCL 95%	10,03	29,01	348,40	28,79	36,64	9372,00	782,70	18,06	43534,00	0,11

Continuación Tabla 11

TGS	Parámetros [mg/kg]	Cd	As	Cu	Ni	Pb	Al	Mn	Co	Fe	Hg
PE3a *	Promedio	10,36	11,13	141,73	43,92	18,17	21538,71	951,10	47,87	48698,07	0,04
	Desviación	0,78	3,49	23,74	14,30	4,12	6808,96	533,89	23,71	2993,48	0,02
	UCL 95%	10,94	13,70	159,20	54,42	21,19	26941,00	1343,00	65,28	50897,00	0,06
PE3a	Promedio	10,28	17,32	91,93	13,29	8,04	24318,21	736,32	19,11	44909,57	0,02
	Desviación	0,68	1,94	12,47	4,14	6,52	2115,32	125,22	1,17	3518,65	0,00
	UCL 95%	10,79	18,75	101,10	16,57	18,78	25872,00	828,30	19,97	47494,00	0,02
PE3i *	Promedio	17,27	15,17	65,93	13,74	167,38	14024,90	753,96	15,48	30502,35	0,04
	Desviación	11,50	1,81	7,97	3,35	174,63	1943,04	52,73	0,95	2270,62	0,01
	UCL 95%	25,71	16,50	71,79	16,21	295,60	15452,00	792,70	16,18	32170,00	0,04
PE3i	Promedio	6,95	12,39	113,82	23,64	5,44	14432,78	886,84	12,23	30221,65	0,04
	Desviación	1,45	2,76	37,01	5,85	4,22	3224,71	293,68	3,10	7141,73	0,02
	UCL 95%	8,02	14,42	141,00	27,68	8,54	16801,00	1103,00	14,36	35088,00	0,05
Peg	Promedio	9,95	10,52	79,85	9,37	10,04	27947,18	715,64	18,63	44562,27	0,03
	Desviación	0,51	1,84	10,00	2,34	2,29	1273,72	25,60	0,69	2365,87	0,01
	UCL 95%	10,32	11,87	87,20	11,09	11,73	28883,00	734,40	19,14	46300,00	0,04
Pl1m	Promedio	10,13	8,33	23,22	1,12	6,89	9609,67	1041,04	15,45	39391,68	0,01
	Desviación	0,71	1,60	3,67	0,00	2,77	621,67	89,95	1,15	2782,64	0,00
	UCL 95%	10,65	9,50	25,91	N/D	9,08	10066,00	1107,00	16,29	41435,00	0,01
Qa *	Promedio	10,45	14,00	98,41	21,84	14,67	11116,24	604,76	28,02	42752,30	0,00
	Desviación	3,20	5,16	12,87	4,32	28,22	3419,31	118,19	10,41	5649,32	0,00
	UCL 95%	12,97	17,79	107,90	25,02	61,16	14887,00	691,60	39,89	46901,00	0,00
Qa	Promedio	18,66	9,74	24,50	1,12	7,83	29450,97	763,16	21,93	83681,20	0,01
	Desviación	2,27	1,10	6,93	0,00	0,93	37492,04	343,20	1,85	9217,33	0,00
	UCL 95%	20,32	10,55	29,59	N/D	8,51	71963,00	1025,00	23,29	90451,00	0,02
Qe *	Promedio	3,39	143,83	3424,15	2,20	16,19	3354,26	223,15	4,38	12620,56	0,05
	Desviación	1,75	18,61	470,03	1,86	18,11	1080,57	52,68	0,75	2320,00	0,02
	UCL 95%	4,78	157,50	3769,00	5,27	46,02	4148,00	264,90	4,93	14324,00	0,06
Qe	Promedio	6,67	11,26	28,26	5,84	12,31	8877,68	527,80	12,37	30483,80	0,00
	Desviación	1,26	1,77	4,46	3,99	1,55	1412,74	136,98	2,03	5786,87	0,00
	UCL 95%	7,60	12,56	31,54	8,77	13,44	9915,00	628,40	13,86	34734,00	0,01
Qm	Promedio	0,99	2,17	5,63	6,94	1,05	2094,73	80,76	1,71	5140,82	0,00
	Desviación	0,82	1,70	2,74	8,50	0,00	560,11	22,03	0,69	698,56	0,00
	UCL 95%	1,59	3,42	7,65	13,19	N/D	2506,00	104,40	2,22	5695,00	0,00
Trg	Promedio	6,52	19,98	70,09	10,14	13,97	12983,15	425,07	9,10	26218,86	0,00
	Desviación	1,24	3,99	18,08	3,76	17,19	2429,52	70,79	1,29	5186,12	0,00
	UCL 95%	7,43	22,91	83,37	12,90	42,30	14768,00	477,10	10,05	30028,00	0,00

Continuación Tabla 11

TGS	Parámetros [mg/kg]	Cd	As	Cu	Ni	Pb	Al	Mn	Co	Fe	Hg
TrJ1c	Promedio	7,98	20,34	91,05	17,11	16,10	10977,06	717,93	16,58	35619,68	0,04
	Desviación	1,72	3,24	36,25	4,93	1,91	2206,52	45,77	2,99	6070,49	0,01
	UCL 95%	9,24	22,72	117,70	20,73	17,50	12598,00	751,50	18,78	40078,00	0,05
TrJ3	Promedio	7,26	10,20	43,63	21,60	10,95	15964,71	478,02	14,98	32776,74	0,08
	Desviación	0,53	0,97	9,06	3,88	1,76	2280,51	45,96	0,92	1205,31	0,02
	UCL 95%	7,66	10,91	50,29	24,45	12,24	17640,00	511,80	15,65	33662,00	0,09
TrJg	Promedio	6,09	5,87	7,30	7,19	1,79	4394,17	194,93	6,48	23444,95	0,00
	Desviación	0,72	0,79	0,95	0,80	1,97	365,17	38,95	0,71	3006,29	0,00
	UCL 95%	6,62	6,45	7,99	7,77	5,04	4662,00	223,50	7,00	25653,00	0,00

*El asterisco con el cual se destacan algunos TGS en las tablas 10 y 11 es utilizado para identificar las coordenadas y los respectivos parámetros estadísticos, en aquellos TGS que se repiten en la zona, pero que se ubican en sitios diferentes.

