



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

**"ESTUDIO DE PATRONES GEOQUÍMICOS REGIONALES  
EN SEDIMENTOS DE DRENAJE ENTRE LOS 19°S Y 21°S - I  
REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE."**

---

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**JAIME ESTEBAN BARRERA SALAZAR**

PROFESOR GUÍA:

JUAN PABLO LACASSIE REYES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

KATJA DECKART

FRANCISCO HERVÉ ALLAMAND

SANTIAGO DE CHILE

2013

## Resumen

La zona de estudio se enmarca entre los 19°S y 21°S; desde la línea de la costa chilena hasta los 69°W, I región de Tarapacá y parte de XV región de Arica y Parinacota, Chile. Cubre un área aproximada de 27.500 km<sup>2</sup>.

El objetivo principal es evaluar y definir la existencia de patrones geoquímicos en sedimentos de drenajes a escala regional, desarrollando interpretaciones que expliquen cuáles son los controles determinantes de cada patrón, considerando la diversidad y coexistencia de factores geológicos, climáticos y antrópicos.

Las muestras de sedimentos de drenajes utilizadas fueron extraídas en terreno, preparadas en laboratorio y enviadas a análisis geoquímico por los profesionales de la unidad de geoquímica de SERNAGEOMIN durante los años 2010-2012. A los sedimentos de drenaje se les realizó un análisis de composición geoquímica de la fracción fina <180 μm por medio de ICP-MS e ICP-ES, obteniendo las concentraciones para un set de 59 elementos, incluyendo óxidos mayores y elementos trazas. En total, las 1311 muestras utilizadas, conforman una malla de baja densidad con una representación aproximada de 20 Km<sup>2</sup> por muestra. La base de datos obtenida no será publicada en este trabajo debido a la calidad inédita de parte importante de los datos (véase Lacassie *et al.*, 2012b).

Tras obtener los análisis químicos, en este trabajo, se realizaron cálculos estadísticos básicos y mapas univariados para cada elemento. Adicionalmente se realizó un proceso de *clustering* y visualización multivariable por medio de la implementación de redes neuronales artificiales, obteniéndose 6 *clusters* con distintivas características químicas, que posteriormente fueron objeto de interpretaciones.

Los resultados muestran una evidente segmentación geoquímica entre las principales unidades geomorfológicas, encontrando una fuerte diferencia entre la Cordillera de la Costa (CC) y el resto de las unidades. Las principales anomalías de la CC corresponden a Ca, S, P, y Se. Los controles determinantes en la geoquímica de la CC corresponden a factores geológicos y climáticos entre los que destacan: el periódico aporte de iones desde el océano pacífico hacia el continente por medio de la camanchaca, la abundancia relativa de los iones transportados, la capacidad de absorción iónica superficial de arcillas, óxidos e hidróxidos; la afinidad química entre elementos y condición climática de hiperaridez prolongada.

Los controles determinantes en los patrones presentes en la Depresión intermedia (DI) y Precordillera (PR) corresponden a procesos relacionados con la meteorización y transporte de detritos desde la Cordillera Occidental (CO); y la constante deflación eólica a la que es sometida la DI. Esto conlleva a la generación de patrones antagónicos, que representarían, por un lado, fases mineralógicas abundantes en rocas con mayor diferenciación para aquel patrón dominante en quebradas, y por otro lado, fases densas para aquel patrón que domina en pampas.

Se obtiene un patrón asociado a las cotas altas de la CO que refleja la mineralogía de la roca fresca de edificios y secuencias volcánicas; y otro patrón asociado principalmente a sectores con alteración hidrotermal y/o actividad de la industria mineral, distribuido en las distintas unidades geomorfológicas.

Adicionalmente se reconocieron 2 quebradas con evidente anomalías, que se sugiere como consecuencia de la intervención humana y la industria minera; esta alteración se expresa fuertemente en la anomalía de Cobre (Cu) río abajo de la faena de HMC ubicada en la Qda. Sagasca y la histórica alteración en la concentración de molibdeno (Mo) que posee la Qda. Guatacondo. Se requiere estudio de detalle para confirmar estas sugerencias.

Finalmente, fueron comparadas las concentraciones de metales pesados con estándares internacionales a fin de distinguir posibles zonas con concentraciones riesgosas para organismos vivos; en general los sectores donde ciertos elementos como el arsénico (As), cromo (Cr) y cobre (Cu) tienen valores nocivos para la biota, no se encuentran poblados y tampoco se desarrollan grandes ecosistemas de organismos superiores. Se reconocen factores naturales, como la concentración anómala de As en Qda. Camarones, y factores antrópicos como alteraciones puntuales por la industria minera.

**“Con amor, a mi mami, mi Papi, mis hermanos y mis abuelos.**

**A Elizabeth, mi negra, mi compañera de ruta.**

**A mis hermanos animales.**

**A mi país.”**

## Agradecimientos

Agradezco a mis papis Jessie y Jaime por su incondicional entrega de amor y su sacrificio; por los antaños zapatos rotos de mi mamá y por las interminables noches de estudio de mi papá... por sus largas caminatas nocturnas al trabajo para ahorrar. Por todo eso, con el corazón abierto, gracias. Poder escribir estas palabras es fruto, primero, del sueño de mis padres, que nació en sus corazones y que germinó en el mío.

Agradezco con sinceridad a JP, por darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo. Agradezco sus incisivos comentarios y sugerencias, sin las cuales este trabajo no habría llegado al mismo puerto. Agradezco especialmente su humildad y humanidad.

Agradezco profundamente a mis hermanos Fabián y Jessie, porque aunque entre nosotros seamos económicos en las palabras, nunca he dejado de sentir su apoyo y cariño.

Agradezco a Elizabeth, mi negra linda, por su sincera e inagotable paciencia y entrega. Porque cuando le dije que me cambiaría de carrera, fue la primera en poner garra y regalarme una arenga. En el período de este trabajo, fue mi principal puntal y compañía. Este trabajo, sin duda, es tanto mío como suyo.

Agradezco a mi familia en Quintero, por su cariño infinito y su constante transmisión de buenas vibras. A mis tías, tíos, prima y primos, a ellos les doy mil gracias.

Agradezco al Lobo y a mi Reina por su compañía en las tantas noches de estudio. No podré olvidar nunca los placidos y profundos ronquidos del Lobo, que siempre interpreté como un incentivo para terminar pronto el estudio y acompañarlo en el tuto.

Agradezco con especial cariño a mis amigos del Bronxxx: Colombiano, Tomatón, Blanco, Pollo, Manriver, Joaco y Ricky, con quienes viví la gratificante tarea de formarme como futuro profesional, amenizando los años con buena compañía, siempre acompañados de un buen bebestible. Gracias por su amistad.

Agradezco a la hermosa generación de geología que me acompañó en estos últimos años de carrera. A mí querido curso “Punta De Lanza”, sin personalismos ni preferencias, muchas gracias. La energía humana que emana de ese valioso grupo de trabajo sin duda fue una inyección constante de energía. A veces silente, pero siempre presente.

Finalmente, agradezco a mis profesores de colegio, desde los de educación básica, hasta los de enseñanza media en el Instituto Nacional. Estos últimos, verdaderos maestros, formadores de ciudadanos. Con orgullo les digo que, hoy, sus enseñanzas también son celebradas.

**“Agradezco a esta boca que permite sonreír, y que a menudo, en total sinergia con el corazón, me permite agradecer...”**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos .....	1
1.1.1. Objetivo principal .....	1
1.1.2. Objetivos específicos .....	1
1.2. Hipótesis .....	1
1.3. Descripción de la zona de estudio .....	2
1.3.3. Ubicación y vías de acceso .....	2
1.3.4. Sistemas de drenajes principales .....	4
1.3.5. Geomorfología .....	6
1.3.6. Climatología .....	7
1.3.7. Asentamientos humanos .....	9
1.3.8. Actividades económicas .....	10
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	11
2.1. Terreno .....	11
2.2. Laboratorio.....	12
2.2.1. Preparación de muestras.....	12
2.2.2. Análisis geoquímico .....	15
2.3. Procesamiento de datos .....	15
2.3.1. Control de calidad de datos .....	15
2.3.2. Análisis univariable .....	20
2.3.3. Redes neuronales artificiales.....	21
3. MARCO GEOLÓGICO.....	22
3.1. Unidades litoestratigráficas .....	22
3.1.1. PALEOZOICO.....	22
3.1.2. JURASICO - CRETÁCICO INFERIOR .....	24
3.1.3. CRETÁCICO SUPERIOR – PALEOCENO INFERIOR.....	34
3.1.4. PALEOCENO-EOCENO INFERIOR.....	36
3.1.5. EOCENO MEDIO.....	37
3.1.6. OLIGOCENO SUPERIOR-PLIOCENO .....	37

3.1.7.	PLEISTOCENO-HOLOCENO.....	41
3.2.	Marco estructural .....	47
3.3.	Metalogenia .....	48
4.	RESULTADOS .....	52
4.1.	Control de calidad de datos (QAQC).....	52
4.2.	Análisis univariable .....	54
4.3.	Redes neuronales artificiales .....	56
5.	DISCUSIONES .....	61
5.1.	Control de calidad (QAQC) .....	61
5.2.	Redes neuronales artificiales (RNA) .....	63
5.2.1.	Segmentación geoquímica regional.....	63
5.3.	Factores antropogénicos en impronta geoquímica .....	88
5.3.1.	Anomalía de molibdeno en Qda. Guatacondo .....	88
5.3.2.	Anomalía de cobre en Qda. Sagasca .....	88
5.4.	Comparación de concentraciones con valores PEC .....	89
6.	CONCLUSIONES .....	95
6.1.	Redes neuronales artificiales (RNA) .....	95
6.1.1.	Segmentación geoquímica .....	96
6.1.2.	Nodo 4 .....	97
6.1.3.	Análisis de sensibilidad de datos .....	97
6.2.	Factores antropogénicos en impronta geoquímica .....	98
6.3.	Comparación de concentraciones con valores PEC .....	98
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100
8.	ANEXOS.....	104
8.1.	Redes neuronales artificiales (GCS).....	105
8.2.	Calidad de datos (QAQC) .....	110
8.3.	Mapas univariables .....	125

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Tipos de sedimentos recolectados y número total de muestras consideradas en este estudio.....	11
Tabla 2-2: Ejemplo de cuadro resumen de estadísticas básicas de duplicados para Arsénico. Se muestra además los valores de Error Relativo Medio (%) y Test t-Student.....	17
Tabla 2-3: Umbrales de toxicidad para metales pesados (MacDonald, 2000). .....	20
Tabla 3-1: Leyenda de mapa geológico. Extraído de Ordoñez y Rivera (2004). .....	46
Tabla 4-1: Resumen de valores estadísticos calculados de duplicados de terreno. Se muestra en color rojo las muestras con error relativo medio superior al 20%. .....	52
Tabla 4-2: Número de muestras de cada nodo, desglosadas según tipo de compuesto de sedimento.....	56
Tabla 4-3: Factores de enriquecimiento de cada elemento para los 6 nodos obtenidos en la RNA. Se adjunta el valor del promedio regional de cada elemento calculado en base a todas las muestras utilizadas en este trabajo. Los colores, según intensidad, resaltan los mayores valores (rojo) o menores valores (azul) por cada nodo. ....	58
Tabla 4-4: Elementos con factor de enriquecimiento >1,1. En negrita se señalan los elementos que adicionalmente presentan un valor igual o superior a (promedio regional + desviación estándar). Los valores que se encuentran subrayados, son considerados outliers según <i>box-plot</i> “factor de enriquecimiento vs nodo”. El asterisco (*) indica los elementos del nodo 4 que serán incluidos por el recalcu de la desviación estándar en ese nodo en las discusiones de este trabajo. ....	60
Tabla 5-1: Abundancia relativa de iones en soluciones provenientes de suelo, aerosol y niebla (camanchaca) en cerro El Tofo, IV Región, Chile Los primeros cinco puestos de abundancia relativa están dentro del mismo orden de magnitud, mientras que los demás tienen un orden de magnitud menor. Modificado de Schemenauer y Cereceda (1992). .....	67
Tabla 5-2: Elementos con factor de enriquecimiento >1,1 para RNA paralela. En encuentran en negrita los elementos con valor igual o superior a (promedio regional + desviación estándar). Los valores subrayados, son considerados outliers según <i>box-plot</i> (Figura 5-6).....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1-1: Vías de acceso principales de la I región. El recuadro rojo enmarca la zona de estudio.....3
- Figura 1-2: Sistemas de drenajes principales: se observa la transición, de norte a sur, desde el sistema exorreico a sistema endorreico. En el sistema endorreico, los drenajes no traspasan dominio de la Cordillera de la costa, llegando solamente hasta el depocentro de la depresión intermedia (DI). El cambio de sistemas se produce aproximadamente a los 19°45'S. Los drenajes importantes están delineados de color azul. ....5
- Figura 1-3: Mapa de isoyetas regionales (precipitación media anual en mm). Recuadro rojo marca la zona contemplada en este estudio. Modificado de declaración de impacto ambiental (DIA) de Operación Nueva Victoria de SQM. Autor: PRAMAR Ambiental Consultores. (www.e-seia.cl).....8
- Figura 2-1: Proceso de preparación de muestras. A.- Cuarteado de muestras: la cubeta con la etiqueta se vacía para ser separada en 2 submuestras, una de ellas es guardada como respaldo. B.- Tamizado: la muestra se separa por tamaño granulométrico, buscando obtener la fracción <180 µm. C.- Pulverizado: La fracción fina se pulveriza en mortero de ágata y el material obtenido se vierte en el envase plástico, finalizando la etapa de preparación de muestra. Capturas realizadas en Laboratorio de SERNAGEOMIN..... 14
- Figura 2-2: Ejemplo de gráfico de dispersión de duplicados para P2O5 [%]..... 17
- Figura 2-3: Ejemplo de gráfico de cuantiles para potasio K<sub>2</sub>O [%]. La línea roja corresponde a la ecuación Y=X. .... 18
- Figura 2-4: Ejemplo de gráfico Diferencia relativa absoluta (eje Y) vs % Datos Acumulados (eje X) para Magnesio (%). Nótese que es posible extraer que menos del 10% de los datos trabaja con una diferencia relativa mayor al 20%. .... 19
- Figura 2-5: Ejemplo de gráfico Diferencia relativa vs promedio entre originales y duplicados para mercurio. Nótese que las diferencias relativas son mayores cuando más se acercan los valores al límite inferior de detección de equipo, que en este caso es 0,01 ppm para Hg..... 19
- Figura 3-1: Mapa geológico: El recuadro rojo enmarca la zona de estudio. Leyenda completa en página siguiente. Modificado de Ordoñez y Rivera (2004). ....45
- Figura 3-2: Provincias y franjas metalogénicas de la I y XV región. En el recuadro rojo se muestra el área de este estudio. Modificado de Ordoñez y Rivera (2004). ....50
- Figura 3-3: Yacimientos económicos históricos registrados en la zona. Se presenta una selección de la base de datos que existe en SERNAGEOMIN. La mayoría de estos yacimientos son de pequeña minería y están en total abandono. La simbología de “torta” representa los principales recursos de extracción en cada faena.....51



Figura 4-1: Ejemplo de mapa univariable: distribución de concentraciones de fósforo ( $P_2O_5$ ). Las clases fueron calculadas en base al método Head/Tail Breaks. (Mapa en anexo). .....	55
Figura 4-2: Esquema de RNA del tipo GCS correspondiente al set total de muestras de sedimentos. Cada número representa un cluster de muestras con comportamiento químico similar.....	56
Figura 4-3: Mapa de distribución espacial de los nodos obtenidos en la RNA. La topología de la RNA se muestra en la esquina superior derecha.....	59
Figura 4-4: Gráfico de Caja para los factores de enriquecimiento correspondiente a cada nodo. Destacan con un asterisco los valores considerados atípicos extremos y con un círculo los valores atípicos leves. Realizado en software SPSS versión 21. ....	60
Figura 5-1: Mapa de distribución espacial de las muestras correspondientes a los nodos 2 y 5. Se observa una preferencia en su distribución contenida en gran parte por la CC y unas pocas muestras en la DI.....	65
Figura 5-2: Mapa de distribución espacial de las muestras correspondientes a los nodos 3 y 6. ....	74
Figura 5-3: Fotografía a los sedimentos muestreados en una zona de pampa en la DI. Esta muestra forma parte del nodo 6. Se aprecia la acumulación superficial de sedimentos con tonalidades más oscuras, asociadas a minerales densos acumulados por deflación eólica. ....	77
Figura 5-4: Mapa de distribución de nodo 1. Destaca su presencia en zonas altas de la PR y CO. Desde los 20°S hacia el sur, su presencia prácticamente desaparece.....	79
Figura 5-5: Mapa de distribución espacial de las muestras correspondientes al nodo 4. ....	82
Figura 5-6: Gráfico de Caja para los factores de enriquecimiento correspondiente a cada nodo de la RNA desarrollada para el análisis de sensibilidad. Destacan con un asterisco los valores considerados atípicos extremos y con un círculo los valores atípicos leves.....	85
Figura 5-7: Mapa de distribución de nodos de RNA generada a partir del análisis de sensibilidad. La topología de la RNA se muestra en la esquina superior derecha. ....	86
Figura 5-8: Drenaje en Qda. Sagasca, río abajo de faena minera. Se observan eflorescencias verdosas y óxidos de hierro sobre sedimentos recientes. Esta zona obtuvo los más altos valores de Cu de la región, superando en 100 veces la concentración regional. ....	89
Figura 5-9: Mapa de distribución de concentraciones de arsénico (ppm). ....	91

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo principal

Evaluar y definir la existencia de patrones geoquímicos en sedimentos de drenajes a escala regional entre los 19°S y 21°S, desarrollando interpretaciones que expliquen cuáles son los controles determinantes de cada patrón y considerando la diversidad de factores geológicos, climáticos y antrópicos involucrados.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Desarrollo de estadísticas básicas y mapas univariados de distribución de concentraciones para cada elemento.
- Realizar análisis estadísticos mediante redes neuronales artificiales (RNA) a fin de identificar un reducido número de *clusters* de muestras que indiquen comportamientos geoquímicos similares.
- Determinar relaciones entre resultados obtenidos por análisis estadísticos; contrastarlos con factores geológicos, climáticos y antrópicos.
- Definir toxicidad de concentraciones de metales pesados en sedimentos por medio de su comparación con parámetros medioambientales establecidos.

## 1.2. Hipótesis

En relación al objetivo principal, se plantea que es posible identificar y definir patrones geoquímicos a escala regional con el uso de herramientas estadísticas avanzadas, que sean reflejo de: influencia de la composición litológica local, ubicación según segmentación geomorfológica, factores ambientales naturales y alteraciones generadas por la actividad del hombre.

## **1.3. Descripción de la zona de estudio**

### **1.3.3. Ubicación y vías de acceso**

La zona de estudio se enmarca entre los 19°S y 21°S; desde la línea de la costa chilena hasta los 69°W, encontrándose contenida casi en su totalidad en la I Región de Tarapacá y en una mínima proporción abarca la zona más septentrional de la XV Región de Arica y Parinacota. La superficie cubierta es de aproximadamente 27.500 km<sup>2</sup> que equivale a poco menos de la suma de las áreas de las regiones Metropolitana (RM) y Valparaíso (V región).

El Acceso a la zona es variado, siendo el más importante la ruta 5 que cruza la zona en toda su extensión en dirección norte a sur. Es posible también llegar vía terrestre desde Bolivia por medio de la ruta A-15. El acceso aéreo más importante es el Aeropuerto internacional Diego Aracena que se sitúa a unos 40 Km al Sur de la ciudad de Iquique (Figura 1-1).

Las rutas más importantes que conducen desde la Ruta 5 hacia el Este, vale decir en dirección a la precordillera, de norte a sur, son: ruta A-345 (Qda. Camarones), A-375, A-41, A-45, A-45, A-55, A-65, A-651, A-75 y A-85 (Qda. Guatacondo). Las rutas más importantes que conducen desde la ruta 5 hasta la costa, de norte a sur, son: ruta A-376 (Qda. Camarones), A-40 (a Pisagua), A-16 (a Iquique), A-760 (a Caleta Patillo). Por otra parte, existe la ruta costera A-1 que recorre desde Iquique hacia el sur.

En relación al tipo de vehículo idóneo para el acceso a todas las zonas estudiadas, se recomienda utilizar camionetas 4x4 con equipamiento de seguridad apropiado para los distintos terrenos. Adicionalmente es recomendable, por seguridad, portar equipos de comunicación satelital debido a que en gran parte del área no existe señal de telefonía celular.

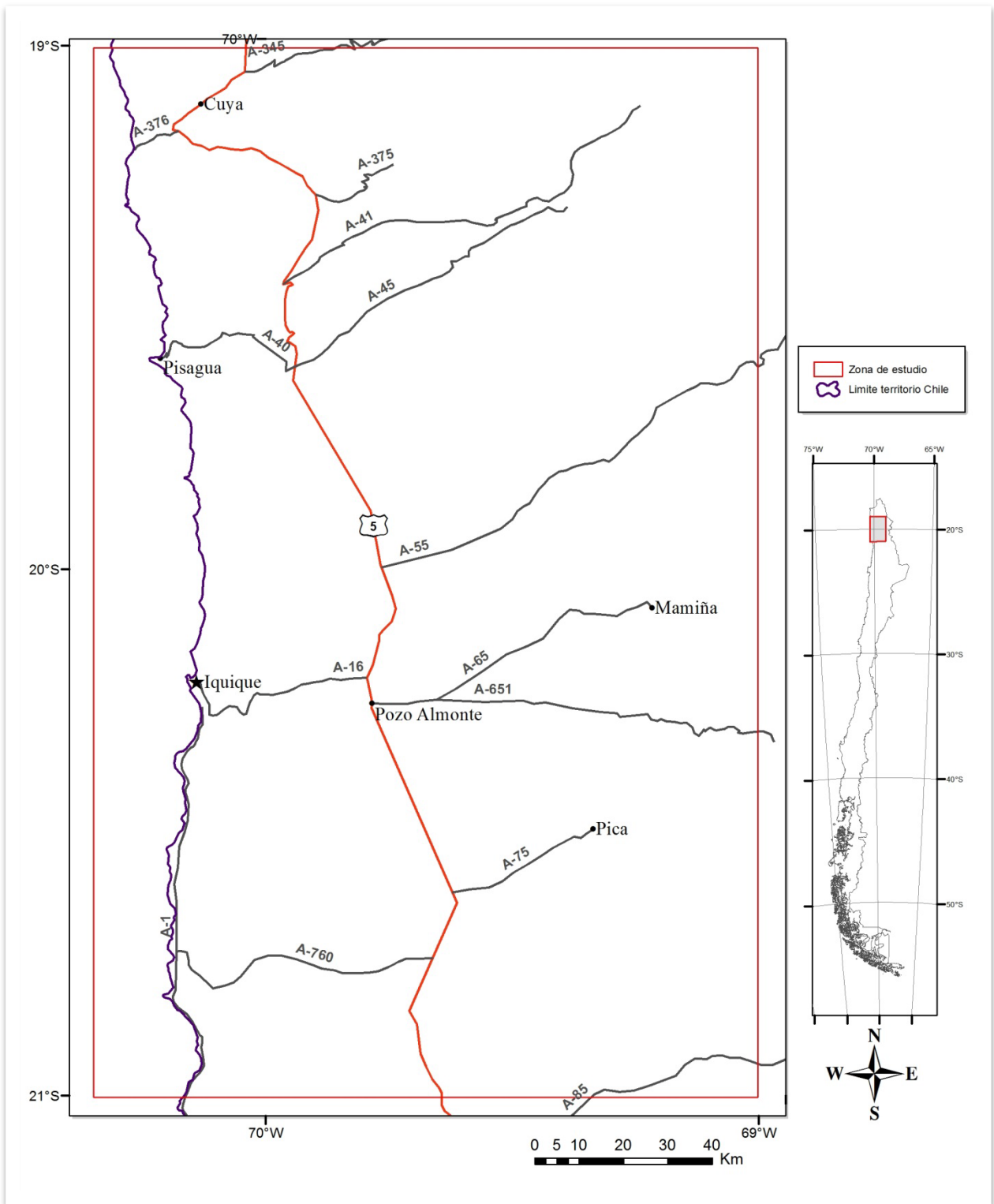


Figura 1-1: Vías de acceso principales de la I región. El recuadro rojo enmarca la zona de estudio.

### 1.3.4. Sistemas de drenajes principales

En el área de estudio figuran dos grandes grupos de drenajes importantes: exorreicos y endorreicos. Los drenajes exorreicos se ubican al norte de los 19°30'S y los endorreicos hacia el sur hasta cerca de los 26°S (Figura 1-2). El factor fundamental que habría generado la diferencia entre el desarrollo de los distintos grupos de drenajes sería la disimilitud en las condiciones climáticas, en donde la zona endorreica coincide con condiciones hiperáridas del Desierto de Atacama, mientras que la zona exorreica mantiene condiciones de aridez a semi-aridez (Farías, 2012).

Los drenajes exorreicos son principalmente dos: Qda. Tiliviche y Qda. Camarones.

La Qda. Tiliviche desemboca en la zona conocida como Pisagua antiguo hacia los 19°33'S. Su escorrentía superficial es nula casi todos los días del año excepto esporádicamente en época estival. El área que drena es de aproximadamente 3.700 km<sup>2</sup> siendo la olla hidrográfica exorreica más importante de la zona de estudio.

La Qda. Camarones se ubica en la zona norte del estudio y su caudal activo desemboca al mar en Caleta Camarones a la altura de los 19°11'S. A ella converge la Qda. de Chiza como principal tributario pero que a diferencia de la Qda. Camarones, no tiene escorrentía superficial de agua. El río Camarones se forma por la unión de los ríos Ajatama y Caritaya, cuyos caudales reducidos, presentan escurrimiento durante meses invernales (Muzzio, 1986). La Qda. Camarones drena alrededor de 5.000 km<sup>2</sup>, de los cuales 2.700 km<sup>2</sup> pertenecen al área de estudio, configurándose como la segunda gran olla exorreica de la zona después de la Qda. Tiliviche (Ayala, 2003).

Las incisiones de ambos drenajes exorreicos alcanzan alturas máximas hacia sus desembocaduras de entre 600 a 800 m y 1.700 m en la precordillera (García *et al.*, 2011).

La zona de drenaje endorreico, que abarca su área de drenaje desde la Cordillera Occidental, termina en la depresión intermedia, al este de la Cordillera de la Costa. El área total drenada por este tipo de cuencas en la zona de estudio alcanza del orden de 14.000 km<sup>2</sup>.

## Sistemas de drenaje principales

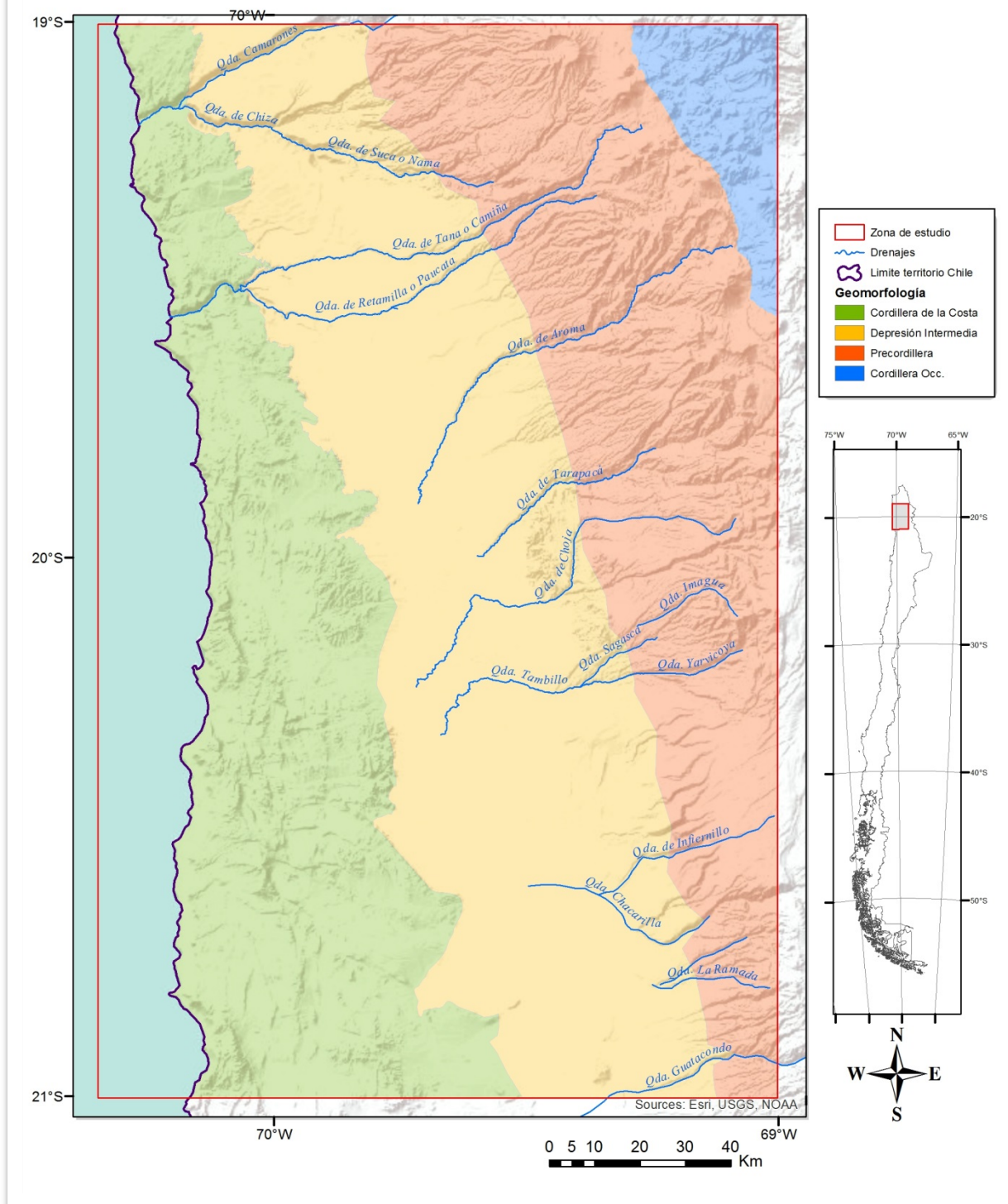


Figura 1-2: Sistemas de drenajes principales: se observa la transición, de norte a sur, desde el sistema exorreico a sistema endorreico. En el sistema endorreico, los drenajes no traspasan dominio de la Cordillera de la costa, llegando solamente hasta el depocentro de la depresión intermedia (DI). El cambio de sistemas se produce aproximadamente a los 19°45'S. Los drenajes importantes están delineados de color azul.

### 1.3.5. Geomorfología

Los Andes, enmarcados en la zona de este estudio, están constituidos por cuatro unidades geomorfológicas que representan el arco y el antearco de la Cordillera (García *et al.*, 2011). Estas corresponden de oeste a este: 1.- Cordillera de la Costa (CC), 2.- Depresión Intermedia (DI), 3.- Precordillera (PR) y 4.- Cordillera Occidental (CO).

**Cordillera de la costa (CC):** Es una elevación madura de relieve bajo, pediplanizada, es decir, con un relieve uniformemente parejo, con tendencia a la horizontalidad con un promedio de 1.000 msnm, altura que tiende a aumentar hacia el sur. Es un cordón de orientación N-S de alrededor de 50 km de ancho en la zona sur y de 30 km en la zona norte del estudio, constituida mayoritariamente por rocas mesozoicas, con una elevación máxima en la zona aproximada de 1.200 msnm. Su límite occidental está caracterizado por la presencia del gran escarpe costero, donde los acantilados subverticales alcanzan un desnivel promedio de 700 m con máximos de 1.000 m (Paskoff, 1979).

**Depresión intermedia (DI):** Es la región deprimida alojada entre la Cordillera de la costa y la Precordillera aquí denominada Pampa del tamarugal. Su superficie corresponde a una extensa cubierta aluvial, inclinada con una suave pendiente hacia el W. Tiene una altura promedio de 1.000 msnm, aunque aumenta de NW a SE desde los 500 – 1.000 msnm, hasta 1.900 – 2.300 msnm. Al norte de los 19°30'S donde la Cordillera de la Costa presenta menor elevación y ancho, la pampa es incidida por profundos valles fluviales de orientación EW (ver sección Sistema de drenajes principales).

**Precordillera (PR):** Franja de 50 a 80 Km de ancho, con alturas entre los 1.900 a 3.700 msnm que se desarrolla al oriente de la Depresión intermedia y corresponde a la zona de transición hacia la Cordillera Occidental. La pendiente de la topografía aumenta hacia el E y por consiguiente se produce el aumento de la incisión fluvial que da origen a numerosas y profundas quebradas que disectan la Precordillera de E a W. Al sur de los 20°S, esta unidad da lugar a un cordón longitudinal denominado Cordillera de Domeyko. Posee numerosos centros volcánicos y cuencas cerradas del tipo salares andinos.

**Cordillera Occidental (CO):** Tiene una amplitud de entre 50 y 100 Km y su altura aumenta desde los 3.000 msnm en el W hasta los 4.800 msnm en el E, destacándose la imponente altura de sus volcanes que alcanzan los 6.300 m. Se constituye por edificios volcánicos de edad miocena-holocena junto con secuencias sedimentarias y volcánicas deformadas de edad miocena-pliocena (García *et al.*, 2011). Esta unidad aparece en la punta NE del área de estudio.

### **1.3.6. Climatología**

La Región de Tarapacá se encuentra en una zona tropical, pero presenta un clima atípico para la latitud, con ausencia casi total de precipitaciones en gran parte de su territorio, excepto las que se registran en la zona alta (Precordillera, Cordillera occidental), preferentemente en época estival (Figura 1-3). Se presentan cuatro subtipos climáticos desérticos que desde el poniente al oriente, son los siguientes:

**Clima desértico costero con Alta nubosidad (BWn):** este subtipo climático se localiza en toda la costa de la región. Se caracteriza por presentar abundantes nieblas matinales, fenómeno denominado "camanchaca", producto de la corriente fría de Humboldt; este subtipo climático se presenta al sur de Iquique con escasa variación térmica, una humedad relativa media anual de 74% y una temperatura media anual de 18,1° C. Las máximas precipitaciones anuales registradas en la costa han sido de 2,6 mm, siendo lo normal menor a 0,1 mm, mientras que la tasa de evapotranspiración media anual es de 2.083 mm.

**Clima desértico Normal (BW):** se localiza en la pampa (depresión intermedia), sobre los 1.000 metros de altura y sin influencia oceánica costera. Este subtipo se caracteriza por ser de extrema aridez, gran amplitud térmica (35°C) con temperaturas medias que alcanzan a 18° C y donde las precipitaciones anuales varían entre 0 y 20 mm, siendo lo normal la ausencia de precipitaciones. Característicos de este clima son los días con cielos despejados y mucha luminosidad, con una humedad relativa en promedio de 50% y en comparación, es más seco que el clima desértico costero. La tasa de evapotranspiración media anual es de 2.493 mm.

Al interior de la región, ya en la precordillera, se presenta **el clima desértico marginal de altura (BWH)**. Este subtipo se ubica por sobre los 2.000 metros de altura, debido a



ello las temperaturas son más atenuadas presentando una media anual de 10°C. Se caracteriza por masas de aire inestables que por efecto de la altura producen nubosidad de desarrollo vertical, que da origen a precipitaciones que fluctúan entre 50 y 100 mm anuales, presentándose casi en su totalidad durante los meses de verano.

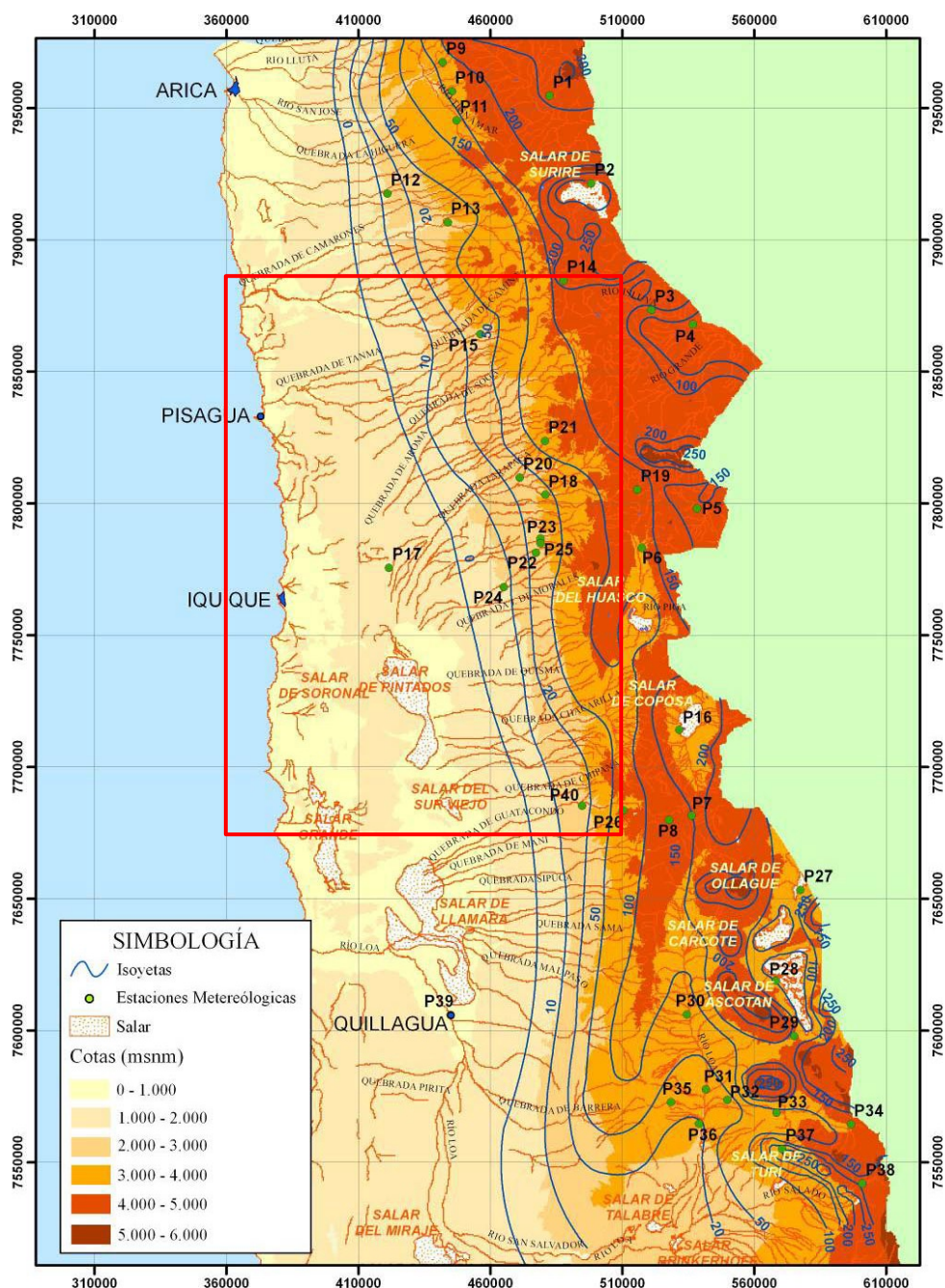


Figura 1-3: Mapa de isoyetas regionales (precipitación media anual en mm). Recuadro rojo marca la zona contemplada en este estudio. Modificado de declaración de impacto ambiental (DIA) de Operación Nueva Victoria de SQM. Autor: PRAMAR Ambiental Consultores. ([www.e-seia.cl](http://www.e-seia.cl)).

**Clima de estepa de altura (ETH):** este subtipo predomina por sobre los 3.500 msnm. Las temperaturas medias no sobrepasan los 5°C, produciéndose gran amplitud térmica entre el día y la noche. Las precipitaciones de tipo convectiva aumentan a una media anual de entre 200 y 300 mm, pero simultáneamente las temperaturas descienden (altiplano). Un fenómeno climático importante en esta región es el llamado “invierno boliviano”, el que corresponde a intensas precipitaciones estivales que afectan la zona intertropical (INE, 2007)

Cabe destacar que estas condiciones climáticas durante el Cenozoico tardío, han permitido la preservación del relieve oligoceno-mioceno en la Cordillera de la Costa del extremo norte de Chile. En efecto, se ha calculado una prolongada ausencia de precipitaciones en la CC, por un período de al menos 25 Ma (Dunai *et al.*, 2005). Esto ha manteniendo una tasa de denudación en la CC del orden de 10 a 100 cm Ma<sup>-1</sup>, en contraste con los, al menos, 4.600 cm Ma<sup>-1</sup> en la Cordillera Occidental (Kober *et al.*, 2007).

### **1.3.7. Asentamientos humanos**

El XVII Censo Nacional (2002), registró un total de 238.950 habitantes en la I región de Tarapacá, representando el 1,58% de la población con una densidad regional de 5,66 habitantes/km<sup>2</sup>. La principal característica de esta región es disponer de grandes espacios despoblados. El poblamiento de esta región se ve orientado por accidentes de tipo físico-geográfico, en donde se pueden distinguir perfectamente tres formas básicas de asentamiento: poblamiento costero, poblamiento en Pampa del Tamarugal y poblamientos precordilleranos-altiplánicos.

Dentro de los poblamientos costeros el centro urbano de mayor importancia de la región es la ciudad de Iquique, la cual concentra el mayor porcentaje de población regional, por sobre el 90%. En la Pampa del Tamarugal hay un poblamiento escaso y disperso, asociado generalmente a redes camineras, ríos, quebradas y oasis que disectan la meseta de Tarapacá y la Pampa del Tamarugal. Algunos centros poblados urbanizados que destacan son Pozo Almonte, Pica, Huara y Tarapacá. Mientras que en los sectores

precordilleranos existe una mínima cantidad de poblados, muchos de ellos abandonados por habitantes que han preferido migrar a las urbes.

El 95% de la población se encuentra principalmente en ciudades versus el 5% en sectores rurales, que en su mayoría desarrolla actividades agropecuarias. (INE, 2007)

### **1.3.8. Actividades económicas**

La economía de la región se basa principalmente en la extracción de recursos naturales, especialmente mineros.

A fines del siglo XIX, la principal riqueza de esta región era el salitre, siendo a la vez el principal producto exportador de la nación. Actualmente, la extracción de cobre es la que lidera este sector tras la puesta en marcha de los proyectos mineros Doña Inés de Collahuasi, Quebrada Blanca (Fuera área estudio) y Cerro Colorado.

También destacan la extracción de otro tipo de minerales no metálicos, como la halita en el yacimiento de Punta de Lobos (el más importante de Chile), arcilla común, bentonita, boratos, diatomita, guano, toba y yodo (Gajardo, 2000).

La agricultura y ganadería son casi nulas, debido a la aridez de las tierras. Sin embargo, existen ciertos cultivos en las zonas de quebradas, además de la ganadería de auquénidos.

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

### 2.1. Terreno

La recolección de muestras se llevó a cabo entre los años 2010 - 2012 por los profesionales de la Unidad de Geoquímica del Servicio Nacional de Geología en un gran número de campañas con una duración media de dos semanas por terreno. Estas muestras fueron extraídas en el marco del desarrollo de la cartografía geoquímica de las hojas de Iquique (Lacassie *et al.*, 2012b) y Pisagua (en edición) de escala 1:250.000 cada una. En este estudio se consideraron 1.311 muestras recolectadas: 560 de la hoja de Iquique y 751 de la hoja de Pisagua. Las muestras corresponden a sedimentos extraídos desde diversos ambientes y han sido clasificados según la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Tipos de sedimentos recolectados y número total de muestras consideradas en este estudio.

Tipo de sedimento	Cantidad de muestras
compósito de sedimento fluvial activo	182
compósito de sedimento fluvial reciente	374
compósito de sedimento de drenaje (inactivo)	483
compósito de pampa o llanura	272

Según se describe en el texto de la hoja de Iquique (Lacassie *et al.*, 2012b), las muestras fueron recolectadas considerando una malla regular de muestreo con distancias equi-espaciadas de 4 km entre ellas y una representatividad homogénea de cada muestra de aproximadamente 20 km<sup>2</sup>. Esta malla fue considerada semiflexible, de tal forma de maximizar la representación de la muestra, mediante el muestreo del drenaje con mayor área drenada, a una distancia discreta al punto exacto que la malla asignó. Las observaciones para realizar la relocalización de cada muestreo fueron hechas en terreno, según las condiciones geográficas que se encontraron en cada caso y según el criterio del profesional a cargo del grupo de trabajo.

Existen algunas áreas dentro de la zona del estudio a las que no fue posible acceder, básicamente por inaccesibilidad geográfica, por no contar con la venia de comunidades, dueños o concesionarios locales y por ser zonas constituyente de depósitos salinos (salares). Por otra parte, la zona que se encuentra próxima a Pisagua, hasta 25 km

hacia el sur presenta una malla de muestreo más densa, con una representatividad de aproximadamente 5 km<sup>2</sup> por cada muestra, realizada con posterioridad, debido a que de forma preliminar presento interés económico.

En cada punto de muestreo fueron registradas las coordenadas geográficas para luego realizar una descripción breve de las características del lugar.

Las muestras fueron recolectadas usando como herramienta básica una pala de PVC y una bolsa resistente de polietileno. En un comienzo fue necesario siempre ambientar la pala recolectando incrementos que luego fueron desechados. Luego, cada muestra fue generada a partir de la suma de incrementos que se recolectaron en un tramo de alrededor de 30 a 50 m con una profundidad máxima aproximada de 10 cm a lo largo del drenaje, logrando un peso total por muestra de 2 a 4 Kg. En lugares donde fue propicio, las muestras fueron extraídas desde ambas riberas del cauce principal. En cada incremento se consideró evitar el factor eólico de los sedimentos, al igual que las costras salinas que tanto abundan en la depresión central y en la cordillera de la costa. En ciertos casos se removió manualmente la superficie unos centímetros para evitar los factores antes mencionados.

Las muestras fueron etiquetadas y registradas *in situ* de su extracción utilizando un código característico único, intuitivo y fácilmente identificables visualmente.

## **2.2. Laboratorio**

El trabajo de laboratorio consta básicamente de dos etapas consecutivas, tal y como se describe en el texto de la hoja de Iquique (Lacassie *et al.*, 2012), que corresponden a: 1.- Preparación de muestras, 2.- Análisis geoquímico.

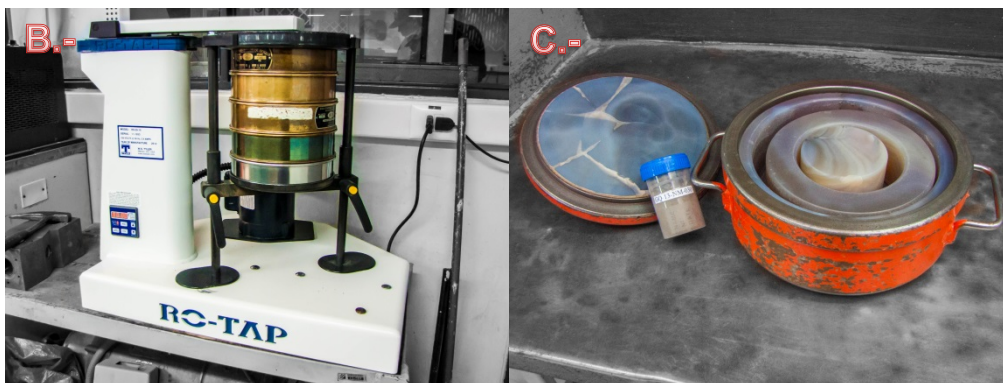
### **2.2.1. Preparación de muestras**

La preparación de muestras se llevó a cabo en las dependencias del laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), en el marco del desarrollo del proyecto de cartografía geoquímica perteneciente al plan nacional de geología, desarrollado por SERNAGEOMIN.

Las muestras extraídas en terreno en primera instancia, solo de ser necesario, son secadas a 30°C por alrededor de dos semanas, de lo contrario pasan directamente a

una segunda etapa, que consta de un cuarteo, en donde se separa la muestra en dos partes; una de las cuales continuará siendo preparada y la otra se reserva como respaldo. La parte seleccionada se somete a tamizaje en donde solo se recupera la fracción fina menor a 180  $\mu\text{m}$  y el resto es desechado. La mitad de la fracción fina obtenida también es cuarteada y conservada. Posteriormente, se toma una masa aproximada de 50 g (dependiendo de su volumen) y se somete a pulverización por 5 minutos en un mortero de ágata. El polvo obtenido en pulverización se reserva en un envase de plástico que luego es enviado a laboratorio de análisis geoquímico (Figura 2-1).

Es sumamente importante mantener una perfecta limpieza en cada fase de preparación de muestras para aminorar lo máximo posible la contaminación, así como también realizar una exhaustiva limpieza posterior al término de la preparación de una muestra, para que la siguiente muestra a preparar no sufra de contaminación cruzada.



**Figura 2-1: Proceso de preparación de muestras. A.- Cuarteado de muestras: la cubeta con la etiqueta se vacía para ser separada en 2 submuestras, una de ellas es guardada como respaldo. B.- Tamizado: la muestra se separa por tamaño granulométrico, buscando obtener la fracción  $<180 \mu\text{m}$ . C.- Pulverizado: La fracción fina se pulveriza en mortero de ágata y el material obtenido se vierte en el envase plástico, finalizando la etapa de preparación de muestra. Capturas realizadas en Laboratorio de SERNAGEOMIN.**

## **2.2.2. Análisis geoquímico**

El laboratorio encargado de realizar los análisis geoquímicos de las muestras preparadas fue AcmeLabs en Canadá, que posee gran prestigio y certificación internacional.

La determinación de concentración de óxidos principales se llevó a cabo mediante espectrometría de emisión ICP-ES, tomando 0,2 g que se someten a fusión con borato de litio y digestión por ácido nítrico.

La determinación de concentraciones de elementos traza se realizó mediante espectrometría de masa ICP-MS. En esta etapa se realiza la preparación de dos tipos de muestras: 1.- análisis de tierras raras y algunos elementos traza, que tiene la misma preparación que aquellos para ICP-ES; 2.- Análisis de metales preciosos y metales base, en donde se toman muestras de 0,5 g que son digeridos por Agua Regia (AcmeLabs, 2013).

## **2.3. Procesamiento de datos**

El set de datos de los análisis realizados por AcmeLabs a la fracción fina <180  $\mu\text{m}$ , incluye resultados para 59 elementos: 10 óxidos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{MnO}$ ), 47 elementos traza ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  en wt%, Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Hg, Tl, Se en ppm y Au en ppb), además de los valores en wt% de carbono total ( $C_{\text{total}}$ ) y azufre total ( $S_{\text{total}}$ ).

Con el propósito de simplificar la cantidad de información resultante de los análisis geoquímicos y considerando el trabajo estadístico posterior, se determinó agrupar las tierras raras livianas y tierras raras pesadas realizando la suma de los resultados obtenidos. Así entonces de aquí en adelante el grupo conformado por los elementos La, Ce, Pr, Nd y Sm será llamado tierras raras livianas (LREE) y el grupo conformado por Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Y y Lu será llamado tierras raras pesadas (HREE).

### **2.3.1. Control de calidad de datos**

Para llevar a cabo el control de calidad de datos, se utilizaron los resultados de 69 pares de duplicados obtenidos directamente en terreno por profesionales de la unidad



de geoquímica de SERNAGEOMIN y cuyas muestras fueron preparadas en laboratorios del mismo y analizadas por AcmeLabs. Los duplicados de terreno corresponden a muestras pareadas extraídas en el mismo lugar, consecutivamente y bajo las mismas condiciones para minimizar el error o sesgo en el muestreo. Estas muestras posteriormente son objeto de estudio a fin de encontrar los valores asociados al error de análisis total. Los duplicados de terreno fueron incluidos de forma aleatoria dentro del set total de muestras, de tal forma que fueran indistinguibles para los operadores del laboratorio.

Los análisis estadísticos típicos para duplicados que se realizaron independientemente para cada elemento en este trabajo son: estadísticas básicas (mínimo, máximo, media, varianza), grafico de dispersión, Q-q plot, Test t-Student, y gráficos de diferencia relativa.

A cada pareja de muestras, llámese original (A) y duplicado (B), se le calculo diferencia, promedio y varianza relativa para cada elemento.

$$Diferencia = A - B$$

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

Con estos valores fue posible calcular el error relativo medio (%) y realizar el test t-Student que principalmente busca determinar si existe algún grado de sesgo entre las muestras duplicadas. Así este último test establece que para determinar si las muestras carecen de sesgo entre ellas, el valor resultante debe estar dentro del intervalo [-1,96; 1,96]<sup>1</sup>. Estos resultados se presentan para cada elemento en un cuadro resumen tipo (Tabla 2-2).

$$t = (Diferencia promedio) \cdot \sqrt{\frac{n^{\circ} de pares de duplicados}{Varianza de la Diferencia}}$$

---

<sup>1</sup> Magri Consultores Ltda. Curso “Muestreo y control de calidad para exploración y minería” [diapositivas]. Enero, 2012.

$$\text{Error relativo Medio [\%]} = 100 \cdot \sqrt{\text{Varianza Relativa promedio}}$$

Tabla 2-2: Ejemplo de cuadro resumen de estadísticas básicas de duplicados para Arsénico. Se muestra además los valores de Error Relativo Medio (%) y Test t-Student.

	RESUMEN DE DATOS PARA ARSÉNICO (As)			
	ORIGINAL	DUPLICADO	DIFERENCIA	VARIANZA RELATIVA
Nº PARES	69	69	69	69
MÍNIMO	6,6	6,1	-174,5	0
MAXIMO	174,3	265,1	31,3	0,48
PROMEDIO	36,19	36,78	-0,58	0,01
DESVIACIÓN ESTANDAR	32,13	39,32	22,16	-
t-STUDENT			<b>-0,22</b>	
ERR. RELATIV. MEDIO (%)				<b>11,6</b>

Los gráficos de dispersión o *scatter plot*, permiten evaluar que tan precisa es la fase del muestreo y que tan repetible son los resultados obtenidos por cada muestra. En el eje de las abscisas (X), se despliegan las concentraciones de cada muestra original, mientras que en el eje de las ordenadas (Y), seorean con la respectiva concentración de su duplicado. Luego se realiza una regresión lineal para calcular la ecuación que muestra la tendencia de las muestras, que, mientras más cercana se encuentre de la ecuación  $Y=X$ , mayor repetitividad presenta el muestreo.

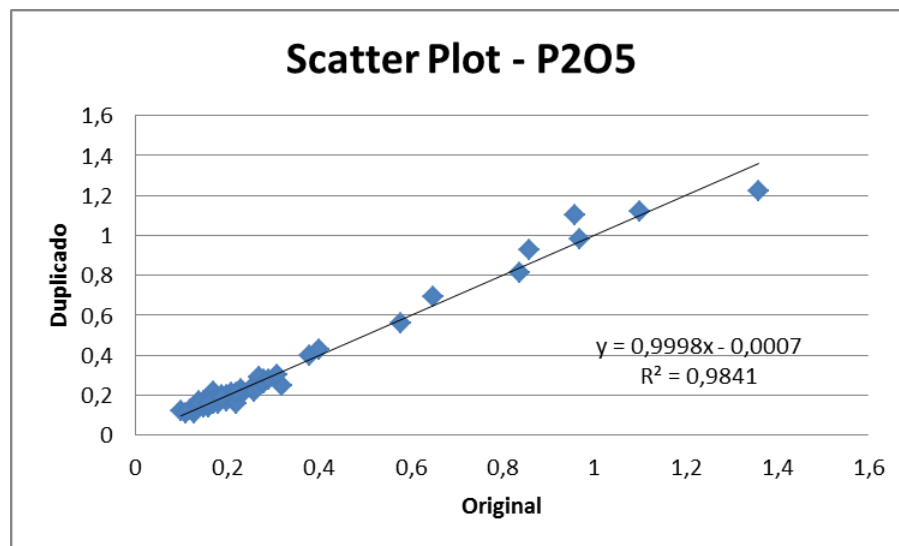


Figura 2-2: Ejemplo de gráfico de dispersión de duplicados para P205 [%].

El gráfico de cuantiles o *Q-q plot*, permite observar las diferencias en las distribuciones de las muestras originales versus duplicadas. Un error en la toma de muestra de duplicados se expresaría en una diferencia en las distribuciones de concentración y, por consiguiente, un alejamiento de la recta  $Y=X$ . Una traslación desde la recta  $Y=X$  muestra diferencia de promedios, mientras que un cambio en la pendiente muestra diferencia de varianza entre ambas distribuciones.

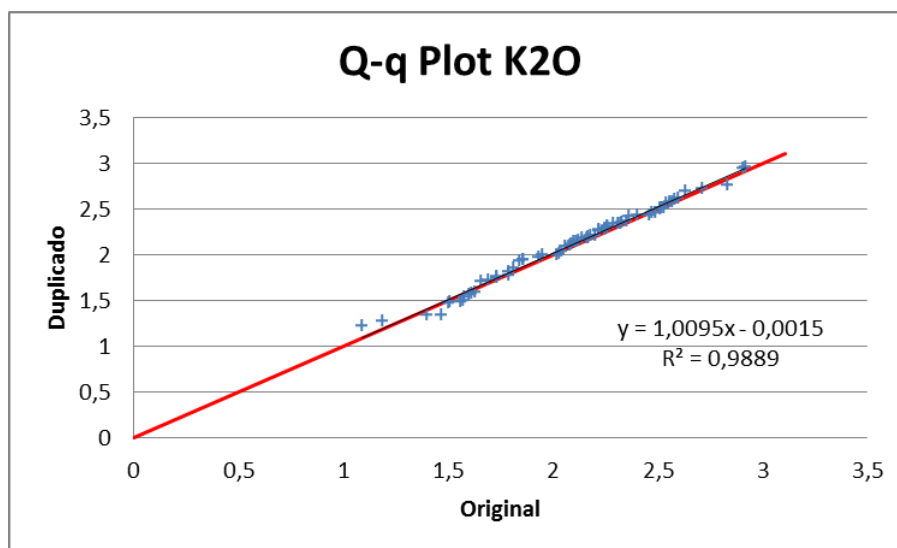


Figura 2-3: Ejemplo de gráfico de cuantiles para potasio  $K_2O$  [%]. La línea roja corresponde a la ecuación  $Y=X$ .

Adicionalmente, se desarrollaron gráficos de diferencia relativa absoluta versus porcentaje de datos acumulados, con el objetivo de identificar qué porcentaje de muestras presenta valores mayores a un 20%. La diferencia relativa absoluta se calcula como:

$$Diferencia\ Relativa\ [\%] = 200 \cdot \left( \frac{A - B}{A + B} \right)$$

$$Diferencia\ Relativa\ absoluta\ [\%] = 200 \cdot \left| \frac{A - B}{A + B} \right|$$

Finalmente, los gráficos de diferencia relativa versus promedio entre par de duplicados mostrarán si existe algún posible sesgo analítico en algún rango específico de leyes para determinado elemento.

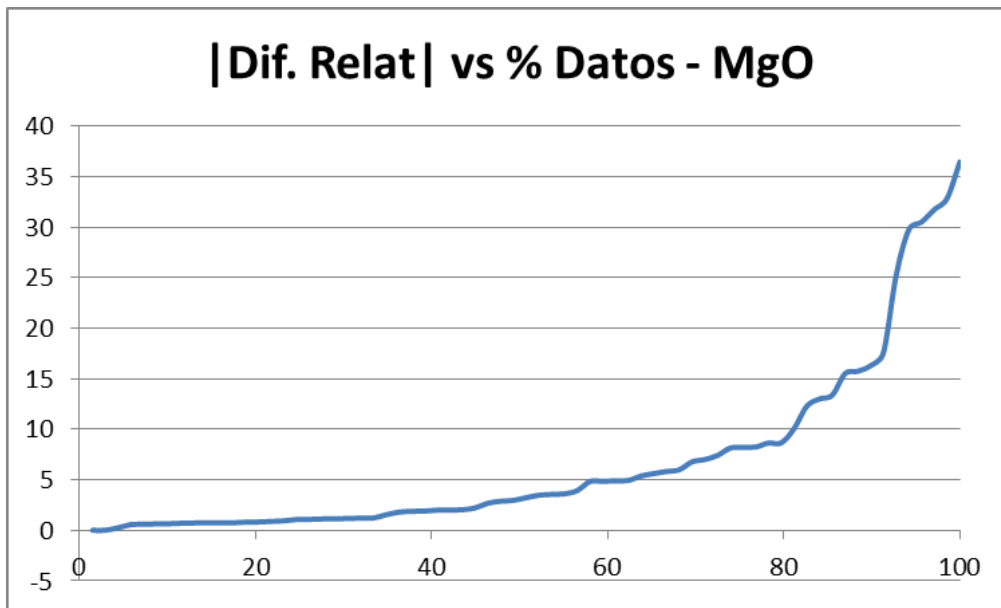


Figura 2-4: Ejemplo de gráfico Diferencia relativa absoluta (eje Y) vs % Datos Acumulados (eje X) para Magnesio (%). Nótese que es posible extraer que menos del 10% de los datos trabaja con una diferencia relativa mayor al 20%.

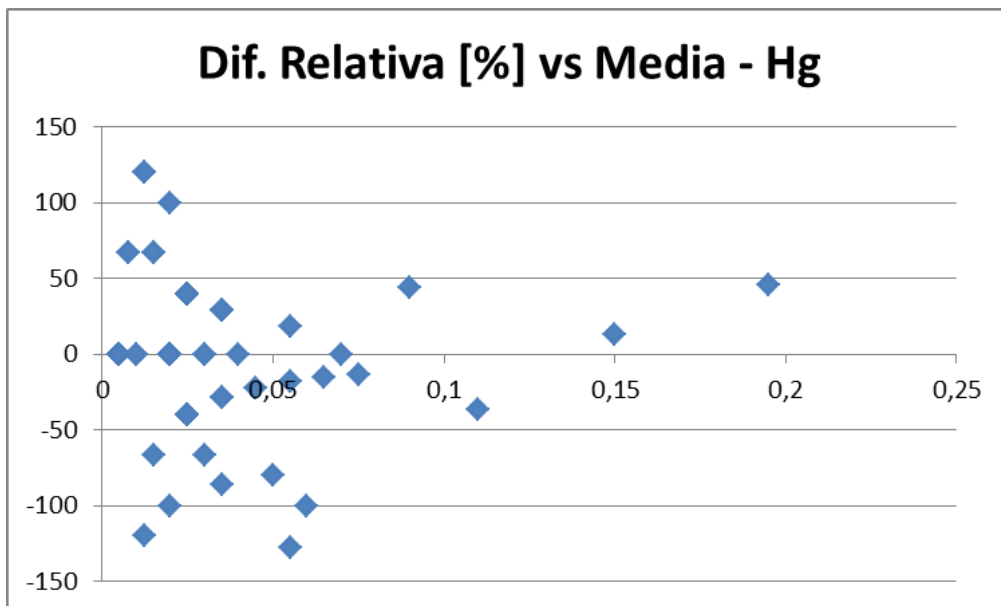


Figura 2-5: Ejemplo de gráfico Diferencia relativa vs promedio entre originales y duplicados para mercurio. Nótese que las diferencias relativas son mayores cuando más se acercan los valores al límite inferior de detección de equipo, que en este caso es 0,01 ppm para Hg.

### 2.3.2. Análisis univariable

Con el fin realizar un análisis univariable para cada elemento con el total de set de muestras de sedimentos, se generaron grupos de muestras que fueron clasificados según dos algoritmos estadísticos: 1.- *Natural Breaks (Jenks)*, 2.- *Head/Tail Breaks*. El primer método busca minimizar la varianza que existe entre muestras que son asignadas a una misma clase, y a la vez maximizar la varianza entre clases (Smith, 2009). El segundo método realiza una clasificación que está dirigido para aquellas muestras que presentan una distribución *heavy-tailed* y que permite realzar visualmente los valores *outliers* (Jiang, 2012). Este análisis permitió agrupar muestras y posteriormente, con la ayuda del software ArcGIS versión 10.1, poder visualizar en mapas univariables la distribución de los resultados de esta clasificación. Se utilizó para la visualización una simbología circular para cada muestra, en donde el tamaño guarda directa relación con la concentración de los elementos mostrados.

Con ambos métodos y su correcta implementación, es posible resaltar las clases que agrupan a los valores con mayores anomalías positivas de cada elemento y visualizar su distribución en planta.

Los mapas univariables también serán el sustrato de los análisis e interpretaciones que se realizarán de la toxicidad asociada a cada muestra de sedimentos. Esto se llevará a cabo por medio del contraste de las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni) y zinc (Zn) de cada muestra con el parámetro propuesto por MacDonald *et al.* (2000), denominado PEC (*Probable Effect Concentration*). Este establece, para los elementos explicitados, valores umbrales de concentración (Tabla 2-3) que de ser sobrepasados, probablemente podrían generar efectos adversos para los ecosistemas y organismos vivientes que conviven con los sedimentos, ya sean plantas, bacterias u organismos superiores.

Tabla 2-3: Umbrales de toxicidad para metales pesados (MacDonald, 2000).

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
Umbral de toxicidad PEC (ppm)	33	4,98	111	149	128	1,06	48,6	459

### 2.3.3. Redes neuronales artificiales

Dado el gran volumen de información disponible para este estudio, se han utilizado redes neuronales artificiales (RNA), específicamente las del tipo *Growing Cell Structures* (GCS; Fritzke, 1994).

Las RNA se han utilizado satisfactoriamente en el área de la geoquímica; para analizar la proveniencia sedimentaria de unidades litológicas (Lacassie, 2004) y para visualizar diferencias geoquímicas entre tipos de rocas volcánicas (Lacassie *et al.*, 2006).

Las redes neuronales del tipo GCS son redes de procesadores individuales que tienen la posibilidad de almacenar una pequeña cantidad de memoria local y que son del tipo “no supervisadas”, por tanto se trabaja sólo con la información que provee el conjunto de datos a analizar y se elimina el sesgo asociado a las apreciaciones del investigador. Con este método estadístico avanzado, se genera una síntesis de la información y se reducen las dimensiones de los datos de un espacio n-dimensional a un espacio, en este caso, bi-dimensional. El producto resultante de las GCS corresponde a un conjunto de nodos o *clusters*, cada uno interconectado al menos con otros dos nodos. Cada nodo representa un subconjunto de muestras que presentan comportamiento geoquímico similar de acuerdo a los datos que se analizan. En este trabajo se consideran 1.311 muestras de sedimentos de drenaje y 46 variables para cada una (Tabla 2-1 y sección 2.3 Procesamiento de datos).

Las GCS presentan una gran ventaja en comparación a otros tipos de análisis estadísticos multivariados (ejemplo: PCA), debido a que el algoritmo considera tanto relaciones lineales como no lineales entre las variables (Lacassie, 2003), y por tanto los resultados obtenidos poseen una mayor significancia estadística. La modelación y visualización de las redes generadas fue implementada en el *software* Matlab por medio de la *toolbox* “Growing Cell Structures Visualisation Toolbox (GCSVIS)” (Walker, 1999)<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Código base escrito y desarrollado por Andrew J. Walker, Dr. Robert F. Harrison, and Dr. Simon S. Cross. Departments of Automatic Control and Systems Engineering and Pathology at the University of Sheffield, UK, con código adicional escrito y desarrollado en código Matlab por J.P. Lacassie, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile (Lacassie, 2003).

### 3. MARCO GEOLÓGICO

#### 3.1. Unidades litoestratigráficas

##### 3.1.1. PALEOZOICO

###### **Estratos de Chulluncane** (Harambour, 1990) (PALEOZOICO)

Aflora en Qda. Chulluncane 3 km aguas arriba de Chiapa. Corresponden a areniscas cuarcíferas de grano muy fino de color gris a pardo-amarillento, con laminación paralela muy fina e intercalaciones de calizas recristalizadas.

###### **Fm. Quebrada Aroma** (Harambour, 1990)

(DEVÓNICO SUPERIOR –CARBONÍFERO INFERIOR)

Secuencia de 1.000 a 1.500 m de metasedimentos marinos compuestos por una alternancia rítmica de filitas gris-verdosas y areniscas cuarzo-feldespáticas micáceas con alteración pardo-rojiza.

###### **Estratos de Poroma** (Harambour, 1990)

(PALEOZOICO SUPERIOR)

Al este de pueblo Poroma afloran 190 m de areniscas cuarzo-feldespáticas alteradas rítmicamente con fangolitas micáceas.

###### **Fm. Quipisca** (Galli, 1968) (CARBONIFERO-PÉRMICO)

Definida para designar una secuencia de tobas silíceas, que aflora al oriente del Cerro Juan de Morales. La base de la formación no está expuesta y el techo corresponde a la Fm. Juan de Morales (Pérmico inferior), con la que entra en contacto por falla y por discordancia erosiva (Qda. Mamiña). Tiene un espesor mínimo de 700 m.

Los afloramientos de esta formación están constituidos por tobas riolíticas de color gris rojiza a gris pardo. Con plagioclasas (15-25%), alteradas parcialmente a arcillas, calcita y epidota. Aparecen apatita y zircón como minerales accesorios. Datación por U-Pb en zircón (SHRIMP) le confiere una edad de  $311,5 \pm 2,7$  Ma (Blanco *et al.*, 2012), que se interpreta como edad del depósito volcánico.

### **Fm. Juan de Morales** (Galli, 1968) (PÉRMICO INFERIOR ALTO)

Definida por Galli (1968) como una secuencia constituida por conglomerados y areniscas gris rojiza a rojiza, calizas gris castaña y lutitas grises, gris oliva y castaña, con un nivel fosilífero distintivo intercalado en la secuencia con, cuya sección tipo aflora 2,7 km al SE del cerro Juan de Morales, en la parte noroccidental de la Carta Mamiña. Con numerosas fallas intraestratales que despegan capas con litologías contrastantes (lutitas-areniscas; conglomerados-lutitas) y que, en parte, transponen ligeramente los estratos. Esta unidad se apoya en discordancia de erosión sobre la Fm. Quipisca y su techo corresponde a la Fm. Munujna, con la cual se encuentra en contacto por falla. La Fm. Juan de Morales tiene un espesor aproximado de 142 m. Su posición estratigráfica le confiere edad máxima es carbonífera superior, pero sobre la base de asociaciones de foraminíferos analizados, se le confieren una edad pérmica inferior alta (Artinskiano – Kunguriano) (Díaz-Martínez *et al.*, 2000. Extraído de Blanco *et al.*, 2012)

### **Fm. Munujna** (Blanco *et al.*, 2012) (PÉRMICO)

Esta formación fue definida por Galli (1968) bajo la denominación de Fm. Diablo, como una secuencia constituida por conglomerados, areniscas (arcosa y grauvaca) y lutitas, de origen continental, con intercalaciones marinas en su base, expuestas al SE del cerro Juan de Morales, en la parte noroccidental de la carta Mamiña. Su techo, se encuentra en contacto por falla normal, con reactivación inversa, bajo rocas volcánicas de la Fm. Cerro Empexa, de edad cretácica superior. Además, se encuentra intruida por cuerpos hipabisales andesíticos del Cretácico Superior (Ksh(a)). Su espesor alcanza aproximadamente 250 m en la sección tipo (Galli, 1968).

Su litología se compone de areniscas líticas (riolitas) de grano grueso, gris rojizas, con intercalaciones de conglomerados y lutitas rojizas, conglomerados macizos con clastos bien redondeados de tobas riolíticas, alternando con paquetes de areniscas gruesas con estratificación cruzada en artesa. Le sigue una sucesión de lutitas fisibles rojo grisáceas, con intercalaciones de areniscas líticas (riolitas) de grano fino a grueso, intercalaciones de conglomerados gruesos pardos, compuestos por clastos redondeados a subangulares, principalmente de tobas riolíticas de hasta 20 cm de diámetro. La parte superior de esta sección se compone de areniscas pardas.



## **Granitoides del Carbonífero superior**

(CARBONÍFERO SUPERIOR ALTO)

En el sector sureste de la Carta Oficina Victoria se identificaron granitos de edad Carbonífero Superior que afloran en una superficie aproximada de 13 km<sup>2</sup>. Se caracterizan por su litología principalmente de roca ígnea intrusiva granítica de grano grueso y de color gris claro a rosáceo. Presenta biotita como único mineral máfico. Están intruidos por diques dioríticos del Cretácico Superior y cubiertos por depósitos mio-pliocenos de las Gravas de Alto Hospicio por el oeste y las gravas de la Depresión Central por el este. U-Pb en circón le asigna una edad de 301,9 ± 4,6 Ma (Blanco *et al.*, 2012).

### **3.1.2. JURASICO - CRETÁCICO INFERIOR**

#### **UNIDADES ESTRATIFICADAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA**

**Fm. Oficina Viz** (Thomas, 1970) (SINEMURIANO? – BAJOCIANO)

Secuencia masiva y monótona de basaltos porfídicos a capas de lavas andesitas basálticas, con amígdalas características de sílice, epidota, calcita y a veces óxidos de cobre. Es intruida por cuerpos monzoníticos y monzodioríticos que generan halo de metamorfismo de contacto. Su espesor mínimo es de 1.000 a 1.500 m. Sus afloramientos se encuentran ampliamente distribuidos en la Cordillera de la Costa, se concentran principalmente en el sector sur de las cartas Pozo Almonte e Iquique, así como aleatoriamente en la Carta Patillos y Carta Oficina Victoria. Esta formación subyace concordantemente a rocas sedimentarias marinas de la Fm. Caleta Lígate (Jmcl), en tanto que al este de la Cordillera de la Costa es cubierta en discordancia angular por la Fm. Punta Barranco (Kipb). Dataciones <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en plagioclasa entregan edades entre 176 y 170 Ma (Oliveros *et al.*, 2006).

**Grupo Huantajaya** (Blanco *et al.*, 2012) (BAJOCIANO - TITONIANO)

Incluye a Fm. Caleta Ligate (Bajociano), Fm. El Godo (Bajociano-Oxfordiano), Fm. Santa Rosa (Oxfordiano superior) y Fm. Estación Montevideo (Oxfordiano superior?-Titoniano). Este grupo se apoya concordantemente sobre las volcanitas de la Fm. Viz

(Sinemuriano-Bajociano) y subyace en discordancia de erosión a Fm. Punta Barranco (Cretácico Inferior).

**Fm. Caleta Lígate** (Cecioni y García, 1960; Thomas, 1970) (BAJOCIANO)

Secuencia marina compuesta de rocas sedimentarias marinas de buena estratificación; lutitas negras, limonitas, areniscas verdes amarillentas, con lentes conglomerádicos y abundante fauna fósil. Se identifican además areniscas fosilíferas con intercalaciones de rocas piroclásticas, como tobas y brechas volcánicas. Se deposita concordantemente sobre una secuencia andesítica basáltica de la Fm. Oficina Viz y subyace concordantemente a la Fm. El Godo. Su potencia es de 1.200 m que disminuye gradualmente hacia el este (Kossler, 1998). Edad U-Pb en zircón le asigna una edad de  $170,8 \pm 2,5$  Ma (Blanco *et al.*, 2012).

**Fm. Cuya** (Cecioni y García, 1960) (BAJOCIANO SUPERIOR- CALOVIANO)

Corresponde a una secuencia de brechas andesíticas con intercalaciones de andesitas porfíricas, con menores niveles de lutitas, conglomerados, areniscas y calizas. Aflora en las inmediaciones de Cuya. Tiene 1.300 m de potencia según Cecioni y García (1960) y de más de 2.000 m según Muzzio (1986).

**Fm. El Godo** (Kossler, 1998) (BAJOCIANO - OXFORDIANO)

Definida como sedimentos marinos que consisten en dos facies: lutitas y limolitas calcáreas oscuras (a), y brechas y lavas basálticas con intercalaciones de lutitas, limolitas y areniscas finas (b). Por otro lado, esta unidad se encuentra intruida por diques y filones de Jurásico Superior, y por el Complejo Intrusivo Huara, con edades radiométricas de 138 y 140 Ma. Esta formación presenta un contacto transicional hacia la Fm. Santa Rosa y está cubierta en relación de paraconcordancia, y localmente de discordancia angular, por la Fm. Punta Barranco (Kipb). Se obtuvo una edad U-Pb en zircón de  $165,1 \pm 2,7$  Ma (Kossler, 1998).

**Fm. Chiza** (Cecioni y García, 1960) (CALOVIANO – OXFORDIANO)

Secuencia de sedimentitas marinas. Aproximadamente 1.000 m de calizas oolíticas, lutitas calcáreas y areniscas calcáreas. Se encontraría sobreyaciendo Fm Cuya.

**Fm. Santa Rosa** (Blanco *et al.*, 2012) (OXFORDIANO SUPERIOR)

Compuesta por calizas masivas de color gris claro a celeste con intercalaciones mínimas de areniscas finas pardo-rosas. La Fm. Santa Rosa cubre a la Fm. El Godo en contacto transicional, y está a la vez cubierta concordantemente por la Fm. Estación Montevideo. Al igual que el resto de las formaciones sedimentarias jurásicas, esta se encuentra cubierta en paraconcordancia o discordancia angular por rocas del Cretácico Inferior de la Fm. Punta Barranco. Presenta metamorfismo de contacto generado por intrusión del Complejo Intrusivo Punta Negra en el norte, y los cuerpos intrusivos dioríticos asociados a este complejo.

**Fm. Estación Montevideo** (Blanco *et al.*, 2012)  
(OXFORDIANO SUPERIOR? – TITONIANO)

Se denomina así a una sucesión sedimentaria marina, clástica y carbonatada expuesta en dos áreas de la carta Pozo Almonte, cuyos afloramientos cubren un total de 7 km<sup>2</sup> de superficie. Los afloramientos localmente se encuentran afectados por un intenso fallamiento. Esta formación alcanza un espesor mínimo aproximado de 370 m, y se dispone concordantemente sobre las calizas de la Fm. Santa Rosa, y subyace en discordancia angular y de erosión a la Fm. Punta Barranco.

**Fm. Atajaña** (Cecioni y García, 1960) (KIMMERIDGIANO – BERRIASIANO)

Constituida principalmente por conglomerados de andesitas, limolitas y brechas con intercalaciones de riodacitas y tobas hacia la parte superior. Su espesor mínimo es de 1.400 m. En Qda. Chiza descanza sobre Fm. Chiza.

**Fm. Blanco** (Cecioni y García, 1960) (BERRIASIANO – BARREMIANO)

Se compone principalmente por calizas, areniscas calcáreas y en menor proporción se han reconocido limolitas y conglomeraos. Tiene una potencia mínima de 400 m. Su distribución areal es pequeña, con tan solo 8 Km<sup>2</sup>.

### **Fm. Punta Barranco** (Cecioni y García, 1960)

(BERRIASIANO? - ALBIANO)

Secuencia continental volcano-sedimentaria; facies volcánica constituidas por andesitas, brechas volcánicas y depósitos de flujo de detritos volcánicos, con menor intercalación de areniscas rojas y escasas tobas. Facies sedimentarias constituidas por brechas, conglomerados, areniscas y limonitas de color rojizo de origen continental se encuentra localmente intruida por cuerpos hipabisales de Pórfidos del Cretácico Inferior bajo (Kibp), los que presentan una edad aproximada de 140 Ma, limitando la edad. U-pb en circón arroja edades entre 100 Ma y 129 Ma.

## **GRANITOIDES DE LA CORDILLERA DE LA COSTA**

### **Monzonita Cerro Vetarrón** (Blanco *et al.*, 2012) (182-175 Ma)

Intrusivos de composición monzodiorítica equigranulares a monzonítica porfídicas de dos piroxenos que afloran en el sector del Cerro Vetarrón y más al sur, en las cercanías del Cerro Tentación. Intruyen a la Fm. Oficina Viz al este de salar del Carmen generando metamorfismo de contacto en las volcanitas de esta formación. U-Pb en circón arrojó entre 182 y 175 Ma (Blanco *et al.*, 2012).

### **Plutón de Cuya** (Muzzio, 1986) (POST- CALOVIANO?)

Compuesto por Granodiorita de hornblenda y biotita a diorita y monzodiorita cuarcífera. Predomina granodiorita. Cubre un área de 21 Km<sup>2</sup> y aflora en ambos flancos de Qda Camarones en cuya.

### **Granito Casa grande y Alejo Occidental** (POST-CALOVIANO?)

Corresponden a granitos y monzodioritas cuarcíferas, presentando solo algunas diferencias menores.

### **Complejo Intrusivo Cerro Carrasco** (Blanco *et al.*, 2012) (160-151 Ma)

Conjunto de intrusivos monzoníticos a dioríticos que aflora en una franja con orientación aproximada norte-sur en el sector suroeste de la Carta Patillos, tanto en la costa como

sobre el acantilado costero. Está compuesto principalmente por monzonitas cuarcíferas de anfíbola y biotita, dioritas cuarcíferas de anfíbola y biotita con ocurrencias de gabros. Estos cuerpos están intruyendo a la Fm. Oficina Viz y a la Fm. Caleta Lígate, las que presentan metamorfismo de contacto. Intrusión magmática se produjo en varios episodios entre los 160 Ma y 151 Ma (Blanco *et al.*, 2012).

### **Complejo Intrusivo Punta Negra (151-145 Ma)**

El Complejo Intrusivo de Punta Negra (CIPN) corresponde a lo que Thomas (1970) definió como Batolito de Punta Negra, descrito como un “batolito de composición predominantemente granodiorítica, con rocas claras muy silíceas hacia el sur y una zona marginal de rocas oscuras dioríticas”. Se identificó también un pórfido tonalítico (Blanco, 2012).

### **Intrusivo Chuquichambe (Muzzio, 1986) (145 Ma)**

Se ubica en Qda. Camarones, 15 km al este de Cuya. No sobrepasa los 2 Km<sup>2</sup>. Posee variaciones con clara diferenciación entre fases de diorita cuarcífera, granodiorita hasta granito.

### **Complejo Intrusivo Oyarbide (150-144 Ma)**

Constituido por cuerpos de composición variable entre granodiorítica a diorítica. Principalmente compuesto por granodiorita con monzonita y diorita subordinada.

### **Filones Del Jurásico-Cretácico (153-143 Ma)**

Corresponden a filones y diques subordinados, daciandesíticos porfídicos, que intruyen a las formaciones jurásicas y están cubiertos por los depósitos Cenozoicos. Estos cuerpos hipabisales están asociados (espacial y temporalmente) a la actividad magmática de los complejos intrusivos Punta Negra y Oyarbide. Frecuentemente intruyen el contacto entre las formaciones Oficina Viz y Caleta Lígate, en el sector occidental de la Cordillera de la Costa.

### **Pórfidos Del Cretácico Inferior Bajo (141-140 Ma)**

Rocas hipabisales porfídicas con afloramientos principalmente distribuidos en la parte media de la Carta Oficina Victoria, y localmente en los alrededores de la mina Atahualpa. Esta unidad intruye a formaciones jurásicas y, en la Carta Oficina Victoria, esta intruyendo a rocas asignadas a la Fm. Punta Barranco

### **Complejo Intrusivo Huara (Blanco *et al.*, 2012) (140-136 Ma)**

Compuesto de cuerpos granodioríticos a dioríticos. Afloran en el margen oriental de la Cordillera de la Costa (Carta Iquique), en forma de un notorio macizo (Macizo de Huara) y cubriendo una superficie de aproximadamente 137 km<sup>2</sup>. Dentro de este complejo se incluyen además cuerpos satélites de granodioritas, dioritas y monzonitas de similar composición y edad. Los cuerpos de este complejo intruyen a calizas de la Fm. Caleta Lígate al oeste, y a calizas y anhidritas de la Fm. Estación Montevideo, al este del complejo. La roca caja en los bordes del intrusivo presenta recristalización, generando facies de skarn con granate, piroxeno, actinolita, epidota y wollastonita. Hacia el este del macizo se ha reconocido el techo de este complejo, que incluye fábricas de stopping magmático en el área de Cerro Piedras. Este cuerpo está siendo intruido a su vez por diques asociados a la facies hipabisales de la Fm. Punta Barranco (de 100-129 Ma (Blanco *et al.*, 2012)). Los contactos entre los diferentes cuerpos granodioríticos, monzoníticos y dioríticos que componen este complejo son difusos y transicionales.

### **Pórfidos Del Cretácico Inferior (Blanco *et al.*, 2012) (129-111 Ma)**

Cuerpos hipabisales porfídicos andesíticos a daciandesíticos que ocurren tanto en el sector oriental de la Cordillera de la Costa como en afloramientos relativamente pequeños diseminados en la Carta Iquique. Presentan una asociación espacial y temporal con la Fm. Punta Barranco, e intruyen a rocas jurásicas.

### **Granitoides Del Cretácico Inferior (Blanco *et al.*, 2012) (128-127 Ma)**

Cuerpos intrusivos de composiciones que varían entre monzonita, monzodiorita, diorita, diorita cuarcífera y tonalita. Los cuerpos de esta unidad intruyen a las formaciones Oficina Viz y Punta Barranco, aunque con esta última unidad tendrían también una relación genética. Los contactos entre los cuerpos de esta misma unidad son difusos.

### **Intrusivo Cerro del Toro** (Muzzio, 1986) (127 Ma)

Corresponde principalmente a monzodiorita cuarcífera, diorita cuarcífera y localmente a diorita de piroxeno. Cubre un área de 45 km<sup>2</sup>.

### **Granito Molle** (Blanco *et al.*, 2012) (115-113 Ma)

Marquardt *et al.* (2008) definen a este cuerpo como un “plutón granítico de grano fino, de color pardo claro rosado a amarillento, expuesto al sur de la ciudad de Alto Hospicio, en pampa Molle, y en reducidos afloramientos en el acantilado costero”. Este cuerpo también aflora en el sector centro-occidental de la Carta Iquique en el sector del Cerro Minas Viejas, y al oeste de Cerro Campamento en la Carta Pozo Almonte. Intruye a la Fm. Oficina Viz, a las formaciones del Grupo Huantajaya, y a la Fm. Punta Barranco, y a su vez está intruido por diques andesíticos de dirección E-W.

### **Complejo Intrusivo Montevideo** (Blanco *et al.*, 2012) (110-100 Ma)

Agrupar cuerpos de variadas composiciones, desde granitos a dioritas, y ocurre principalmente en vertiente oriental de la Cordillera de la Costa en las cartas Pozo Almonte y Oficina Victoria. Los cuerpos de este complejo intruyen a las unidades del Grupo Huantajaya, y podría tener una relación genética y temporal con las volcanitas más jóvenes de la Fm. Punta Barranco.

### **Pórfido Dacítico De Caleta Buena** (Silva, 1977)

(JURÁSICO SUPERIOR – CRETACICO INFERIOR?)

Stock de 2 Km de diámetro emplazado en la Fm. Caleta Ligarte posiblemente relacionado con el intrusivo de Pisagua. Presenta una textura porfídica con fenocristales de plagioclasas, 70% alterada a sericita y anfíbola 15%, la masa fundamental constituida por plagioclasas, cuarzo 25%, anfíbola, minerales opacos y titanita.

### **El complejo intrusivo de Pisagua** (Silva, 1977)

(JURÁSICO SUPERIOR – CRETACICO INFERIOR?)

Se distribuye en el sector noroccidental de la zona Pisagua (450 Km<sup>2</sup>) principalmente de composición granodiorítica y diorítica; textura hipidiomorfa granular constituida por fenocristales de plagioclasas maclados con estructura zonal, alterados a sericita 50%, cuarzo 25%, biotita 10% algo alterada a clorita, ortoclasa 5%, anfíbola 3%, como

accesorios 2% se reconoció zircones, minerales opacos y apatito. Localmente presenta variaciones en su composición al tipo monzonita (Sur de Junín).

## **UNIDADES ESTRATIFICADAS DE LA PRECORDILLERA**

### **Fm. Noasa** (Harambour, 1990) (JURÁSICO INFERIOR)

Secuencia sin base expuesta constituida por ortocuarcitas con subordinadas intercalaciones rítmicas de fangolitas silíceas, y lentes de calizas con estructuras oolíticas.

### **Fm. Longacho** (SINEMURIANO)

Sucesión marina fosilífera constituida por lutitas fisibles, fangolitas, areniscas finas, calizas y, localmente, mantos de tobas, expuestas en un anticlinal asimétrico a los largo de Sierra Longacho, al SW de Carta Mamiña (Galli y Dingaman, 1962).

### **Fm. Quebrada Coscaya** (Harambour, 1990) (SINEMURIANO – OXFORDIANO)

Serie de más de 1000 m de potencia de rocas sedimentarias volcanoclásticas intermedias a ácidas de colores grises, verdosos y violáceos.

### **Estratos De Guata Guata** (Blanco *et al.*, 2012) (JURÁSICO MEDIO)

Se denomina informalmente así a una secuencia de bien estratificada de areniscas finas a gruesas, de color rojo grisáceo y pardo rojizo, cuarzo-arenitas de grano medio, lutitas rojas y negras, y limolitas con fragmentos de cuarzo.

### **Fm. El tranque** (Harambour, 1990) (CALOVIANO)

Aflora en Qda. Tarapacá 2 km aguas debajo de Pachica. De potencia aproximada 100 m, constituida por tres tipos litológicos principales: areniscas cuarcíferas, fangolitas silíceas y calizas.

### **Fm. Duplijsa** (Galli, 1968) (CALOVIANO-OXFORDIANO)

Secuencia de calizas gris rojizas, fosilíferas, y escasas areniscas calcáreas pardas grisáceas. Aflora en un sector bastante restringido, ubicado en la vertiente occidental de la Quebrada Juan de Morales, hoja de Mamiña. Su base se encuentra intruida por



cuerpos hipabisales andesíticos del Cretácico Superior (Ksh(a)), que lo separan de los Estratos de Guata Guata con similar actitud estructural (techo hacia el SO). Su techo lo constituyen areniscas, conglomerados y tobas del Miembro Inferior de la Fm. Cerro Empexa (Ksce1), a través de un contacto depositacional (y angular) fallado.

**Fm. Chusmiza** (Harambour, 1990)

(JURÁSICO SUPERIOR – CRETÁCICO INFERIOR)

Agrupa una sección basal de 250 m de conglomerados, una sección media de cerca de 500 m de rocas clásticas gruesas dispuestas en una sucesión granodecreciente, y una sección superior de más de 250, de tobas grises-blancas.

**Fm. Infiernillo** (Harambour, 1990) (OXFORDIANO)

Aflora 500 m aguas arriba de confluencia de Qda. Tarapacá y Qda. Infiernillo. Consiste en más de 130 m de fangolitas calcáreas de color negro azulado con alteración pardo claro, dispuestas en bancos centimétricos, que hacia el techo gradan a calizas macizas.

**Fm. Copaquire** (García, 1967) (OXFORDIANO SUPERIOR)

Fue definida por García (1967) como una secuencia constituida principalmente por cuarcitas amarillo verdoso interestratificadas con lutitas pizarrosas oscuras, bancos de lutita, cuarsoarenitas y limolita silíceas gris hacia la parte inferior. En dicha localidad, la formación expone un espesor de 650 m y subyace, concordantemente, a la Fm. Aquiuno, del Oxfordiano Superior (García, 1967), mientras que su base no aflora.

**Fm. Majala** (García, 1967) (OXFORDIANO SUPERIOR)

Es una potente secuencia de limolitas gris verdoso claro con intercalaciones de lutitas silíceas y bancos delgados de arenisca fina con calizas subordinadas, expuestas en la confluencia de las quebradas Guatacondo y Majala, donde alcanza un espesor de 1.640 m (García, 1967). Allí, se deposita en forma concordante y transicional sobre la Fm. Aquiuno (García, 1967) y, de igual forma, debajo de la Fm. Chacarilla (Galli y Dingman, 1962). Los afloramientos de esta unidad se distribuyen en el borde oriental de la Carta Guatacondo.

**Fm. Challacollo** (Blanco *et al.*, 2012) (OXFORDIANO-TITONIANO)

Se denomina así en Blanco *et al.* (2012) a una secuencia de lutitas con intercalaciones subordinadas de calizas, limolitas calcáreas, limolitas silíceas, areniscas cuarcíferas muy finas y, en su parte superior, capas de yeso que afloran en la parte septentrional del cerro Challacollo.

**Fm. Quebrada Honda** (Harambour, 1990) (JURÁSICO SUPERIOR)

Aflora en Qda. Honda y Qda. Juan de Morales. Constituida por 250 m de potencia de areniscas medias a gruesas y conglomerados alternados rítmicamente a fangolitas.