6.2. Diagramas combinados de los datos transformados

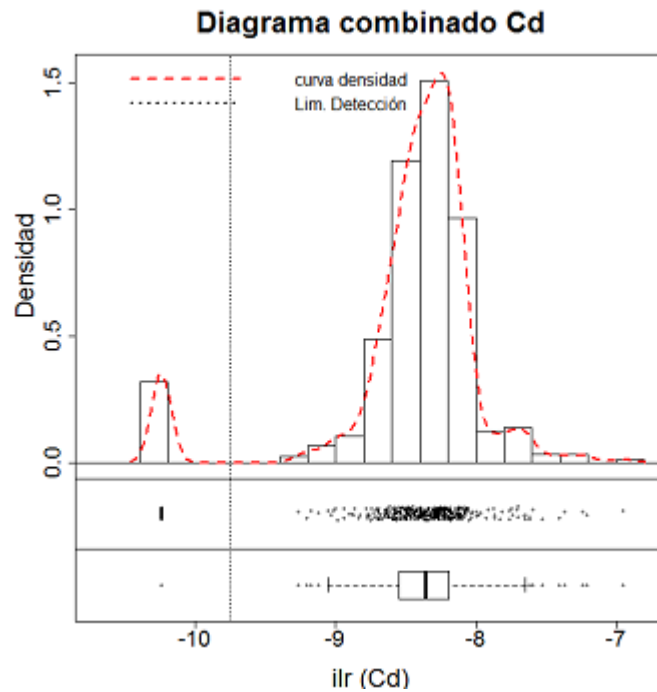


Figura 19. Diagrama combinado Cadmio.

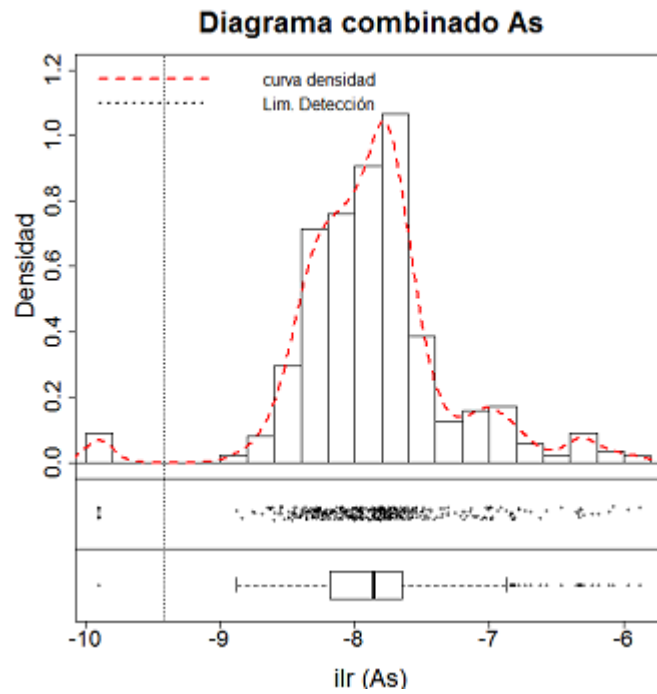


Figura 20. Diagrama combinado Arsénico.

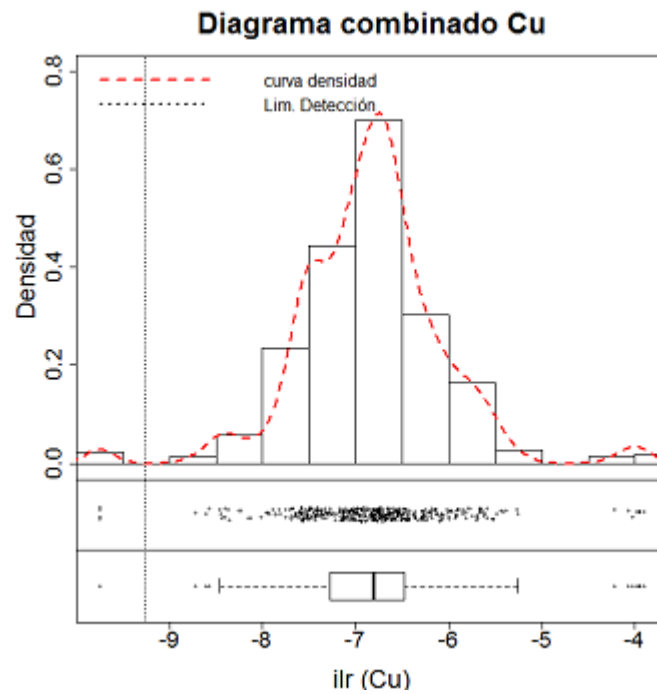


Figura 21. Diagrama combinado Cobre.

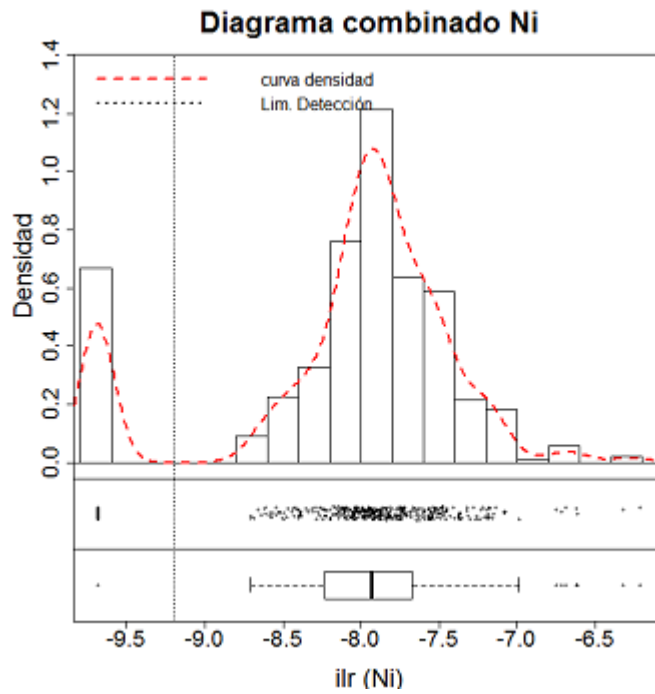


Figura 22. Diagrama combinado Níquel.

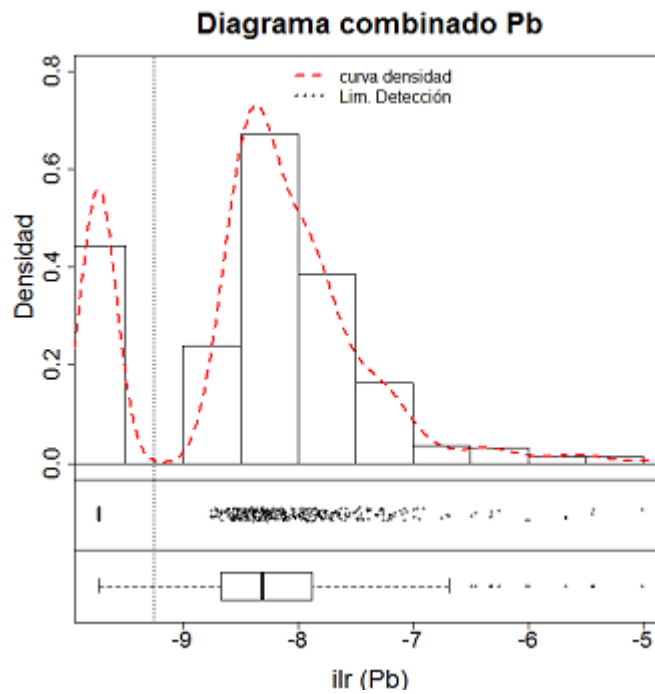


Figura 23. Diagrama combinado Plomo.