**Fm. Chacarilla** (Galli y Dingman, 1962)

(JURÁSICO SUPERIOR- CRETÁCICO INFERIOR)

Potente secuencia, bien estratificada, de fangolitas, fangolitas fisibles, areniscas y ortocuarcitas, de colores gris rojizo o gris verdoso, depositadas en ambiente marino en su parte inferior y continental en la superior. Los afloramientos de esta unidad se extienden a lo largo de una franja de 43 km en sentido meridional, en el margen oriental de la Carta Guatacondo.

**GRANITOIDES DEL CRETÁCICO INFERIOR DE LA PRECORDILLERA**

**Pórfido Hipabisal Del Cretácico Inferior Bajo** (Blanco *et al.*, 2012) (141 Ma)

Pequeño stock de pórfido dacítico de hornblenda y biotita con forma tabular que aflora en el cerro Longacho. Intruye, con contacto generalmente concordante, a limolitas y calizas de la Fm. Longacho, y está cubierto por la Ignimbrita Tambillo (Miit) y conglomerados del Miembro Imagua de la Fm. Altos de Pica.

**Lamprófidos Del Cretácico Inferior Alto** (Blanco *et al.*, 2012) (107 Ma)

Stock lamprofirico de kaersutita que aflora en la ladera norte de la quebrada Chacarilla, cubre <0,02 Km<sup>2</sup> sin exposición de su roca huésped y cubierto por conglomerados del Miembro Sagasca de la Fm. Altos de Pica.

### **3.1.3. CRETÁCICO SUPERIOR – PALEOCENO INFERIOR**

#### **UNIDADES ESTRATIFICADAS DE LA PRECORDILLERA**

##### **Complejo Volcánico De Cerro Challacollo**

(Orrego *et al.*, 1997; Blanco *et al.*, 2012) (CRETÁCICO SUPERIOR, 83-80 Ma)

Aflora exclusivamente en Cerro Challacollo, constituido por rocas volcánicas dacíticas y riolíticas y sedimentarias clásticas.

##### **Fm. Suca** (Cecioni y García, 1960) (CRETÁCICO SUPERIOR)

Secuencia reconocida en Qda Camarones. Constituida por andesitas porfíricas y en menor proporción brechas, delgadas intercalaciones de areniscas y conglomerados. Presencia de diques y sills andesíticos. Tiene un espesor mínimo de 1.500 m y 3,5 Km<sup>2</sup> de extensión.

##### **Fm. Panjuacha** (Harambour, 1990) (CRETÁCICO SUPERIOR)

Está compuesta por cerca de 300 m de dacitas, riolitas fluidales, andesitas, conglomerados y areniscas, con estratificación gruesa.

##### **Fm. Cerro Empexa** (Galli y Dingman, 1962)

(CAMPANIANO-MAASTRICHTIANO)

Secuencia continental constituida por brechas, conglomerados, traquitas, areniscas finas y fangolitas. Se definen 3 miembros, con un espesor aproximado de 600 m, donde los miembros 1 y 3 están constituidos por brechas y conglomerados gris rojizos y traquitas grises y moradas, y un miembro intermedio o 2, conformado por areniscas finas y fangolitas rojo grisáceas e intercalaciones irregulares de yeso.

#### **GRANITOIDES DE LA CORDILLERA DE LA COSTA**

##### **Intrusivos Del Cretácico Superior** (82-77 Ma)

Se reconocen afloramientos aislados de monzodioritas de biotita en el sector de Cerro Cachango, al sur del Salar Bellavista-Pintados. Estas rocas están intruyendo tanto a rocas calcáreas del Grupo Huantajaya como también a las rocas volcánicas de la Fm. Punta Barranco.

## **GRANITOIDES DE LA PRECORDILLERA**

### **Unidad intrusiva I (Harambour, 1990)**

(CRETÁCICO SUPERIOR - TERCIARIO INFERIOR)

Se incluyen en esta unidad los cuerpos plutónicos de mayores dimensiones de la zona que se enmarcan entre los 69°W y los 69°30'W y entre los 19°15'S y 20°15'S aproximadamente, representados por los intrusivos de Tarapacá II, Cerrillos, Juan de Morales, Mocha, Chulluncane, Campahue, Cerro Colorado, Cerro Choja, Alantaya y otros menores. Los intrusivos de menor distribución presentan aureolas de alteración hidrotermal con mineralización metálica asociada y desarrollo de brechas de contacto en sus márgenes. Están constituidos por cuerpos de dioritas hasta granitos de grano grueso que se disponen en forma aproximadamente tabular, con una elongación N-S dominante.

### **Granitoides Del Cretácico Superior (Blanco *et al.*, 2012) (81-66 Ma)**

Corresponden a una serie de intrusivos que presentan composiciones que varían desde diorita, monzodiorita, diorita cuarcífera y monzodiorita cuarcífera, hasta monzonita cuarcífera, granito y sienogranito. Afloran en el sector NW de la Carta Mamiña, desde la sierra Tarapacá por el norte, hasta la Sierra Juan de Morales por el sur y la localidad de Quipisca por el este, intruyendo lavas y tobas cretácicas de la Fm. Cerro Empexa, y cortados por cuerpos hipabisales del Cretácico Superior alto – Paleoceno Inferior bajo. Las diferentes facies intrusivas tienen como característica común la presencia de ortopiroxeno y clinopiroxeno como minerales ferromagnesianos dominantes. Alcanzan un área de distribución total de ca. 70,1 km<sup>2</sup>.

### **Cuerpos Hipabisales Del Cretácico Superior (83-72 Ma)**

Corresponden a stocks subvolcánicos hipabisales, raíces intrusivas de domos, filones mantos y diques de composición andesítica-microdiorítica a riolítica-microgranítica relacionados con el volcanismo del Cretácico Superior en la zona precordillerana. Se distinguen tres grupos litológicos: (a) pórfidos, filones mantos y diques andesíticos y

microdioríticos, (d) un pórfido dacítico de piroxeno, y (r) pórfidos y domos intrusivos riolíticos de piroxeno y un stock microgranítico.

**Granitoides Del Cretácico Superior Alto – Paleoceno Inferior Bajo** (Blanco *et al.*, 2012) (65 Ma)

Stock de monzonita cuarcífera de biotita, que aflora en la ladera norte de la quebrada Chacarilla, Intruye a la Fm. Majala.

**Cuerpos Hipabisales Del Cretácico Superior Alto – Paleoceno Inferior Bajo**  
(Blanco *et al.*, 2012) (71-64 Ma)

Stocks hipabisales, filones mantos y diques de composición dacítica-microgranodiorítica y riolítica-microgranítica asociados a zonas de alteración hidrotermal y, localmente, mineralización pirítica en la zona precordillerana. En total, alcanzan un área de distribución de 4,0 km<sup>2</sup>.

### **3.1.4. PALEOCENO-EOCENO INFERIOR**

**Monzodiorita Cuarcífera Tamentica** (Paleoceno, 62 Ma)

Stock de monzodiorita cuarcífera de piroxeno y biotita que aflora en la quebrada Guatacondo, en la localidad de Tamentica. Su roca de huésped no aflora y está cubierto por conglomerados de la Fm. El Diablo.

**Complejo Intrusivo Cerro Colorado** (Blanco, 2012) (Eoceno Inferior)

Se denomina así a una serie de stocks y diques hipabisales porfíricos y brechas hidrotermales intrusivas que afloran en la vertiente sur de la quebrada de Parca, sector centro norte de la Carta Mamiña, la que se asocia genéticamente al yacimiento de cobre, tipo pórfido cuprífero, Cerro Colorado. Se incluye en este complejo afloramientos de una monzodiorita cuarcífera expuestos en la vertiente norte de la quebrada de Parca.

### **3.1.5. EOCENO MEDIO**

#### **Granitoides Del Eoceno** (Blanco *et al.*, 2012) (45-44 Ma)

Corresponden a un conjunto de stocks pequeños de composición diorita, monzodiorita, monzonita y monzonita cuarcífera, principalmente, que aflora en el núcleo y limbo oriental del sinclinal Higuieritas, cerca el límite oriental de la Carta Guatacondo.

#### **Complejo Intrusivo Yabricoya** (Thomas, 1967; Blanco, 2012) (49-40 Ma)

El Complejo Intrusivo Yabricoya está constituido por al menos siete diferentes facies intrusivas genética y espacialmente relacionadas, y emplazadas en un estrecho margen de tiempo, que afloran en el macizo montañoso de Cunupa-Yarvicoya y en la Carta Mamiña. Las facies diferenciadas en este complejo presentan composiciones que varían desde dioritas, dioritas cuarcíferas, monzodioritas, monzodioritas cuarcíferas, monzonitas cuarcíferas, granitos, pórfidos tonalíticos-granodioríticos y pórfidos dacíticos.

### **3.1.6. OLIGOCENO SUPERIOR-PLIOCENO**

#### **UNIDADES ESTRATIFICADAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA**

##### **Gravas De Alto Hospicio** (Marquardt *et al.*, 2008)

Corresponde a una secuencia de gravas y areniscas de origen aluvial, bien consolidadas, con algunas intercalaciones de cenizas de caída y cenizas retrabajadas. Localmente se observan secuencias de limos con niveles evaporíticos que engranan lateralmente con las gravas. Está cubierta parcialmente, en paraconcordancia, y ocasionalmente, con ligera incisión, por depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno, depósitos coluviales, depósitos salinos y depósitos eólicos. Su espesor es variable y alcanza un máximo de 350 m en los afloramientos expuestos en el Gran Escarpe Costero frente a Punta Patillos.

### **Tobas Casa Grande** (informal) (Muzzio, 1986) (MIOCENO INFERIOR)

Depósitos de toba rosada subhorizontales que afloran en acantilado costero, en inmediaciones de mina Casa Grande (Cu), al este de Punta Madrid. En discordancia angular con Fm. Cuya y cubierto por relleno aluvial actual.

### **Fm. Hacienda Camarones** (Muzzio, 1987) (MIOCENO - PLIOCENO)

Está compuesta por dos miembros; uno de arenisca, conglomerados y arcillotitas bien estratificadas de color pardo rojizo. El segundo superior de areniscas conglomeradas grises con estratificación incipiente. Se data una toba de  $14 \pm 1,2$  Ma (Muzzio, 1987).

### **Depósitos De Piedemonte** (informal) (Blanco *et al.*, 2012)

(MIOCENO SUPERIOR-PLIOCENO)

Se agrupa bajo esta denominación a un conjunto de gravas y arenas pobremente consolidadas, expuestas en el borde oriental de la Carta Pozo Almonte. Corresponde a lo que anteriormente Galli y Dingman (1962) denominaron Miembro 5 de la Fm. Altos de Pica.

## **UNIDADES ESTRATIFICADAS DE LA PRECORDILLERA**

### **Fm. Altos De Pica** (Galli, 1957; Blanco *et al.*, 2012)

(OLIGOCENO SUPERIOR-MIOCENO INFERIOR)

Conformada por conglomerados gruesos y de bolones, de tonos grises claro oliva a marrón, areniscas gruesas, pardas y blancas, e intercalaciones subordinadas de tobas ignimbríticas. Esta formación ha sido dividida en dos miembros: uno inferior denominado Sagasca, del cual se han diferenciado facies conglomerádicas y facies de areniscas, y un miembro superior denominado Imagua. Entre ambos miembros se intercala la Ignimbrita Tambillo. Representa, en general, el desarrollo de sistemas de abanicos aluviales derivados de la erosión y maduración del relieve positivo generado por la fase orogénica Incaica, y posiblemente relieves anteriores a ésta, y que morfológicamente constituyó el piedemonte aluvial del margen occidental de la precordillera andina durante el Oligoceno Superior-Mioceno Inferior.

**Fm. Latagualla** (Pinto, 1999) (MIOCENO INFERIOR?)

Aflora en Qda. Suca y Qda. Camiña. Fue dividida en 4 miembros: Camiña, Latagualla, Miñimiñi y Pacagua. Tiene aproximadamente 1.200 m de potencia. Compuesto de conglomerados, areniscas intercaladas con ignimbritas, gravas, arenas y fango, formando amplios sistemas de abanicos aluviales que progradan hacia el oeste.

**Ignimbrita Tambillo** (Galli, 1968)

(MIOCENO INFERIOR)

Compuesta por tobas de flujos de ceniza (Ignimbrita) y tobas soldadas de color rosado anaranjado grisácea, castaño y negra.

**Ignimbrita Huasco** (Vergara y Thomas, 1984)

(MIOCENO INFERIOR ALTO)

Definición y relaciones estratigráficas. La Ignimbrita Huasco fue definida como una secuencia de tobas soldadas cuyos afloramientos se sitúan preferentemente al occidente del salar homónimo y fue asignada al Mioceno Medio sobre la base de dataciones radiométricas (Vergara y Thomas, 1984). Estos autores estimaron un espesor máximo de 100 m.

**Fm. Chipana** (Blanco *et al.*, 2012) (MIOCENO INFERIOR-MIOCENO MEDIO)

Definición y relaciones estratigráficas. Se designa con esta denominación a una secuencia bien estratificada de areniscas, conglomerados, limolitas, limolitas calcáreas, carbonatos palustres y calizas silicificadas, de color marrón claro, cuya sección tipo se expone en el curso terminal de la quebrada homónima, al N de cerro Challacollo, con un espesor estimado de 130 m.

**Fm. El Diablo** (Tobar *et al.*, 1968)

(MIOCENO INFERIOR ALTO-MIOCENO MEDIO)

Secuencia esencialmente sedimentaria clástica, con intercalaciones de evaporitas, expuesta ampliamente en las cartas de Mamiña y Guatacondo de Blanco (2012). En su litología destacan areniscas grises pardas, areniscas de guijarro, areniscas finas,



conglomerados gruesos y de bolones, e intercalaciones subordinadas de tobas de flujo y caída y tufitas cineríticas blancas.

### **Depósitos De Piedemonte (MIOCENO SUPERIOR-PLIOCENO)**

Se agrupa bajo esta denominación a un conjunto de gravas y arenas pobremente consolidadas, con subordinados y delgados intercalaciones de cenizas volcánicas, expuestas ampliamente en la zona de estudio. Cabe destacar, que esta unidad informal corresponde a lo que anteriormente Galli y Dingman (1962) denominaron Miembro 5 de la Fm. Altos de Pica.

### **Fm. Tarapacá (Pérez, 1972. Tomado de Farías, 2003)**

(TERCIARIO SUPERIOR)

Corresponde a un conglomerado torrencial sincrónico con las efusiones andesíticas del cordón volcánico precordillerano. Predominan lavas negras e ignimbritas como constituyente clásticos. Proviene de la destrucción de los centros volcánicos terciarios de la precordillera.

## **GRANITOIDES DE LA PRECORDILLERA**

### **Unidad intrusiva II (Harambour, 1990) (MIOCENO?)**

Pertenecen a esta unidad pórfidos dacíticos que se hallan temporal y espacialmente relacionados con la cubierta ignimbrítica cenozoica, ya que instruyen sus niveles basales y están cubiertos por sus niveles superiores. Afloran en Coscaya, Sibaya, Sotoca, Chiapa y quebrada Pillani.

### 3.1.7. PLEISTOCENO-HOLOCENO

#### UNIDADES ESTRATIFICADAS Y DEPÓSITOS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA

Tomado de Blanco *et al.* (2012).

##### **Fm. Soledad (PLEISTOCENO)**

Corresponden a limitados estratos decimétricos de anhidrita, arenisca cementada por halita con algunas intercalaciones de cenizas. Las capas de anhidrita presentan, en general, un aspecto masivo y rugoso, localmente con desarrollo de cristales de anhidrita con orientación aleatoria.

##### **Depósitos Litorales (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Corresponden a depósitos decimétricos de areniscas calcáreas, conglomerados y coquinas, con grado de consolidación variable, que afloran discontinuamente sobre el substrato rocoso en la Franja Costera (Marquardt *et al.*, 2008). Incluye, además, a los depósitos de arenas de bioclastos que se acumulan en las playas actuales.

##### **Depósitos De Guano (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Constituidos por fosfatos de calcio, los que fueron depositados como materiales fecales y restos orgánicos de aves marinas litorales, conformando tanto niveles puros como cemento en sedimentos coluviales o aluviales (Marquardt *et al.*, 2008). Depósitos de guano blanco y rojo coexisten aflorando en promontorios aledaños a la costa.

##### **Depósitos Coluviales (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Comprende el conjunto de depósitos no consolidados acumulados en el pie de grandes escarpes y laderas de alta pendiente, conformando frecuentemente conos coluviales. Se componen de bloques, gravas y arenas, de carácter polimíctico, provenientes del transporte gravitacional y aluvial desarrollado bajo la configuración morfológica que prevalece hasta la actualidad (Marquardt *et al.*, 2008).

##### **Depósitos De Remoción En Masa (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Son depósitos no consolidados clasto-soportados, compuestos por bloques métricos con fracturamiento en puzzle, a decimétricos, muy angulosos y mal seleccionados, presentando ocasionalmente gradación inversa. Estos depósitos se encuentran al pie

del acantilado costero, cubriendo a depósitos litorales, y se generan por el colapso del material que compone el escarpe costero debido a procesos gravitacionales y probablemente sísmicos.

#### **Depósitos Aluviales (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Corresponden a arenas gruesas, medias, finas, limos y, en menor proporción, gravas y bloques, que se acumulan en el fondo de las quebradas, depresiones estructurales y, ocasionalmente, en abanicos aluviales.

#### **Depósitos Salinos (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Consisten generalmente en costras salinas centimétricas con cantidades variables de sulfatos y carbonatos, aunque también se presentan depósitos salinos masivos de más de 100 m de espesor (Salar Grande). Existen variaciones texturales y de proporción de material clástico incorporado.

#### **Depósitos Aluviales Activos (HOLOCENO)**

Se encuentran confinados en la Depresión Central (cartas Pozo Almonte y Oficina Victoria). Están constituidos por torrentes de fango y arena fina provenientes de la Precordillera.

#### **Depósitos Eólicos Activos (HOLOCENO)**

Corresponden a los depósitos transportados por el viento que se encuentran en la Depresión Central (Carta Pozo Almonte). Están constituidos por arenas grises no consolidadas.

#### **Depósitos Antrópicos (HOLOCENO SUPERIOR)**

En el área estudiada se han diferenciado los depósitos originados por la acción humana en: depósitos de relleno sanitario y vertederos, residuos inorgánicos de obras civiles y residuos inorgánicos de labores mineras. En estos últimos destacan los grandes desmontes con material estéril de las ex-oficinas salitreras.

## **DEPÓSITOS DE LA PRECORDILLERA**

### **Depósitos Glaciales (PLEISTOCENO)**

Se encuentran circunscritos a las regiones de mayor altitud geográfica. Los depósitos presentan mediana consolidación y se componen de brechas y conglomerados de bloques, matriz y clasto soportados, mal seleccionados.

### **Depósitos Aluviales Antiguos (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Esta unidad está conformada mayoritariamente por gravas de bolones y gruesas, no consolidadas, con escasas intercalaciones de arenas laminadas y de guijarro. Estos depósitos se encuentran incisos en los Depósitos de Piedemonte, del Mioceno Superior-Plioceno, y se encuentran disecados por los Depósitos aluviales activos y cubiertos por los eólicos activos, del Holoceno.

### **Depósitos Coluviales (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Corresponden gravas angulosas y subangulosas, gruesas y de bloques, y arenas gruesas de guijarro, acumuladas, morfológicamente en abanicos coluviales asociados a laderas de pendientes fuertes, escombros de falda en las laderas de las quebradas más profundas y en los faldeos de algunos cerros.

### **Depósitos De Deslizamiento (PLEISTOCENO-HOLOCENO)**

Depósitos constituidos por megabloques con deslizamiento rotacional y derrumbes gravitacionales asociados al colapso de laderas abruptas y cornisas rocosas, respectivamente, las que se circunscriben principalmente a las quebradas mayores que drenan la precordillera.

### **Depósitos Salinos (PLEISTOCENO SUPERIOR-HOLOCENO)**

Se ubican en la extensión más nororiental del Salar de Pintados. Se encuentran cubiertos y parcialmente erosionados por depósitos eólicos (He) y lateralmente engranan con gravas y arenas más bajas de las terrazas aluviales asignadas a los Depósitos aluviales antiguos.

### **Depósitos Fluviales Y De Ciénagas (HOLOCENO)**

Se denomina así a depósitos medianamente consolidados, bien estratificados, de color pardo grisáceo, constituidos por arenas, arenas de guijarro, gravas de bolones, diatomitas, limolitas, fangolitas y alfombras orgánicas negras. Expuestos en la ladera norte de quebrada de Quisma.

### **Depósitos Aluviales Activos (HOLOCENO)**

Bajo esta denominación se agrupan una serie de depósitos no consolidados, distribuidos ampliamente en estrechos cauces aluviales, de actividad efímera, encausados primariamente por los drenajes de primer orden que se asocian las principales quebradas que drenan el margen occidental de la precordillera.

### **Depósitos Eólicos Activos (HOLOCENO)**

Depósitos no consolidados, constituido por arenas medias, finas y gruesas, de origen eólico y carácter activo, distribuidos, esencialmente, en el borde oriental de la Pampa del Tamarugal.



**Tabla 3-1: Leyenda de mapa geológico. Extraído de Ordoñez y Rivera (2004).**

sedimentos no consolidados	Qs	: Depósitos coluviales, aluviales, fluviales, de remoción en masa, eólicos y litorales. Cuaternario.
	Plgl	: Depósitos morrénicos, glaciafluviales, glacialacustres: diamictos de bloques y matriz de limo-arcilla, gravas y arenas. Pleistoceno
Rocas estratificadas	Qv	: Estratovolcanes, complejos volcánicos menores, depósitos piroclásticos y de avalanchas volcánicas, de composición andesítica a dacítica. Cuaternario.
	Pls	: Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas: coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos, que afloran al sur de Caleta Camarones. Pleistoceno.
	Pv	: Estratovolcanes y depósitos de lavas, domos y piroclastitas, generalmente de composición andesítica a dacítica. Plioceno.
	PPIs	: Conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas, generalmente consolidados, de facies principalmente aluviales, subordinadamente lacustres y eólicas. Plioceno-Pleistoceno.
	MQs	: Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos. Mioceno-Cuaternario.
	MsPs	: Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas, intercaladas con volcanitas ácidas. Mioceno Superior-Plioceno.
	Msv	: Centros volcánicos y secuencias compuestas por lavas, domos, depósitos piroclásticos e ignimbríticos, con intercalaciones aluviales. Estos depósitos están en parte asociados a depósitos epitermales de Au-Ag. Mioceno Superior.
	Ms	: Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, piedemonte o fluviales compuestas por gravas, arenas y limos. Mioceno Inferior a Medio.
	Mv	: Complejos volcánicos parcialmente erodados y secuencias volcánicas constituidas por lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas, dacíticas y riolíticas asociadas a calderas de colapso (ignimbritas). Mioceno Inferior a Medio.
	OPs	: Secuencias sedimentarias continentales paralíticas o aluviales: conglomerados, areniscas, lutitas y calizas. Oligoceno-Plioceno
	OMv	: Secuencias de lavas, brechas, domos y centros volcánicos continentales, andesíticos a riolíticos. Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso e ignimbritas. Oligoceno-Mioceno.
	OMvs	: Secuencias volcanosedimentarias constituidas por lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. Oligoceno Superior-Mioceno Inferior.
	OMsv	: Secuencias sedimentarias continentales aluviales y fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas con intercalaciones menores de yeso, tobas y lavas. Oligoceno-Mioceno Inferior.
	Ksvs	: Secuencias volcánicas continentales y sedimentarias: Lavas, domos y brechas basálticas, dacíticas y riolíticas, y piroclastitas. Conglomerados, brechas, areniscas y limolitas rojas. Cretácico Superior.
	Kissv	: Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas. Cretácico Inferior alto-Superior bajo.
	Kivs	: Secuencias volcánicas y volcanosedimentarias continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas y rocas epiclásticas. Cretácico Inferior.
	Kis	: Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, calcarenitas, areniscas, margas, coquinas. Cretácico Inferior.
	JKsv	: Secuencias sedimentarias y volcánicas: areniscas, limolitas, lutitas, conglomerados. Lavas basálticas a riolíticas, domos, brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos. Jurásico.
	Jsv	: Secuencias sedimentarias marinas: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, conglomerados, niveles de yeso e intercalaciones andesíticas a basálticas subordinadas. Jurásico.
	Jvs	: Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas basálticas a andesíticas y tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. Jurásico
Trsv	: Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales: rocas epiclásticas fosilíferas, calizas estromatolíticas, lacas, brechas y tobas andesíticas a riolíticas. Triásico Medio a Superior.	
CPs	: Secuencias sedimentarias continentales y marinas. Carbonífero Superior-Pérmico	
CPvs	: Secuencias volcánicas continentales e intercalaciones sedimentarias: lavas, domos, tobas, brechas andesíticas a riolíticas, areniscas, conglomerados y calizas. Carbonífero Pérmico	
DCs	: Secuencias sedimentarias levemente metamorizadas: areniscas, lutitas, pizarras, conglomerados, calizas, cuarcitas y limolitas. Devónico- Carbonífero.	
Rocas intrusivas	Og	: Granodioritas, monzogranitos, tonalitas, dioritas de hornblenda y biotita, gabros. Oligoceno.
	EOp	: Pórfidos granodioríticos, monzoníticos, dioríticos, dacíticos y riolíticos de biotita y hornblenda. Eoceno-Oligoceno.
	Eg	: Granodioritas, tonalitas, monzogranitos, textura de pórfidos, asociados a los pórfidos cupríferos de Cerro Colorado y Mocha. Paleoceno.
	Pag	: Granodioritas, tonalitas, monzogranitos, contextura de pórfidos, asociados a los pórfidos cupríferos de Cerro Colorado y Mocha. Paleoceno.
	KTg	: Granodioritas, dioritas, pórfidos graníticos. Cretácico Superior-Terciario Inferior.
	Ksg	: Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxenos, biotita y hornblenda. Pórfidos andesíticos y riolíticos. Cretácico Superior.
	Kig	: Granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita (intrusivo Pisagua). Cretácico Inferior.
	JKg	: Granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita (intrusivo Pisagua). Cretácico Inferior.
Jg	: Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. Jurásico Medio a Superior.	
CPg	: Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita. Carbonífero-Pérmico.	

### **3.2. Marco estructural**

En la I Región de Tarapacá se distinguen cinco dominios estructurales (Ordoñez y Rivera, 2004). El primer dominio estructural se desarrolla en el sector norte de la Cordillera de la Costa y en la parte occidental de la Depresión Intermedia, desde la Línea de la Concordia hasta aproximadamente los 19°20'S. En la zona de estudio existen fallas y lineamientos predominantemente NE. El segundo dominio se extiende en el sector central de la Cordillera de la Costa y en parte de la Depresión Intermedia, aproximadamente entre los 19° 20' y los 20° 30'S. Se distingue por la predominancia de estructuras de rumbos cercanamente NS y EW. Las estructuras NS aparecen con igual importancia en todo el dominio, mientras que las EW aparecen más restringidas hacia los extremos sur y norte del dominio, mostrando una transición gradual hacia estructuras de rumbo NE hacia el norte.

En el sector sur de la Cordillera de la Costa y en el margen occidental de la Depresión Intermedia, a partir de los 20°30'S y hasta el límite con la Región de Antofagasta, las estructuras dominantes se asocian a la extensión más septentrional de la Zona de Falla de Atacama. En este dominio presentan una transición gradual desde rumbos NW a NS.

En el margen oriental de la Depresión Intermedia y en la Precordillera y Cordillera de los Andes, desde la Línea de la Concordia hasta los 19°50'S aproximadamente, se desarrolla un dominio estructural donde predominan lineamientos regionales de rumbos NNW a NW, con trazas que alcanzan a 50 km. El último dominio corresponde al sector sur de la región, abarcando el margen oriental de la Depresión Intermedia, Precordillera y Cordillera de los Andes, desde los 19°50'S hasta el límite con la Región de Antofagasta. Este dominio estructural se presenta claramente asociado a la Zona de Falla de Domeyko, donde predominan estructuras con rumbos NS, aunque se observa una transición gradual a estructuras de rumbo NNE en el extremo norte del dominio. Las trazas de estas estructuras pueden llegar a 40 km en la cordillera andina, mientras que en la Depresión Intermedia, al oeste de Pica, existe una estructura de casi 80 km de extensión. (Ordoñez y Rivera, 2004)



### **3.3. Metalogenia**

En la I y XV regiones, se han reconocido tres provincias metalogénicas que coinciden con las unidades geomorfológicas mayores (Ordoñez y Rivera, 2004).

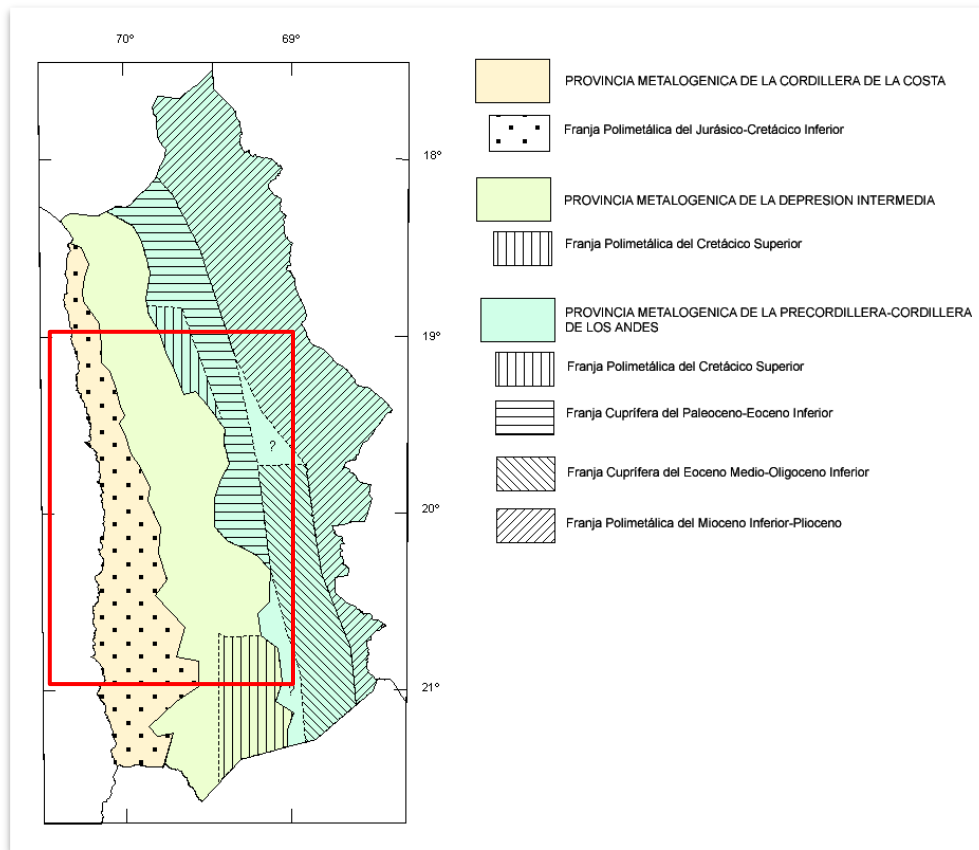
La provincia metalogénica de la Cordillera de la Costa, constituida principalmente por rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas jurásicas a cretácicas, se caracteriza por poseer depósitos principalmente vetiformes, estratoligados y de relleno de fracturas, con mineralización de cobre (Cu), oro (Au), plata (Ag) y, subordinadamente, hierro (Fe). Están agrupados en una franja polimetálica de edad jurásica-cretácica inferior, donde la mayoría de los depósitos son de reducidas dimensiones y se encuentran paralizados. Los más importantes (depósitos de tamaño mediano) en esta zona corresponden a vetas argentíferas de los distritos históricos de Huantajaya y Santa Rosa, al este de Iquique y el distrito de la Mina Carmen (Au) al norte de Iquique.

La provincia metalogénica de la Depresión Intermedia está asociada a sedimentos terciarios a cuaternarios, en parte asociados a salares, que rellenan la cuenca que conforma esta unidad geomorfológica. Sus depósitos de metales base y preciosos son escasos y han sido incluidos en una franja polimetálica de edad cretácica superior. El más importante corresponde al depósito argentífero de Challacollo, emplazado en cerros islas ubicados al sur de la región, constituidos por rocas volcánicas e intrusivas jurásicas a cretácicas. Esta franja metalogénica aparece más al norte en los dominios de la precordillera.

La provincia metalogénica de la Precordillera - Cordillera de los Andes es la más importante de la región. Se asocia principalmente a rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas y rocas metamórficas subordinadas, con edades que van desde el Precámbrico hasta el Cuaternario. En esta provincia se emplaza el arco volcánico actual y contiene depósitos, principalmente cupríferos, de nivel mundial. Se han reconocido cuatro franjas metalogénicas desde el Cretácico Superior al Plioceno, aproximadamente de orientación NS y con edades decrecientes hacia el este. La franja polimetálica cretácica superior se extiende en la precordillera, donde el depósito más importante es un prospecto cuprífero de tamaño mediano conocido como Chilpe (Camarones). La franja cuprífera paleocena-eocena inferior también se asocia a la precordillera, donde

se encuentra el pórfido de Cu-Mo de Cerro Colorado y el prospecto de pórfido cuprífero de Mocha. La franja cuprífera eocena media-oligocena inferior es la más importante, siendo reconocida a nivel mundial. En ella se albergan los megapórfidos de Cu-Mo de Collahuasi y Quebrada Blanca, actualmente en producción, y los prospectos de menor tamaño de Queen Elizabeth, La Planada y Copaquire. La franja polimetálica miocena inferior-pliocena se ubica en la alta cordillera y contiene depósitos epitermales de Au-Ag de tamaño mediano como Choquelimpie, algunos prospectos menores de cobre, oro y polimetálicos y mantos de manganeso de pequeño tamaño.

Finalmente, en la región existen ocurrencias uraníferas en las provincias de la Cordillera de la Costa y Depresión Intermedia, asociadas a niveles diatomíticos y limo-arcillosos en sedimentos miocenos a cuaternarios. En la provincia de la Precordillera-Cordillera de los Andes, los únicos antecedentes de mineralización de uranio se relacionan con contenidos menores en los depósitos cupríferos de Campanani, Sagasca y Huiniquintipa (Ordoñez y Rivera, 2004).



**Figura 3-2: Provincias y franjas metalogénicas de la I y XV región. En el recuadro rojo se muestra el área de este estudio. Modificado de Ordoñez y Rivera (2004).**

## Yacimientos económicos históricos.

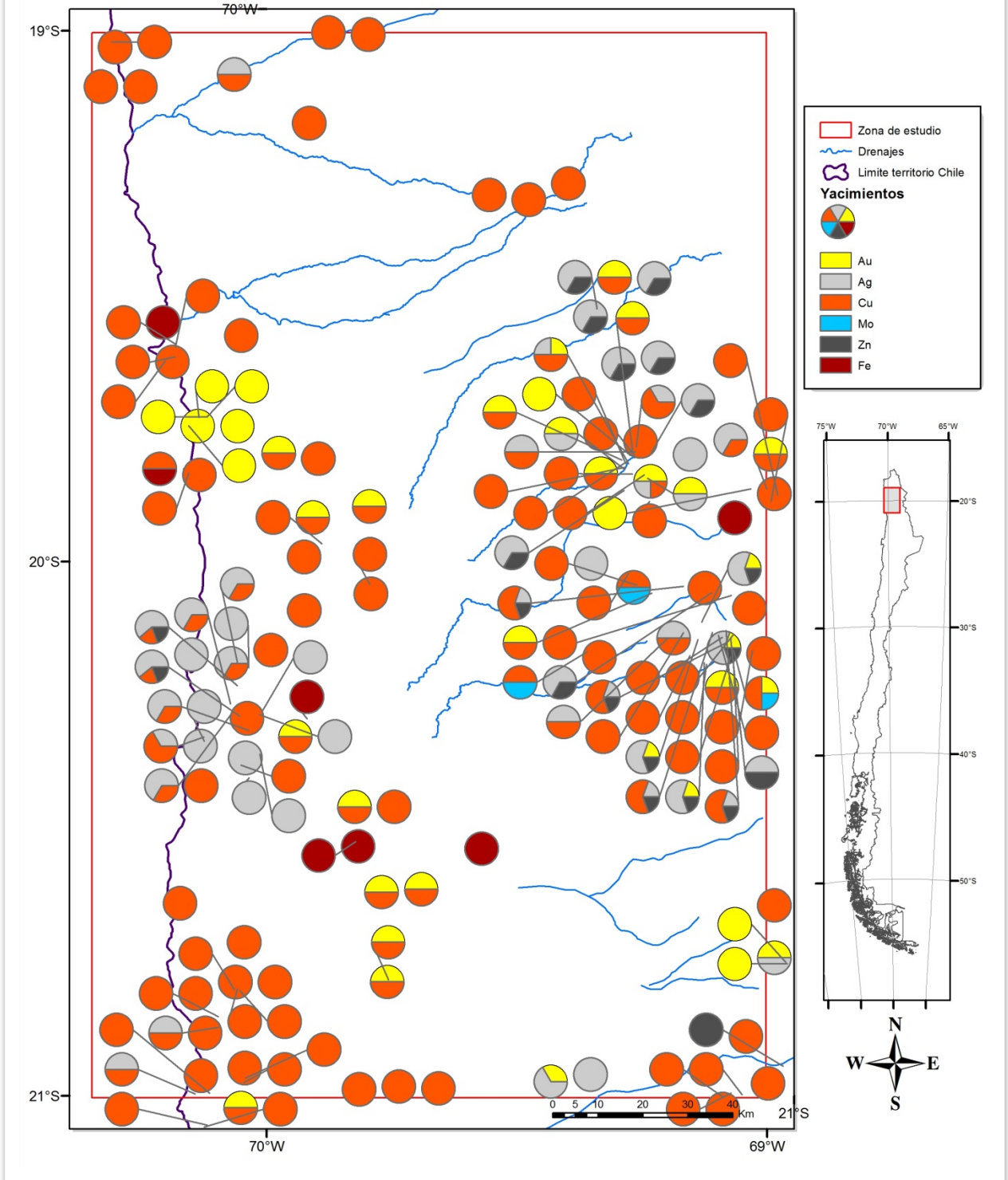


Figura 3-3: Yacimientos económicos históricos registrados en la zona. Se presenta una selección de la base de datos que existe en SERNAGEOMIN. La mayoría de estos yacimientos son de pequeña minería y están en total abandono. La simbología de “torta” representa los principales recursos de extracción en cada faena.

## 4. RESULTADOS

Los datos geoquímicos utilizados forman parte de: 1.- Hoja geoquímica de Iquique, escala 1:250.000 (Lacassie *et al.*, 2012b). 2.- Hoja geoquímica de Pisagua, escala 1:250.000 (en edición). Ambos trabajos han sido o están siendo realizados por la unidad de geoquímica del Servicio Nacional de Geología y Minería. Ante la calidad de inédito de parte importante de estos datos, estos no serán publicados en el presente estudio.

### 4.1. Control de calidad de datos (QAQC)

Se presenta un resumen de los cálculos estadísticos más importantes realizados para los 69 pares de duplicados de terreno, desglosados por elemento (Tabla 4-1) y destacado en rojo aquellos elementos que obtuvieron un error relativo medio superior al 20%. Los resultados fueron ordenados de forma decreciente según error relativo medio (%).

Tabla 4-1: Resumen de valores estadísticos calculados de duplicados de terreno. Se muestra en color rojo las muestras con error relativo medio superior al 20%.

Elemento		Promedio de diferencias	Promedio de Varianza Relativa	t-Student	Error Relativo Medio (%)
Be	ppm	-0,18	0,35	-1,04	58,87
Au	ppb	-0,06	0,32	-0,41	56,70
Hg	ppm	0,00	0,11	-0,39	33,91
TOTAL S	%	0,09	0,11	1,01	33,72
Sn	ppm	-0,03	0,11	-0,33	32,53
Cd	ppm	-0,01	0,10	-1,24	32,26
Tl	ppm	-0,01	0,10	-0,72	30,89
Bi	ppm	-0,01	0,09	-1,80	30,03
W	ppm	0,02	0,09	0,13	29,95
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,00	0,06	1,10	24,22
Se	ppm	0,01	0,06	0,14	23,96
TOTAL C	%	0,02	0,05	0,51	23,00
Sb	ppm	-0,01	0,04	-0,30	21,00
V	ppm	6,46	0,04	0,77	20,94
Lu	ppm	0,20	0,04	0,99	19,66
Ta	ppm	0,02	0,04	1,05	19,45
Cu	ppm	-1,87	0,04	-0,96	19,06
Tm	ppm	0,20	0,04	0,98	18,81
Ho	ppm	0,21	0,03	1,01	18,43
Zr	ppm	0,49	0,03	0,06	17,54
Yb	ppm	0,23	0,03	1,15	17,48
Tb	ppm	0,21	0,03	1,01	17,47
Eu	ppm	0,18	0,03	0,93	16,92

Elemento		Promedio de diferencias	Promedio de Varianza Relativa	t-Student	Error Relativo Medio (%)
Pb	ppm	-0,24	0,03	-0,56	16,62
Hf	ppm	0,05	0,03	0,25	16,11
Er	ppm	0,24	0,03	1,17	16,04
TiO <sub>2</sub>	%	0,04	0,02	1,20	15,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,27	0,02	1,05	15,12
Dy	ppm	0,19	0,02	1,03	14,64
Co	ppm	0,36	0,02	0,70	14,62
Gd	ppm	0,19	0,02	0,99	13,66
Sm	ppm	0,26	0,02	1,29	13,45
Ag	ppm	0,00	0,02	-0,55	13,42
Ni	ppm	0,22	0,02	0,86	12,83
Pr	ppm	0,26	0,02	1,18	12,82
CaO	%	0,22	0,01	1,40	12,14
Zn	ppm	0,74	0,01	0,62	11,82
La	ppm	0,35	0,01	0,59	11,68
As	ppm	-0,58	0,01	-0,22	11,63
Nd	ppm	0,07	0,01	0,14	11,62
Nb	ppm	0,22	0,01	0,99	11,39
Mo	ppm	-0,04	0,01	-0,96	10,96
MnO	%	0,00	0,01	0,05	10,94
Cs	ppm	-0,35	0,01	-1,08	10,89
Th	ppm	-0,10	0,01	-0,60	10,64
Ce	ppm	0,66	0,01	0,65	10,54
Sc	ppm	0,25	0,01	1,01	9,64
Y	ppm	0,26	0,01	0,80	9,30
U	ppm	0,05	0,01	0,68	9,04
Sr	ppm	3,63	0,01	0,43	8,79
Rb	ppm	-0,96	0,01	-0,87	8,58
MgO	%	0,01	0,01	0,34	7,80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,00	0,00	0,19	6,67
Ga	ppm	0,16	0,00	0,89	6,52
Ba	ppm	-10,23	0,00	-1,65	6,33
K <sub>2</sub> O	%	-0,02	0,00	-0,86	6,05
Na <sub>2</sub> O	%	0,01	0,00	0,40	5,57
SiO <sub>2</sub>	%	-0,48	0,00	-1,28	4,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-0,13	0,00	-1,35	4,33

Se observan 14 elementos con errores mayores al 20%, destacando importantes errores para Hg, S, Sn, Cd, Tl, Bi con valores sobre el 30% y con cifras superiores al 50% de error en Be (ppm) y Au (ppb). Dentro de las posibles causas que generarían estos altos errores, se contemplan: la variabilidad natural de algunos elementos al estar asociados a minerales pesados que se pueden segregar por deflación eólica, captación de “pepita” en algunas muestras (error asociado a muestreo) y valores de concentración bajos, cercanos al límite de detección que evidenciaría básicamente error analítico.

En cuanto al test t-student, todos los valores se encuentran dentro del intervalo de confianza.

Se realizaron adicionalmente: gráficos de dispersión, Q-q plot, diferencia relativa versus promedio y diferencia relativa absoluta versus porcentaje de datos. Todos estos se adjuntan en anexo de Calidad de datos (QAQC).

## **4.2. Análisis univariable**

Se confeccionaron 47 mapas de distribución de concentraciones de elementos como los de la Figura 4-1 y que se presentan en su totalidad en anexos de Mapa univariables. De ellos, 22 elementos fueron procesados y clasificados en base al método *Jenks Natural Brakes* en los que se determinaron 6 clases representativas. Estos elementos son SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc, Ba, Be, Co, Ga, Rb, Sr, Ta, Th, Zn, Ni, Cd, Bi, Tl. Por otra parte el método *Head/Tail Breaks* fue utilizado en los restantes 24 elementos, que son: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cs, Hf, Nb, Sn, U, V, W, Zr, C total, S total, LREE, HREE, Mo, Cu, Pb, As, Sb, Ag, Au, Hg, Se.

En cada mapa de distribución de concentraciones, las dos clases con mayores concentraciones de elementos fueron destacadas con estrellas, debido a que, proporcionalmente, su representación en círculos es demasiado grande y distorsiona la simplificación visual que nos brinda este tipo de simbología.

## Distribución de concentraciones de fósforo (%)

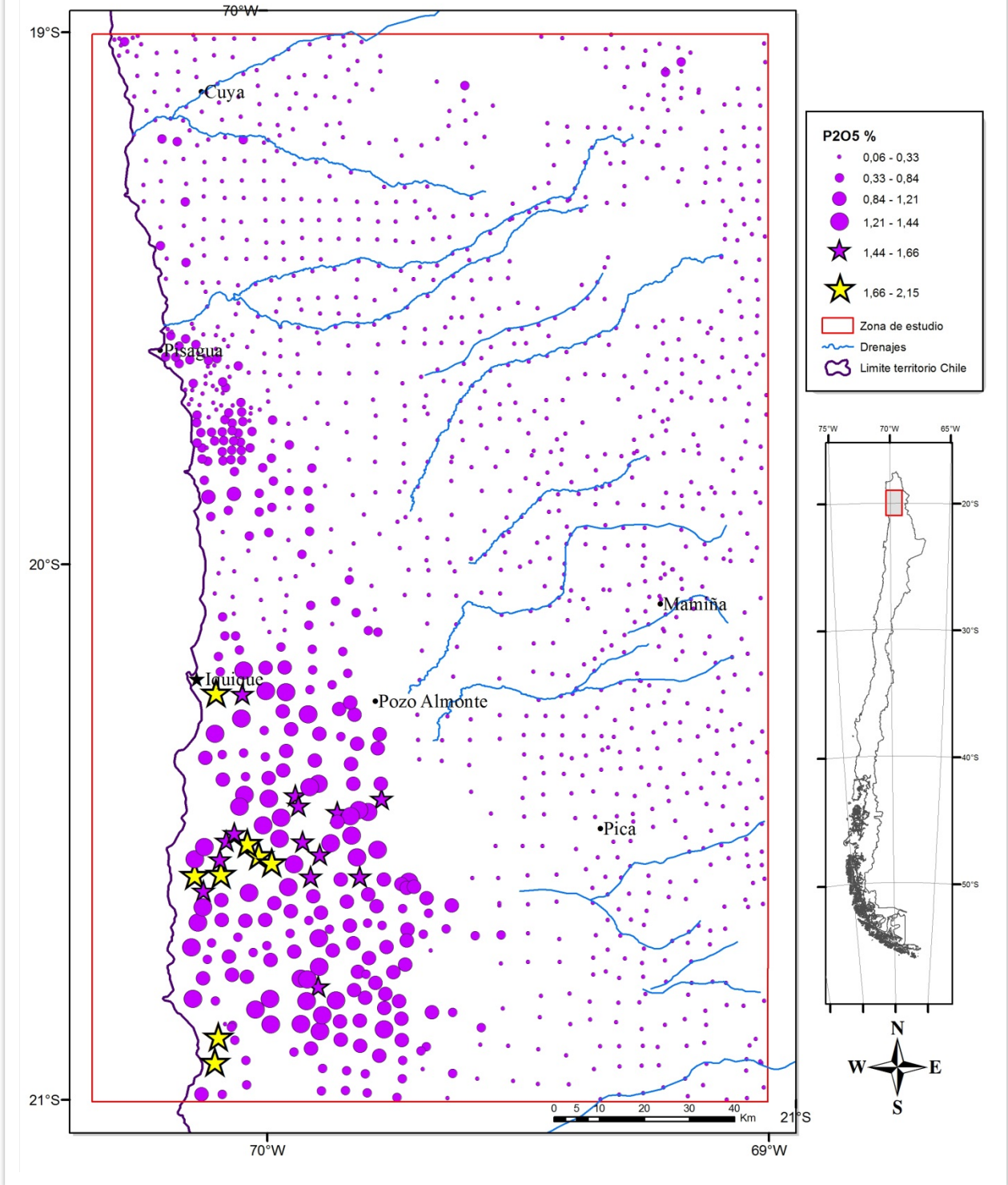


Figura 4-1: Ejemplo de mapa univariable: distribución de concentraciones de fósforo ( $P_2O_5$ ). Las clases fueron calculadas en base al método Head/Tail Breaks. (Mapa en anexo).



### 4.3. Redes neuronales artificiales

El análisis con RNA concluyó con una estructura conocida como red neuronal, compuesta por 6 nodos (Figura 4-2).

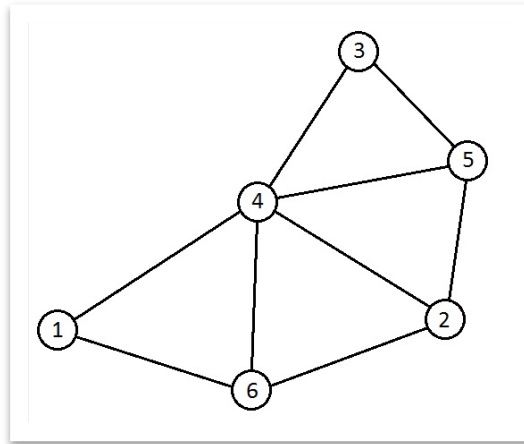


Figura 4-2: Esquema de RNA del tipo GCS correspondiente al set total de muestras de sedimentos. Cada número representa un cluster de muestras con comportamiento químico similar.

La naturaleza de las muestras y su proporción según el número de nodo al cual fueron asignadas, son mostradas en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Número de muestras de cada nodo, desglosadas según tipo de compósito de sedimento.

n° nodo	Tipo de compósito de sedimento				Total
	Pampa	Drenaje	Fluvial Activo	Fluvial Reciente	
1	1	2	35	23	61
2	94	100	1	8	203
3	45	81	78	210	414
4	23	78	33	59	193
5	35	145	0	3	183
6	74	77	35	71	257
<b>Total</b>	272	483	182	374	1311

Los valores obtenidos en relación a la concentración de los elementos por cada nodo, en base al análisis con redes neuronales, fueron tabulados. Con estos resultados, junto con los promedios regionales calculados, fue posible determinar factores de enriquecimiento por cada elemento y para cada nodo (Tabla 4-3). La coloración con matices de intensidad que representa el factor de enriquecimiento en cada celda, es una forma visual intuitiva que permite destacar cuales son los valores que se comportan de forma anómala, con factores de enriquecimiento mayores (rojo) o menores (azul) al resto de su clase (nodo).

$$\text{Factor de enriquecimiento} = \frac{\text{Promedio de Elemento en Nodo } i}{\text{Promedio Regional de elemento}}, \text{ con } i = 1, \dots, 6$$

La distribución espacial de cada nodo se presenta en la Figura 4-3. Se muestra en la misma gráfica, las principales quebradas, calculadas en base a un modelo de elevación digital (DEM).

En base a los resultados obtenidos en cada nodo, es posible definir estadísticamente cuales son los valores que destacan por sus anomalías positivas. Así, se ha realizado el cuadro resumen que muestra los elementos anómalos por cada nodo (Tabla 4-3). Estos elementos enriquecidos constituirán el set de elementos mayormente analizados de acuerdo a la importancia que poseen en la zona de estudio.

En paralelo, se desarrolló de un gráfico de caja o *box-plot* (Figura 4-4), que permite conocer cuáles son los valores atípicos extremos y leves, de factores de enriquecimiento, que caracterizan a cada nodo.

Tabla 4-3: Factores de enriquecimiento de cada elemento para los 6 nodos obtenidos en la RNA. Se adjunta el valor del promedio regional de cada elemento calculado en base a todas las muestras utilizadas en este trabajo. Los colores, según intensidad, resaltan los mayores valores (rojo) o menores valores (azul) por cada nodo.

			Factor de Enriquecimiento					
elemento		Promedio regional	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5	Nodo 6
SiO2	%	53,47	0,84	0,75	1,14	1,06	0,91	1,03
Al2O3	%	13,92	0,91	0,71	1,13	1,08	0,87	1,08
Fe2O3	%	7,25	3,44	0,69	0,76	0,86	0,95	1,19
MgO	%	2,67	1,04	1,13	0,72	0,92	1,40	1,11
CaO	%	7,27	0,53	2,02	0,59	0,67	1,55	0,82
Na2O	%	2,98	0,76	1,08	1,05	0,85	1,06	0,98
K2O	%	2,11	0,73	0,78	1,19	1,16	0,79	0,97
TiO2	%	0,98	3,39	0,69	0,77	0,80	1,06	1,15
P2O5	%	0,33	0,67	1,17	0,50	0,71	2,94	0,60
MnO	%	0,12	2,14	0,78	0,82	1,01	1,12	1,10
Cr2O3	%	0,01	2,56	0,88	0,63	0,78	1,39	1,21
Sc	ppm	13,30	1,38	0,84	0,82	0,96	1,40	1,07
Ba	ppm	589	1,02	0,69	1,22	1,09	0,68	1,05
Be	ppm	1,53	0,85	0,86	1,04	1,10	0,86	1,10
Co	ppm	16,60	2,83	0,70	0,76	0,98	0,96	1,24
Cs	ppm	13,51	1,31	0,52	1,16	1,90	0,40	0,81
Ga	ppm	16,26	1,61	0,68	1,06	1,05	0,81	1,12
Hf	ppm	7,01	2,79	0,77	0,77	0,80	1,44	0,96
Nb	ppm	9,60	2,36	0,76	0,97	1,02	0,85	1,01
Rb	ppm	73,30	0,77	0,68	1,19	1,30	0,72	0,97
Sn	ppm	1,93	2,37	0,66	0,93	1,22	1,03	0,87
Sr	ppm	524	0,85	1,31	0,93	0,78	1,11	0,98
Ta	ppm	0,67	2,21	0,66	1,03	1,04	0,91	0,98
Th	ppm	9,64	1,59	0,71	1,04	1,12	0,93	0,99
U	ppm	3,09	1,55	0,89	0,86	1,03	1,47	0,83
V	ppm	178	4,03	0,71	0,68	0,75	0,99	1,22
W	ppm	1,91	1,40	0,72	1,03	1,63	0,68	0,83
Zr	ppm	262	2,91	0,78	0,75	0,77	1,43	0,98
TOTAL C	%	0,35	0,56	0,92	0,96	1,54	1,30	0,62
TOTAL S	%	1,58	0,08	3,72	0,14	0,44	1,52	0,50
S_LREE	ppm	115	1,55	0,74	1,01	1,05	1,02	1,01
S_HREE	ppm	32,05	1,11	0,87	0,90	1,07	1,40	0,90
Mo	ppm	1,81	0,93	1,70	0,60	1,43	1,20	0,64
Cu**	ppm	60,37	1,00	0,60	0,63	2,78	1,02	0,57
Pb	ppm	11,24	1,41	0,81	0,94	1,58	0,86	0,81
Zn	ppm	57	2,05	0,80	0,83	1,34	0,86	1,02
Ni	ppm	10,7	2,00	0,83	0,76	1,21	0,92	1,18
As	ppm	43,3	1,43	1,02	0,79	2,10	0,54	0,71
Cd	ppm	0,24	0,56	0,90	0,62	1,65	1,93	0,64
Sb	ppm	1,03	2,07	0,66	0,88	1,98	0,60	0,75
Bi	ppm	0,15	1,55	0,51	1,00	2,05	0,55	0,79
Ag	ppm	0,06	0,96	1,01	0,87	1,69	0,85	0,81
Au	ppb	1,59	0,51	1,73	0,72	1,55	1,01	0,57
Hg	ppm	0,03	1,77	0,46	0,91	2,34	0,34	0,86
Tl	ppm	0,16	1,08	1,00	0,79	1,77	1,02	0,73
Se	ppm	0,86	0,37	3,48	0,35	0,53	1,21	0,44

\*\*Luego de realizar análisis de sensibilidad, el promedio regional de Cu se redujo a 45,78, Los factores de enriquecimiento del nodo 1 al 6 pasaron a ser: 1,26; 0,75; 0,79; 1,56; 1,29 y 0,72 respectivamente.

# Mapa de distribución de nodos de RNA

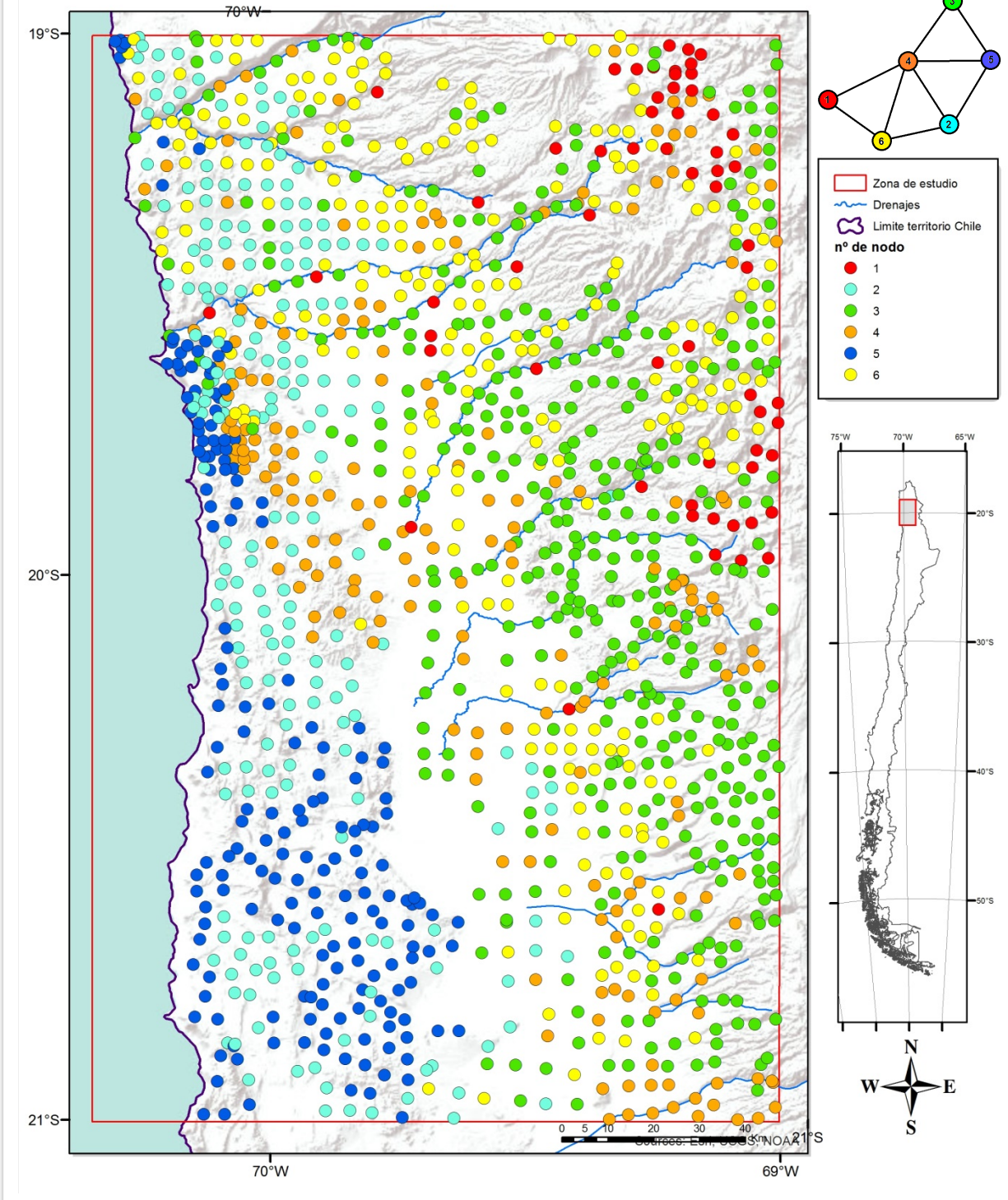


Figura 4-3: Mapa de distribución espacial de los nodos obtenidos en la RNA. La topología de la RNA se muestra en la esquina superior derecha.

Tabla 4-4: Elementos con factor de enriquecimiento >1,1. En negrita se señalan los elementos que adicionalmente presentan un valor igual o superior a (promedio regional + desviación estándar). Los valores que se encuentran subrayados, son considerados outliers según *box-plot* "factor de enriquecimiento vs nodo". El asterisco (\*) indica los elementos del nodo 4 que serán incluidos por el recalclo de la desviación estándar en ese nodo en las discusiones de este trabajo.

nº nodo	Elementos con factor de enriquecimiento mayor a 1,1
1	<u>V</u> , <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>TiO<sub>2</sub></b> , <b>MnO</b> , <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>Co</b> , <b>Hf</b> , <b>Zr</b> , <b>Sc</b> , <b>Cs</b> , <b>Ga</b> , <b>Nb</b> , <b>Sn</b> , <b>Ta</b> , <b>Th</b> , <b>U</b> , <b>W</b> , <b>LREE</b> , <b>HREE</b> , <b>Pb</b> , <b>Zn</b> , <b>Ni</b> , <b>As</b> , <b>Sb</b> , <b>Bi</b> , <b>Hg</b> .
2	<u>CaO</u> , <u>TOTAL S</u> , <u>Mo</u> , <u>Au</u> , <u>Se</u> , MgO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Sr.
3	<b>SiO<sub>2</sub></b> , <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>K<sub>2</sub>O</b> , <b>Ba</b> , <b>Cs</b> , <b>Rb</b>
4	<u>Cu</u> , <b>Cs</b> , <b>As</b> , <b>Sb</b> , <b>Bi</b> , <b>Hg</b> , <b>Tl</b> , <b>W*</b> , <b>Cd*</b> , <b>Ag*</b> , <b>K<sub>2</sub>O</b> , <b>Rb</b> , <b>Sn</b> , <b>Th</b> , <b>TOTAL C</b> , <b>Mo</b> , <b>Pb</b> , <b>Zn</b> , <b>Ni</b> , <b>Au</b> .
5	<u>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></u> , <b>CaO</b> , <b>TOTAL S</b> , <b>Cd</b> , <b>MgO</b> , <b>MnO</b> , <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>Sc</b> , <b>Hf</b> , <b>Sr</b> , <b>U</b> , <b>Zr</b> , <b>TOTAL C</b> , <b>HREE</b> , <b>Mo</b> .
6	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>MgO</b> , <b>TiO<sub>2</sub></b> , <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>Co</b> , <b>Ga</b> , <b>V</b> , <b>Ni</b> , <b>Be</b> .

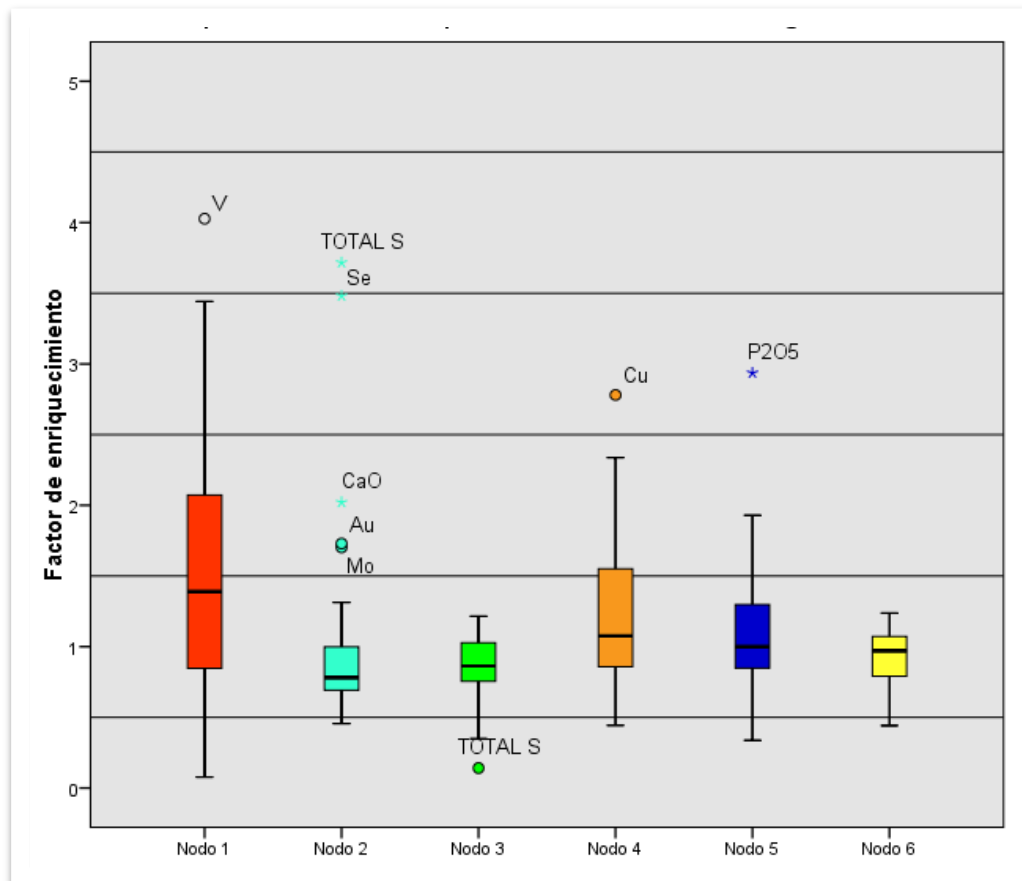


Figura 4-4: Gráfico de Caja para los factores de enriquecimiento correspondiente a cada nodo. Destacan con un asterisco los valores considerados atípicos extremos y con un círculo los valores atípicos leves. Realizado en software SPSS versión 21.

## 5. DISCUSIONES

### 5.1. Control de calidad (QAQC)

Considerando los datos disponibles, que comprenden los duplicados de muestras generados en terreno, es posible obtener cuantitativamente el error asociado a la suma de todo el proceso de muestreo en terreno y análisis de laboratorio. Así, el error relativo medio es el valor que representa el error total. Los resultados de los duplicados hechos en laboratorio para un subconjunto de muestras, permitirían calcular el error asociado netamente al análisis en laboratorio y sería posible saber con certeza el sesgo asociado a cada etapa.

Tal como se señaló en el capítulo de resultados, son 14 los elementos que presentan error total mayor al 20%, porcentaje que se considera como cota máxima aceptable de error para tener total fiabilidad de los datos en este trabajo (Tabla 4-1). Estos valores tan altos se explican básicamente por:

1. Gran porcentaje de datos asociados a estos elementos no alcanzan a superar el límite de detección inferior o toma su valor mínimo. (Para aquellos datos menores al límite de detección, se le asignó la mitad de ese valor.)
2. Una importante cantidad de los datos apenas supera el límite de detección, rango en el cual la resolución del equipo es bastante gruesa y por tanto, pequeñas variaciones pueden generar grandes errores asociados.

Así por ejemplo, para el original y duplicado de una muestra se obtienen valores por 0,5 ppm y 1 ppm en berilio (Be). El valor 0,5 fue asignado debido a que la muestra no presenta una concentración mínima detectable por el equipo de análisis. Aunque estos valores para fines prácticos son idénticos, su error estadístico asociado es cercano al 47% y por tanto aportan gran cuota de error para cuando se realiza el cálculo de error total, en conjunto con los demás pares de duplicados.

El respaldo de los gráficos de diferencia relativa versus promedio (anexo de Calidad de datos (QAQC)) muestran que los mayores errores se asocian con muestras que bordean el límite de detección, no así los valores que se despegan de ese mínimo detectable. Por ejemplo, para el azufre (S) rara vez se supera el 20% de error cuando

se sobrepasan el 2% de concentración total, mientras que para valores menores al 2% es común encontrar errores que superan el 50% entre pares, incluso llegando a cerca del 160% de error.

La observación de los gráficos de diferencia relativa absoluta versus porcentaje de datos, muestra que los 14 elementos con errores mayúsculos, poseen un gran porcentaje de datos con diferencias relativas altas, asociados, mayormente a muestras que bordean el límite de detección.

Los análisis anteriores permiten esclarecer que no necesariamente todos los datos asociados a los elementos que poseen error total superior al 20% son descartables. De esta forma, se establece una notoria diferencia en la fiabilidad de los datos cuando su valor ronda el límite de detección inferior del análisis, dándoles un valor cualitativo incierto y cuantitativo poco preciso. Por otra parte se descarta la posibilidad de que esos errores mayúsculos también estén asociados a valores que se alejan considerablemente del límite de detección inferior y por tanto, no deben ser omitidos de los análisis.

Los gráficos Q-q y de dispersión muestran una correlación satisfactoria entre las distribuciones de las muestras originales y duplicadas (excluyendo de los que poseen error total mayor a 20%), acercándose en su gran mayoría a la ecuación  $Y=X$  (ideal). La excepción se presenta en los gráficos asociados a Eu, Sm, Pr, Ho, Dy, Tb, Gd, Lu, Yb, Tm, Er, debido a que, presumiblemente, una muestra original (GQ-12-PC-124) debió presentar una incorrecta manipulación y posterior resultado impropio, ya que la diferencia con su duplicado (GQ-12-PC-125) es abismante (varios ordenes de magnitud de diferencia) y suficiente para generar un desbalance en la regresión lineal general. De omitir ese par de muestras en los duplicados, el comportamiento de estas tierras raras sería satisfactorio para los gráficos Q-q y de dispersión.

Finalmente, los resultados asociados al test t-student fueron satisfactorios para todos los elementos analizados, presentándose todos dentro del rango de confianza y por tanto, esta prueba no genera mayor especulación respecto a sesgos mayúsculos asociados a los pares de duplicados.

## **5.2. Redes neuronales artificiales (RNA)**

### **5.2.1. Segmentación geoquímica regional**

Los resultados muestran evidentes contrastes geoquímicos entre los distintos nodos. Realizando una inspección visual de la distribución regional que adquieren los 6 nodos obtenidos en la zona de estudio, y comparando estos resultados con los obtenidos en los mapas univariados, es posible definir una segmentación geoquímica que se correlacionan con la definición de unidades geomorfológicas regionales como la Cordillera de la costa (CC), Depresión intermedia (DI), Precordillera (PR) y Cordillera occidental (CO). La excepción la establece el nodo 4, el cual será estudiado con posterioridad, puesto que establece una diferenciación respecto a los demás nodos.

#### **5.2.1.1. Cordillera de la Costa**

En principio, la asociación de los nodos 2 y 5 se manifiesta al encontrarse topológicamente contiguos en la red neuronal artificial resultante (Figura 4-2), y por constituirse espacialmente dentro de la zona de la CC que comparte características en común en toda la extensión de la zona de estudio. En efecto, ambos nodos se constituyen casi en su totalidad en la CC, además de una pequeña cantidad de muestras que se encuentra en el área occidental de la DI (Figura 5-1). La mayor parte de las muestras en la CC corresponden a compósito de sedimentos de drenaje y subordinado compósito de pampa, mientras que en la DI predomina el compósito de pampa. Esto es una muestra cualitativa clara de la total ausencia de cursos de agua o eventos fluviales recientes en toda la CC en esta zona. La hiperaridez imperante ha generado una baja tasa erosiva, y por tanto los relieves han sido meteorizados in situ y cubiertos por sus propios detritos (Allmendinger, 2005; Carrizo, 2008), siendo la litología local la fuente más importante de aporte a la señal geoquímica rastreada en el muestreo, pero no la única que se reconoce.

**El nodo 2** se encuentra distribuido de forma homogénea en gran parte del dominio correspondiente a la CC y parte de la DI extendiéndose aproximadamente 50 km desde la línea de costa hacia el este, con un GAP local hacia los 20°30'S. Destacan las concentraciones anómalas positivas de calcio (Ca), azufre (S), molibdeno (Mo), oro (Au) y selenio (Se) (Figura 4-4). Lo secundan las anomalías no tan marcadas de magnesio



(Mg), fósforo (P) y estroncio (Sr). En efecto, los valores con mayores anomalías regionales de estos elementos pertenecen en gran parte al nodo 2 y también al nodo 5. Esto se evidencia al analizar los mapas univariados (en anexo más adelante) y compararlos con los resultados obtenidos con RNA (Figura 5-1).

Por otra parte, **el nodo 5** se constituye totalmente en la CC con una distribución poco homogénea entre los 19°S y 20°S, concentrándose principalmente en dos zonas: la primera cercana a Pisagua (que posee una densidad mayor de muestreo) y la segunda, en la zona norte rondando los 19°S. Entre los 20°S y 21°S su distribución espacial es más homogénea e incluso define el borde oriental de la CC a esta latitud. Este nodo se caracteriza por presentar como principal anomalía positiva el fósforo (P), destacando fuertemente por sobre los demás elementos anómalos. Así, también se presenta una redundancia de elementos anómalos con el nodo 2. Es el caso de calcio (Ca), estroncio (Sr), además de cadmio (Cd) (Tabla 4-4 y Figura 4-4).

Existe una cantidad no menor de factores ambientales y geológicos que coexisten en la CC, que podrían explicar las anomalías que se evidencian en la geoquímica de sedimentos. Entre estos factores se considera: litología de la región y mineralogía, ocurrencia de costras salinas, el periódico aporte de set de iones desde el océano pacífico hacia el continente por medio de niebla (camanchaca), abundancia relativa de iones transportados, productos de meteorización (arcillas, óxidos e hidróxidos) con capacidad de captación de iones contenidos en aerosol, afinidad química entre elementos, proceso acumulativos de facies minerales pesadas por deflación eólica y condición ambiental de hiperaridez, entre otros .

## Mapa de distribución de nodos 2 y 5

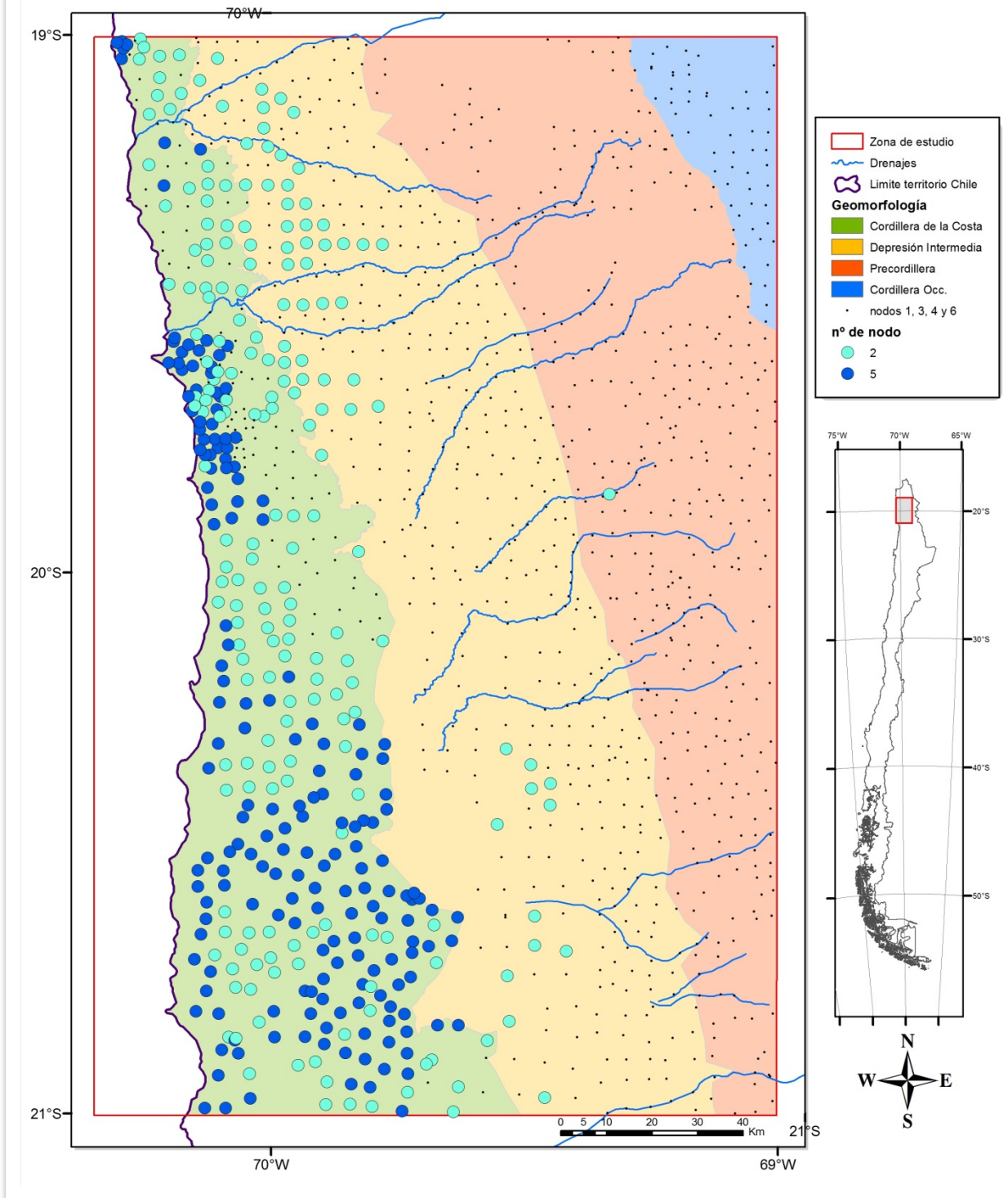


Figura 5-1: Mapa de distribución espacial de las muestras correspondientes a los nodos 2 y 5. Se observa una preferencia en su distribución contenida en gran parte por la CC y unas pocas muestras en la DI.

## **Anomalías de azufre, calcio, magnesio y estroncio**

Las altas concentraciones de algunos de los elementos que predominan en los nodos 2 y 5 en la CC, entre los 20° y 21°S, como S, Ca, Sr y Mg fueron interpretados por Lacassie *et al.* (2012a), quién consideró que estas anomalías son un reflejo de:

- La influencia litológica de la zona, que se compone de forma importante por rocas sedimentarias marinas carbonatadas.
- La ubicua ocurrencia de costras salinas en la zona, incluyendo percloratos, yodatos, nitratos, halita, yeso y anhidrita (Chong, 1999; Clarke, 2006).
- La captación de iones desde el aerosol marino (camanchaca), mecanismo que se ha estimado como responsable de hasta el 70% de la concentración de Ca y Sr de la cubierta sedimentaria en ambiente hiperárido (Capo y Chadwick, 1999).

Respecto al último punto, se correlacionan de buena forma, las alturas que alcanza la camanchaca, que ronda los 1.000 msnm, con la altura promedio de la CC, por cuanto esta unidad geomorfológica está siendo constantemente cubierta por este fenómeno atmosférico y constituye una eficiente barrera a la penetración de humedad hacia el desierto interior. No obstante, perturbaciones atmosféricas en la costa producen periódicas entradas de camanchaca hacia el interior (Vargas, 2000).

Los resultados de RNA del estudio de Lacassie (2012b) muestran la asignación de un par de nodos específicos para la CC. Se consideraron como elementos anómalos en estos nodos a Na, P, S, Ca, Sr y Se. A su vez, esto último coincide con lo que se aprecia en este estudio; nodos 2 y 5 dominantes en toda la CC. Los resultados obtenidos mediante RNA en ambos estudios, la observación de la continuidad de las litologías y considerando las características climatológicas idénticas, refuerza la idea que, las apreciaciones hechas entre los 20°S y los 21°S son, al menos, extensibles hacia el norte por toda la CC hasta los 19°S.

Por otra parte, el trabajo de Schemenauer y Cereceda (1992) muestra análisis en zonas costeras de la IV región, en donde se exponen importantes antecedentes de la composición elemental que posee como carga iónica la niebla oceánica (camanchaca) y también el *background* del aerosol sin camanchaca. Muestra que en las

concentraciones de iones solubles presentes en el suelo<sup>3</sup>, aerosol y camanchaca, existe una directa relación entre las concentraciones de elementos de la camanchaca y el aerosol, y también una relación en la concentración de los iones solubles presentes en el suelo y la camanchaca, aunque esta última no es tan directa.

**Tabla 5-1: Abundancia relativa de iones en soluciones provenientes de suelo, aerosol y niebla (camanchaca) en cerro El Tofo, IV Región, Chile Los primeros cinco puestos de abundancia relativa están dentro del mismo orden de magnitud, mientras que los demás tienen un orden de magnitud menor. Modificado de Schemenauer y Cereceda (1992).**

Abundancia relativa	Iones (ppm)		
	suelo	aerosol	Camanchaca
1	Ca	Cl	Cl
2	Mg	Na	SO4
3	Na	SO4	Na
4	Cl	NO3	NO3
5	K	Ca	Ca
6	SO4	Mg	NH4
7	NO3	NH4	Mg
8	NH4	K	K
9		Br	Br

Como antecedente se señala que en la zona muestreada por Schemenauer y Cereceda (1992) existen eventos fluviales periódicos, que en un año normal acumulan un total aproximado de 75 mm/año<sup>4</sup> (en ciudad La Serena). Por otra parte, es posible asumir que la concentración iónica que posee la camanchaca es idéntica o al menos preserva la señal química en la IV y la I región, esto debido a que básicamente provienen de la misma fuente oceánica<sup>5</sup>.

La Tabla 5-1 muestra la abundancia relativa de iones en soluciones provenientes del suelo, aerosol y camanchaca recolectada en la IV región por Schemenauer y Cereceda (1992). En este contexto, destacan las altas concentraciones de S, Ca y en menor

---

<sup>3</sup> El suelo fue lavado con agua destilada y la solución resultante se sometió a análisis químicos.

<sup>4</sup> Dirección meteorológica de Chile [consulta: octubre, 2013] <<http://www.meteochile.cl/precipitacion.html>>

<sup>5</sup> Propiedades del agua de Mar [consulta: octubre, 2013]

<[http://www7.uc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/h32.html](http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h32.html)>

medida de Mg. Además, se evidencia un exceso de sulfato ( $\text{SO}_4$ ) en las aguas de atrapanieblas de la camanchaca, así como también registros de pH ácidos de hasta 3,46.

Schemenauer y Cereceda (1992) sugieren que al menos gran parte de Na, y Mg presente en los sedimentos dejados por el aerosol provendría directamente de fuentes oceánicas, aunque no se reconoce como la única fuente de aporte de elementos.

De la Tabla 5-1 se extrae que, por la similitud de abundancia relativa de los elementos contenidos en suelo y camanchaca, posiblemente los sedimentos de suelo del sector sufren una importante influencia de los iones presentes en la camanchaca y viceversa. Esta carga iónica sería captada en sedimentos, por medio de: 1.- retención y acumulación en superficie de sedimentos remanentes post evaporación de rocío de camanchaca, 2.- abundancia de arcillas, 3.- facilidad que poseen los sedimentos finos como arcillas, óxidos e hidróxidos de Fe y Al de captar elementos gracias a su alta superficie específica<sup>6</sup> y la gran cantidad de sitios activos para adsorción.

Así también, la concentración de iones solubles captados por los sedimentos sería diluida periódicamente, debido a que en estas latitudes se presentan lloviznas ocasionales. Se propone entonces que estos eventos fluviales generarían un efecto de lavado y transporte de iones solubles captados del aerosol y la camanchaca, lo que sumado al aporte intrínseco de iones por parte de la litología, generaría las diferencias en las abundancias relativas existentes entre suelo y el aerosol-camanchaca.

En esta línea, si este mismo efecto de captación y acumulación ocurriera en la zona estudiada en el presente trabajo, se puede inferir que el efecto de lavado de sedimentos se ausentaría completamente debido a las condiciones existentes de hiperaridez en la CC y la consecuente nula presencia de eventos fluviales, favoreciendo la acumulación de los iones captados de la camanchaca en los sedimentos meteorizados insitu; arcillas, óxidos e hidróxidos. Esto permitiría explicar la concentración acumulativa de la carga iónica presente en el aerosol marino por captación en los sedimentos, al menos para S, Ca y Mg. Considerando el tiempo que ha transcurrido con las condiciones aptas

---

<sup>6</sup> Cociente entre área superficial y volumen ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) o área superficial y masa ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )

para la captación y acumulación de iones de la camanchaca en los mismos sedimentos superficiales, se puede considerar que la señal geoquímica rastreada en la CC, con las respectivas anomalías de S, Ca y Mg, estarían reflejando en parte importante este mecanismo.

Es menester mencionar que llama la atención la ausencia de una anomalía importante de sodio (Na) en los nodos 2 y 5, pues contrasta con la aparición de las demás anomalías que son posibles explicar según el estudio de Schemenauer y Cereceda (1992). El Na en este par de nodos se mantiene dentro del promedio regional (Tabla 4-3). Esto se debería a que dentro de los protocolos establecidos para el muestreo de sedimentos, se evitó el muestreo de costras salinas o sedimentos con grandes cantidades de sales, que es donde se acumularía preferentemente el Na.

### **Fuentes de azufre en camanchaca**

Analizando un caso específico, la disponibilidad y abundancia de azufre en la camanchaca fundamentalmente proveniente del océano. Cada año, se calcula que al menos  $44 \times 10^6 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$  de azufre son emitidas desde el océano a la atmósfera, y que cerca del 10% es depositada en los continentes, aunque estas cantidades varían según autor. El transporte específico de S desde el océano a tierra es de aproximadamente  $15 \times 10^6 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$ . Por otra parte, estudios de isótopos de S en lluvias versus agua de océanos ha demostrado que el aerosol oceánico es una importante fuente de este elemento que se deposita en tierra (Brown, 1982), aunque no solo en zonas costeras.

Grandes cantidades de *sulfuro de hidrógeno* ( $\text{H}_2\text{S}$ ) al igual que cantidades menores de otros gases de S como *methane thiol* ( $\text{CH}_3\text{SH}$ ), *dimethyl sulfide* (DMS), *dimethyl disulphide* ( $(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$ ), *carbonyl sulphide* (COS) y *carbon disulphide* ( $\text{CS}_2$ ), son producidas por bacterias y fitoplancton marino. La parte de los compuestos atmosféricos de S sufren complejas reacciones químicas y fotoquímicas, en donde la gran mayoría termina formando fundamentalmente sulfato ( $\text{SO}_4$ ); el  $\text{H}_2\text{S}$  posee una vida media atmosférica de algunas pocas horas y es oxidada a  $\text{SO}_2$ , y este último es nuevamente oxidado a  $\text{SO}_4$  (Kellogg, 1972 citado por Brown, 1982). Por otro lado, y aunque también se reconoce que los suelos de continente pueden emitir gases de S, existen estudios que concluyen que los suelos son más probablemente depósitos de

SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S que una fuente (Smith *et al.*, 1973; Bremner y Banwart, 1976), por lo que es presumible una acumulación de estos elementos en suelos si se dan las condiciones ambientales adecuadas.

Complementando lo anterior, un porcentaje no menor del azufre presente en el aerosol marino podría formar parte del complejo DMS. El DMS se ha reconocido como el compuesto de azufre volátil más abundante en aguas oceánicas, siendo sintetizado profusamente por el fitoplancton marino (Andreae y Raemdonck, 1983), y luego de ser liberado a la atmósfera, sufre la oxidación fotoquímica que como producto genera SO<sub>4</sub>, entre otros productos<sup>7</sup>. Además, las concentraciones de DMS en aguas costeras son sustancialmente mayores que en aguas de mar abierto (Turner, 1988) y, finalmente, se ha reconocido que DMS actúa como uno de los principales núcleos de condensación de nubes (Charlson, 1987) por cuanto, parte de las pequeñas gotas que componen la camanchaca podría tener como núcleo precursor a esta molécula.

En síntesis, todas estas evidencias explicarían que el exceso de sulfato monitoreado por Schemenauer y Cereceda (1992), y que posteriormente sería adsorbido y acumulado en los sedimentos superficiales, tendrían como fuente el océano, gatillado por la acción de microorganismos en suspensión y en sedimentos oceánicos. Es así entonces como se reconoce la estrecha relación que existiría entre la micro-biota oceánica, la atmósfera y la geoquímica de sedimentos en la CC.

### **Anomalía de fósforo**

La anomalía de fósforo (P) se encontraría casi exclusivamente asociado a la presencia de apatito [Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(F,Cl,OH)], aunque también se sabe que forma parte de estructura cristalina de la monazita [(Ce,La,Nd,Th,Sm)(PO<sub>4</sub>,SiO<sub>2</sub>)], xenotima [YPO<sub>4</sub>], huesos y está en trazas en minerales como olivino, piroxenos, anfíbolos y micas. La monazita y xenotima poseen las condiciones para que ocurra su concentración gravitacional debido a sus altas densidades de fase mineral (4,4 a 5,1 gr/cm<sup>3</sup> y 4,6 a 5,7 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente), alta resistencia abrasiva y resistencia química a la meteorización (Maksaev, 2001).

---

<sup>7</sup> Davis (1999) presenta un esquema completo de todas las reacciones y especiaciones a la que es sometido el DMS.

La anomalía de fósforo en zonas expuestas a la acción eólica, localizadas de la CC, podría deberse a la concentración de apatito y xenotima subordinada. La xenotima se estima como posible mineralogía de la zona, asociada a rocas intrusivas, debido a que existe una correlación local muy fuerte entre la anomalía de fósforo e itrio (Y), a la vez que también existe una anomalía de escandio (Sc) en esa zona, que suele ser un elemento traza dentro de la xenotima. El apatito se considera una posibilidad cierta que explicaría la anomalía en su calidad de mineral accesorio de rocas intrusivas y por encontrarse registro de su presencia en el trabajo de Blanco *et al.* (2012) (ej: Monzonita Cerro Vetarrón, Complejo intrusivo Cerro Carrasco, Complejo intrusivo Punta Negra). Por otra parte, se duda del aporte de monazita en la anomalía de fósforo por no reportarse importantes concentraciones de LREE en la zona, asociadas a su estructura cristalina (Ce, La, Nd, Sm). Finalmente, se descarta el posible efecto de depósitos de guano (mena de fosfatos), por presentarse solamente en la línea costera, bajo el acantilado (Gajardo, 2000).

El efecto acumulativo de las fases minerales pesadas por deflación eólica en la CC, en zonas donde se concentran las muestras del nodo 5, también se vería en parte reflejado en las anomalías positivas de MgO, MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc, Hf, Zr. En particular, las anomalías de Hf y Zr son indicativas de concentración de zircón. En fases avanzadas de meteorización el Cr se adsorbe en óxidos de Fe y Al. Cuando el Sc es expuesto al ambiente, la adsorción por arcillas y residuos orgánicos son el principal control de su concentración.

### **Anomalía de selenio**

Existe un gran contraste geoquímico de selenio (Se) si se compara la CC y el resto del territorio. El selenio es un elemento no metálico calcófilo, que tiene grandes similitudes químicas con el azufre (S) (también con fuerte anomalía positiva en la CC), por lo que actúa frecuentemente como reemplazante de este, típicamente en sulfuros como pirita, calcopirita, pirrotina y blenda. Adicionalmente, se ha demostrado que cierta especiación de selenio (selenato SeO<sub>4</sub>), poseen comportamiento similar al sulfato (SO<sub>4</sub>) en los adsorbentes de hidróxidos de Fe y Al (Wijnja, 2000), y por tanto se reconoce como un importante factor de concentración de selenio, la adsorción en superficie por hidróxidos y arcillas, que abundan en la CC. El Se atmosférico que se sería captado por las arcillas



tendría su origen, al igual que el azufre (S), en el océano debido a la acción biológica de microorganismos presentes en los océanos, tanto en suspensión como en los sedimentos marinos (Mosher y Duce, 1987; Velinsky y Cutter, 1991).

Las zonas que muestran una marcada diferencia en la señal geoquímica de la CC son parte de las grandes incisiones de las cuencas exorreicas que cruzan esta unidad geomorfológica de este a oeste. Además se reconoce un par de muestras que fueron asignadas a otros nodos y que se encuentran en zonas de pampas en la CC. Es fácil entonces comprender que para estos casos específicos, la impronta geoquímica reflejada se debe fundamentalmente a otros factores, diferentes a los ya descritos y que se especificarán más adelante.