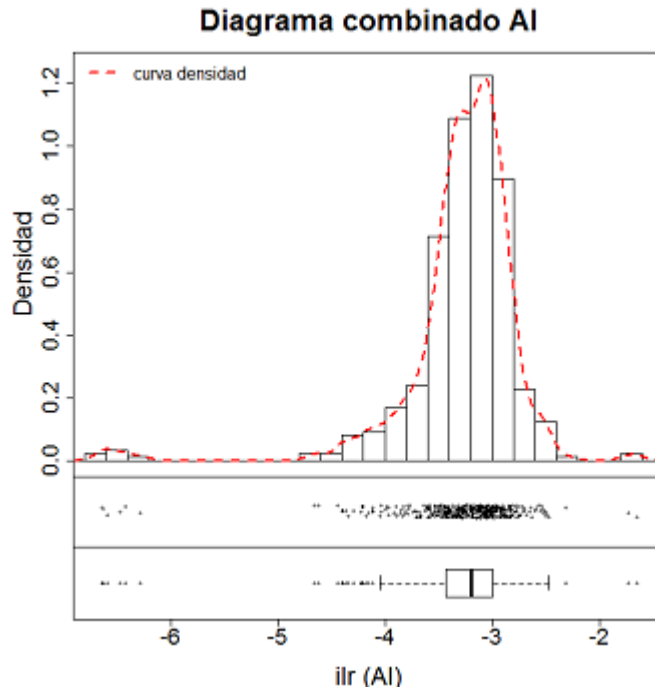


Figura 24. Diagrama combinado Aluminio.

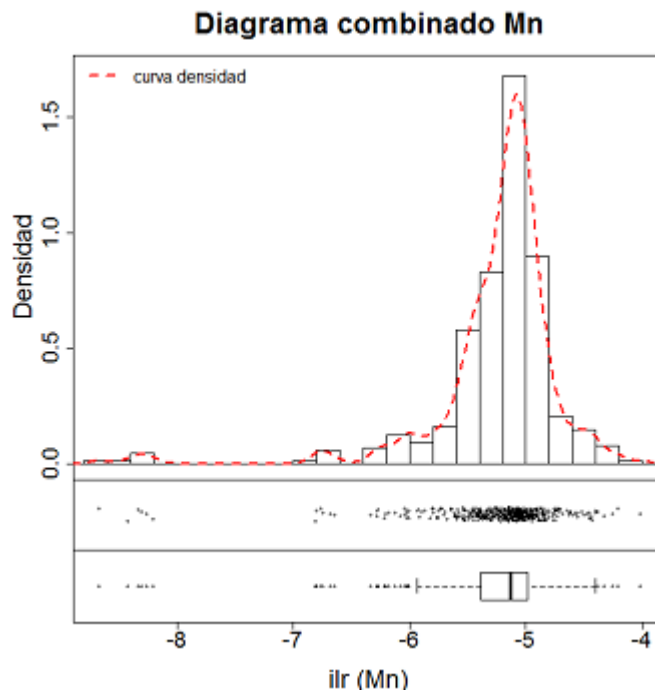


Figura 25. Diagrama combinado Manganeso.

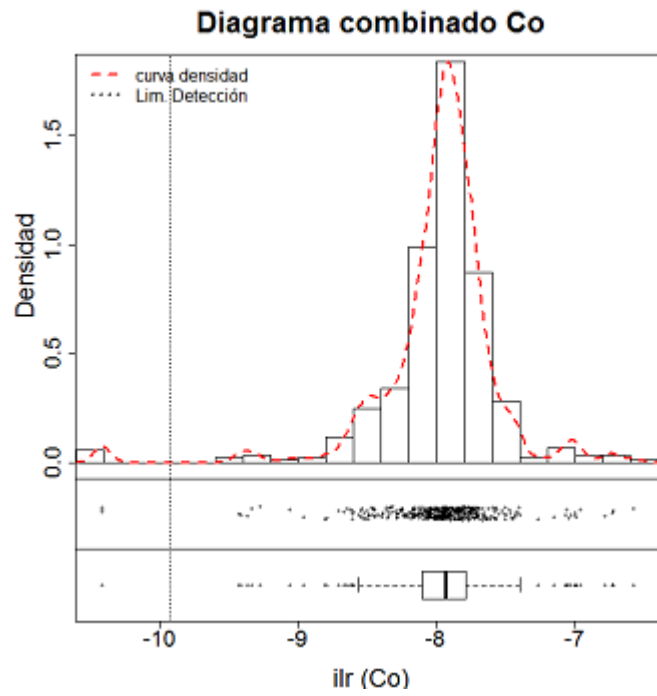


Figura 26. Diagrama combinado Cobalto.

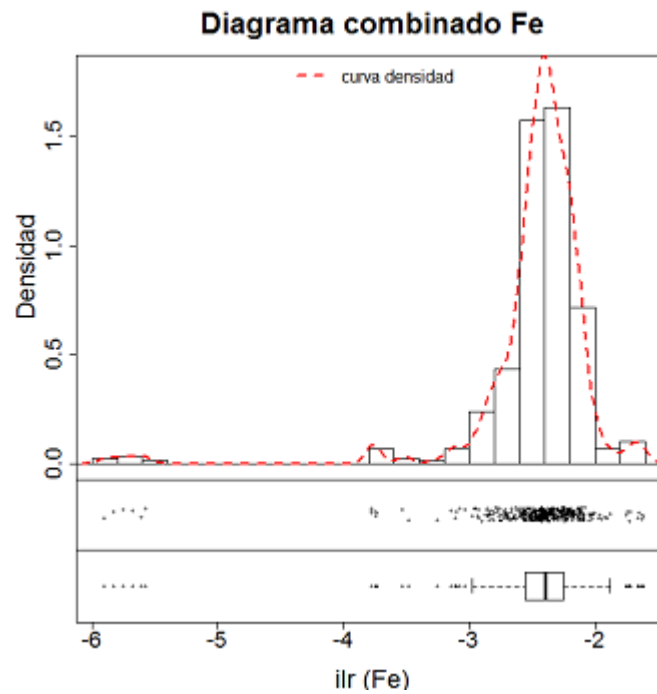


Figura 27. Diagrama combinado Hierro.