#### **5.2.1.2. Depresión intermedia y Precordillera**

La señal geoquímica que se presenta en la DI y PR, reflejan una serie de procesos a los que son sometidos los sedimentos provenientes de las litologías de la zona, que incluyen: meteorización, erosión, transporte y concentración de facies minerales densas por deflación eólica. Cada proceso domina y/o convive con otros en zonas específicas, obteniéndose como respuesta por medio de RNA una clara diferenciación de las señales geoquímicas características. Por otra parte, la extensión que alcanza la señal rastreada en estas zonas, tendrá directa relación con el carácter endorreico o exorreico de las cuencas hidrográficas locales. En estas unidades geomorfológicas se presentan principalmente los nodos 3, 4 y 6.

**El nodo 3** tiene predominio en la zona precordillerana y buena presencia en la DI, aunque ciertamente también se presenta en la CO y en escasas zonas de la CC. Los sedimentos de la PR corresponden principalmente a compósitos de sedimentos fluviales recientes y activos, mientras que en la DI se presenta mayoritariamente en pampas y sedimentos de drenaje.

Este nodo no presenta anomalías positivas particularmente fuertes para ningún elemento y tiende a ser, junto con el nodo 6, el *cluster* con los valores más cercano a los promedios regionales de toda la zona de estudio. Los elementos con mayores

concentraciones son: silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), bario (Ba), cesio (Cs) y rubidio (Rb).

Se presume que la señal geoquímica de este nodo refleja una mineralogía formadora de roca de facies más diferenciadas, tales como cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas sódicas (albita, oligoclasa y andesita) y micas. Esto, debido a que gran parte de las muestras son de sedimentos recientes o activos ubicadas principalmente en quebradas que, en época estival periódicamente sostienen flujos de agua con abundantes detritos debido al *invierno boliviano*. Este fenómeno climatológico favorecería un cíclico y cuantioso aporte de sedimentos, que a su vez poseen bajo grado de meteorización química, debido a una alta tasa de denudación en la cordillera, y la abrupta topología. Por tanto esto mantendría parcialmente la mineralogía del protolito y con ello los minerales formadores de roca principales.

La concentración medianamente anómala de Ba, Cs, Rb y K refuerza la idea de la señal de feldespato potásico y micas; el  $\text{Ba}^{2+}$  frecuentemente sustituye al  $\text{K}^+$  debido a que presentan similar radio iónico. Adicionalmente, el  $\text{Ba}^{2+}$  también sustituye a  $\text{Ca}^{2+}$  en plagioclasas, anfibolas, piroxenos, apatito y calcita. El Cs sustituye, aunque de forma limitada, a K en feldespatos potásicos y en micas. Gran parte del Cs que está contenido en la corteza terrestre está fundamentalmente en estos 2 últimos grupos de minerales. Finalmente, el Rb reemplaza al K en micas muscovíticas y en menor proporción al K contenido en feldespatos potásicos como microclina y ortoclasas (FOREGS, 2005).

## Mapa de distribución de nodos 3 y 6

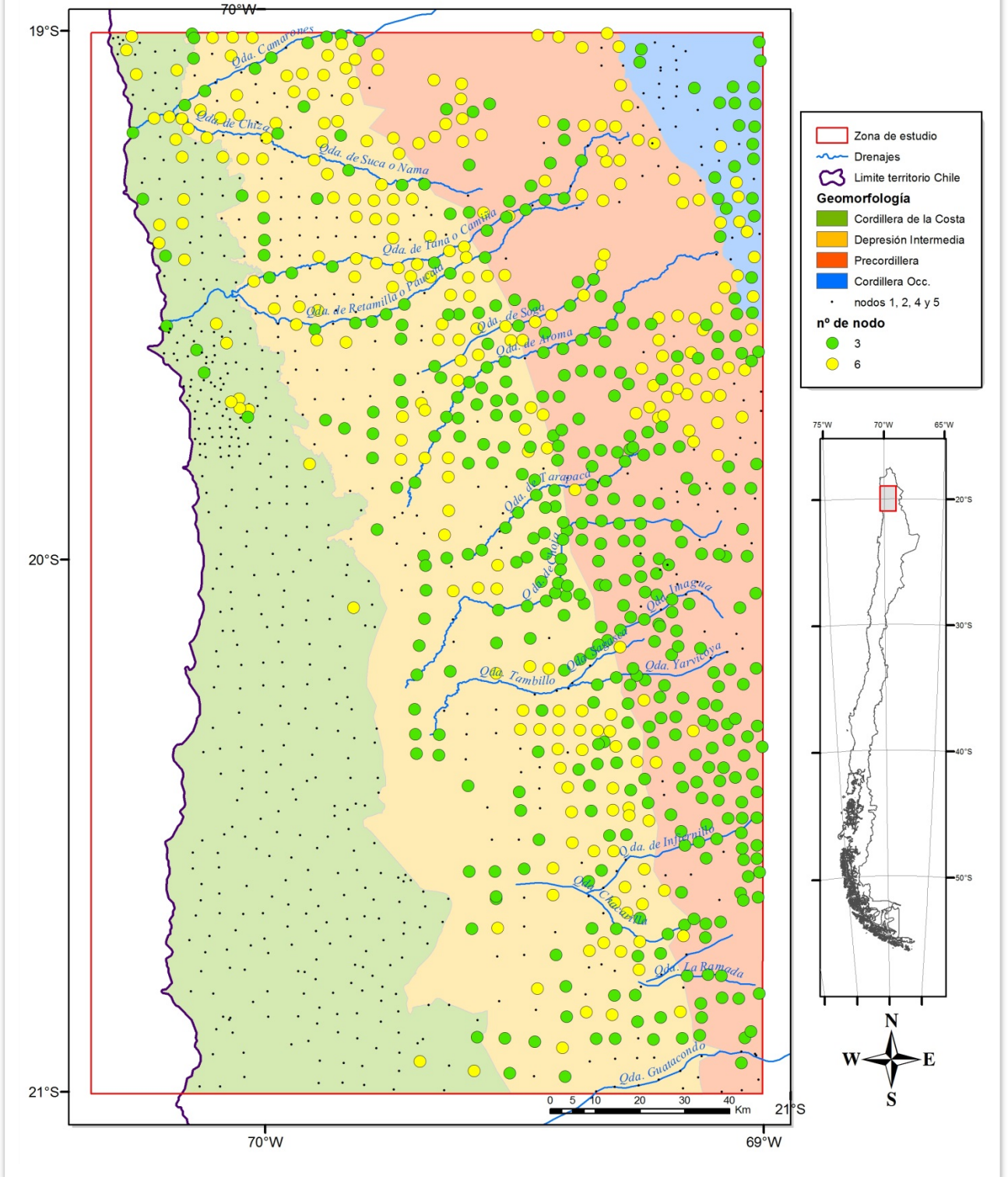


Figura 5-2: Mapa de distribución espacial de las muestras correspondientes a los nodos 3 y 6.

El nodo 3 se presenta en todas las unidades geomorfológicas, con una herencia geoquímica que llega hasta la línea costera, en el caso de las cuencas exorreicas de quebradas Tiliviche y Camarones, o que se acota a los dominios de las decenas de cuencas endorreicas más al sur. La gran extensión que alcanza la señal geoquímica del nodo 3 se debe a que los minerales muestreados serían en general aquellos que termodinámicamente se ven menos alterados por la meteorización debido a las condiciones ambientales (presión, temperatura, disponibilidad de agua, etc.). Visto en perspectiva, la serie de Bowen además de presentar una serie de cristalizaciones de distintas fases minerales según evolucionan las condiciones magmáticas (presión, temperatura y disponibilidad de elementos), por corolario, también establece que aquellos minerales que cristalizan en fases más tardías de la evolución magmática, serán más estables y por tanto perdurarán mayormente en los sedimentos generados a partir de la meteorización de la roca. Este último es el caso de la mineralogía que representa la señal geoquímica de este nodo.

En un segundo plano, destaca la fuerte anomalía negativa que tiene el azufre (S), con un factor de enriquecimiento de 0,14 (Figura 4-4). Esto se debe a que, por una parte, existiría una mineralogía empobrecida en sulfuros y sulfatos, y por otra parte, casi la totalidad de las muestras que presentan una alta concentración relativa regional de S se encuentran en la CC. En definitiva, esta anomalía negativa es una consecuencia directa de la disposición geomorfológica que poseen las muestras pertenecientes a este nodo.

**El nodo 6** se encuentra ampliamente distribuido en la DI, fundamentalmente en zonas de pampas o de escasas escorrentías superficiales recientes, y con subordinación al nodo 3 en quebradas exorreicas. En seguida, se presenta de forma importante en la zona alta de la PR entre los 19°S y 20°S e incluso en parte de la CO. Por último y de forma muy escasa, podemos encontrar muestras pertenecientes a este nodo en pampas de la CC (Figura 5-2).

Este nodo no presenta anomalías positivas marcadas (Figura 4-4), por el contrario posee un reducido rango de variación de factores de enriquecimiento, y por lo demás, el nodo con los valores más cercanos a promedios regionales. Los elementos con leves

anomalías positivas corresponden hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ), titanio ( $\text{TiO}_2$ ), cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), cobalto (Co), galio (Ga), vanadio (V) y níquel (Ni).

La señal geoquímica recogida por este nodo se asociaría principalmente a fases mineralógicas densas en los sectores muestreados. Los factores involucrados en el producto de la señal geoquímica de este nodo predominan en distintas unidades geomorfológicas y son al menos 3:

- Deflación eólica en zonas de pampas en la DI y CC, producto de los fuertes vientos y la frecuente formación de torbellinos de arena que asolan esas zonas, generando el transporte de los minerales menos densos y dejando una concentración de las fases pesadas.
- Altas tasas de erosión en la PR y CO, meteorización química escasa y episodios fluviales periódicos importantes.
- Selección y concentración por segregación gravitacional de fases minerales densas en depósitos de sedimentos producidos por escorrentías superficiales de agua que confluyen en quebradas.

En base al set de elementos medianamente anómalo, se presume que podría existir una abundancia relativa de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) y cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) entre otros minerales.

La aparición menos intuitiva de anomalías de Co, V, Ga y Ni son explicables considerando sus características químicas y afinidad mineralógica; el Co en procesos magmáticos tempranos puede sustituir a Fe y Mg, que son similares en carga (+2) y radio iónico. También es posible encontrar Co y V asociado con magnetita y otros óxidos. El Ga actúa como un elemento accesorio reemplazando a Al o Fe en anfíbolos, feldespatos, micas y arcillas, mientras que el Ni puede sustituir a Mg y Fe, y así, formar parte de minerales ferromagnesianos como olivinos, ortopiroxenos y espinela. Por lo tanto, se desprende que estas y otras mineralogías podrían encontrarse dentro de las que refleja esta señal geoquímica (FOREGS, 2005).



**Figura 5-3: Fotografía a los sedimentos muestreados en una zona de pampa en la DI. Esta muestra forma parte del nodo 6. Se aprecia la acumulación superficial de sedimentos con tonalidades más oscuras, asociadas a minerales densos acumulados por deflación eólica.**

Es menester mencionar que, al observar el comportamiento geoquímico de algunas quebrada principales que atraviesan la PR y DI, es posible apreciar la continua alternancia entre los nodos que fueron asignados a esas muestras, más específicamente, entre los nodos 3 y 6. Esta señal con patrones de tipo zig-zag sería el resultado de efectos hidrodinámicos, que genera segregación gravitacional de ciertas fases minerales de acuerdo a su densidad. En efecto, esto estaría provocando diferenciación en el tipo de sedimentos depositados en distintos segmentos de los cursos de agua, cambiando continuamente entre señales geoquímicas antagónicas, asociada a fases mineralógicas livianas y otras fases densas (Espinoza, 2013). Ejemplos de esto es la continua alternancia entre los nodos 3 y 6 que existe a lo largo de las quebradas Camiña, Soga y parte de quebrada Chiza. En la quebrada Camarones hay una alternancia entre nodo 3 y 4.

### **5.2.1.3. Cordillera occidental**

**El nodo 1** se presenta principalmente entre los 19°S y 20°S en la CO y en la alta PR, con escasa y dispersa presencia en DI (Figura 5-4). Se compone casi totalmente por muestras de sedimentos fluviales recientes y fluviales activos (Tabla 4-2).

Este nodo presenta una potente anomalía de vanadio (V), con factor de enriquecimiento 4,03. Lo secundan las anomalías positivas de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), titanio ( $\text{TiO}_2$ ), manganeso (MnO), cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), cobalto (Co), hafnio (Hf), y zirconio (Zr). Posee adicionalmente un gran set de elementos enriquecidos levemente, además de los mencionados, que se presenta en la Tabla 4-4.

El grueso de las muestras en las zonas altas se ubica en las faldas de centros eruptivos, edificios y secuencias volcánicas, como flujos de lava y depósitos ignimbríticos, pero también se presenta en zonas que además de la litología volcánica existen rocas intrusivas plutónicas y secuencias sedimentarias transicionales. En conjunto, son las fuentes fundamentales de los sedimentos en la zona de PR y CO. Esto último, junto con el cuantioso set de elementos anómalos, hace presumir que este nodo es el reflejo directo de la geoquímica de rocas frescas en los sedimentos; debido a que la zona que involucra este nodo posee una alta tasa de denudación y de producción de sedimentos, que en general, no presentan una meteorización química avanzada y por tanto se conservaría la señal geoquímica fundamental de la litología. Entre los factores que generan las condiciones para la conservación se la geoquímica de roca en los sedimentos, se reconocen algunos como:

- Las precipitaciones abundantes en la CO y parte alta de PR (Figura 1-3).
- La amplitud térmica que alcanza temperaturas bajo 0°C, que genera el congelamiento parcial de aguas lluvia en superficie de la roca, condición necesaria para que ocurra efecto de crioclastia o gelifracción.
- La topología presenta altas pendientes, facilitando el escurrimiento de aguas superficiales y subterráneas. Con esto se regula la cantidad de humedad disponible para la acción del intemperismo químico, que necesariamente requiere agua. Así también, se facilita el transporte de detritos por la inherente alta energía de los flujos.

# Mapa de distribución de nodo 1

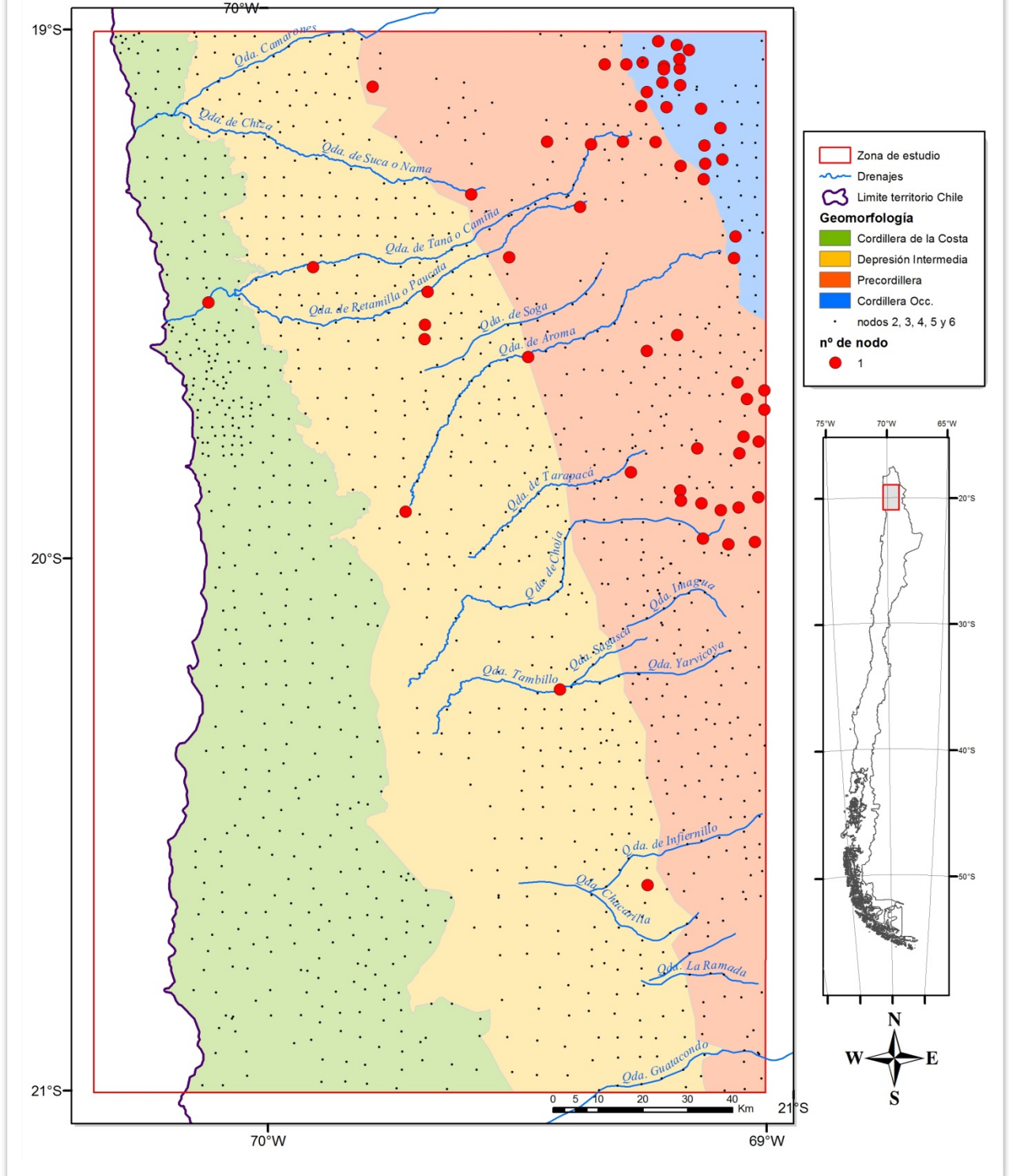


Figura 5-4: Mapa de distribución de nodo 1. Destaca su presencia en zonas altas de la PR y CO. Desde los 20°S hacia el sur, su presencia prácticamente desaparece.



En topologías abruptas y de precipitaciones frecuentes, las corrientes de agua, el desprendimiento de suelos y remociones son procesos de disgregación física muy activos, a diferencia de la meteorización química que no presenta las condiciones idóneas para su desarrollo y por tanto no es un factor influyente que genere un cambio importante en la señal geoquímica de los sedimentos<sup>8</sup>.

Desde otra perspectiva, llama la atención que inmediatamente al sur de los 20°S, desaparece completamente el rastro del nodo 1 en la PR. Al mismo tiempo se observa un importantísimo cambio en la litología, pasando de rocas sedimentarias continentales, intrusivas y volcánicas; a la cobertura signada al Mioceno medio llamada Ignimbrita Huasco, que cubre hasta los 20°45', y luego secuencias sedimentarias aluviales, fluviales y eólicas del Jurásico superior - Cretácico inferior y secuencias volcánicas continentales del Cretácico superior, hasta los 21°S. En definitiva, esta es otra evidencia que liga la impronta geoquímica del nodo 1 con las litologías locales de la PR y CO.

Las pocas muestras asignadas a este nodo que se encuentran en drenajes importantes que cruzan la DI, pueden interpretarse como herencia de la señal geoquímica proveniente de las alturas y que fueron llevadas hasta ahí por eventos de transporte de sedimentos relativamente recientes. Un ejemplo de esto ocurre en la Qda. Camarones, que mantiene escorrentías superficiales permanentemente y que posee un par de muestra, ambas de sedimentos activos, que llegan a la zona occidente de la DI e incluso una muestra se encuentra en el dominio de la CC.

Respecto a las anomalías presentadas en este nodo, la fuerte anomalía de V por sí sola, no entrega mucha información, aunque en rocas ultramáficas, el contenido de V generalmente refleja la abundancia de minerales como óxidos de Fe, Ti y Cr, además de piroxenos. En esta línea, elevados valores de V son indicativos de rocas máficas (FOREGS, 2005). Por otra parte, la anomalía de Co estaría asociada al reemplazo de Fe por Co en minerales máficos como magnetita. También se reconoce la presencia zircones en los sedimentos por la anomalía importante de Zr y Hf. Además el zircón puede incorporar otros elementos como Sc, Nb, Hf, Ti, U, Th y tierras raras, en cantidades de trazas (sobre miles de ppm), hasta incluso llegar a concentraciones del 3

---

<sup>8</sup>Geoquímica inorgánica <<http://littlebullet2.tripod.com/Paginas/geoquimica.htm> >

wt%, y puede formar soluciones sólidas, por ejemplo con hafnon ( $\text{HfSiO}_4$ ), coffinita ( $\text{USiO}_4$ ) y thorita ( $\text{ThSiO}_4$ ) (Geisler, 2007; Harley, 2007).

El nodo 1 posee una gran similitud geoquímica con el nodo 6. En efecto, esto es posible deducirlo al inspeccionar la topología resultante por RNA (Figura 4-2), en donde ambos nodos yacen conectados directamente. Esta similitud geoquímica se hace evidente al comparar ambos sets de elementos anómalos considerados en la Tabla 4-4, en donde comparten la anomalía positiva de V, Fe, Ti, Cr y Co. Por tanto, junto al caso análogo presentado en la CC con los nodos 2 y 5, se evidencia que la topología resultante en RNA presenta en ciertos casos una directa y rápida forma de entrega de información relevante para los análisis cualitativos de la señal geoquímica de cada nodo y su relación con la vecindad.

#### **5.2.1.4. Nodo 4**

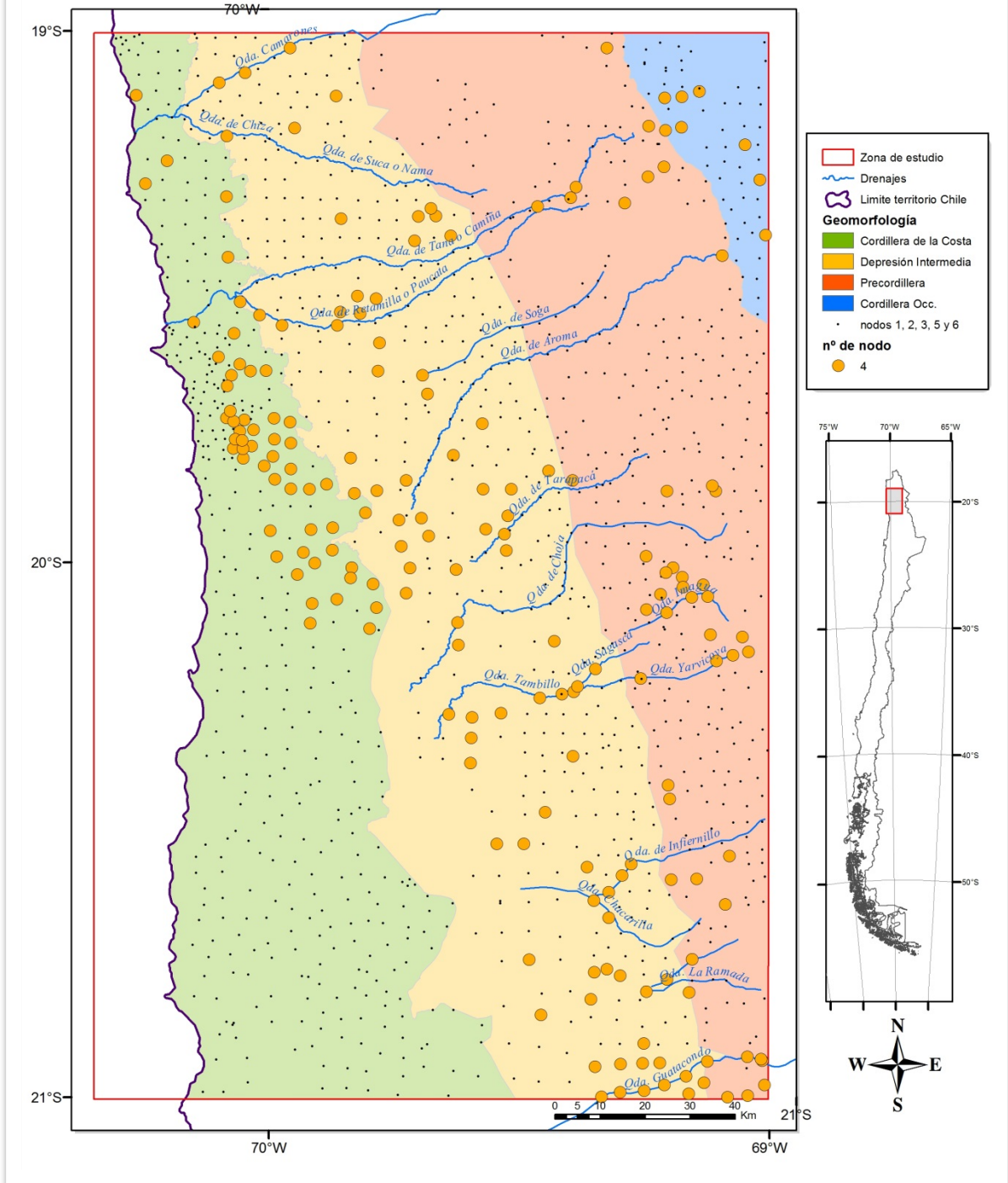
A diferencia del resto, este nodo se encuentra distribuido equitativamente en las distintas unidades geomorfológicas desde la CC hasta la CO (Figura 5-5). Dentro del dominio de la CC se ubica principalmente en la zona que comprende el corredor entre el sector suroriental del Intrusivo Pisagua y el Intrusivo Huara, sobre litologías volcánicas continentales del Jurásico y secuencias sedimentarias continentales Oligocenas - Miocenas. Adicionalmente, se reconoce en la zona gran cantidad de faenas mineras ligadas a la extracción de cobre, oro y subordinadamente plata; todas ellas de menor envergadura (Figura 3-3) y sin actividad actual<sup>9</sup>.

La distribución de este nodo en la DI es bastante homogénea, presentándose indistintamente en pampas y quebradas, mientras que en la PR y CO existen pequeños núcleos que agrupan muestras, donde destaca el área circundante a Mamiña y aquella que se presenta en la CO en la zona nororiental de este estudio. En la PR, desde Pica al sur, este nodo parece tener una continuidad por las quebradas principales hasta la DI; la olla hidrográfica que agrupa la Qda. de Infiernillo y Qda. Chacarilla tiene presencia dispersa de este nodo en su parte media y baja, al igual que la olla de Qda. Higuera y Qda. La Ramada. Finalmente, destaca el total dominio del nodo 4 en la Qda. Guatacondo y sus alrededores, llegado a las faldas del cerro Challacollo en la DI.

---

<sup>9</sup> Geoportal, del Servicio Nacional de Geología y Minería. <[www.geoportal.cl](http://www.geoportal.cl)>

## Mapa de distribución de nodo 4



**Figura 5-5: Mapa de distribución espacial de las muestras correspondientes al nodo 4.**

En las zonas de la PR donde domina el nodo 4, se presentan en general un enjambre de pequeños yacimientos, faenas mineras históricas y otras en explotación donde los

principales recursos son Cu, Cu-Au, Cu-Mo, con subordinada Ag, Pb y Zn. En la Qda. Guatacondo, río arriba del límite del área de este estudio, se encuentran una decena de proyectos mineros de Co, Mo y Au, donde destaca el desarrollo del actual prospecto Copaquire, de clase mundial.

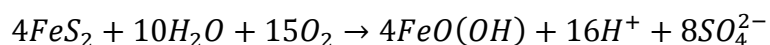
Las anomalías positivas principales del nodo 4 corresponden a: cobre (Cu), cesio (Cs), arsénico (As), antimonio (Sb), bismuto (Bi), mercurio (Hg), talio (Tl), tungsteno (W), cadmio (Cd) y plata (Ag). En este conjunto de elementos anómalos, junto con los medianamente anómalos (Tabla 4-4), se reconoce un gran set de elementos que son considerados *pathfinders* de zonas mineralizadas; ejemplo de esto son Au, Ag, Hg, Bi, Mo, Pb, Sb, Tl y Zn para ambientes epitermales; o Cu, Mo, Au, Ag, Ni, Zn, Pb y W para pórfidos cupríferos. Se observa que la ubicación espacial de este nodo reiteradamente se correlaciona con la existencia de actividad minera, y por ello se considera que en buena parte, este representa las zonas con alteraciones hidrotermales y zonas mineralizadas o en el caso de la DI, el depocentro donde se aloja el material transportado desde esas zonas. Por otra parte se observan algunos elementos que no son interpretables directamente, por lo que se proponen algunos mecanismos que permiten explicar su anomalía:

El cesio (Cs) en general no se presenta en minerales propios, sino que se encuentra como reemplazo en otros, principalmente en micas con potasio (K), como muscovita, y feldespato potásico. En efecto, al contrastar ambos mapas univariados se observa una correlación muy buena entre las muestras con alta concentración de Cs y las que tienen abundante K. También se observa una pequeña anomalía positiva de K en este nodo.

El arsénico (As) en sedimentos de drenaje, ocurre principalmente como  $As_2O_3$  y  $As_2O_5$ , aunque a bajo pH son solubles. También forma parte de sulfuros como arsenopirita ( $FeAsS$ ), oropimente ( $As_2S_3$ ) y complejos co-precipitados con óxidos de Fe. Se debe considerar que la movilidad de As es bastante limitada; las cantidades relativamente pequeñas de As que son liberadas a las aguas durante la meteorización, solo se mantienen móviles si el pH y Eh son suficientemente bajos, de otra forma, a  $pH > 2$ , es rápidamente oxidado a arseniato ( $AsO_4^{3-}$ ), que es adsorbido fuertemente por hidróxidos de Fe, Mn y Al; arcillas y materia orgánica (FOREGS, 2005). Por tanto la ubicua concentración de As en la DI se debería principalmente a procesos de adsorción y

acumulación en los sedimentos finos que son drenados desde las fuentes volcánicas en la CO, probablemente desde zonas geotérmicas o zonas de alteración.

Una posible fuente de transporte de As en sedimentos es por medio goethita coloidal que se forma por oxidación de la pirita:



La goethita coloidal posee una carga positiva neta en ambientes ácidos, lo cual le permite ligar iones complejos de arsénico por adsorción. Estos iones adsorbidos pueden permanecer como tales hasta pHs altos, del orden de 8 u 8,5 (Oyarzún, 2004).

#### **5.2.1.5. Análisis de sensibilidad de datos**

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para el set de datos, teniendo en cuenta que existen 6 muestras localizada en un mismo drenaje que presentan una concentración de cobre (Cu) que supera las 1.000 ppm, con un máximo de 6.295 ppm, ubicándose muy por sobre el promedio regional. Considerando el gran peso que poseen estas muestras para el promedio regional, se puede inferir que la omisión de estos datos podría alterar de forma sustancial el promedio regional e incluso generar variaciones en la distribución espacial final de los nodos de la RNA. En efecto, en este análisis de sensibilidad, si se omiten las muestras ya mencionadas, que representan un 0,45% del total, el factor de enriquecimiento varía desde 2,78 a 1,63 y el promedio regional decrece de 60 ppm a 45 ppm de Cu. En síntesis, el factor de enriquecimiento decrece del orden de un 40% y el promedio regional un 25%. Así, estos últimos valores parecen tener una representatividad mucho mayor para las concentraciones de Cu de toda la región del estudio. El recalcu de los factores de enriquecimiento de Cu para el nodo 4 gatilla que 3 elementos adicionales, W, Cd y Ag, sean considerados medianamente anómalos para este nodo (Tabla 4-4).

Para obtener una perspectiva más clara y certera de los cambios que puede generar la eliminación de muestras con un gran peso estadístico, se desarrolló, en paralelo, una nueva red neuronal artificial del tipo GCS. Luego se generó: 1.- cálculo de factores de enriquecimiento y *box-plot* de estos factores según cada nodo (Figura 5-6), 2.- Tabla de principales anomalías positivas para cada nodo (Tabla 5-2). 3.- Mapa de distribución espacial de nodos (Figura 5-7).

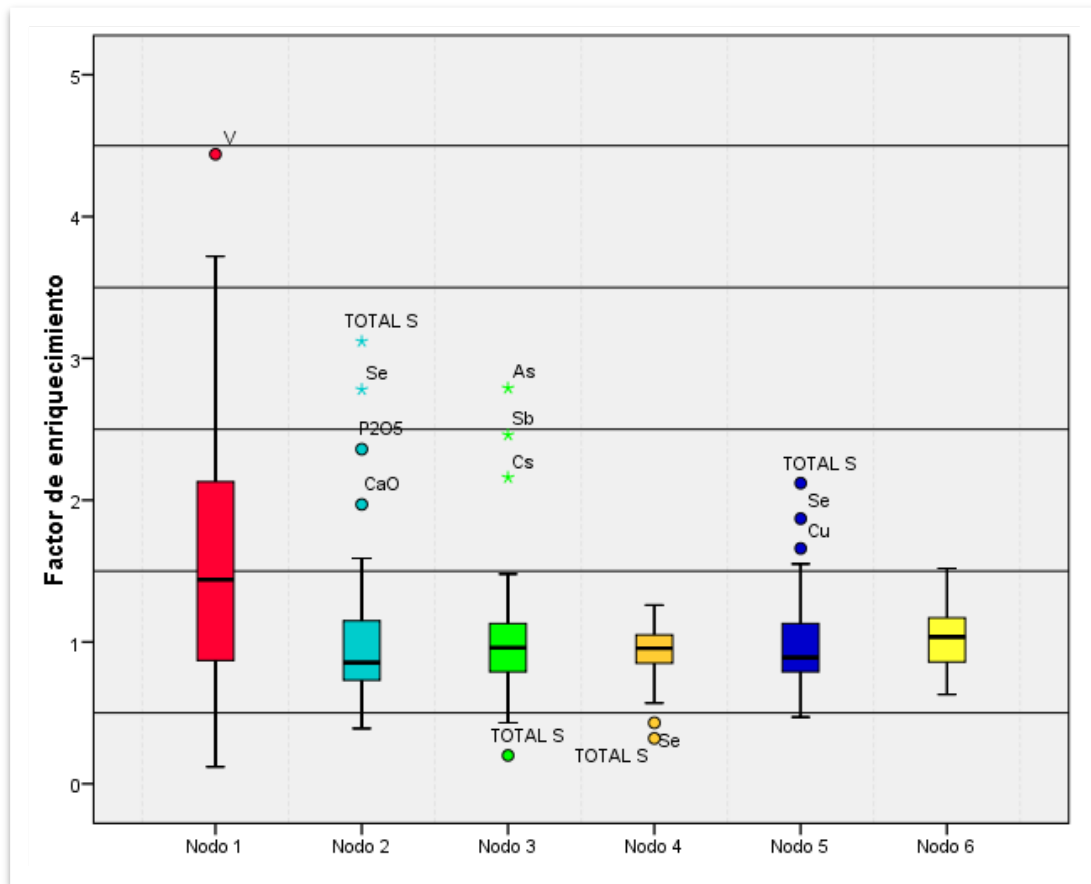


Figura 5-6: Gráfico de Caja para los factores de enriquecimiento correspondiente a cada nodo de la RNA desarrollada para el análisis de sensibilidad. Destacan con un asterisco los valores considerados atípicos extremos y con un círculo los valores atípicos leves.

Tabla 5-2: Elementos con factor de enriquecimiento >1,1 para RNA paralela. En encuentran en **negrita** los elementos con valor igual o superior a (promedio regional + desviación estándar). Los valores subrayados, son considerados outliers según *box-plot* (Figura 5-6).

nº nodo	Elementos con factor de enriquecimiento mayor a 1,1 para RNA paralela.
1	<u>V</u> , <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>TiO<sub>2</sub></b> , <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>Co</b> , <b>Hf</b> , <b>Zr</b> , MnO, Sc, Cs, Ga, Nb, Sn, Ta, Th, U, W, LREE, HREE, Pb, Zn, Ni, As, Sb, Bi, Hg
2	<b>TOTAL S</b> , <u>Se</u> , <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> , <b>CaO</b> , Au, MgO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Hf, Sr, U, Zr, TOTAL C, Mo, Cd
3	<u>As</u> , <u>Sb</u> , <u>Cs</u> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> O, Ba, Be, Ga, Nb, Sr, Ta, TOTAL C, LREE, Hg, Tl
4	K <sub>2</sub> O, Ba, Rb, W, Bi, Hg, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
5	<b>TOTAL S</b> , <u>Se</u> , <b>Cu</b> , <b>CaO</b> , <b>Mo</b> , <b>Cd</b> , MgO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Sc, HREE, Ni, Au, Tl
6	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>TiO<sub>2</sub></b> , <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , <b>Co</b> , <b>Hf</b> , <b>V</b> , <b>Zr</b> , MnO, Sc, Ga, Nb, Sn, Ta, Th, U, LREE, Ni

## Mapa de distribución de nodos de RNA para análisis de sensibilidad.

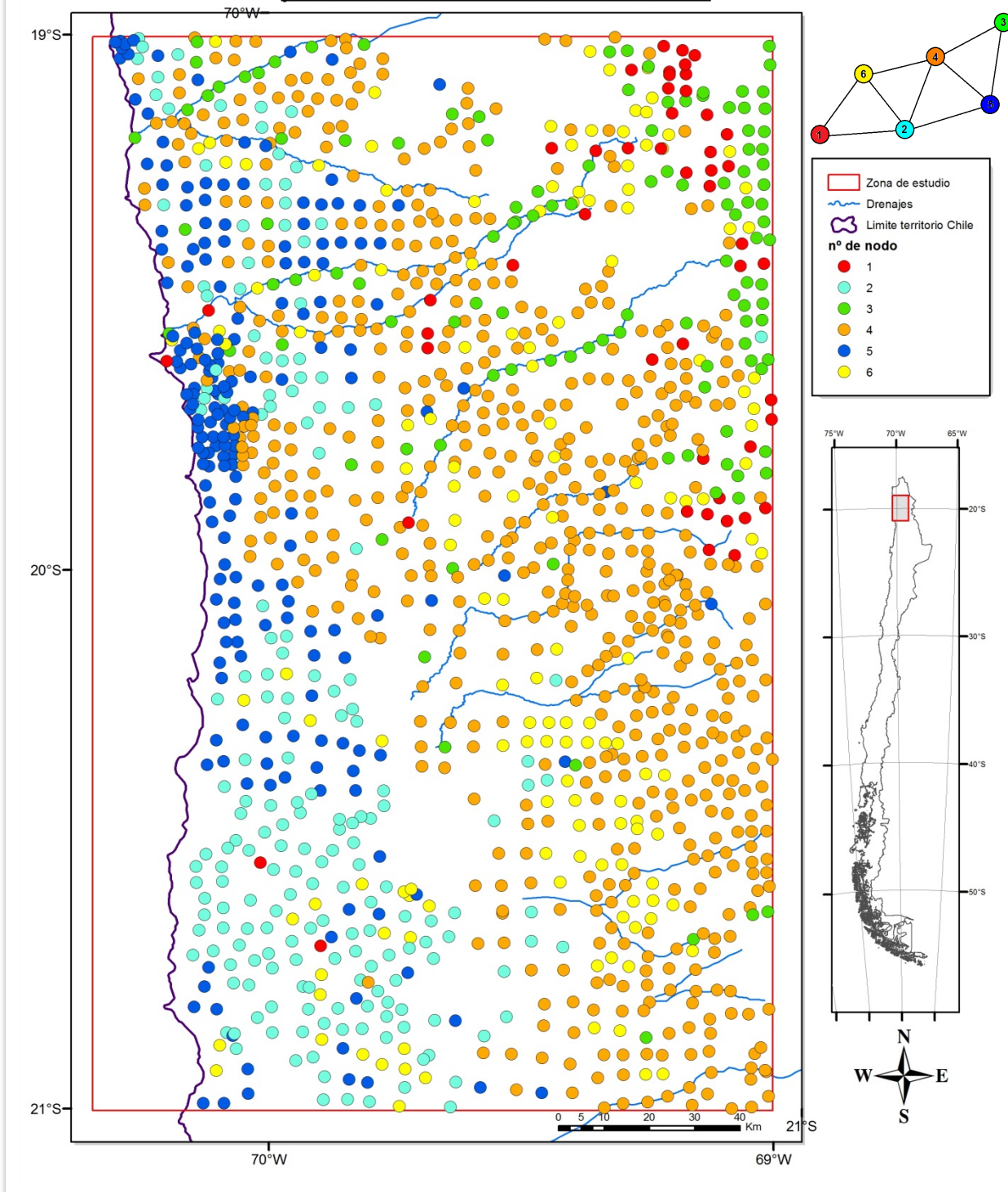


Figura 5-7: Mapa de distribución de nodos de RNA generada a partir del análisis de sensibilidad. La topología de la RNA se muestra en la esquina superior derecha.

Gracias a esta información visual y cualitativa, es posible generar algunas apreciaciones generales, de primer orden, de este análisis de sensibilidad:

- Mantención de principales anomalías y distribución geográfica de muestras relacionadas con el nodo 1.
- Mantención de principales anomalías positivas, y mantención parcial de la distribución geográfica de nodo 6. Se observa una menor cantidad de muestras asignadas a este nodo, aunque su presencia continua en zonas de pampa de la DI, PR y CO.
- Importante reasignación de anomalías para nodo 3 y pérdida de gran número de muestras asignadas a este nodo. Permite visualizar las quebradas que poseen importantes anomalías de arsénico (As) y antimonio (Sb) como Qda. Aroma, Qda. de Tana o Camiña y Qda. Camarones.
- Importante reasignación de anomalías para nodo 4. Este nodo ahora posee una gran presencia en la CC, DI y PR, en desmedro de los nodos 3 y 6. Al haber alterado tremendamente la principal anomalía que presentaba este nodo en la RNA base (cobre), era esperable un cambio importante en sus nuevas anomalías, generando a la vez una alteración en los nodos que tenían un mayor parecido geoquímico; se recuerda que el nodo 4 es un nodo común en la RNA base, encontrándose en directa relación con los demás nodos (Figura 4-2), y que en la nueva topología se encuentra en el centro de los nodos 3 y 6, que coincidentemente son los más afectados.
- Los nodos 2 y 5 se mantienen completamente segregados de los demás, manteniendo su distribución territorial; principalmente ubicados en la CC y la zona occidental de la DI. Las anomalías asociadas a este par de nodos, son, en su conjunto, las mismas, aunque se reconfiguran entre ellos. Se reasignan distintos subconjuntos de muestras pero que pertenecen al mismo conjunto que poseían los nodos 2 y 5 de la RNA base.

En definitiva, se aprecia cómo es que, con la eliminación de datos estadísticos relevantes, se puede generar un cambio notorio en los resultados obtenidos por medio de redes neuronales artificiales del tipo GCS.



Las observaciones realizadas son una aproximación a posibles nuevas implicancias y lecturas que tendría esta reconfiguración de nodos. Aunque se abre una ventana a la generación de nuevas hipótesis interpretativas, tal como se ha señalado, los factores de control geoquímico a nivel regionales mencionados en las discusiones precedentes, continuarán teniendo gran significancia y serán antecedentes necesarios a considerar en futuras investigaciones.

### **5.3. Factores antropogénicos en impronta geoquímica**

#### **5.3.1. Anomalía de molibdeno en Qda. Guatacondo**

Las principales anomalías de molibdeno (Mo) provienen de la Qda. Guatacondo, al extremo sur-oriental de la zona de estudio. Esta quebrada presenta una gran alteración antropogénica proveniente del arrastre de la señal geoquímica que brinda el distrito de Copaquire, en donde se emplazan recursos de Cu-Mo y el cual fue trabajado en épocas pasadas, hacia el 1800 aproximadamente, extrayendo alrededor de 180.000 ton de Cu @3.0%<sup>10</sup>. En efecto, SERNAGEOMIN registra una decena de faenas históricas pequeñas en esta quebrada. Actualmente se está llevando a cabo el prospecto Copaquire, que se encuentra en una etapa avanzada de exploración y estimación de recursos, que se espera entre en explotación a mediano plazo<sup>11</sup>.

Si bien la anomalía que se presenta en los sedimentos es clara, y la actividad minera prolifera, no se descarta que parte de la señal sea generada de forma natural, para lo que se debiese considerar las conclusiones de algún un estudio más acabado en sedimentos preindustriales de la zona.

#### **5.3.2. Anomalía de cobre en Qda. Sagasca**

El promedio para Cu correspondiente al nodo 4 es alto en comparación a los demás, alcanzando un factor de enriquecimiento de 2,78 y notoriamente superior al promedio regional (Tabla 4-3). Gracias a la observación del mapa univariable de Cu (en anexo

---

<sup>10</sup>Mineral Resource estimate Copaquire Project [consulta: septiembre, 2013].  
<<http://internationalpbx.com/reports/Copaquire%20Resource%20Estimate%20Tech%20Report%202009.pdf>>

<sup>11</sup> Medio electrónico Minería Chilena [consulta: septiembre, 2013]  
<[http://www.mch.cl/revistas/index\\_neo.php?id=1886](http://www.mch.cl/revistas/index_neo.php?id=1886)>

Mapas univariantes), se aprecia que las grandes anomalías, que forman una población reducida de 6 muestras, se expresan exclusivamente en la Quebrada Sagasca y que superan de forma excepcional las 1000 ppm de Cu. La concentración de Cu en sedimentos activos de la zona adyacente a la faena minera de HMC, que se sitúa en la Qda. Sagasca, presenta valores incluso 100 veces superior al promedio regional y a su vez es la máxima concentración del total de datos. En esa área, fueron advertidas eflorescencias verdosas y abundantes óxidos de hierro (Figura 5-8) que cubrían los sedimentos recientes. Esta señal de alta anomalía positiva es posible rastrearla hasta unos 35 km aproximados río abajo, en la zona de depocentro de sedimentos en la depresión intermedia.



Figura 5-8: Drenaje en Qda. Sagasca, río abajo de faena minera. Se observan eflorescencias verdosas y óxidos de hierro sobre sedimentos recientes. Esta zona obtuvo los más altos valores de Cu de la región, superando en 100 veces la concentración regional.