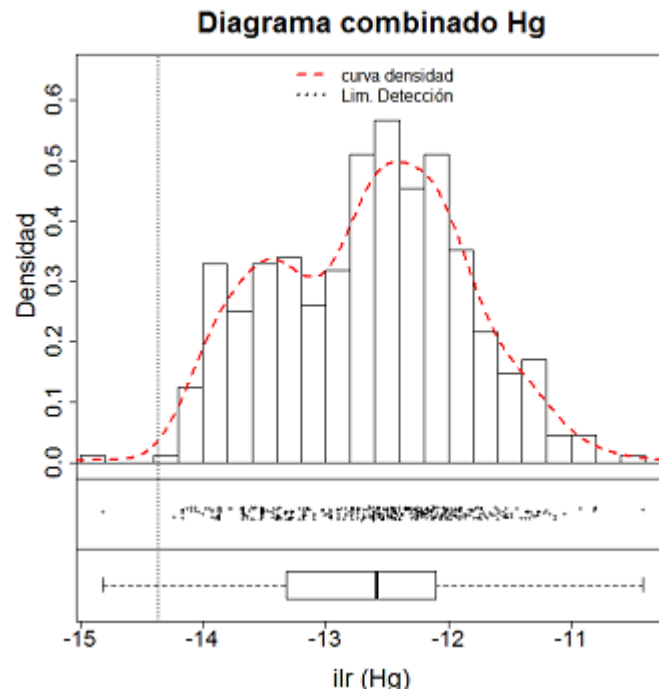


Figura 28. Diagrama combinado Mercurio.

6.3. Mapas Geoquímicos

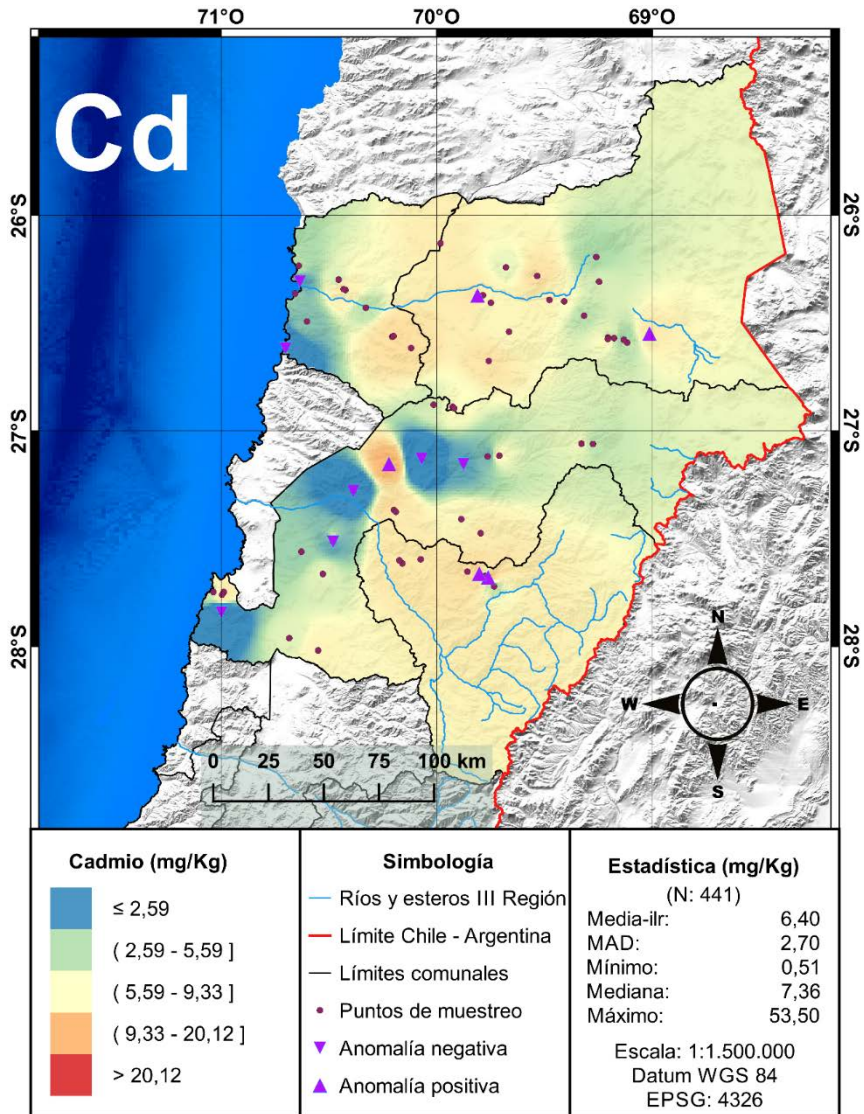


Figura 29. Concentración natural de Cadmio en suelos de la III Región, Chile.

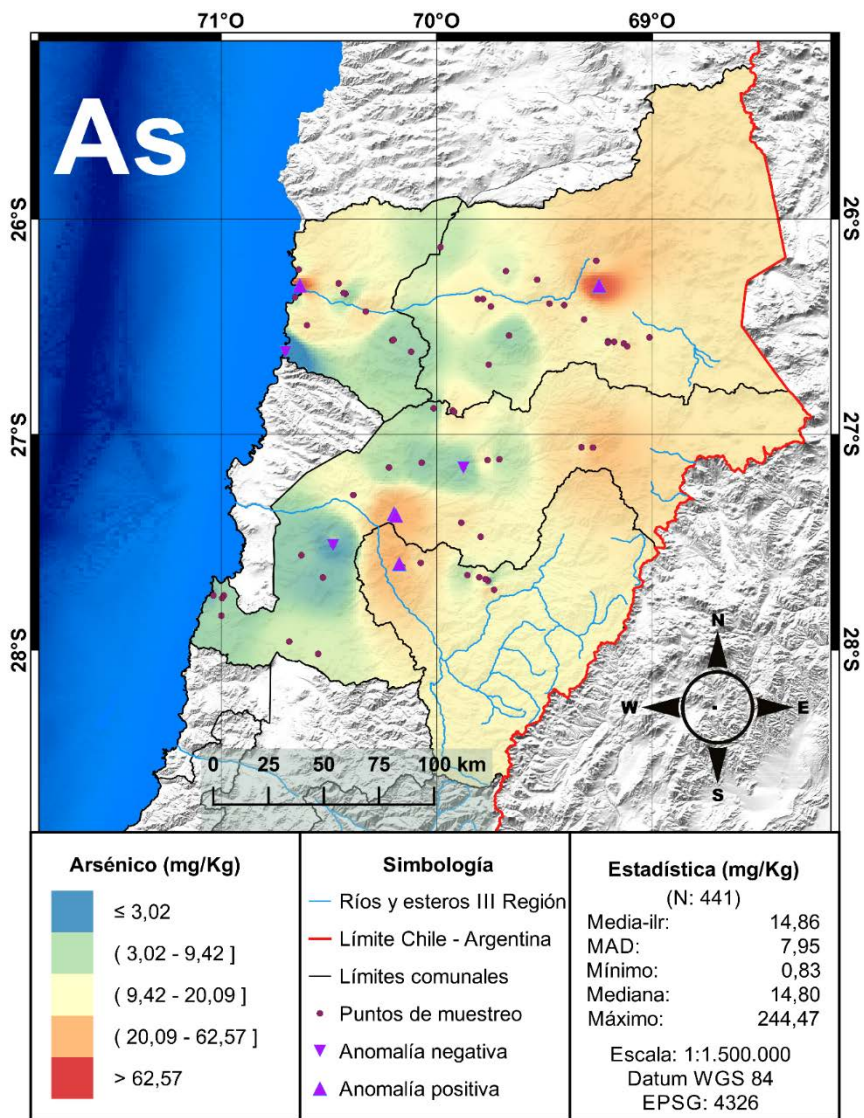


Figura 30. Concentración natural de Arsénico en suelos de la III Región, Chile.

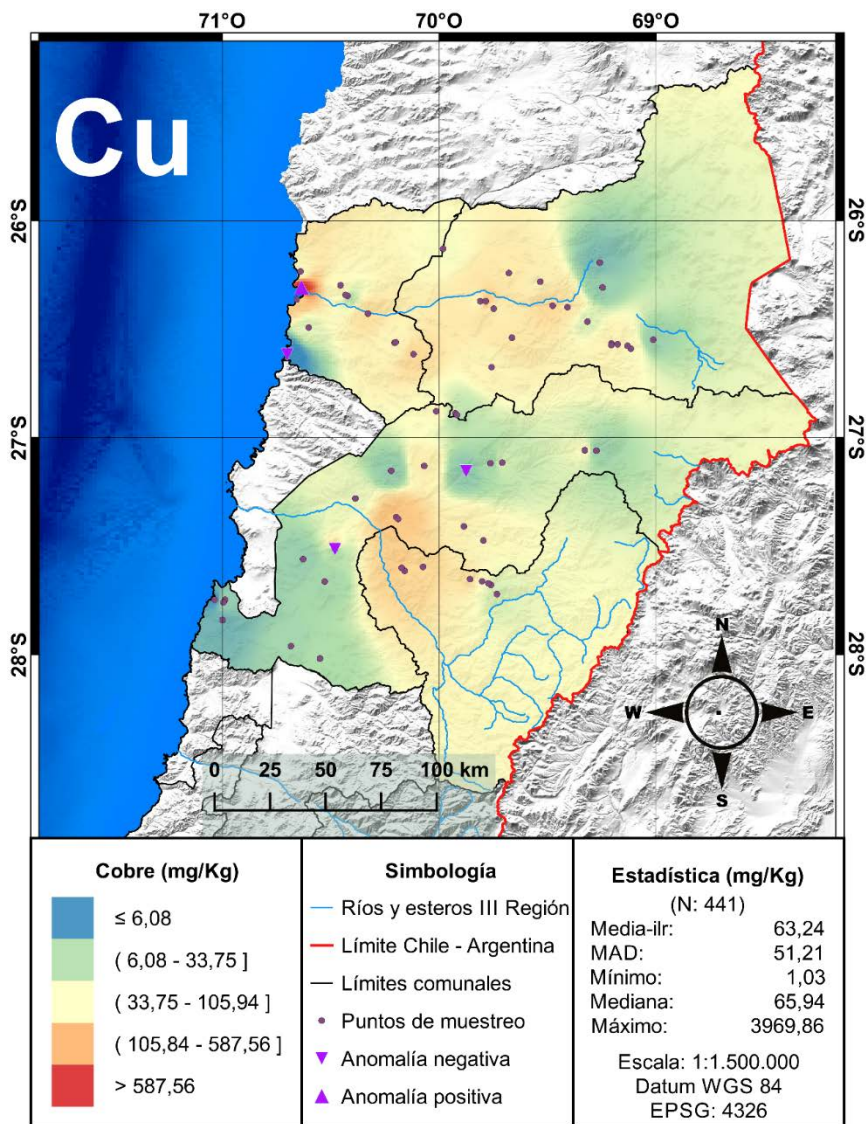


Figura 31. Concentración natural de Cobre en suelos de la III Región, Chile.