#### 5.4. Comparación de concentraciones con valores PEC

Se realizó la comparación de los valores obtenidos en las muestras de sedimentos de drenaje con el parámetro PEC propuesto por MacDonald *et al.* (2000). Esto se llevó a

cabo para arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni) y zinc (Zn):

**Arsénico (As):** Este elemento es esencial para algunos organismos, como los humanos, que requieren entre 12 y 25 µg diarios, pero su concentración excesiva genera efectos nocivos que han hecho que este elemento sea considerado socialmente como un veneno. Las concentraciones de As mínimas que podrían generar afecciones a la biota circundante deben superar las 33 ppm. En el mapa de distribución de concentraciones (Figura 5-9) se aprecian importantes zonas que superan el umbral de toxicidad, entre ellas varias de las principales quebradas de la zona de estudio, entre las que destacan: Qda. Camarones, Qda. Camiña o Tana, Qda. Tiliviche, Qda. Aroma, Qda. Imagua, zona alta de Qda. Yarvicoya, Qda. Guatacondo, y un área no despreciable de la Pampa de Tana y Pampa del Tamarugal. En la CC hay altas concentraciones de As desde la zona suroriental del Intrusivo Pisagua hasta el Complejo intrusivo Huara, conectando continuamente esta señal con la Pampa del Tamarugal.

La señal geoquímica de As proviene desde lo alto de la Cordillera de los Andes, específicamente de las litologías volcánicas; centros eruptivos y depósitos volcanoclásticos cenozoicos, que son drenadas periódicamente y conducidas por las quebradas afectadas hasta el depocentro en la DI.

Las altas concentraciones de arsénico, consideradas inadecuadas para el normal desarrollo de vida, podrían afectar a las poblaciones locales debido al permanente contacto con estos sedimentos y la interacción que tienen estos últimos con las fuentes de agua locales y por consiguiente, con los cultivos locales. En efecto, se ha constatado en osamentas de momias prehispánicas extraídas de la Qda. Camarones, que un importante número de ellas presenta espina bífida, condición producida por la interrupción en el proceso del cierre del tubo neural y a la que se le asocia una causa preponderantemente multifactorial y un significativo componente ambiental. En el trabajo de Silva-Pinto *et al.* (2010) se atribuye esta reiterada condición de las osamentas, a un envenenamiento natural en humanos producto del contacto constante con sedimentos y aguas con altas concentraciones de As. Cerca de un 13,5% de las

momias analizadas presentaron esta condición, a diferencia del 2,4% de momias pertenecientes a otros valles con ausencia de la contaminación natural de As.

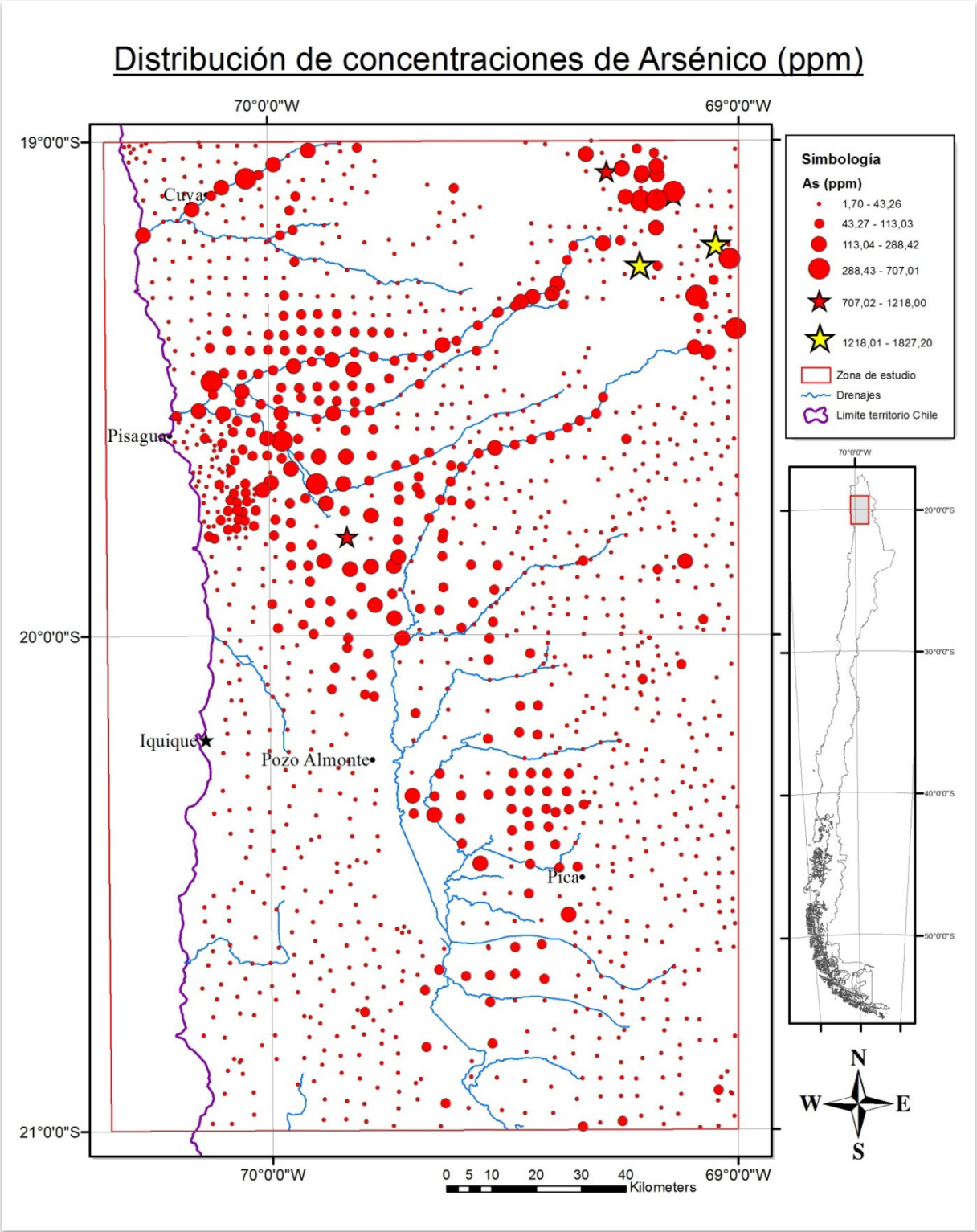


Figura 5-9: Mapa de distribución de concentraciones de arsénico (ppm).

Adicionalmente se generan interrogantes e inquietudes respecto al desarrollo de actividades agrícolas sobre sustratos sedimentarios y aguas inadecuadas para la actividad, como el caso de la Qda. Camarones por la documentada contaminación de As.

Por otra parte, y aunque es raro que la acumulación de As en plantas alcance niveles perjudiciales para los seres vivo, en general se reconocen efectos antrópicos en su concentración anómala en vegetales, debido a la aplicación de insecticidas y pesticidas que contengan compuestos de As sobre cultivos (Carbonell, 1995).

**Cadmio (Cd):** De acuerdo al mapa univariable de Cd, ninguna muestra de sedimentos superan el umbral de toxicidad, debido a que las máximas concentraciones encontradas apenas alcanzan 1,9 ppm, mientras que el umbral PEC llega a 4,98 ppm.

**Cromo (Cr):** Existen numerosos puntos donde se encuentran niveles superiores al umbral PEC para Cr, establecido en 111 ppm; se observa una importante área de la CO al noreste de la zona de estudio que presenta una quincena de muestras con altas concentraciones, todas estas dispuestas sobre edificios y secuencias volcánicas neógenas. Destaca la intermitente pero extensa señal que presenta la Qda. Camiña, en donde la última muestra que supera las 111 ppm se encuentra después de la confluencia con la Qda. Tiliviche. Esta misma intermitencia es la que muestra más al norte la Qda. Suca, que presenta altas concentraciones de Cr hasta antes de la confluencia con la Qda. Camarones; esta baja sustancial en Cr se podría deber a la dilución de la señal que porta la Qda. Suca. Avanzando hacia el sur, en la denominada Qda. de Pillani también existe una continua señal con altos niveles de Cr, en donde según SERNAGEOMIN<sup>12</sup> se registra un yacimiento pequeño de hierro (Ollarapu). También existen dispersas zonas en la CC que presentan valores superiores al PEC, pero que desde el punto de vista ambiental no representa riesgo para la biota debido a la total ausencia de vida en esas zonas. Se observa que la mayor proporción de muestras con altas concentraciones de Cr son asociadas al nodo 1 y en menor medida

---

<sup>12</sup> Geoportal. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). <[www.geoportal.cl](http://www.geoportal.cl)>

al nodo 6. Finalmente, todas ellas se encuentran lejanas a centros poblados o zonas de cultivo, por cuanto se establece que en general estas concentraciones serían de carácter natural y no representan una fuente de preocupación para la población.

**Cobre (Cu):** El cobre es un elemento fundamental para el desarrollo de la vida, pero a concentraciones muy elevadas resulta nocivo. Así es como se ha establecido que una concentración superior a 149 ppm en sedimentos resultaría potencialmente perjudicial para la vida que se desarrolla en su entorno. Desde este punto de vista, existen acotadas zonas donde se supera este umbral: El más importante se genera en la Qda. Sagasca, antes y después de las faenas mineras; en general toda esa olla hidrográfica presenta elevadas concentraciones de Cu, aunque aumentan de forma importante río abajo de las faenas. Destaca también la zona emplazada sobre el Intrusivo Pisagua, y la zona cercana al noreste de Iquique, entre los cerros Guataca y Toro. Finalmente, la Qda. Guatacondo posee altas concentraciones de Cu en toda la extensión dentro del área de estudio.

**Plomo (Pb):** Las concentraciones de plomo en general no sobrepasan el valor PEC de 128 ppm, a excepción de una muestra aislada ubicada en el nacimiento de la Qda. Choja y que se encuentra distante de cualquier zona habitada y sin una continuación de tan altas concentraciones río abajo, por cuanto no presenta ningún riesgo.

**Mercurio (Hg):** El Hg en general no presenta mayores problemas, excepto 3 casos: un par de muestras que se encuentra a 25 Km al este de Camiña en las faldas del cerro Socora, ambas con concentraciones naturales altas de 1,33 ppm, levemente superior al umbral de 1,06 ppm establecido por el parámetro PEC; una muestra que se encuentra a pocos metros de la carretera A-665 que conduce a Pica con una concentración de 2,21 ppm. Esta última podría ser el resultado puntual de desechos humanos, como algún tipo de batería que contenga óxido de mercurio.

**Níquel (Ni):** Se presentan valores superiores al umbral de toxicidad (48,6 ppm) en 2 muestras ubicadas en el nacimiento de la Qda. Camiña y una en la Qda. Maimaja que a su vez desemboca en Qda. Camiña, aproximadamente a 30 km río arriba de Camiña. Se repiten estos puntos con los que también portan una alta concentración de Cr y que también fueron asignados al nodo 1. En general no se presentan en zonas con un

desarrollo considerable de organismos vivos y tampoco cerca de asentamientos humanos por lo que este elemento no reviste mayor preocupación.

**Zinc (Zn):** Este elemento no presenta ninguna muestra con valores superiores a los 459 ppm que fija el parámetro PEC, y tampoco existen muestras que se acerquen peligrosamente a esa cifra, aunque las concentraciones relativas mayores también se presentan en aquellas con altas concentraciones de Cr y Ni.

## 6. CONCLUSIONES

Por medio de la correcta utilización de la información de línea base geoquímica proveída por SERNAGEOMIN a partir de la fracción fina de sedimentos de drenaje y la aplicación de estadísticas a los resultados, fue posible en este trabajo, integrar y contrastar la información con la generada a partir de la utilización de redes neuronales artificiales, a fin de establecer patrones geoquímicos regionales.

La confluencia de distintas aristas de este estudio; mediante el análisis de línea base, la implementación de redes neuronales artificiales (RNA) y el análisis de sus resultados; el estudio de condiciones climatológicas, el uso de *softwares* idóneos para el cruce de información georreferenciada, entre otros, permitieron evaluar la existencia de patrones geoquímicos regionales y definirlos claramente, demostrando la gran diversidad de factores involucrados. Los patrones geoquímicos regionales descritos en este trabajo son el resultado de la co-existencia de diversos factores geológicos, geomorfológicos, topológicos, hidrodinámicos, ambientales y antrópicos, que realizan un control determinante en la geoquímica de los sedimentos a nivel macro. Se identificaron procesos y fenómenos para grandes extensiones de forma general, por lo tanto estos patrones regionales podrían eventualmente variar en orden de importancia en otros estudios a menor escala.

### 6.1. Redes neuronales artificiales (RNA)

La aplicación del algoritmo *Growing Cell Structures* (GCS) fue determinante en el establecimiento de 6 nodos que agrupan muestras con características geoquímicas similares. Estos nodos, según su ubicación geográfica, los factores geológicos y condiciones climáticas, muestran una notoria segmentación geoquímica, que es evidenciada por la expresión de cada nodo en distintos dominios geomorfológicos. Distinto es el caso del nodo 4, que tiene un dominio específico.

Por otra parte, la representación bidimensional de la red neuronal artificial resultante (en anexos), permitió identificar de forma eficaz y rápida ciertas relaciones que posteriormente fueron concluidas respecto a la relación o similitud química que



presentan algunos nodos que se encuentran topológicamente contiguos y conectados con otros nodos. Tal fue el caso para el par de nodos 2 y 5; y los nodos 1 y 6.

### **6.1.1. Segmentación geoquímica**

#### **6.1.1.1. Cordillera de la Costa**

Presenta la asociación de los nodos 2 y 5, cuyos elementos enriquecidos que destacan son fósforo (P), calcio (Ca), estroncio (Sr), azufre (S) y selenio (Se). Estas anomalías son el producto de: las litologías de la zona que comprenden rocas intrusivas ácidas e intermedias, secuencias volcánicas máficas Jurásicas y dispersas rocas sedimentarias carbonatadas; el periódico aporte de iones desde el océano pacífico hacia el continente por medio de la camanchaca, la abundancia relativa de los iones transportados, la abundancia inferida de arcillas, óxidos e hidróxidos (productos de meteorización in-situ); la capacidad de absorción iónica superficial de estos últimos; afinidad química de elementos como As y Se; y condición ambiental de hiperaridez muy prolongada, que habría comenzado en el Oligoceno y profundizado hacia el Mioceno medio o tardío.

#### **6.1.1.2. Depresión intermedia y Precordillera**

Predominan los nodos 3 y 6. Cuyos elementos anómalos resultan ser completamente antagónicos.

El nodo 3, por medio de sus anomalías reflejarían la impronta geoquímica de minerales formadores de roca de facies más diferenciadas como cuarzo, feldespato potásico y plagioclasas sódicas; que son transportados desde la cordillera con un bajo grado de meteorización química debido a la alta tasa de denudación, asociada a la altura cordillerana y periódicos eventos fluviales. La extensión de su señal geoquímica hasta la CC se debe a la estabilidad termodinámica a condiciones ambientales de las facies mineralógicas que representa este nodo.

El nodo 6, de mayor presencia en pampas de la DI recogería la señal geoquímica asociada principalmente a fases minerales densas. Este resultado sería producto de la fuerte deflación eólica en pampas de DI y CC; concentración por segregación gravitacional en escorrentías superficiales y altas tasas de erosión con meteorización

química escasa en PR y CO (fuentes de sedimentos). Minerales posiblemente presentes son magnetita, hematita, rutilo, cromita.

Se observa una rítmica alternancia entre los nodos 3 y 6 en las quebradas Camiña, Soga y parte de Qda. Chiza. El efecto zig-zag sería el resultado de efectos hidrodinámicos que segregan los sedimentos conforme cambia su densidad y reflejaría el inherente comportamiento natural de flujos de agua y el transporte de los sedimentos asociados.

#### **6.1.1.3. Cordillera occidental**

El nodo 1 caracteriza a esta unidad geomorfológica al norte de los 20°S, y se presume que este es el reflejo directo en los sedimentos de la geoquímica de rocas frescas de las zonas circundantes, en su mayoría volcánicas y depósitos ignimbríticos, con subordinadas rocas intrusivas y secuencias sedimentarias. Debido a: anomalías principales (V, Fe, Ti, Mn, Cr, Co, Hf y Zr), desaparición de nodo 1 con el cambio de litología a la Ignimbrita Huasco al sur de los 20°S, precipitaciones abundantes, amplitud térmica, topología de alta pendiente que facilita la denudación y baja actividad de meteorización química. La mineralogía reflejada por esta anomalía, estaría compuesta principalmente de fases densas, como por ejemplo: magnetita, cromita, titanita, piroxenos y zircón, entre otros.

#### **6.1.2. Nodo 4**

Este nodo se encuentra distribuido en todas las unidades geomorfológicas desde la CC hasta la CO. De acuerdo a sus principales anomalías (Cu, Cs, As, Sb, Bi, Hg, Tl, W, Cd y Ag) y evidenciando la ubicación de sus muestras recurrentemente asociadas con zonas de alteración hidrotermal o actividad minera, se presume que este nodo refleja los sedimentos provenientes directamente de zonas con alteración hidrotermal y/o mineralizadas.

#### **6.1.3. Análisis de sensibilidad de datos**

El análisis de sensibilidad permitió mostrar el impacto que puede llegar a tener la eliminación de datos de gran significancia estadística para las RNAs del tipo GCS empleadas en este trabajo.

La nueva red neuronal artificial mostro cambios significativos en el ordenamiento territorial de los nodos 3, 4 y 6, alterando en gran medida los elementos considerados anómalos para estos nodos. Los nodos 2 y 5 mostraron un intercambio de muestras importantes entre ellos, por lo que su distribución espacial se vio alterada individualmente, pero en su conjunto continúan manteniendo las mismas anomalías positivas de importancia y la misma ubicación en la CC y DI. El nodo 1 no se vio alterado mayormente, manteniendo la misma distribución espacial y anomalías positivas.

## **6.2. Factores antropogénicos en impronta geoquímica**

Las principales alteraciones causadas por el hombre en la impronta geoquímica de sedimentos en toda la zona de estudio se refieren a la actividad minera. Esta se expresa fuertemente en la anomalía positiva de Cobre (Cu) causada presumiblemente por la faena de HMC ubicada en la Qda. Sagasca y la histórica alteración en la concentración de molibdeno (Mo) que posee la Qda. Guatacondo, aunque esta última también se podría deber en parte a efectos naturales, por tanto no sería una anomalía conclusivamente antropogénica, necesitándose estudios más detallados. No así en la Qda. Sagasca, donde se evidenció sedimentos atípicos derivados del derrame de relaves o algún símil río abajo de la faena minera.

## **6.3. Comparación de concentraciones con valores PEC**

Los resultados de los análisis químicos también permitieron evaluar desde el punto de vista ambiental la calidad de los sedimentos y establecer el grado de toxicidad que pudiera presentar para la biota circundante. Los elementos analizados correspondieron a arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni) y zinc (Zn). En general los sectores donde ciertos elementos como el As, Cr y Cu tienen valores superiores a lo que establece el parámetro PEC, no se encuentran poblados y tampoco se desarrollan grandes ecosistemas de organismos superiores. Se reconoce en ciertos casos el efecto que genera el lavado y transporte natural de sedimentos, junto con los efectos que habría exacerbado la industria minera para elementos como Cr y Cu. Finalmente, inquietan las altas concentraciones de As que se encontraron en la Qda. Camarones, donde se registra actividad agrícola y mayor

interacción entre la biota y los sedimentos. Existen evidencias arqueológicas que apuntan a que la contaminación natural por As en la Qda. Camarones tuvo un importante papel en el desarrollo de espina bífida en los habitantes prehispánicos de la quebrada y por tanto es una problemática actual que debiese ser considerada a fin de prevenir consecuencias perjudiciales en la población.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ∫ Acme Labs, Acme Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd., Price Brouchure 2013.
- ∫ Allmendinger, R.W, González, G, Yu, J, Hoke, G, Isacks, B. 2005. Trench-parallel shortening in the northern Chilean Forearc: Tectonic and climatic implications. *Geological Society of American Bulletin*, vol.117: 89–104.
- ∫ Andreae, M. O, y Raemdonck H. 1983. Dimethyl sulfide in the surface ocean and the marine atmosphere: A global view, *Science*, vol. 221: 744-747
- ∫ Ayala, Cabrera y asociados Ltda. 2003. Diagnóstico de riego y drenaje en la I región [en línea]. <<http://bibliotecadigital.ciren.cl/>>. [consulta: Agosto del 2013].
- ∫ Blanco, N.; Vásquez, P.; Sepúlveda, F.A.; Tomlinson, A.J.; Quezada, A.; Ladino, M., 2012. Levantamiento geológico para el fomento de la exploración de recursos minerales e hídricos de la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Precordillera de la Región de Tarapacá (20°-21°S). Servicio Nacional de Geología y Minería, 246 p., 7 mapas escala 1:100.000, Santiago.
- ∫ Brown, K. 1982. Sulphur in the environment: a review. *Environmental Pollution (Series B)*, vol. 3: 47-80.
- ∫ Capo, R. and Chadwick, O. 1999. Sources of strontium and calcium in desert soil and calcrete. *Earth and Planetary Science Letters*, (vol.170): 61–72.
- ∫ Carbonell, A, Burló, F, Mataix, J. 1995. Arsénico en el sistema suelo-planta: Significado ambiental. Universidad de Alicante [en línea]. <<http://publicaciones.ua.es/filespublici/pdf/LD8479081929819613.pdf>>. [consulta: Septiembre 2013].
- ∫ Carrizo, D, González, G, Dunai, T. 2008. Neogene constriction in the northern Chilean Coastal Cordillera: Neotectonics and surface dating using cosmogenic <sup>21</sup>Ne. *Revista Geológica de Chile* n°35: 1–38.
- ∫ Cecioni, G, García, F. 1960. Observaciones geológicas en la Cordillera de la Costa de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas. Boletín N°6. 28p. Santiago.
- ∫ Charlson, R, Lovelock, J, Andreae, M, Warren, S. 1987. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature* n°326: 655-661.
- ∫ Chong, G, Mendoza, M, García-Veigas, J, Pueyo, J, Turner, P, 1999. Evolution and geochemical signatures in a Neogene forearc evaporitic basin: the Salar Grande (Central Andes of Chile). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol.151: 39-54.
- ∫ Davis, D. 1999. Dimethyl sulfide oxidation in the equatorial Pacific: Comparison of model simulations with field observations for DMS, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(g), MSA(g), MS, and NSS. *Journal of geophysical research*, vol. 104, n° D5: 5765-5784.
- ∫ Dunai, T. 2005. Oligocene-Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *The geological society of America*, vol. 33: 321-324.
- ∫ Espinoza, F. 2013. Influencia de los factores naturales y antropogénicos en la geoquímica de sedimentos fluviales de las cuencas Vitor y San José de Azapa; XV Región de Arica y Parinacota, Chile. Memoria de título. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. 137 p.

- ∫ Farias, M. 2003. Evolución morfo-tectónica cenozoica y la sismicidad superficial del piedemonte altiplánico chileno entre los 19°25' – 19°45'. Memoria de título. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. 160 p.
- ∫ Farías, V. 2012. Análisis geomorfológico de megadeslizamientos entre las quebradas Camarones y Tiliviche, región de Tarapacá. Memoria de título. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas. 107 p.
- ∫ FOREGS. 2005. Geochemical atlas of Europe. Part 1 – Background Information, Methodology and Maps [en línea]. <<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/index.php>>. [consulta: Agosto 2013]
- ∫ Fritzke, B. 1993. Growing cell structures - A self-organizing network for unsupervised and supervised learning. *Neural Networks*, vol. 7: 1441-1460.
- ∫ Gajardo, A. 2000. Rocas y minerales industriales de Chile. Servicio nacional de geología y minería, Boletín nº58. Santiago, Chile. 181 p.
- ∫ Galli, C. 1968. Cuadrángulo Juan de Morales, Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile nº18: 53 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- ∫ Galli, C.; Dingman, R.J. 1962. Cuadrángulo Pica, Alca, Matilla y Chacarilla, con un estudio sobre los recursos de agua subterránea, Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N°s. 7-10, 4 mapas escala 1:50.000, 125 p. Santiago.
- ∫ García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. En Symposium sobre el Geosinclinal Andino N° 3, Sociedad Geológica de Chile: 138 p. Santiago.
- ∫ García, M, Riquelme, R, Farias, M, Hérail, G, Charrier R. 2011. Late Miocene – Holocene canyon incision in the western Altiplano, northern Chile: tectonic or climatic forcing?. *Journal of the Geological Society*, vol. 168: 1047-1060.
- ∫ Geisler, T, Schaltegger, U. y Tomaschek, F. 2007. Re-equilibration of Zircon in Aqueous Fluids and Melts. *Elements*, vol. 3, nº1: 43-50.
- ∫ Harambour, S. 1990. Geología pre-cenozoica de la Cordillera de los Andes entre las quebradas Aroma y Juan de Morales, I Región. Memoria para optar al título de geólogo. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geología, 228 p.
- ∫ Harley, S. and Kelly, N. 2007. Zircon: Tiny but Timely. *Elements*, vol. 3, nº1: 13-18.
- ∫ Instituto Nacional de Estadísticas (INE) 2007. Síntesis geográfica de la región de Tarapacá. [en línea]. <[www.inetarapaca.cl](http://www.inetarapaca.cl)>. [consulta: Mayo del 2013]
- ∫ Jiang, B. 2012. Head/tail Breaks: A new Classification Scheme for Data with a Heavy-tailed Distribution. *The professional Geographer* 65, vol. 3: 482-494
- ∫ Kober, F. 2007. Denudation rates and a topography-driven rainfall threshold in northern Chile: Multiple cosmogenic nuclide data and sediment yield budgets. *Geomorphology*, vol. 83: 97-120.
- ∫ Kossler, A. 1998. Der Jura in der Küstenkordillere von Iquique (Nordchile)-Palaontologie, Lithologie, Stratigraphie, Palaogeographie. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A Geologie und Paläontologie* 197: 1-161.
- ∫ Lacassie, J, Astudillo, F, Baeza, L, Castillo, P, Figueroa, M, Muñoz, N, Ramírez, C. 2012b. Geoquímica de sedimentos de la Hoja Iquique, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geoquímica 1, 1 DVD versión 1.0, que

contiene 1 mapa interactivo para 59 elementos químicos escala 1:250.000, 1 texto (41 p.) y 2 anexos. Santiago.

- ┌ Lacassie, J.P, Baeza, L, Astudillo, F, Figueroa, M, Castillo, P, Muñoz, N, Ramírez, C, Millares, C, Carrasco, F. 2012a. Mapa geoquímico de la Hoja Iquique: definición e interpretación de patrones geoquímicos a escala regional. En XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, 05-09 Agosto 2012: pp.67-69.
- ┌ Lacassie, JP. 2003. Estudio de la proveniencia sedimentaria de los complejos metamórficos de los Andes Patagónicos (46°-51° Lat. S) mediante la aplicación de redes neuronales e isótopos estables. Tesis (Doctor en Ciencias, mención Geología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geología, 204 p.
- ┌ Lacassie, J P, Ruiz del Solar, J, Roser, BP, Hervé, F. 2006. Visualization of volcanic rock geochemical data and classification with artificial neural networks. *Mathematical Geology*; 3: 697-710.
- ┌ Lacassie J.P., Roser B., Ruiz-del-Solar J., Hervé F. 2004. Discovering geochemical patterns using self-organizing neural networks: a new perspective for sedimentary provenance analysis. *Sedimentary Geology* 165: 175-191.
- ┌ MacDonald, D, Ingersoll, C, Berger, T. 2000. Development and evaluation of Consensus based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 3: 20-31.
- ┌ MaksaeV, V. 2001. Depósitos de Placeres. Apunte curso GL54A Metalogénesis [en línea]. <<http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaeV/PLACERES.pdf>>. [consulta: Septiembre de 2013]
- ┌ Marquardt, C, Marinovic, N, Muñoz, V. 2008. Geología de las Ciudades de Iquique y Alto Hospicio, Región de Tarapacá. Escala 1:25.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 133, 33 p., 1 mapa escala 1:25.000. Santiago.
- ┌ Mosher, B, Duce, R. 1987. Atmospheric selenium: Geographical distribution and ocean to atmosphere flux in the Pacific. *Journal of geophysical research* 92, n° D11: 13277-13287.
- ┌ Muzzio, G. 1986. Geología de los cuadrángulos Caleta Camarones, Cuya, Punta Gorda y Atajaña. (Inédito). Servicio Nacional de Geología y Minería. 43 p., escala 1:100.000. Santiago.
- ┌ Muzzio, G. 1987. Geología de los cuadrángulos Pisagua, Zapiga, Caleta Buena y Huara. Escala 1:100.000. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería. 74 p.
- ┌ Oliveros, V.; Féraud, G.; Aguirre, L.; Fornari, M.; Morata, D. 2006. The Early Andean Magmatic Province (EAMP): 40Ar/39Ar dating on Mesozoic volcanic and plutonic rocks from the Coastal Cordillera, northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 157: 311-330.
- ┌ Ordóñez, A, Rivera, R. 2004. Mapa metalogénico de la I región de Tarapacá, Escala 1:500.000. SERNAGEOMIN; GEODATOS.
- ┌ Orrego, M, Cuitiño, L, Véliz, H, Niemeyer, H. 1997. Nuevos antecedentes sobre el distrito minero Challacollo, Provincia de Iquique, norte de Chile. *Congreso Geológico Chileno 8, Actas*, 2: 1077-1081.
- ┌ Oyarzun, R, Lillo, J, Higuera, P, Maturana, H. 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio-Tambo district) vs. geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 84: 53-64.

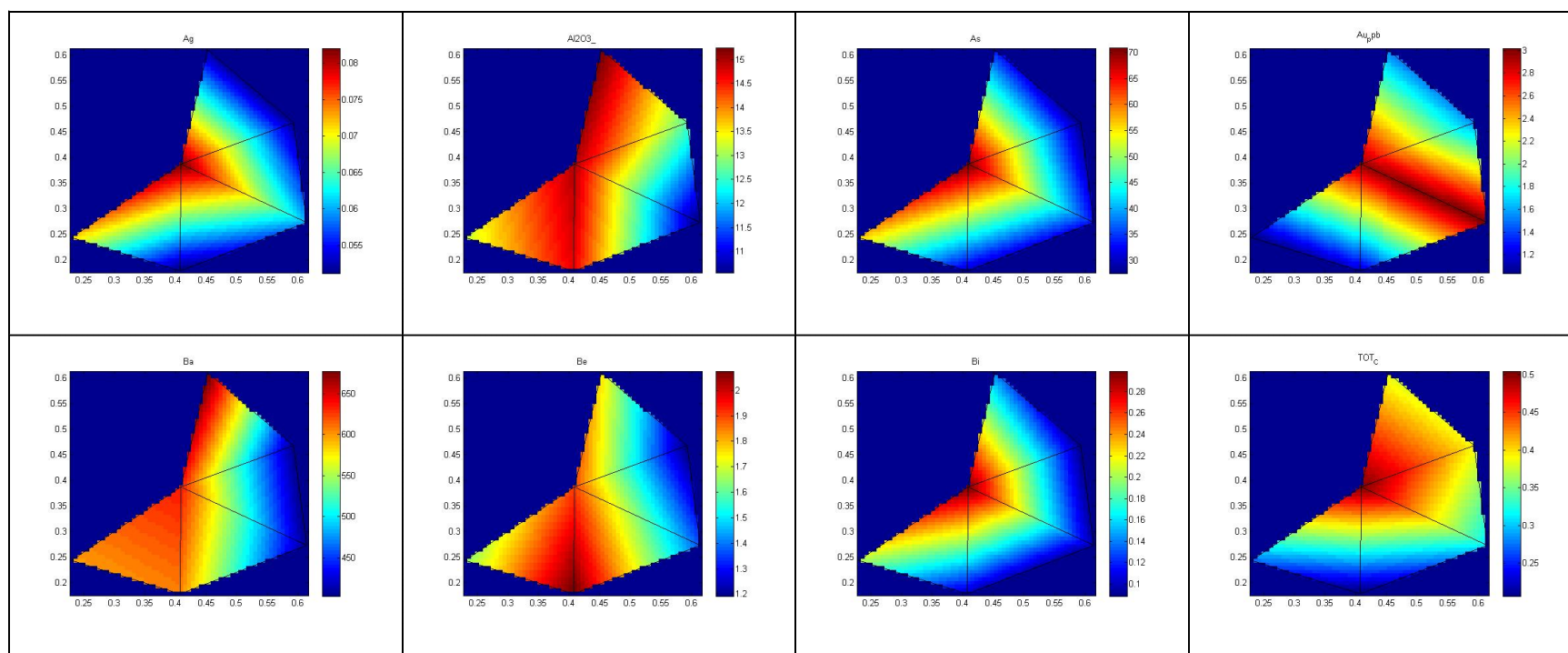
- ∫ Paskoff, R. 1979. Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del norte grande de Chile. *Revista Norte Grande*, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile n°6 [En línea]. <[www.geo.puc.cl](http://www.geo.puc.cl)>. [consulta: Mayo del 2013].
- ∫ Pinto, L. 1999. Evolución tectónica y geomorfológica cenozoica del borde occidental del Altiplano y su registro sedimentario entre los 19°08'-19°27'S (Región de Tarapacá, Chile). Memoria de Título. (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, 125 p. Santiago.
- ∫ PRAMAR Ambiental Consultores. Antecedentes relativos al área de emplazamiento del proyecto. Actualización Operación Nueva Victoria (declaración de impacto ambiental) [en línea]. <http://www.e-seia.cl/>. [Consulta: Agosto del 2013].
- ∫ Schemenauer, R, Cereceda, P. 1992: The Quality of Fog Water Collected for Domestic and Agricultural Use in Chile. *Journal of Applied Meteorology*, vol.31: 275–290.
- ∫ Silva, Luis Ignacio. 1977. Geología de las hojas Pisagua y Zapiga: Provincia de Iquique, Tarapacá, I Región, Chile, escala 1:100.000. IIG, Carta Geológica de Chile (n.24): 8 p., 1 mapa. Coordenadas: 19°30' - 20°00' / 70°15' - 69°30'. Escala: 1:100.000, Santiago.
- ∫ Silva-Pinto, V, Arriaza, B, Standen, V. 2010. Evaluación de la frecuencia de espina bífida oculta y su posible relación con el arsénico ambiental en una muestra prehispánica de la Quebrada de Camarones, norte de Chile. *Revista médica de Chile*, vol. 183, n°4: 461-469. Santiago.
- ∫ Smith, Goodchild, Longley 2006–2009. *Univariate classification schemes en Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to principles Techniques and Software Tools*, 3° edición. 560 p.
- ∫ Thomas, A. 1970. Cuadrángulos Iquique y Caleta Molle, Provincia Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N°21 – 22: 52p., 2 mapas escala 1:50.000, Santiago.
- ∫ Tobar, A, Salas, I, Kast, R. 1968. Cuadrángulos Camaraca y Azapa, Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Nos. 19 y 20, escala 1:50.000, 13 p. Santiago
- ∫ Turner, S, Mali, G, Liss, P. 1988. The seasonal variation of dimethyl sulfide and dimethylsulfoniopropionate concentrations in nearshore waters. *Limnology oceanography*, vol. 33, n°3: 364-375.
- ∫ Vargas, G, Ortlieb, L, Rutllant, J. 2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista geológica de Chile*, (vol.27): 157-176 p.
- ∫ Velinsky, D, Cutter, G. 1991. Geochemistry of selenium in a coastal salt marsh. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55:179-191
- ∫ Vergara, H, Thomas, A. 1984. Hoja Collacagua, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 59: 79 p, 1 mapa escala 1: 250.000. Santiago.
- ∫ Walker, A, Cross, S, Harrison, R. 1999. Visualisation of biomedical datasets by use of growing cell structure networks: a novel diagnostic classification technique. *The Lancet*, (vol. 354): 1518-1521.
- ∫ Wijnja, H. y Schulthess P. 2000. Vibrational Spectroscopy Study of Selenate and Sulfate Adsorption Mechanisms on Fe and Al (Hydr)oxide Surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 229: 286–297.

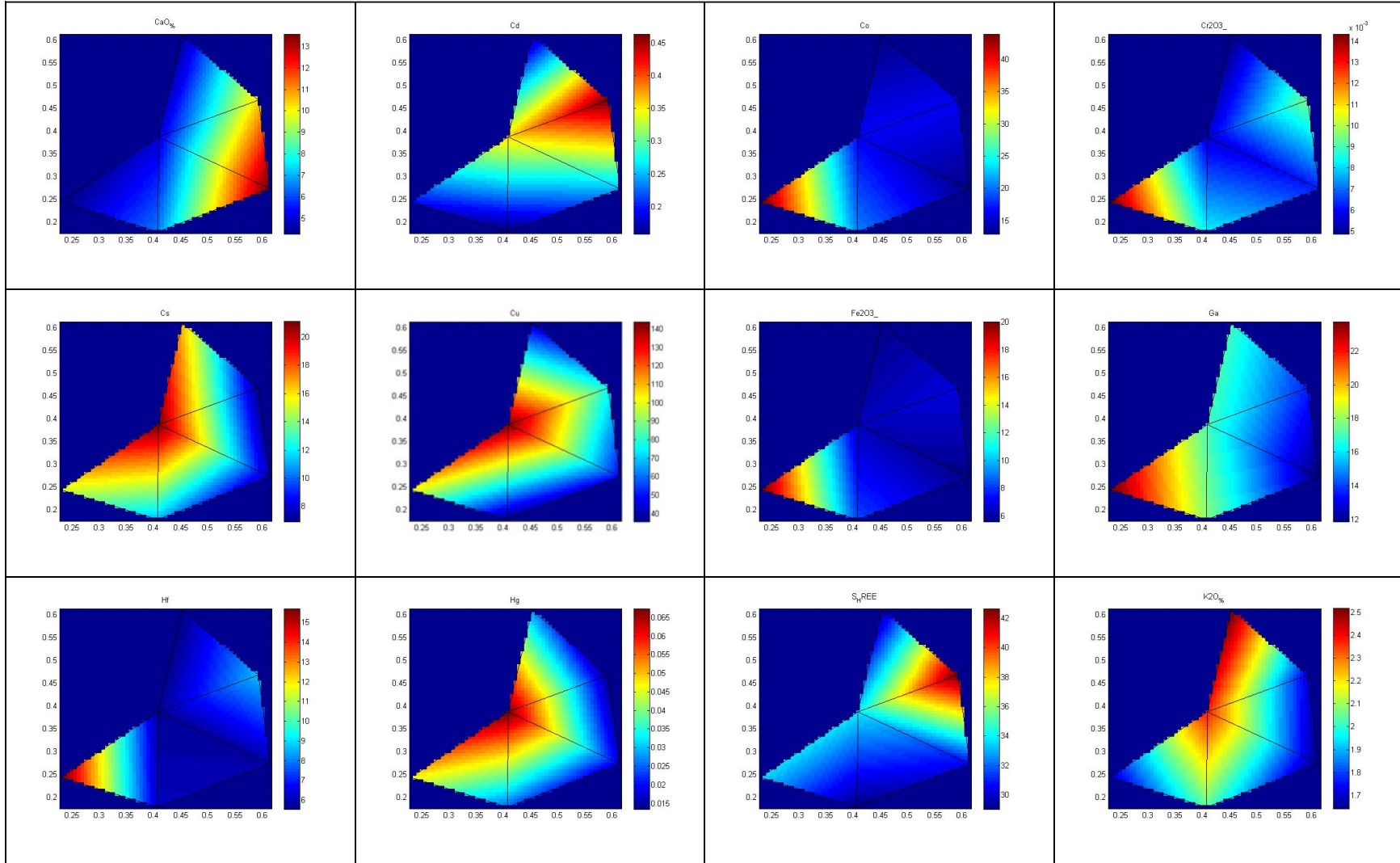


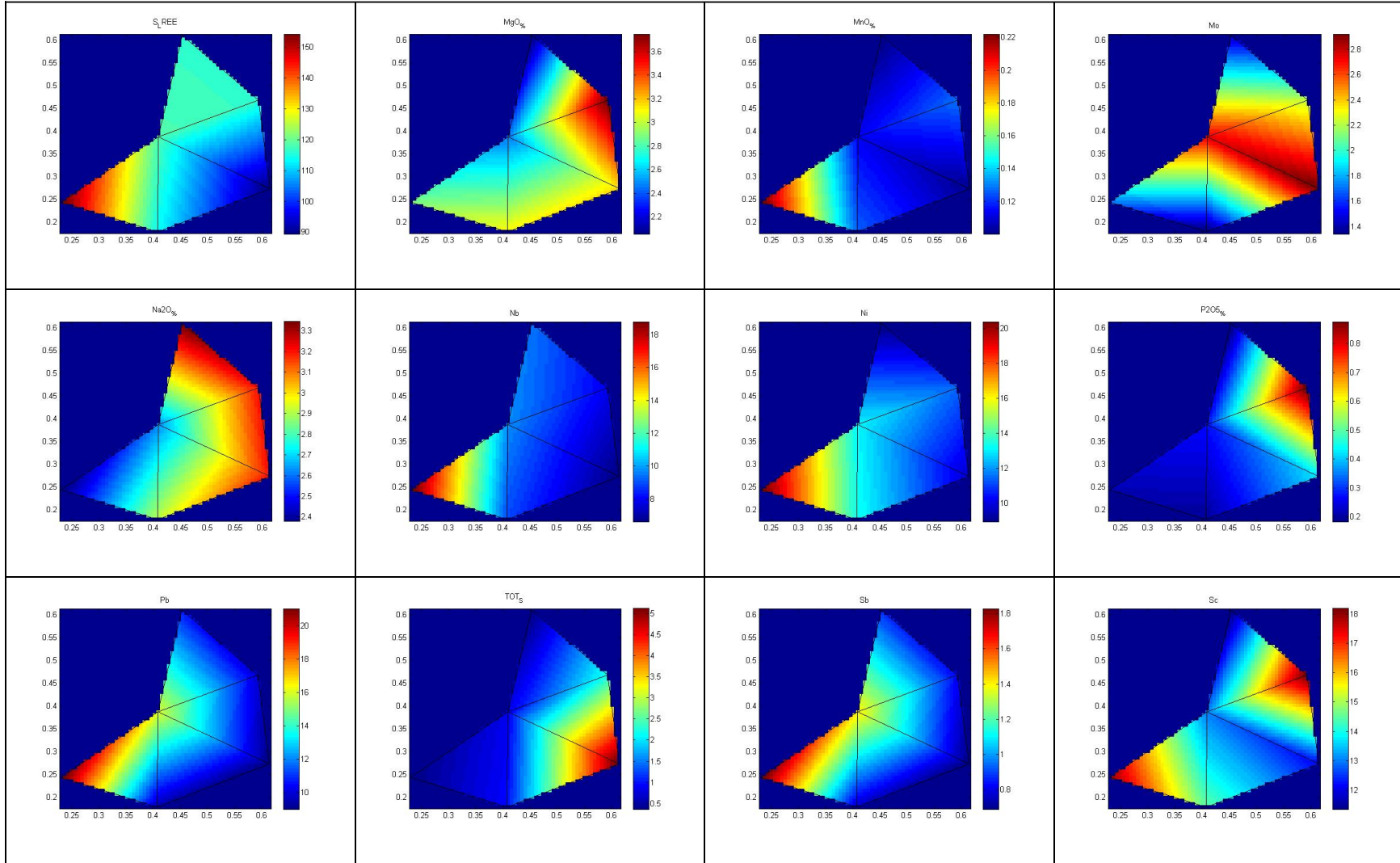
## **8. ANEXOS**

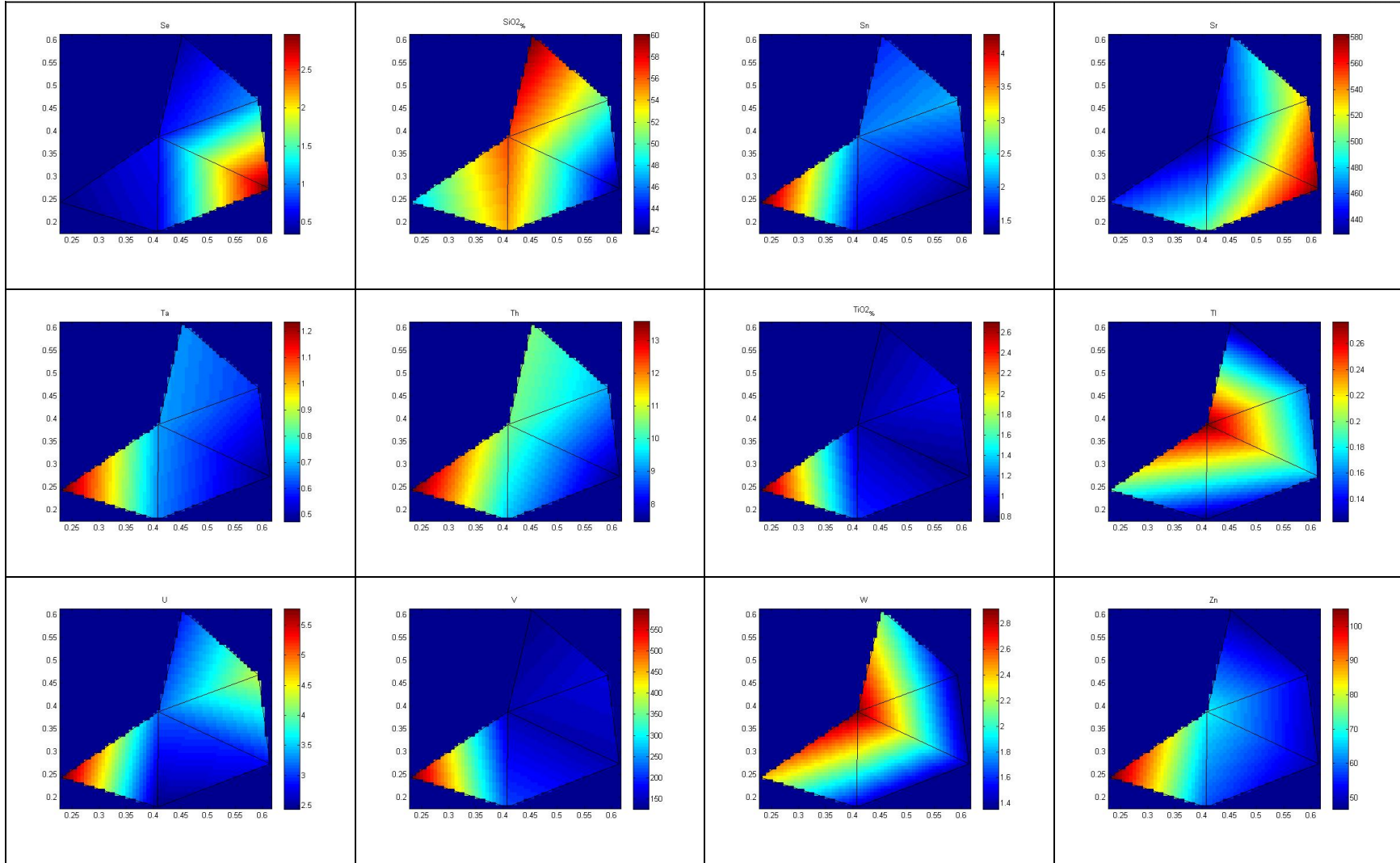
## 8.1. Redes neuronales artificiales (GCS)

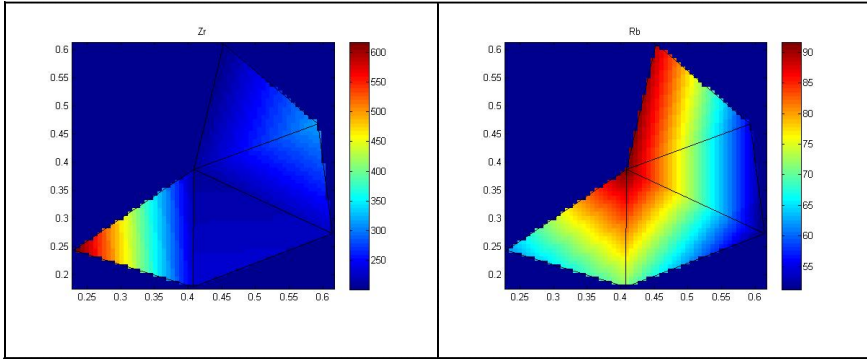
Se presenta a continuación la red neuronal artificial obtenida y su detalle para cada elemento considerado en este estudio. La barra multicolor que se encuentra a la derecha de cada gráfico, representa concentraciones en %, ppm y ppb según sea el caso. Los colores rojos corresponden a altas concentraciones del elemento, mientras que los colores azules representan bajas concentraciones del elemento. Si para un nodo en particular se tiene que el área cercana toma tonalidades rojas, quiere decir que las muestras asociadas a ese nodo poseen en general una alta concentración de ese elemento en particular. Por el contrario, si un nodo se asocia con bajas concentraciones de un elemento, entonces las áreas circundantes a los nodos serán de tonalidades amarillas y azules.