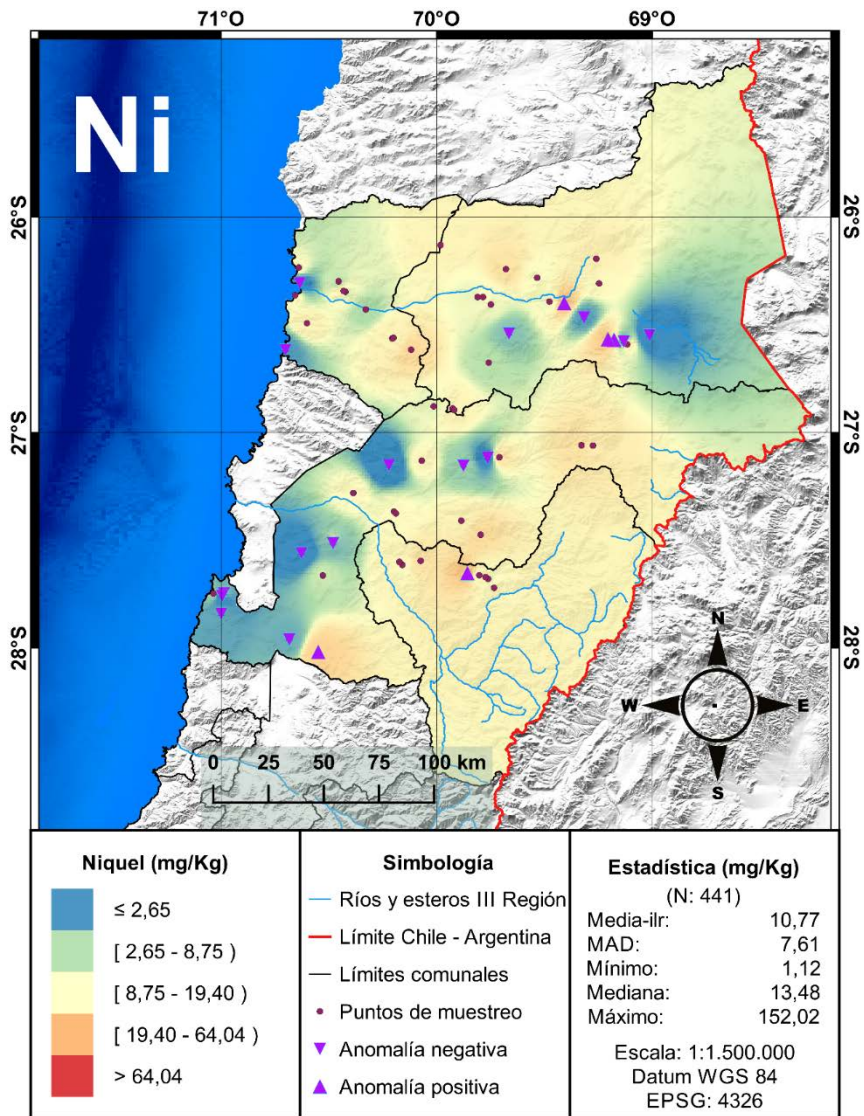


Figura 32. Concentración natural de Níquel en suelos de la III Región, Chile.

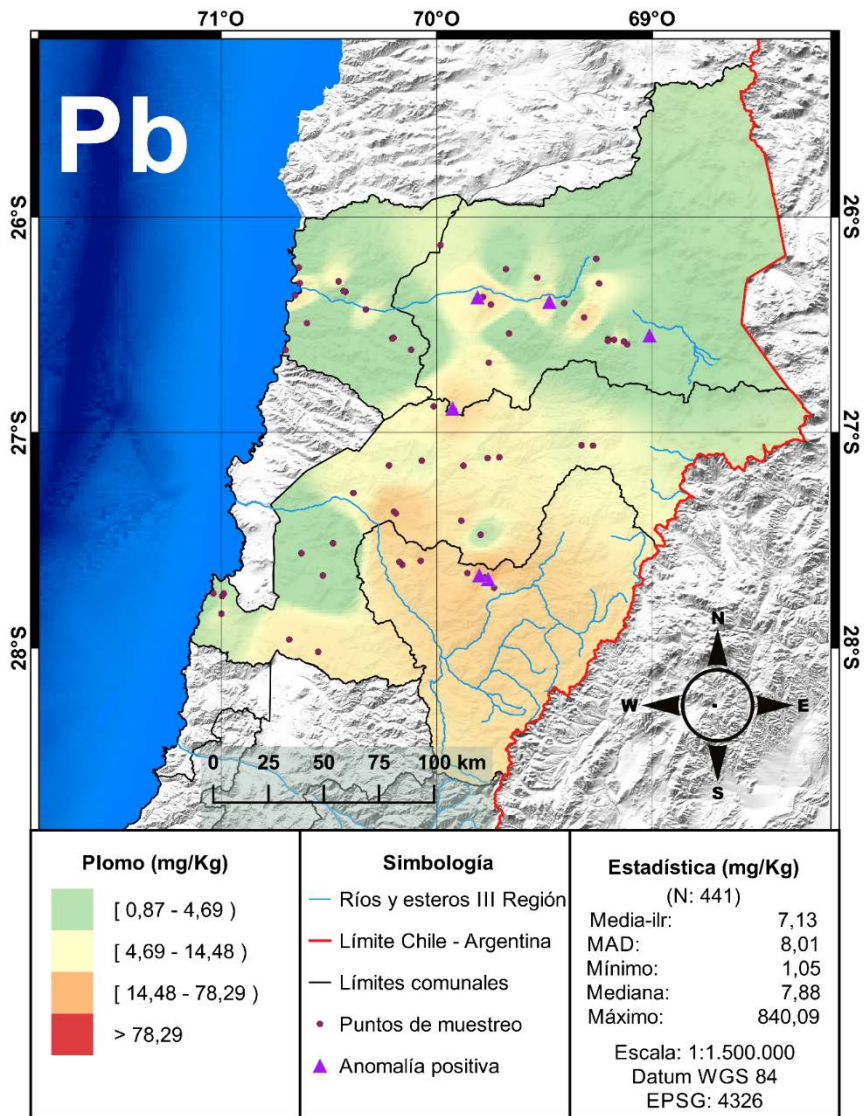


Figura 33. Concentración natural de Plomo en suelos de la III Región, Chile.

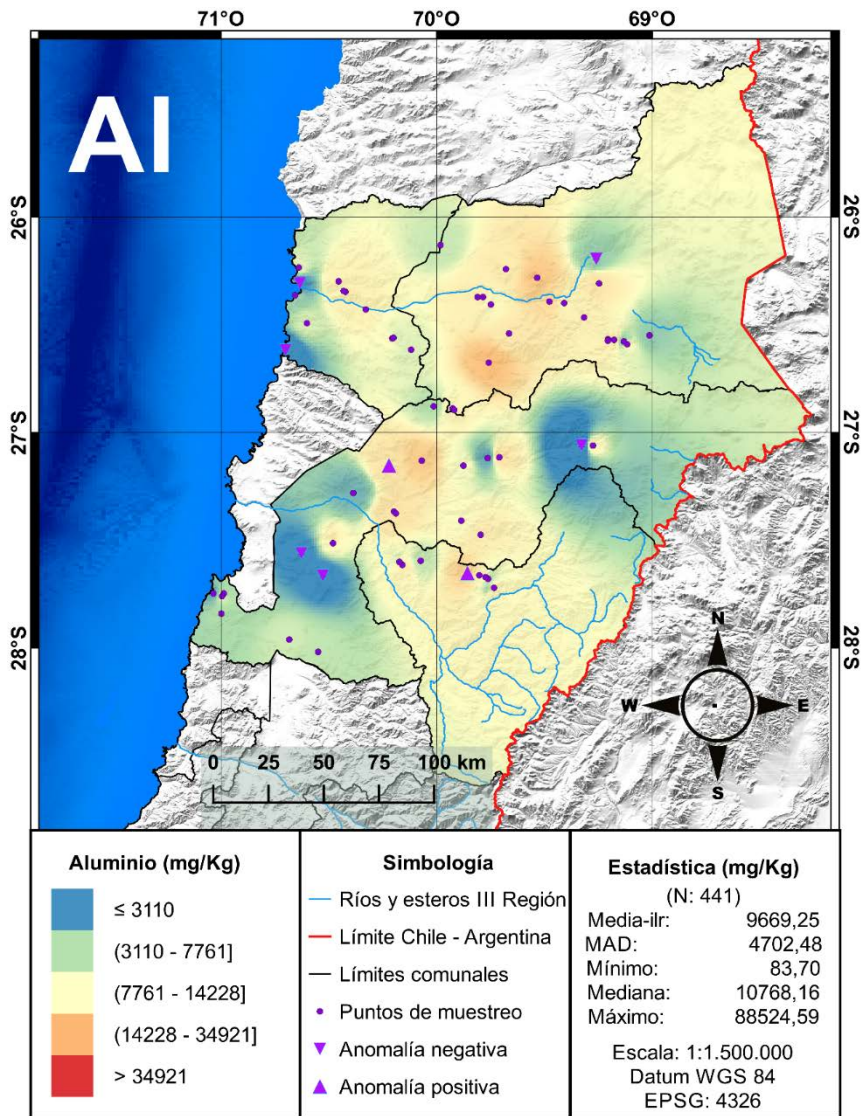


Figura 34. Concentración natural de Aluminio en suelos de la III Región, Chile.

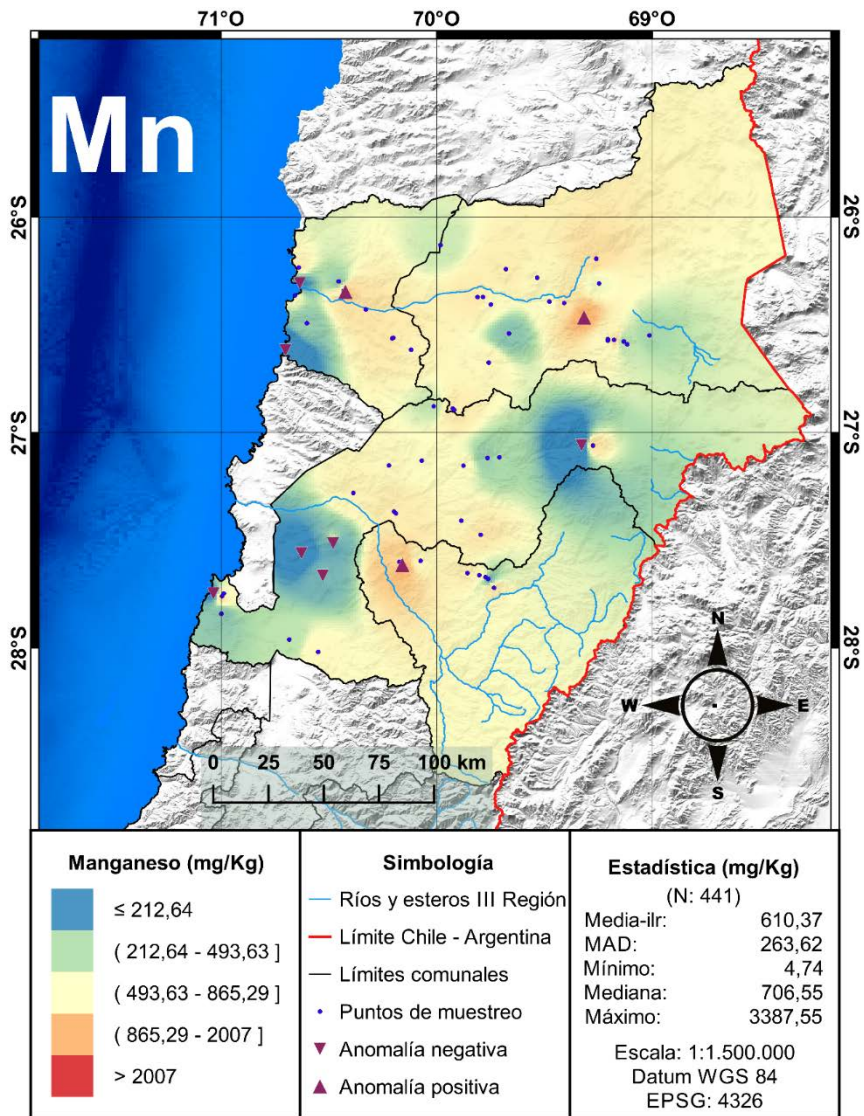


Figura 35. Concentración natural de Manganeso en suelos de la III Región, Chile.

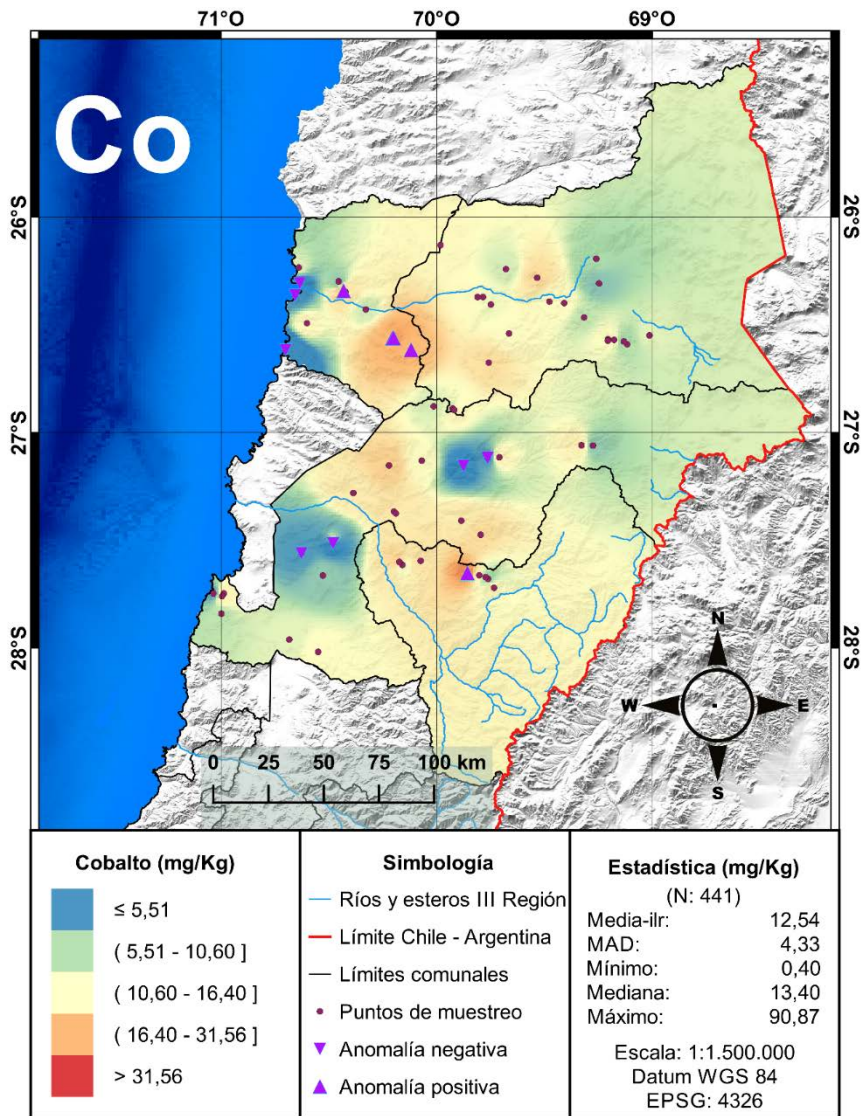


Figura 36. Concentración natural de Cobalto en suelos de la III Región, Chile.