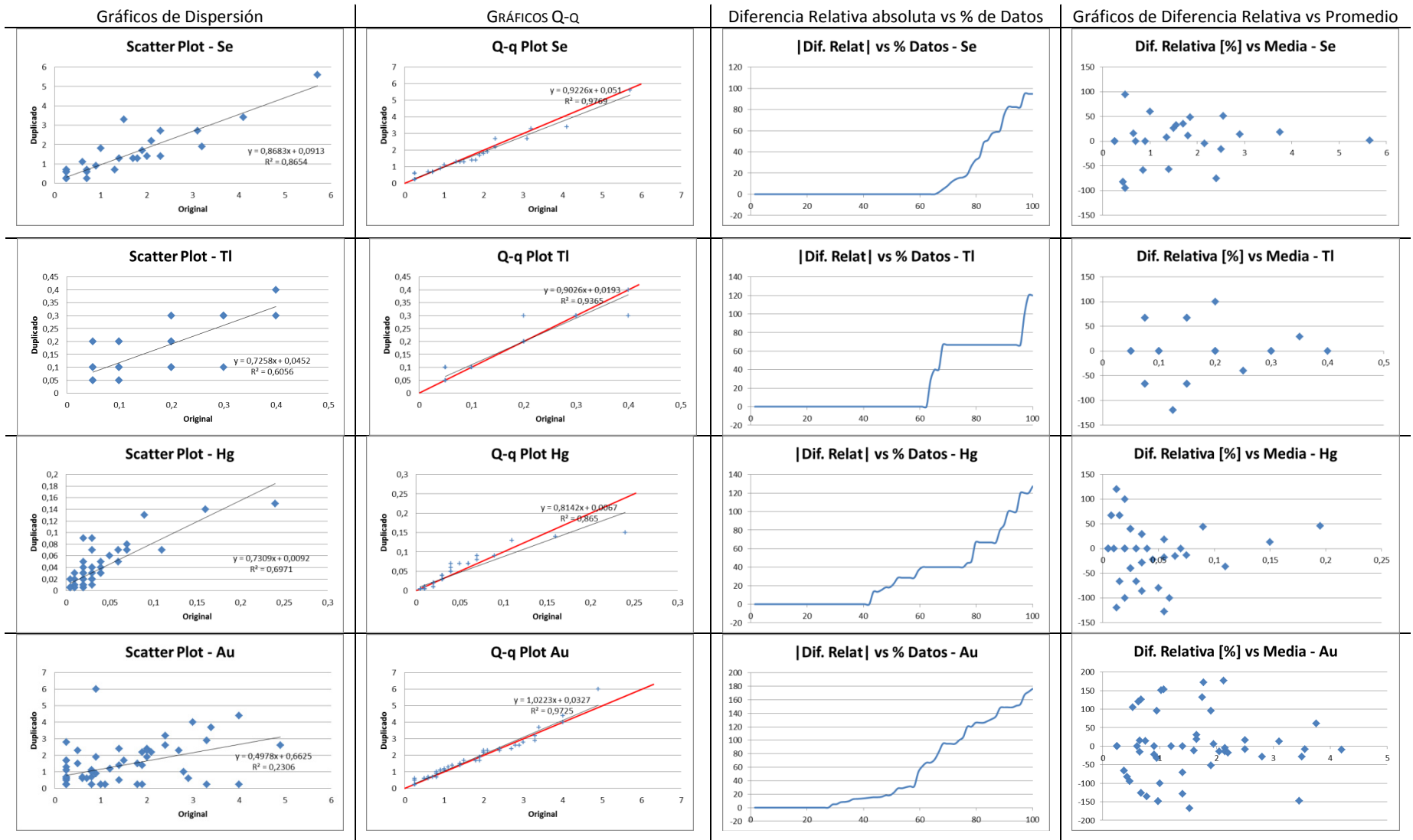








## 8.2. Calidad de datos (QAQC)

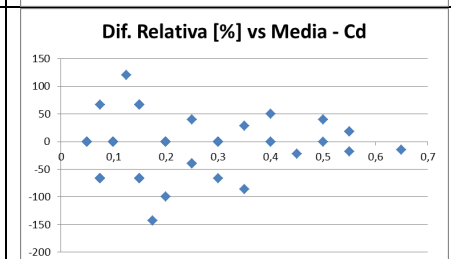
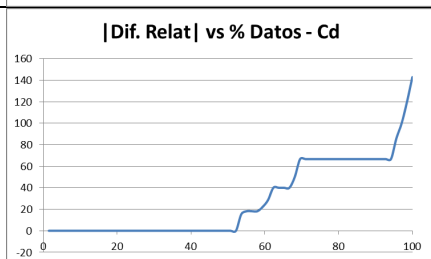
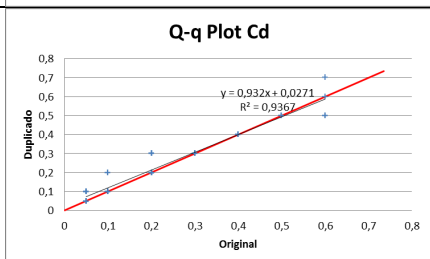
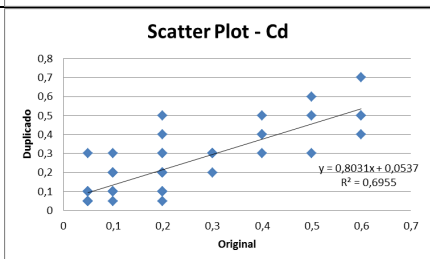
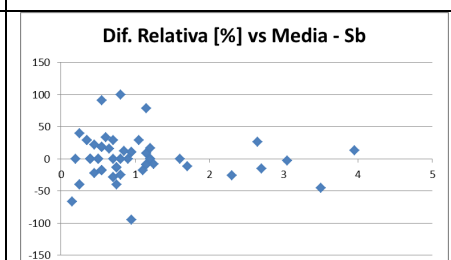
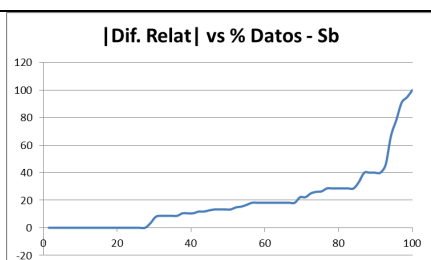
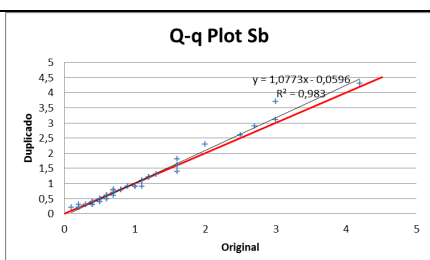
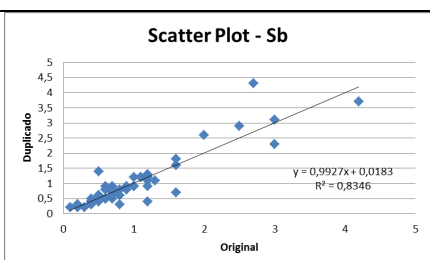
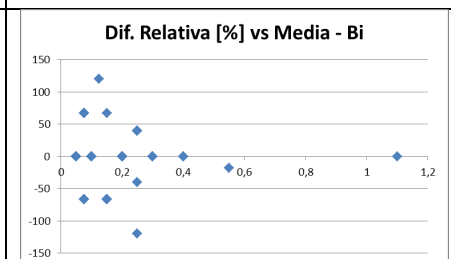
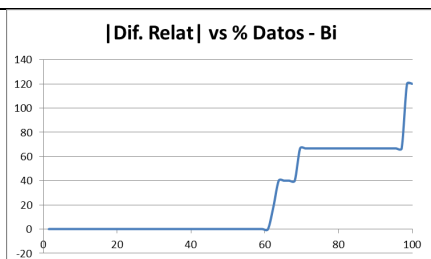
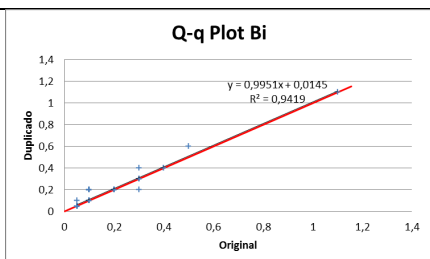
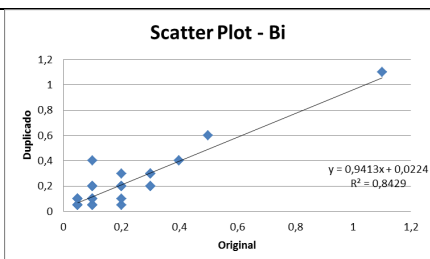
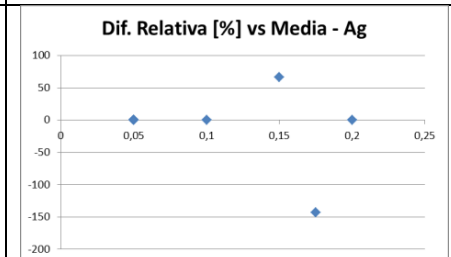
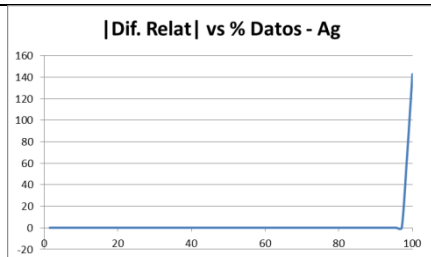
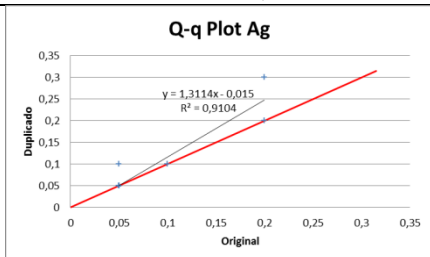
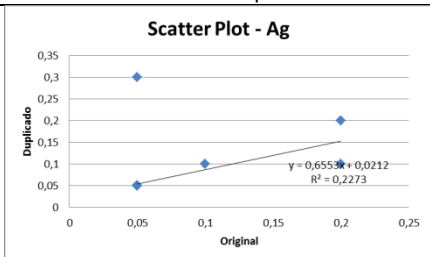


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio



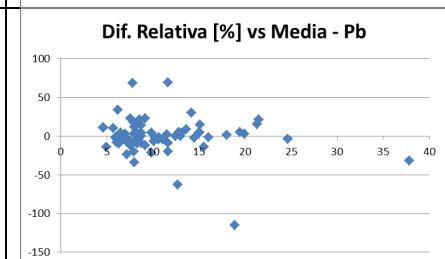
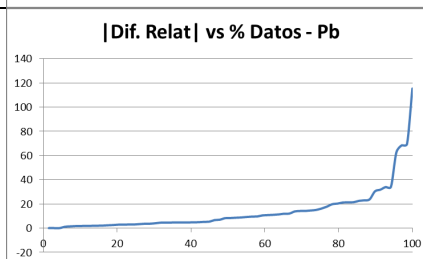
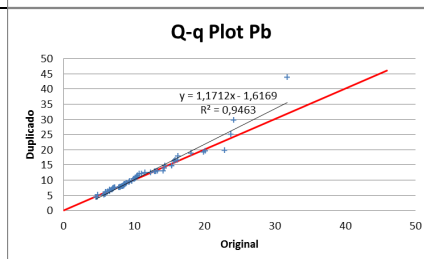
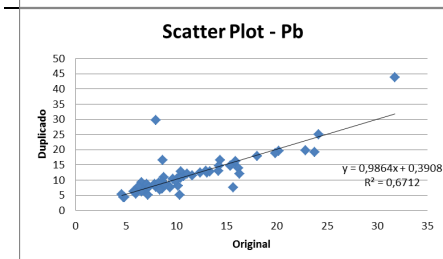
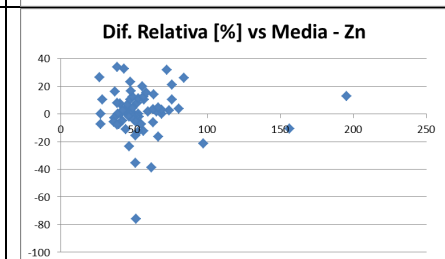
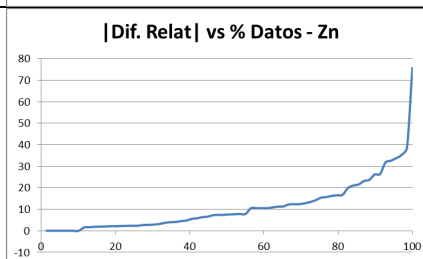
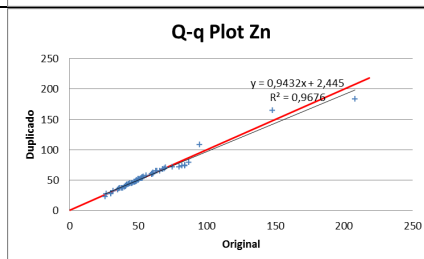
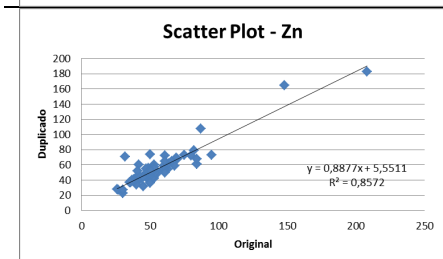
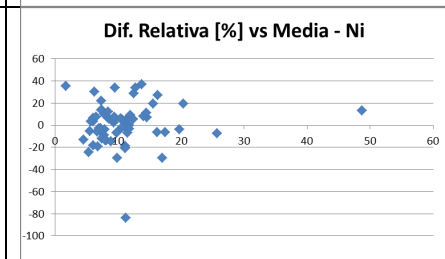
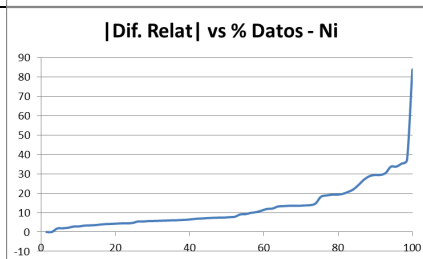
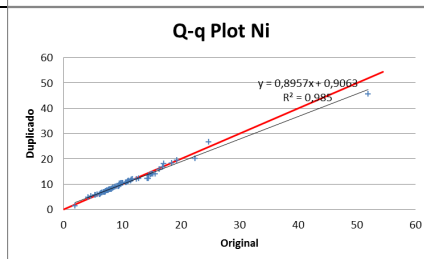
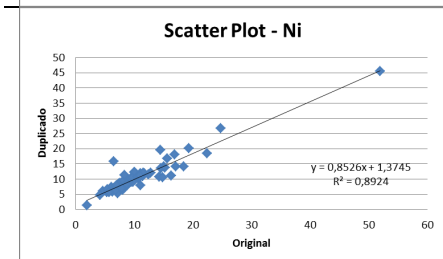
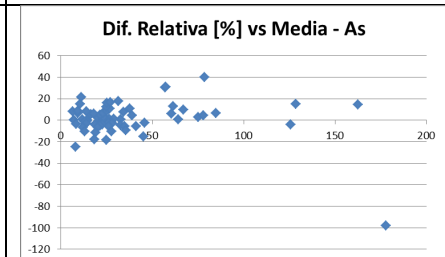
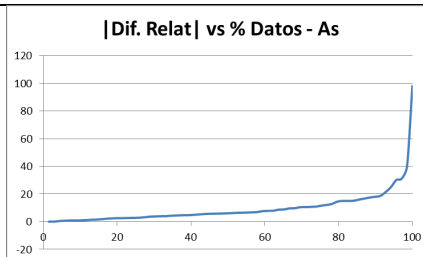
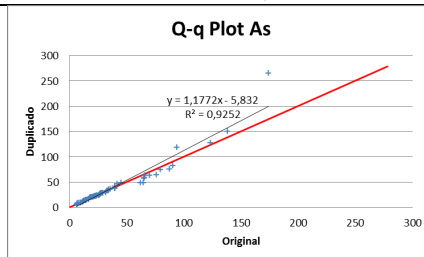
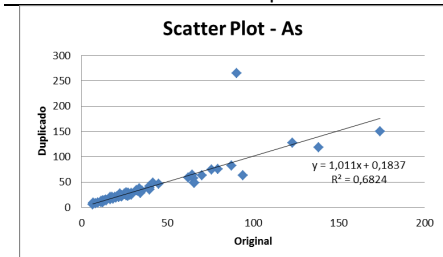


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

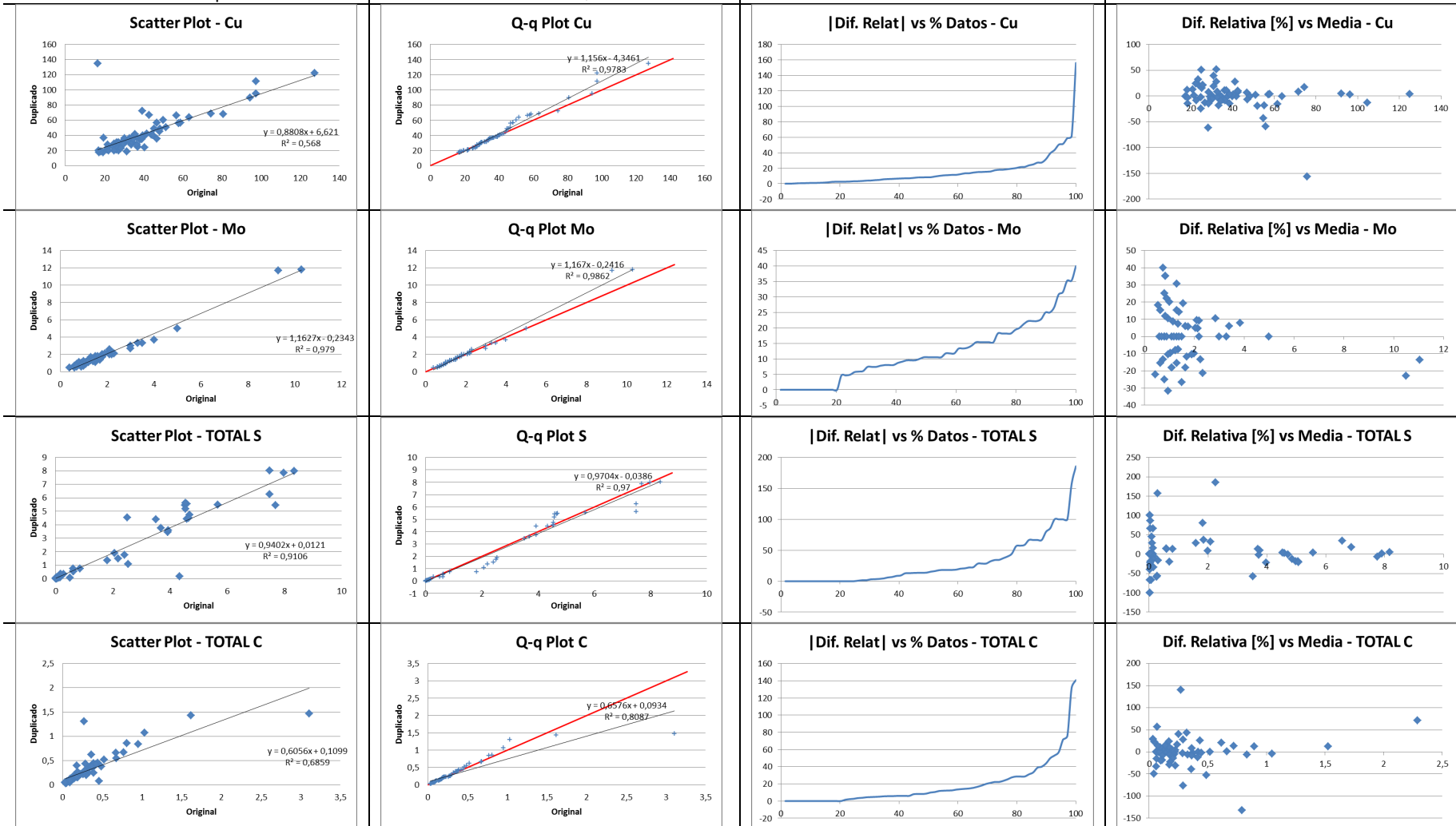


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

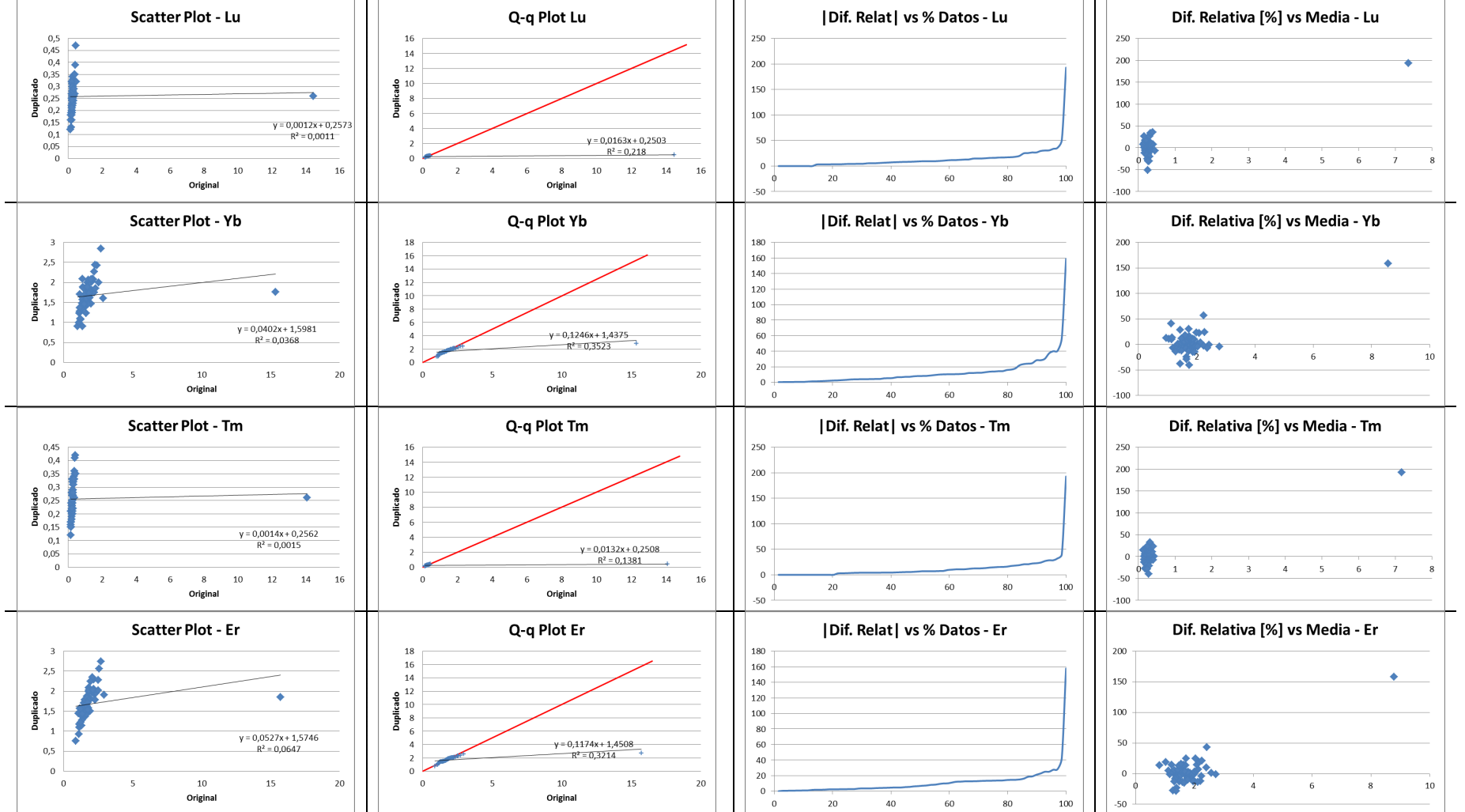


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

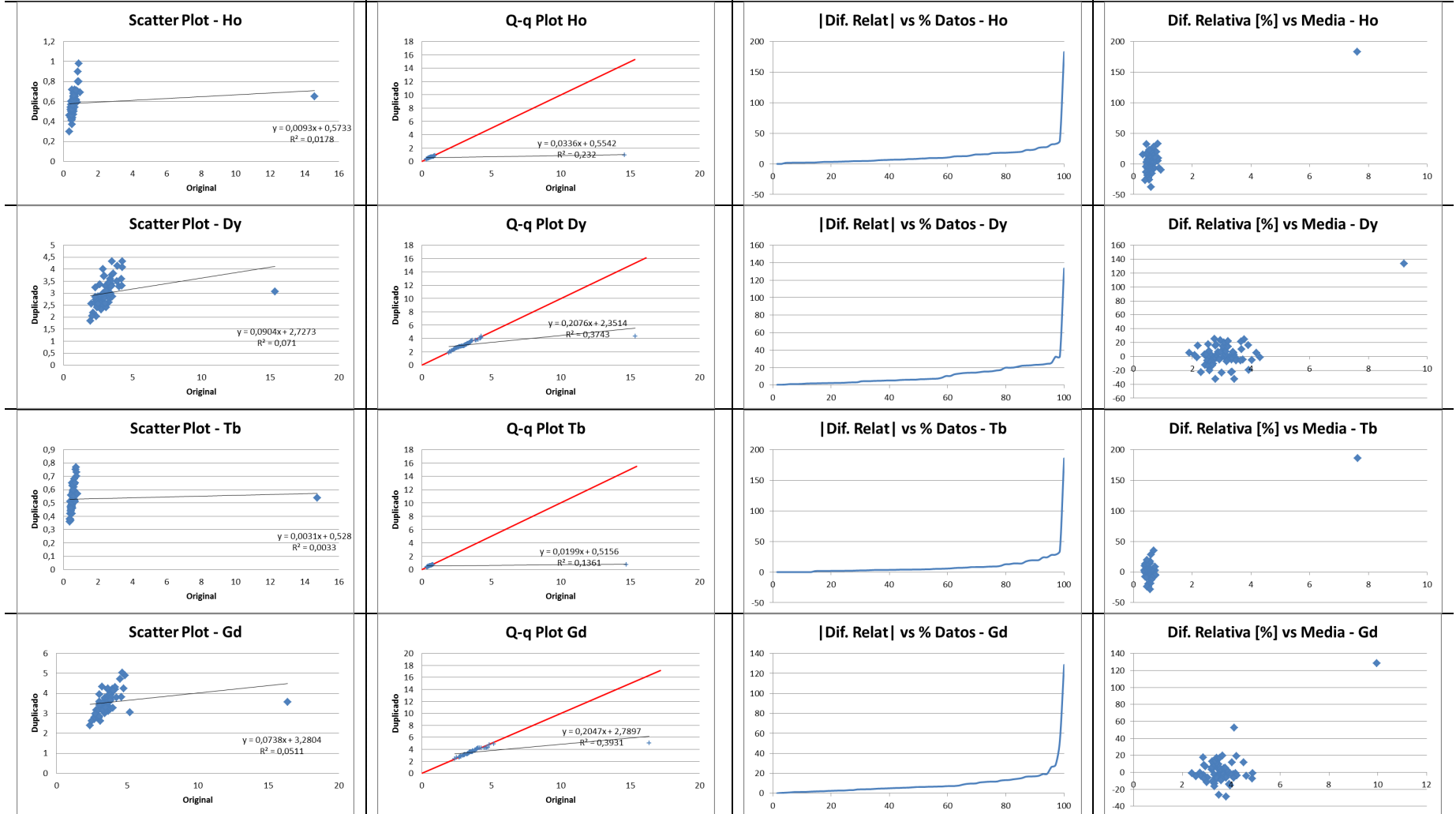


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

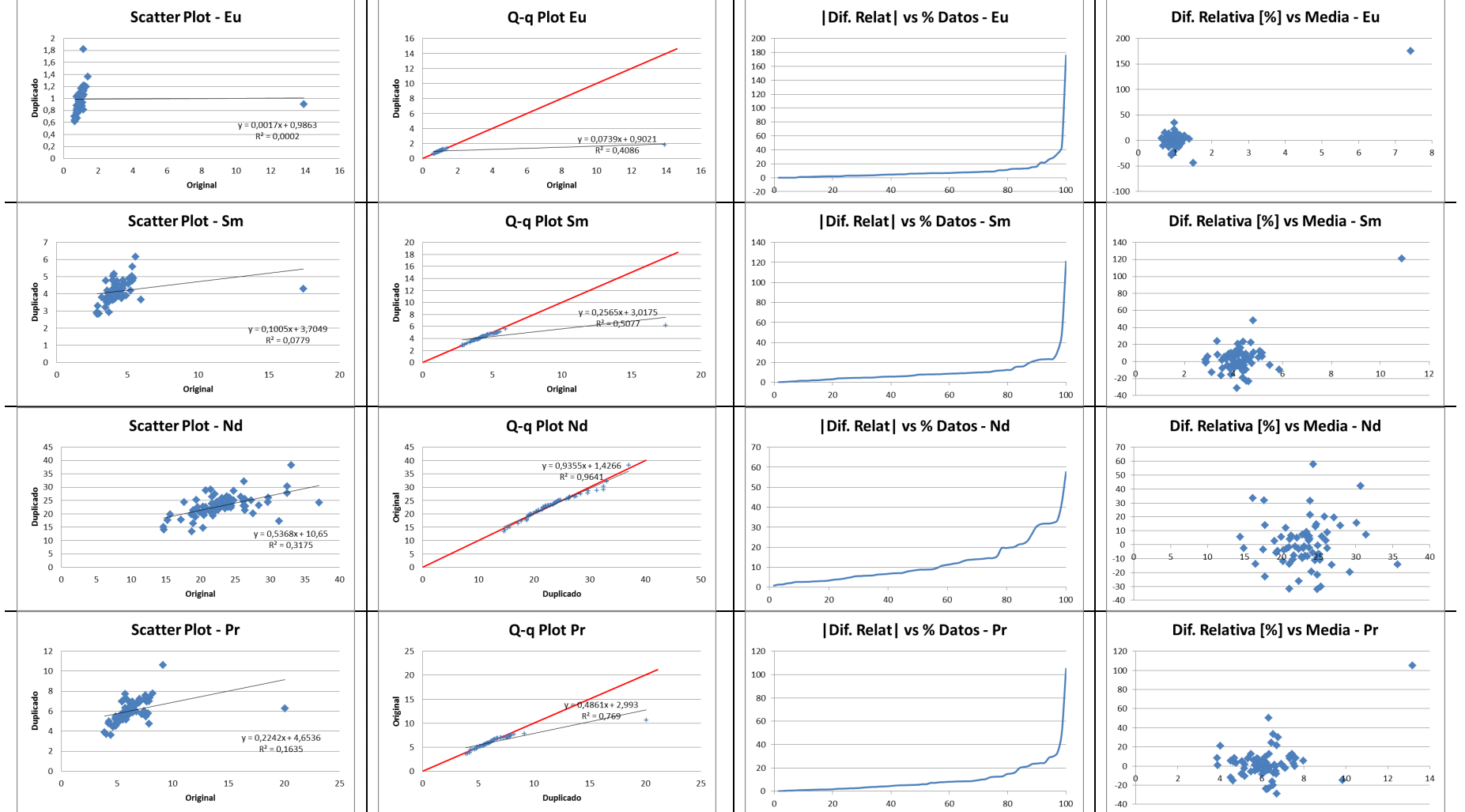


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

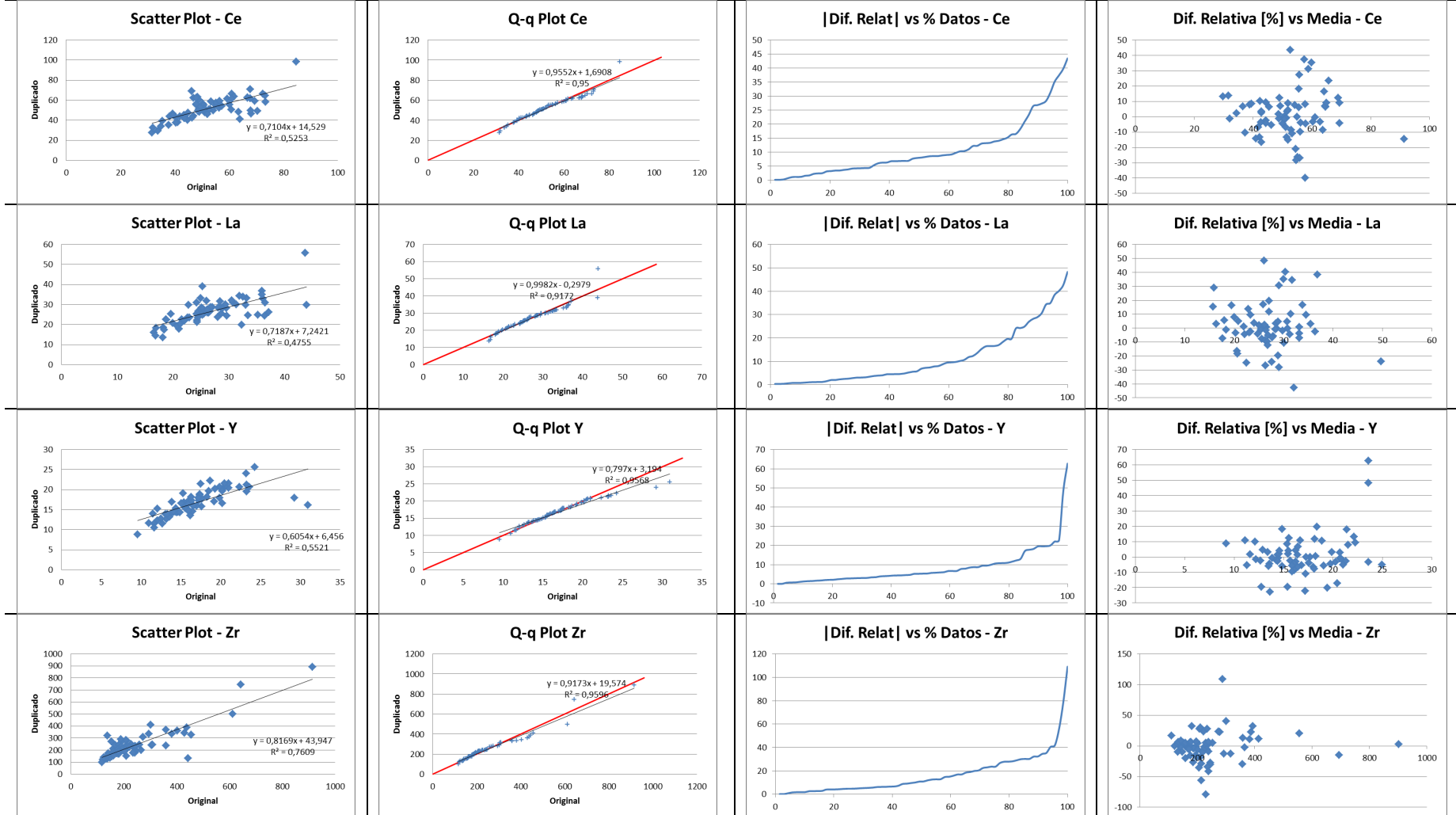


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

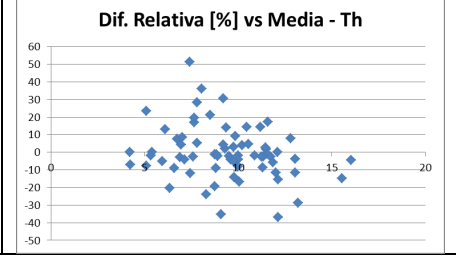
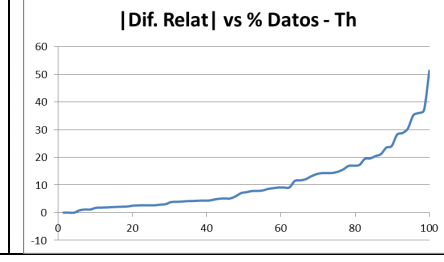
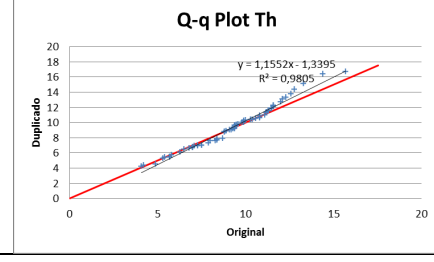
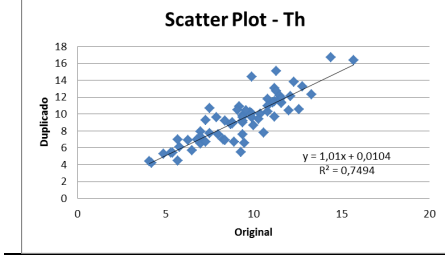
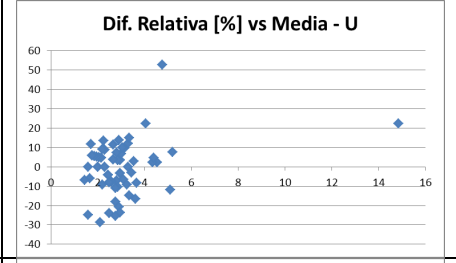
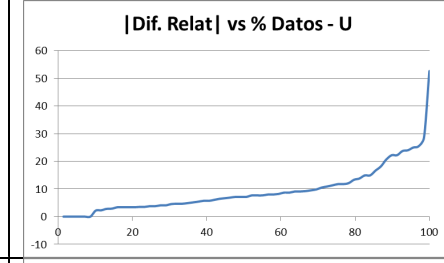
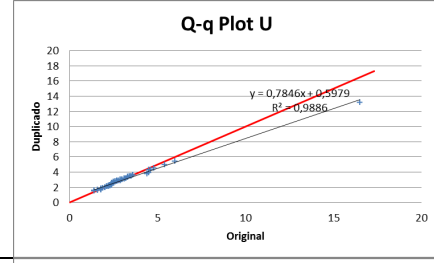
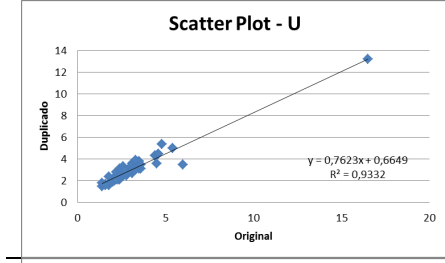
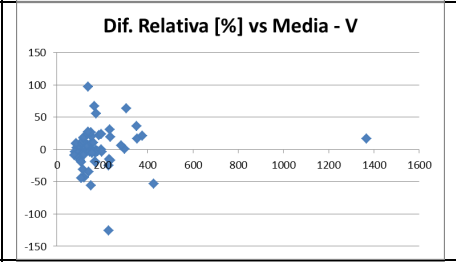
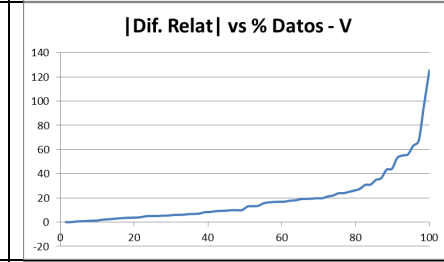
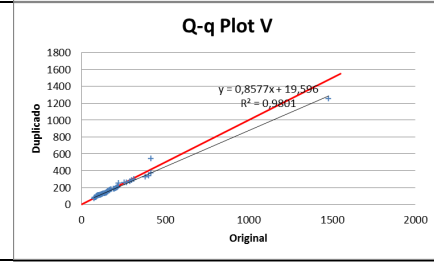
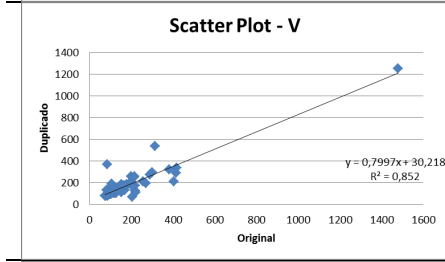
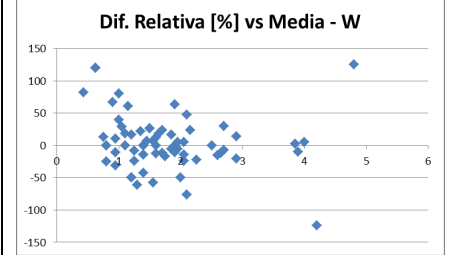
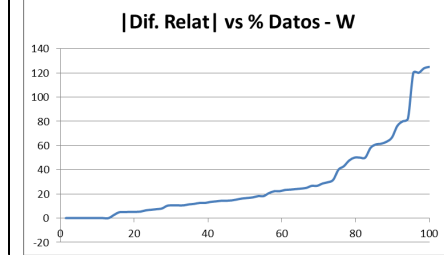
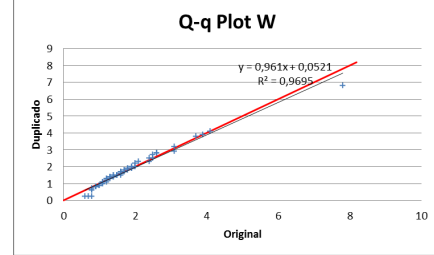
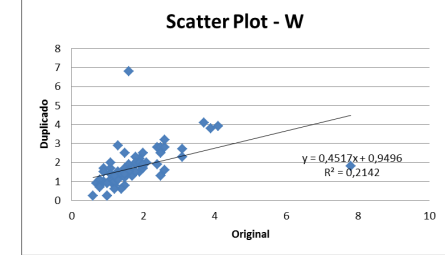