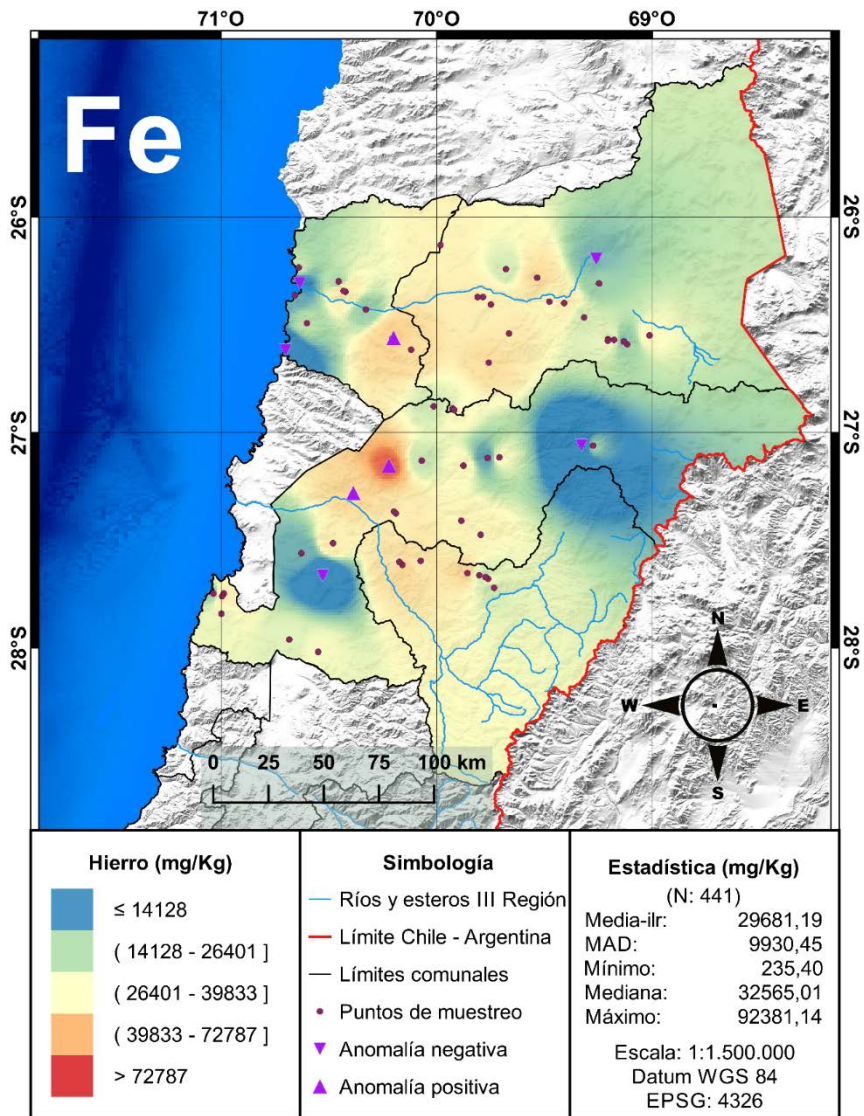


Figura 37. Concentración natural de Hierro en suelos de la III Región, Chile.

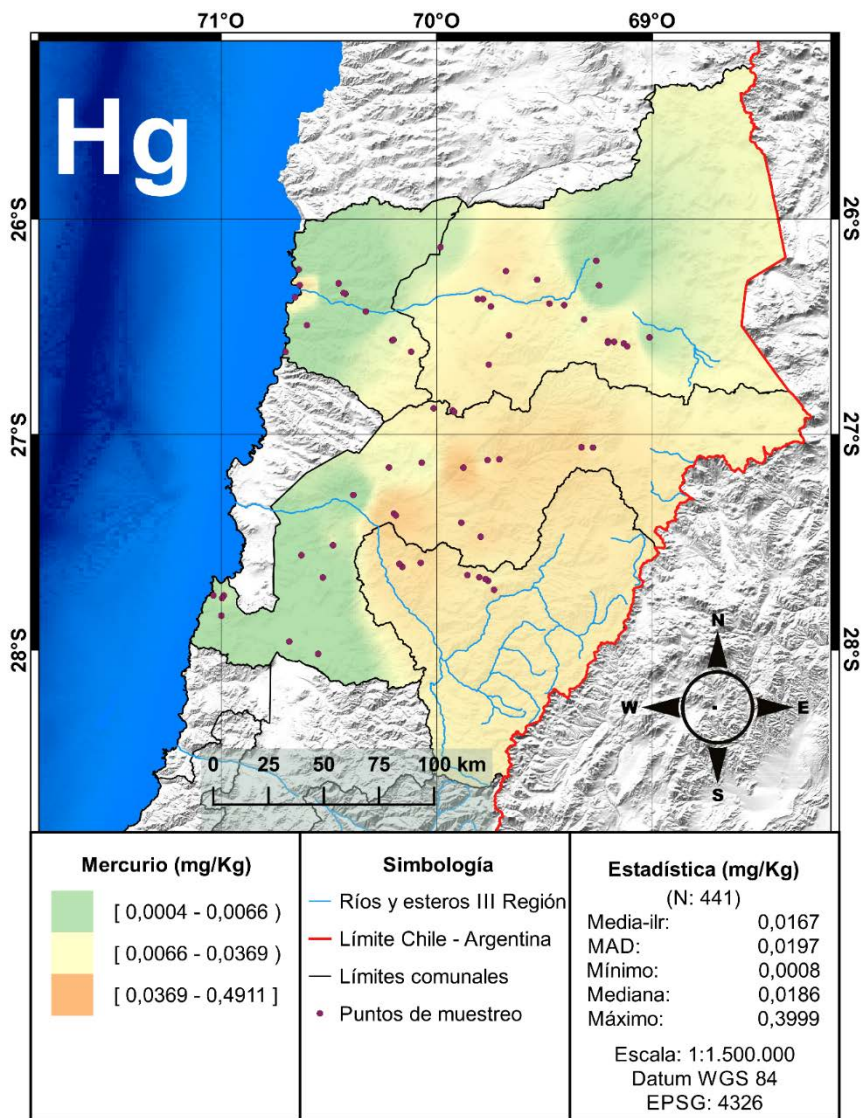


Figura 38. Concentración natural de Mercurio en suelos de la III Región, Chile.