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

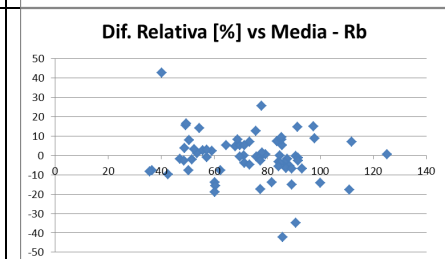
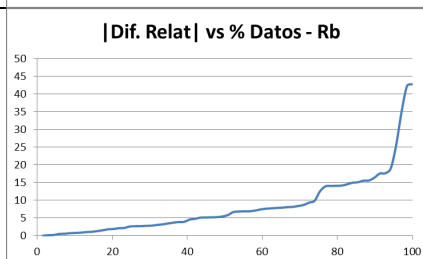
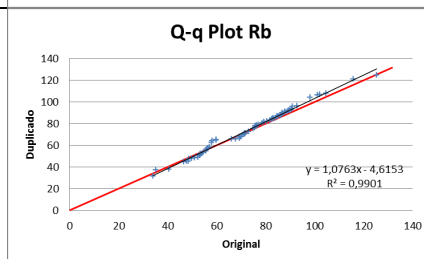
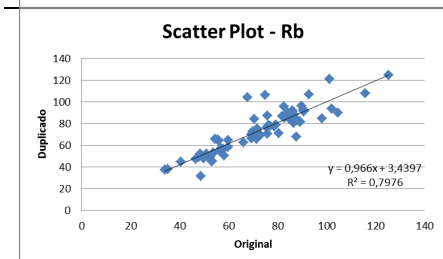
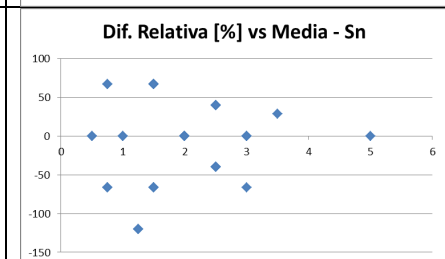
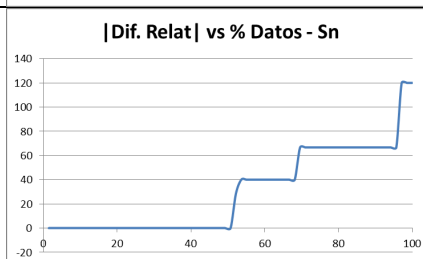
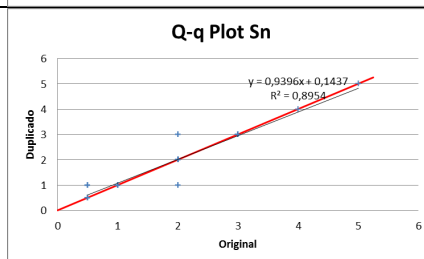
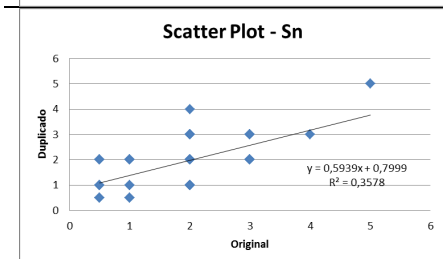
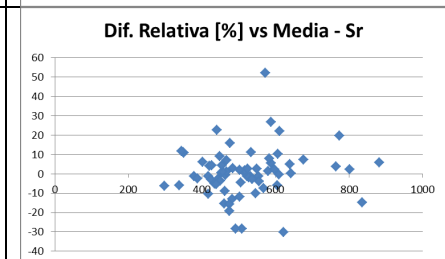
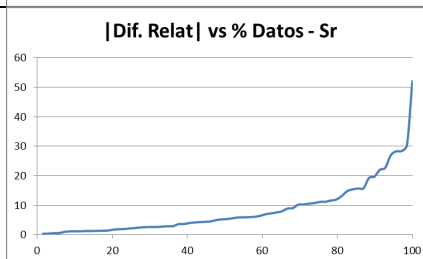
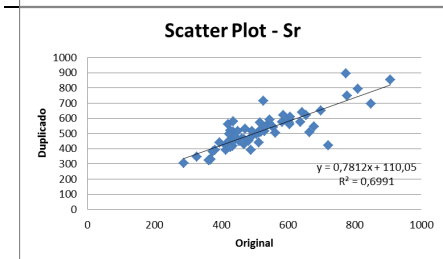
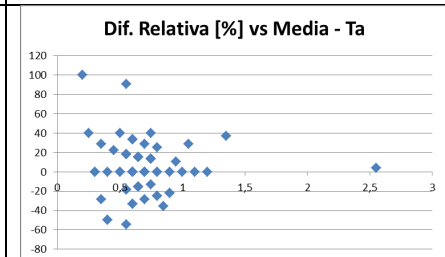
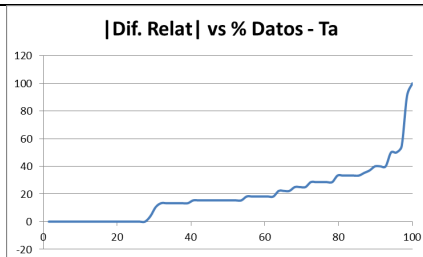
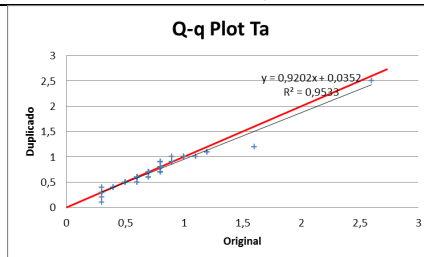
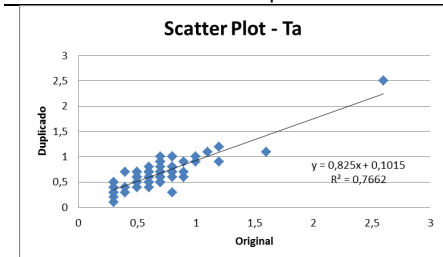


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio



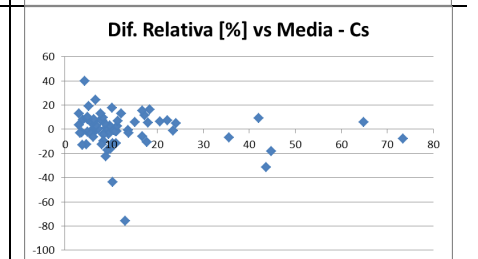
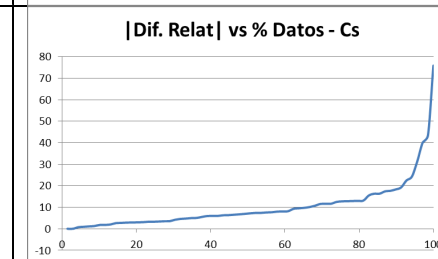
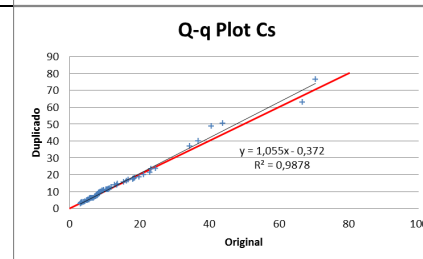
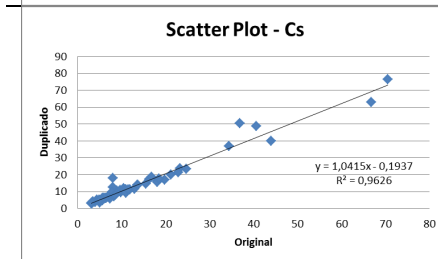
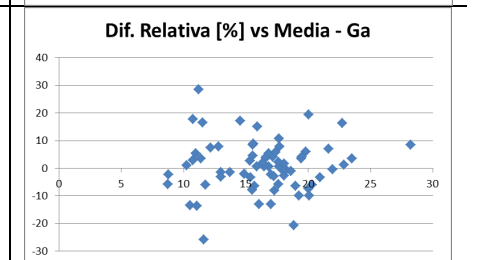
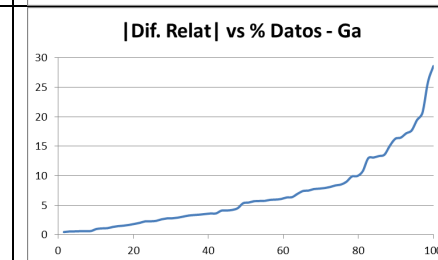
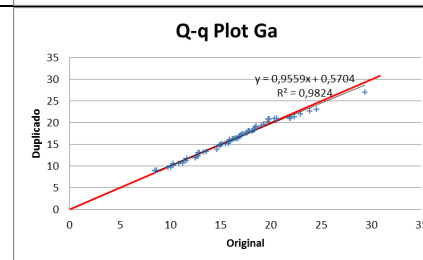
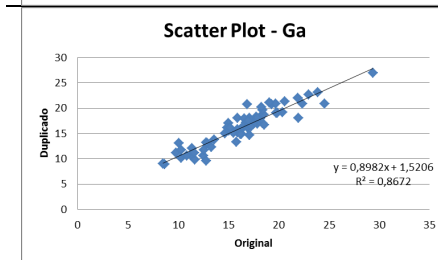
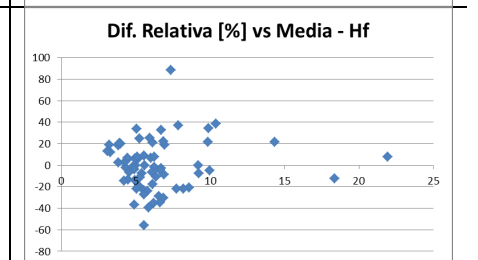
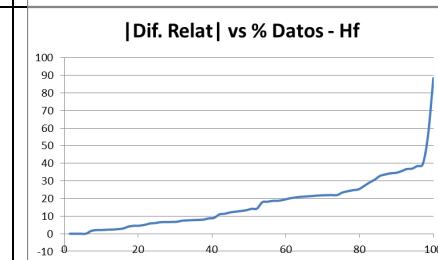
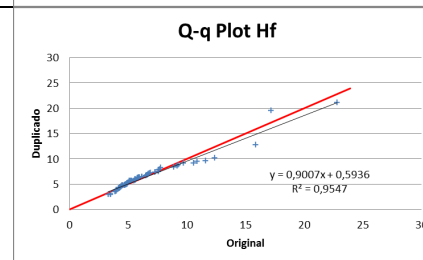
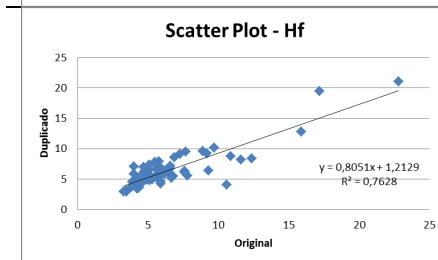
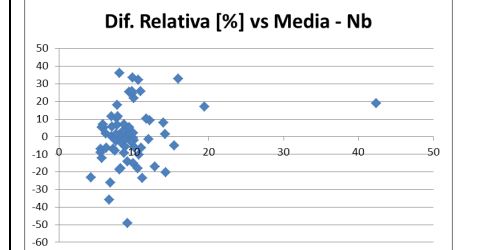
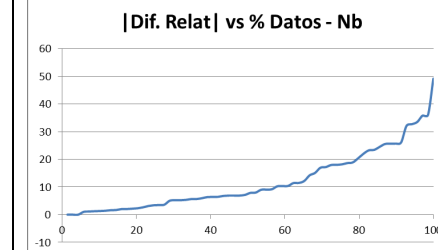
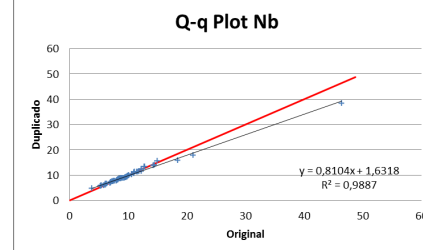
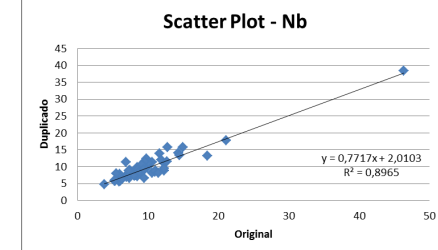


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

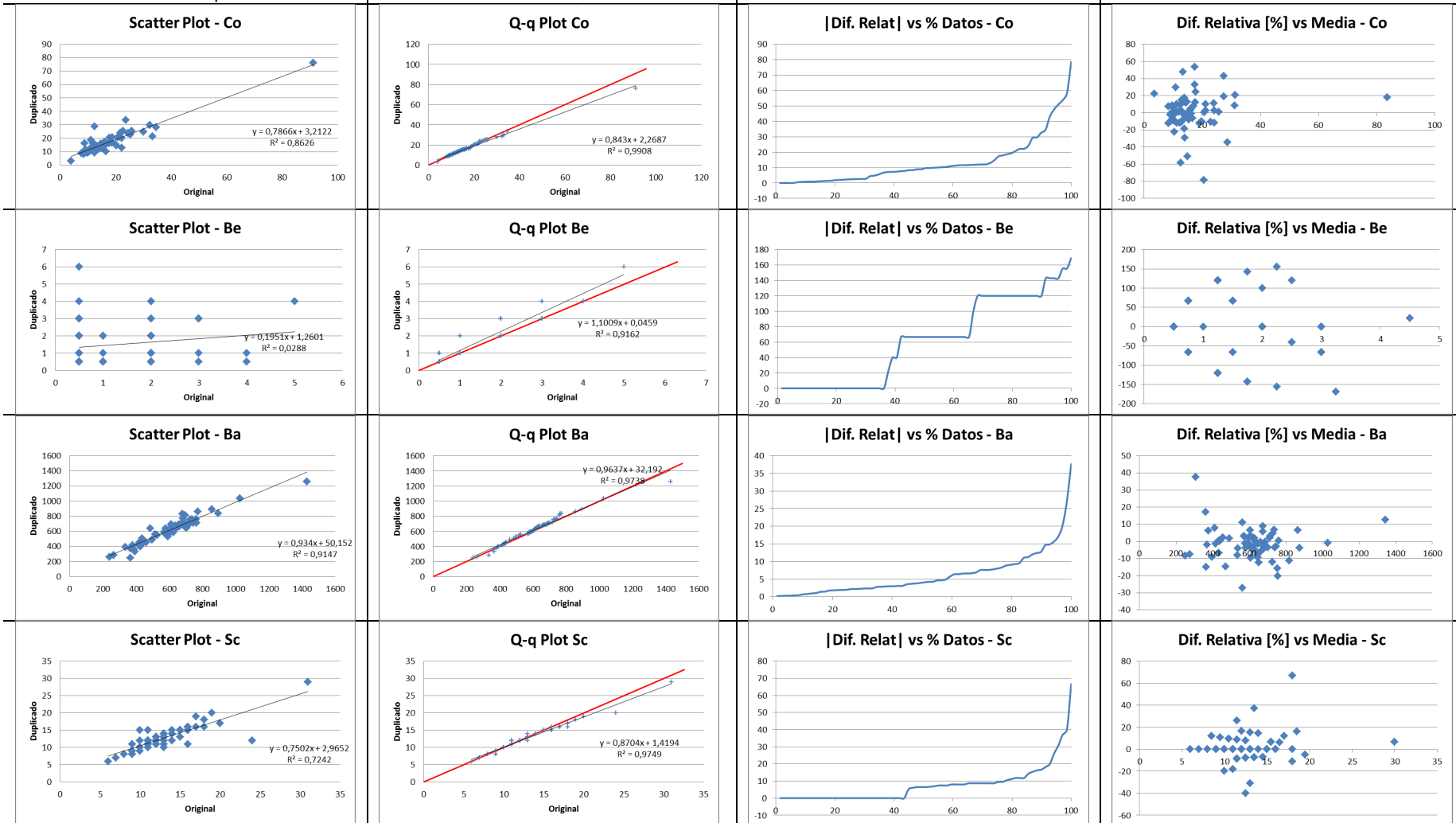


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio



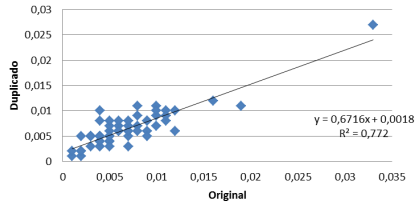
Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

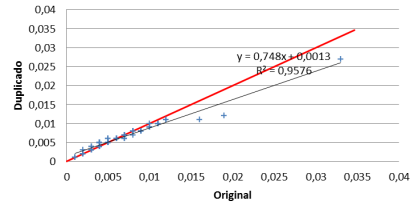
Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

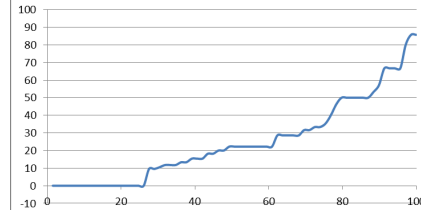
Scatter Plot - Cr2O3



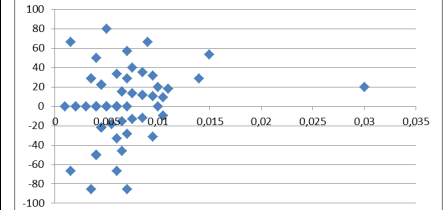
Q-q Plot Cr2O3



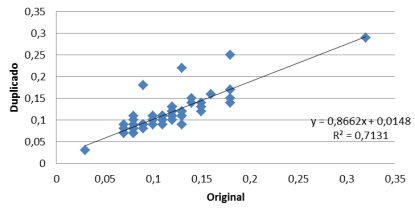
|Dif. Relat| vs % Datos - Cr2O3



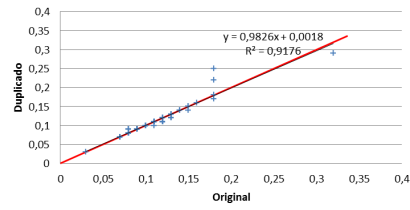
Dif. Relativa [%] vs Media - Cr2O3



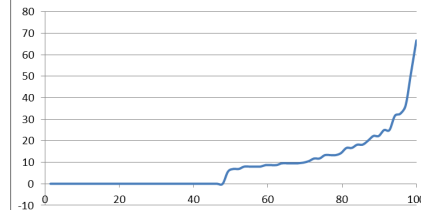
Scatter Plot - MnO



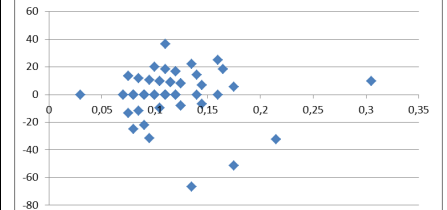
Q-q Plot MnO



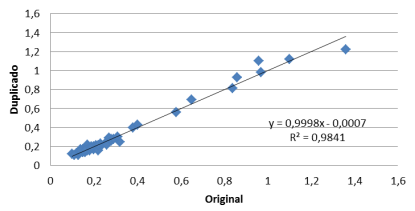
|Dif. Relat| vs % Datos - MnO



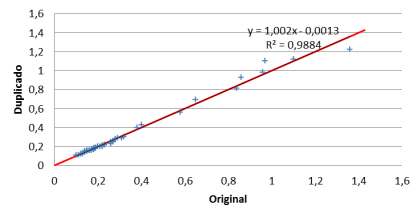
Dif. Relativa [%] vs Media - MnO



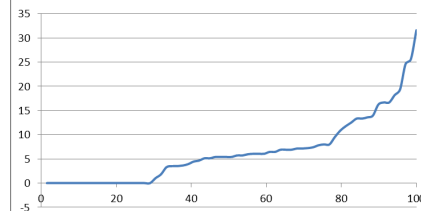
Scatter Plot - P2O5



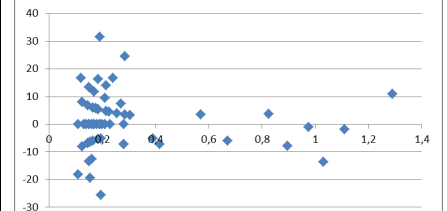
Q-q Plot P2O5



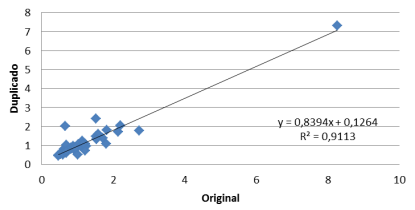
|Dif. Relat| vs % Datos - P2O5



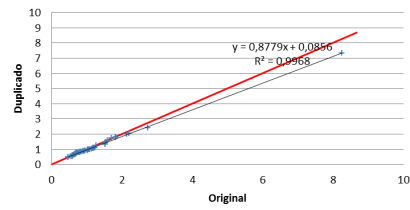
Dif. Relativa [%] vs Media - P2O5



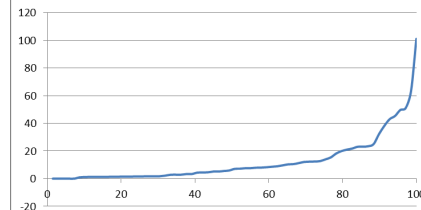
Scatter Plot - TiO2



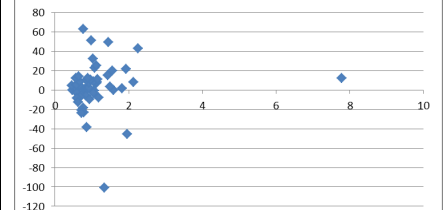
Q-q Plot TiO2



|Dif. Relat| vs % Datos - TiO2



Dif. Relativa [%] vs Media - TiO2

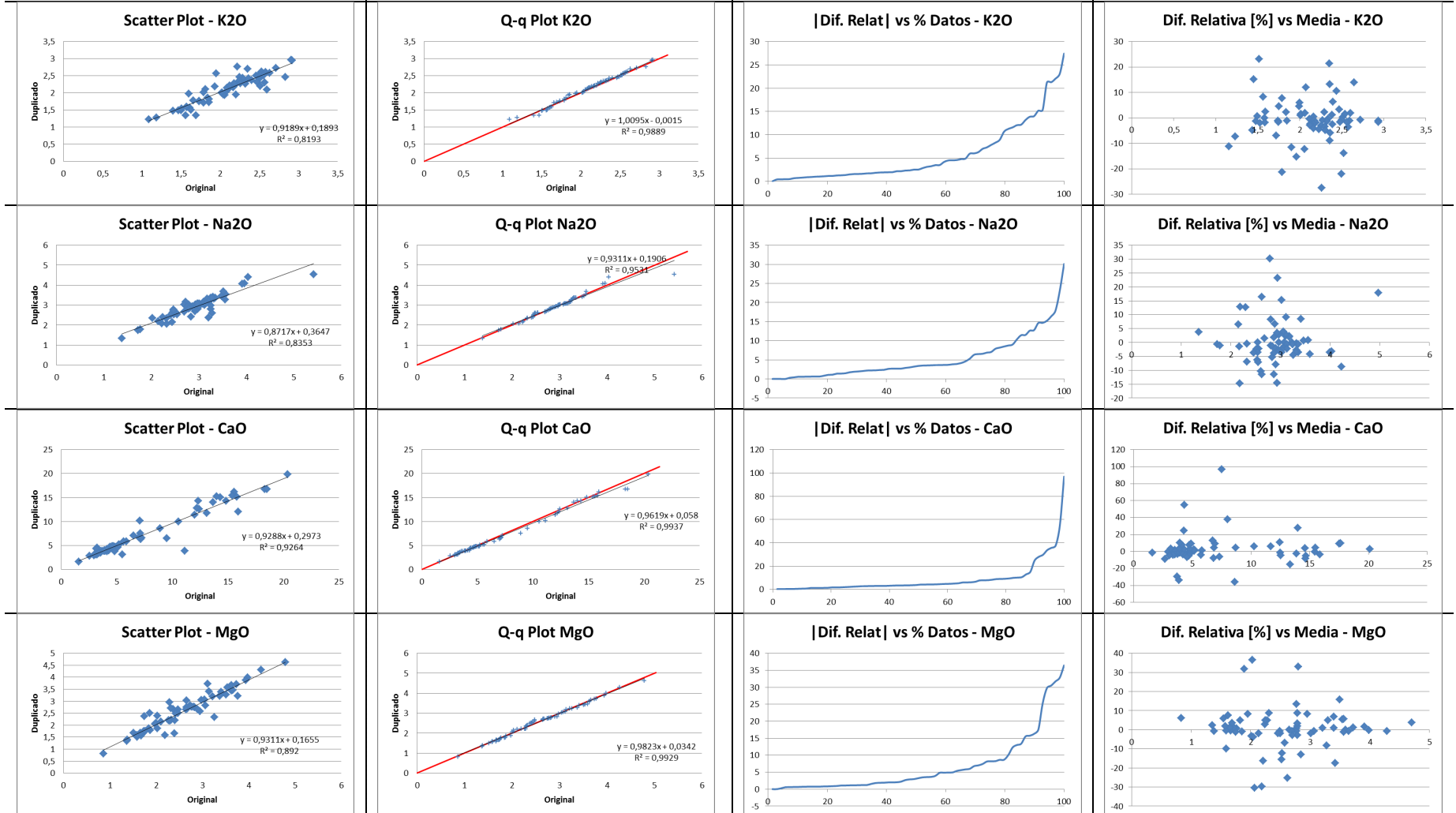


Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio



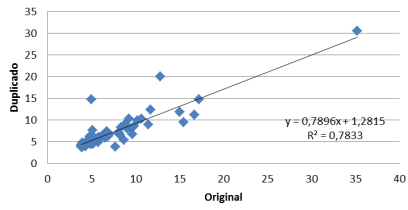
Gráficos de Dispersión

GRÁFICOS Q-Q

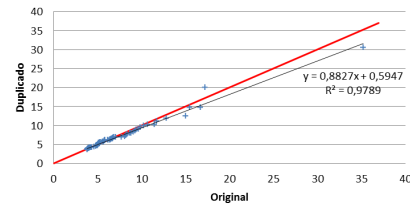
Diferencia Relativa absoluta vs % de Datos

Gráficos de Diferencia Relativa vs Promedio

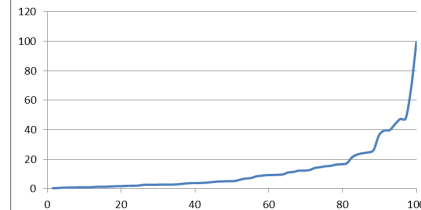
Scatter Plot - Fe2O3



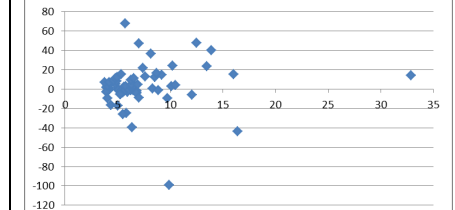
Q-q Plot Fe2O3



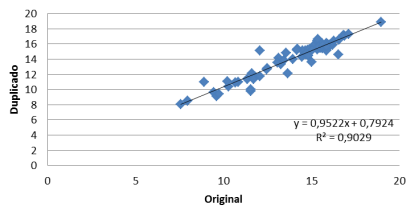
|Dif. Relat| vs % Datos - Fe2O3



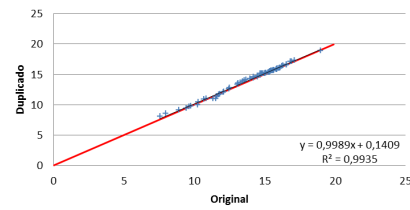
Dif. Relativa [%] vs Media - Fe2O3



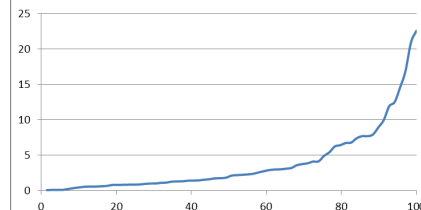
Scatter Plot - Al2O3



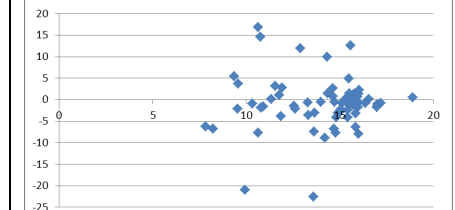
Q-q Plot Al2O3



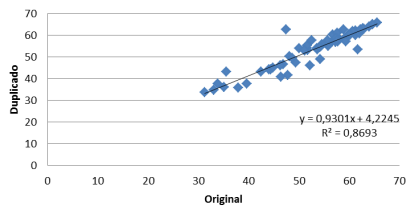
|Dif. Relat| vs % Datos - Al2O3



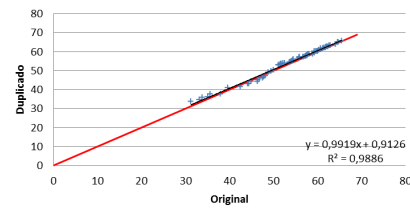
Dif. Relativa [%] vs Media - Al2O3



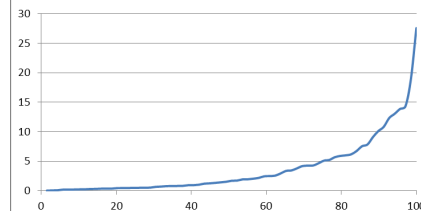
Scatter Plot - SiO2



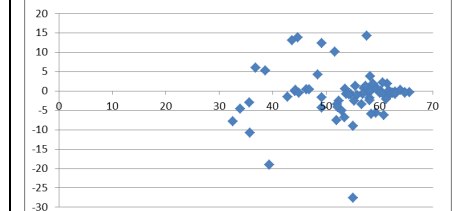
Q-q Plot SiO2



|Dif. Relat| vs % Datos - SiO2

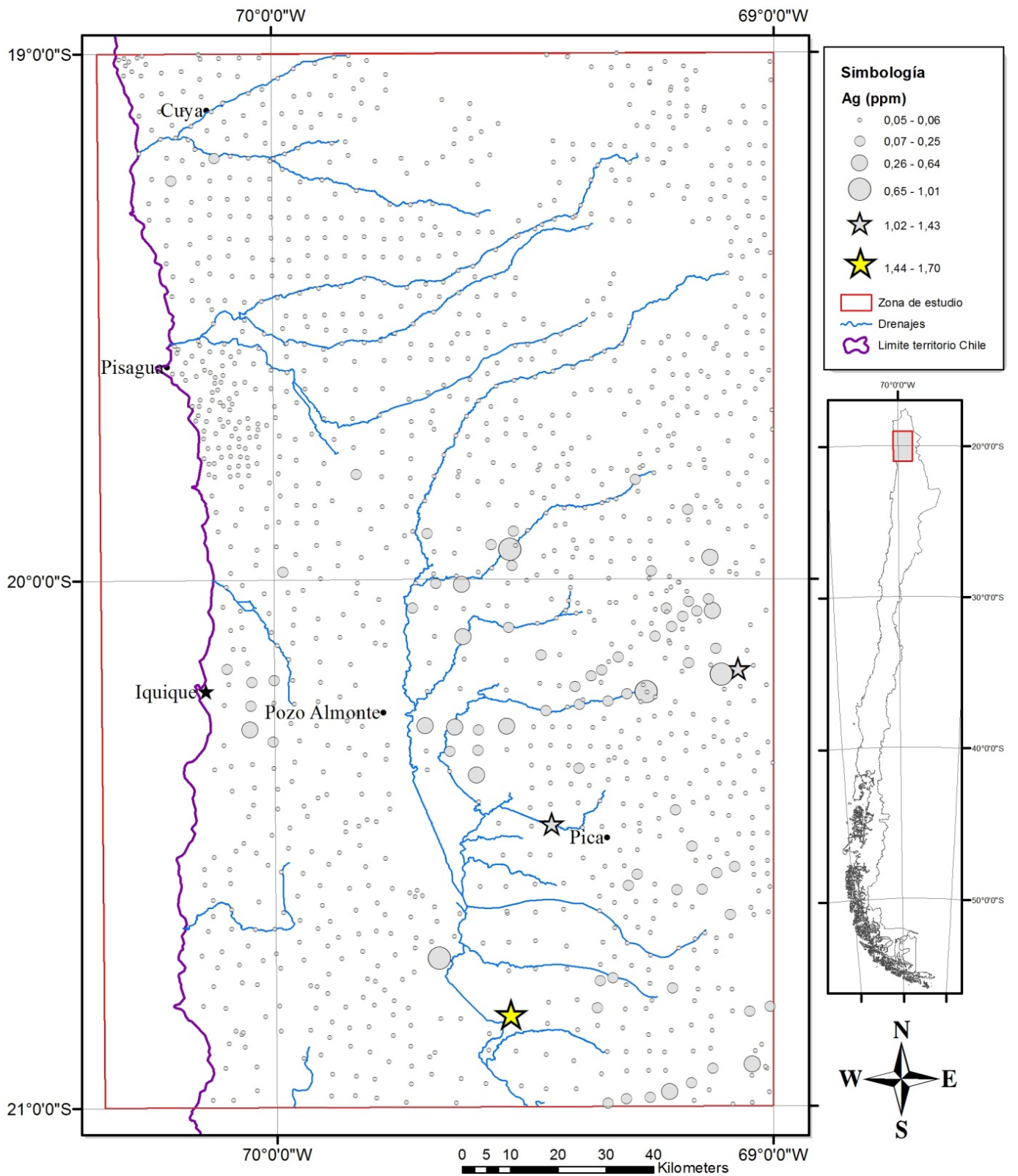


Dif. Relat [%] vs Media - SiO2

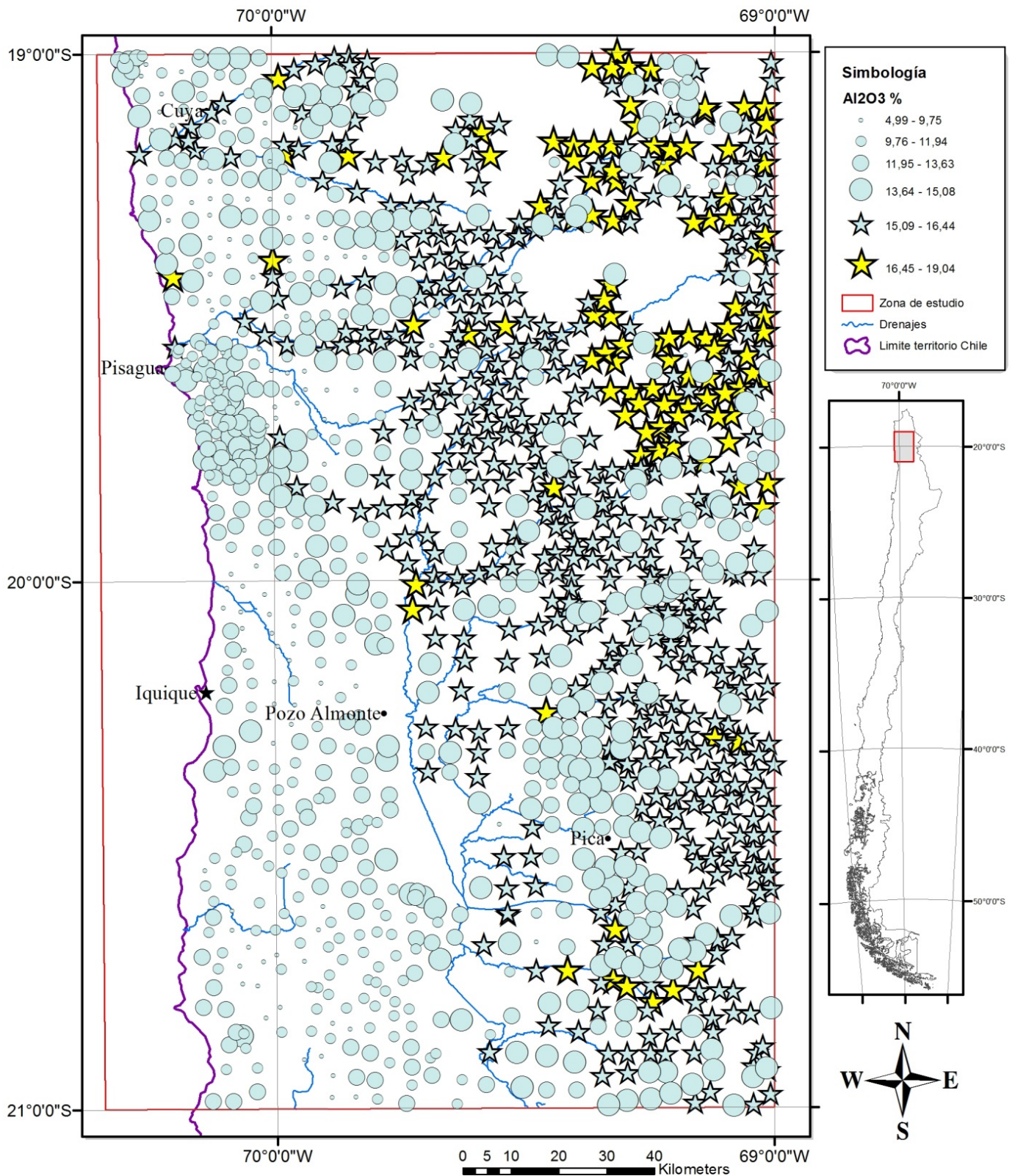


### **8.3. Mapas univariados**

# Distribución de concentraciones de Plata (ppm)

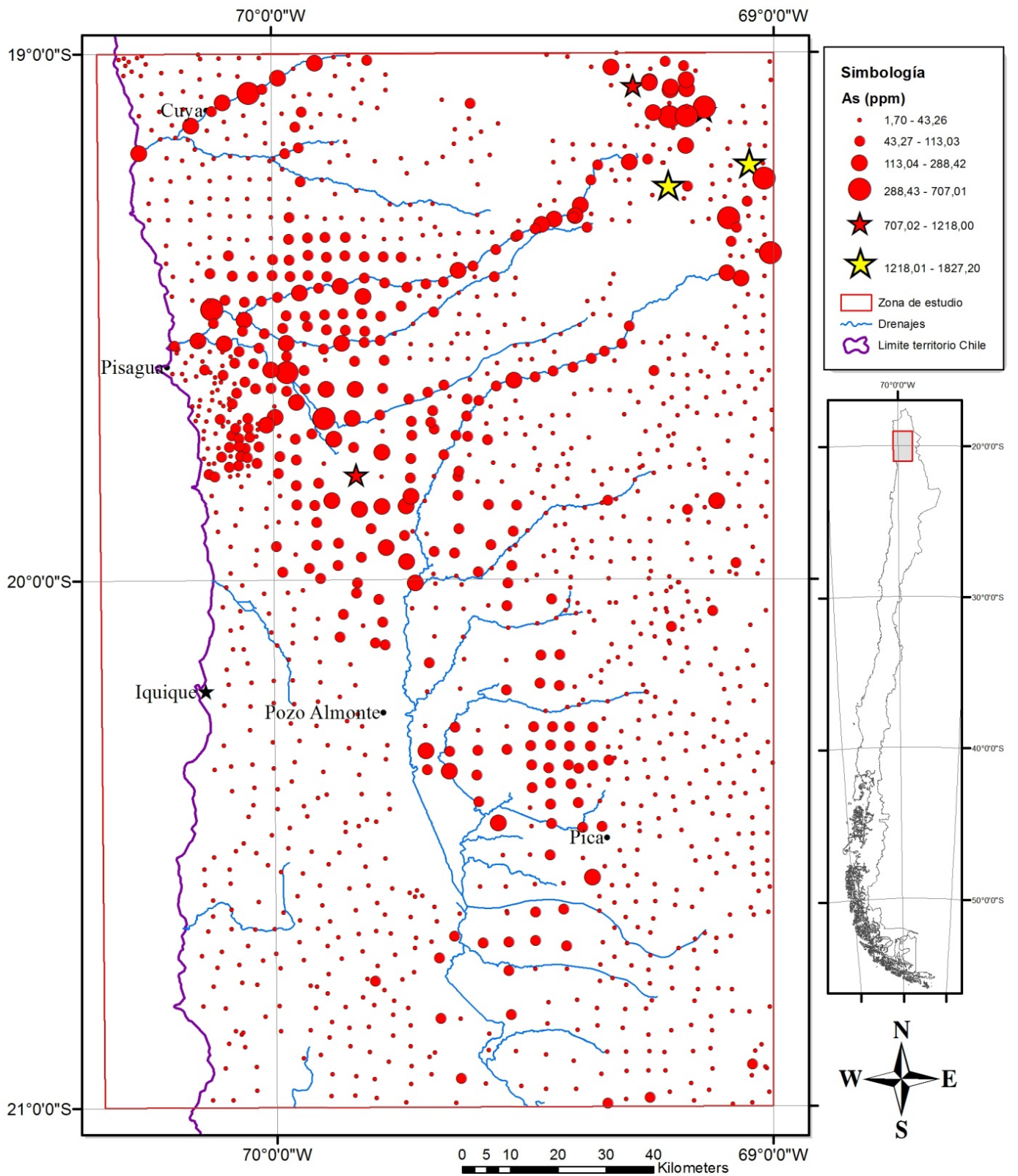


# Distribución de concentraciones de Aluminio (%)

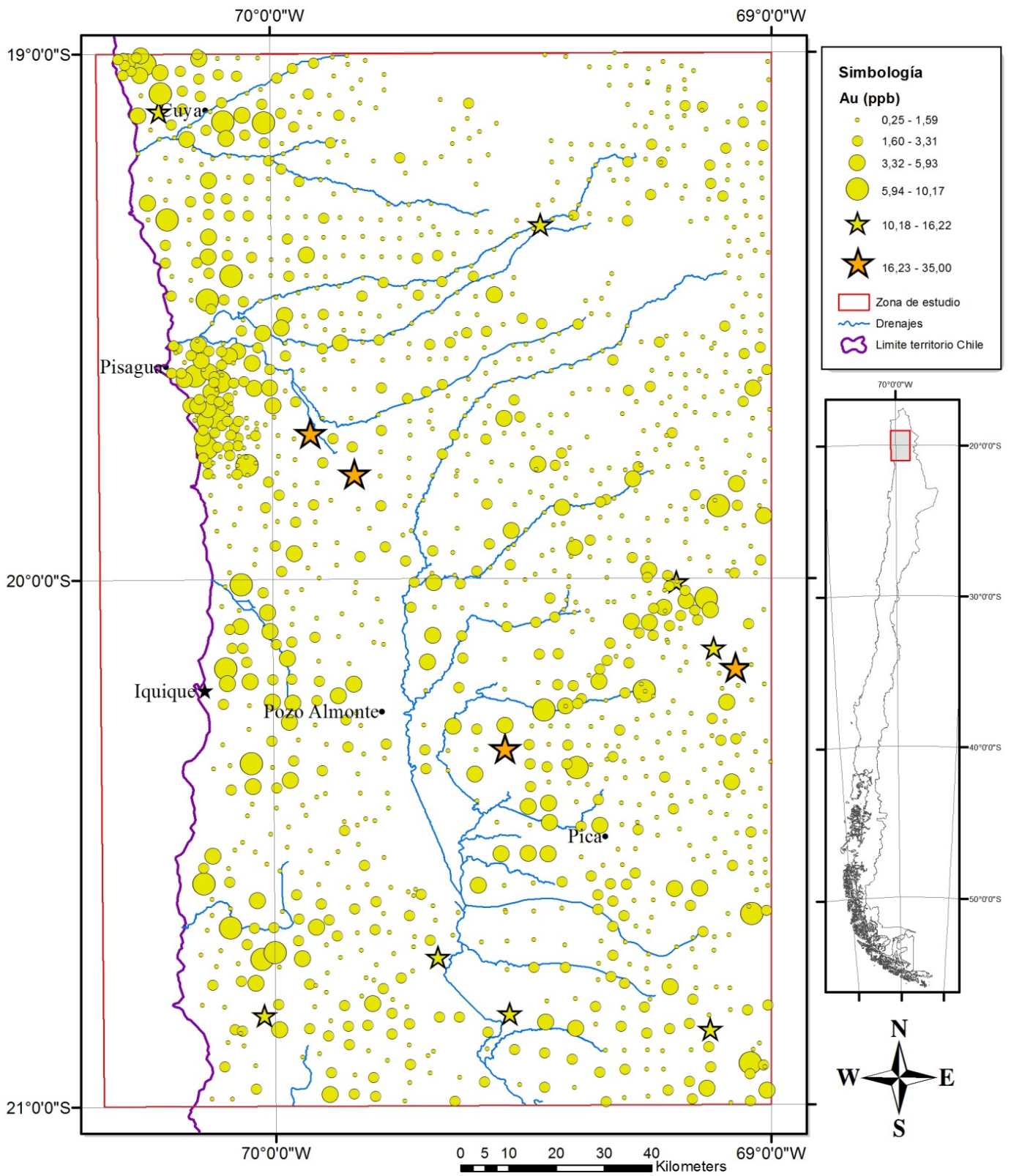




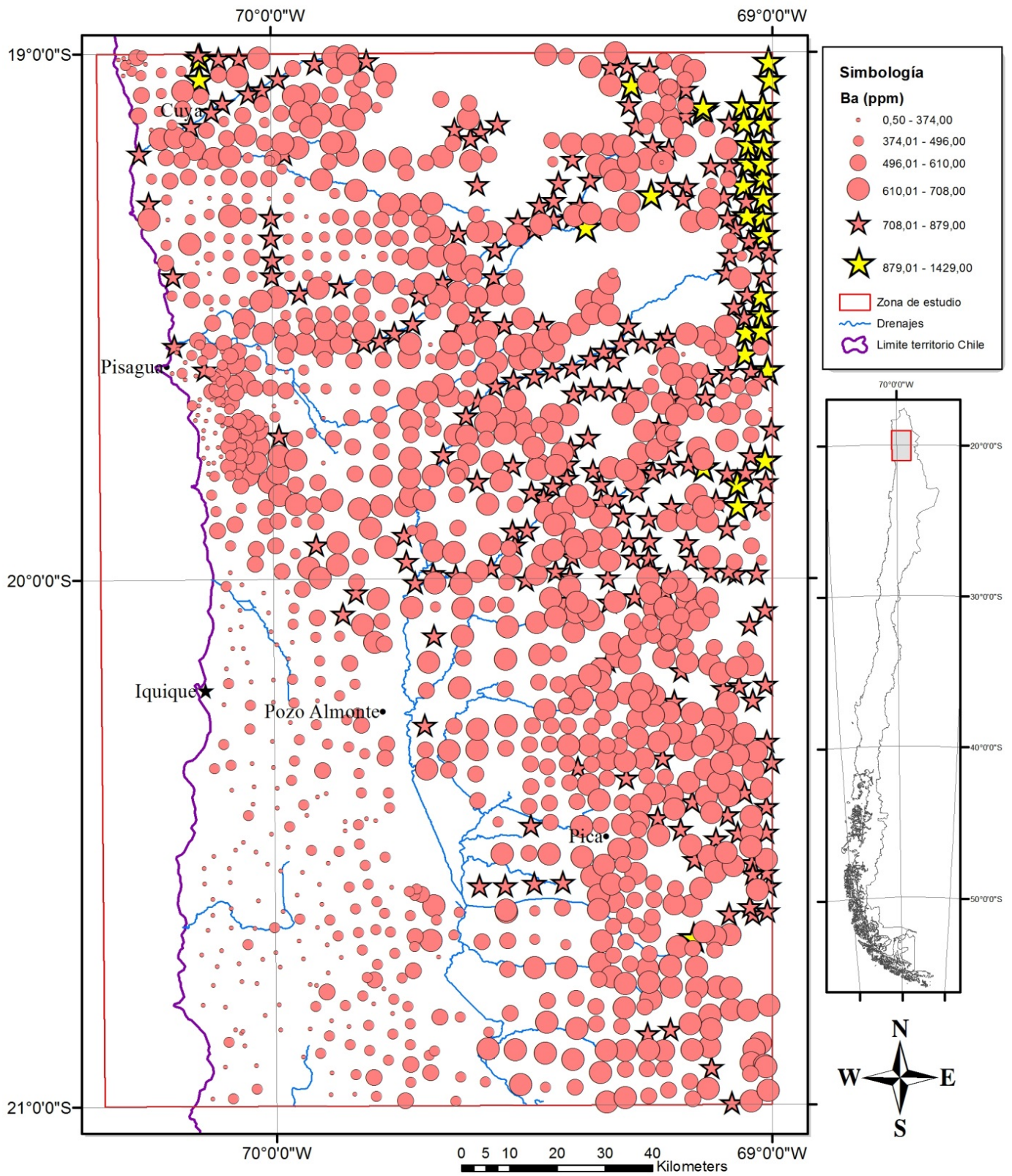
# Distribución de concentraciones de Arsénico (ppm)



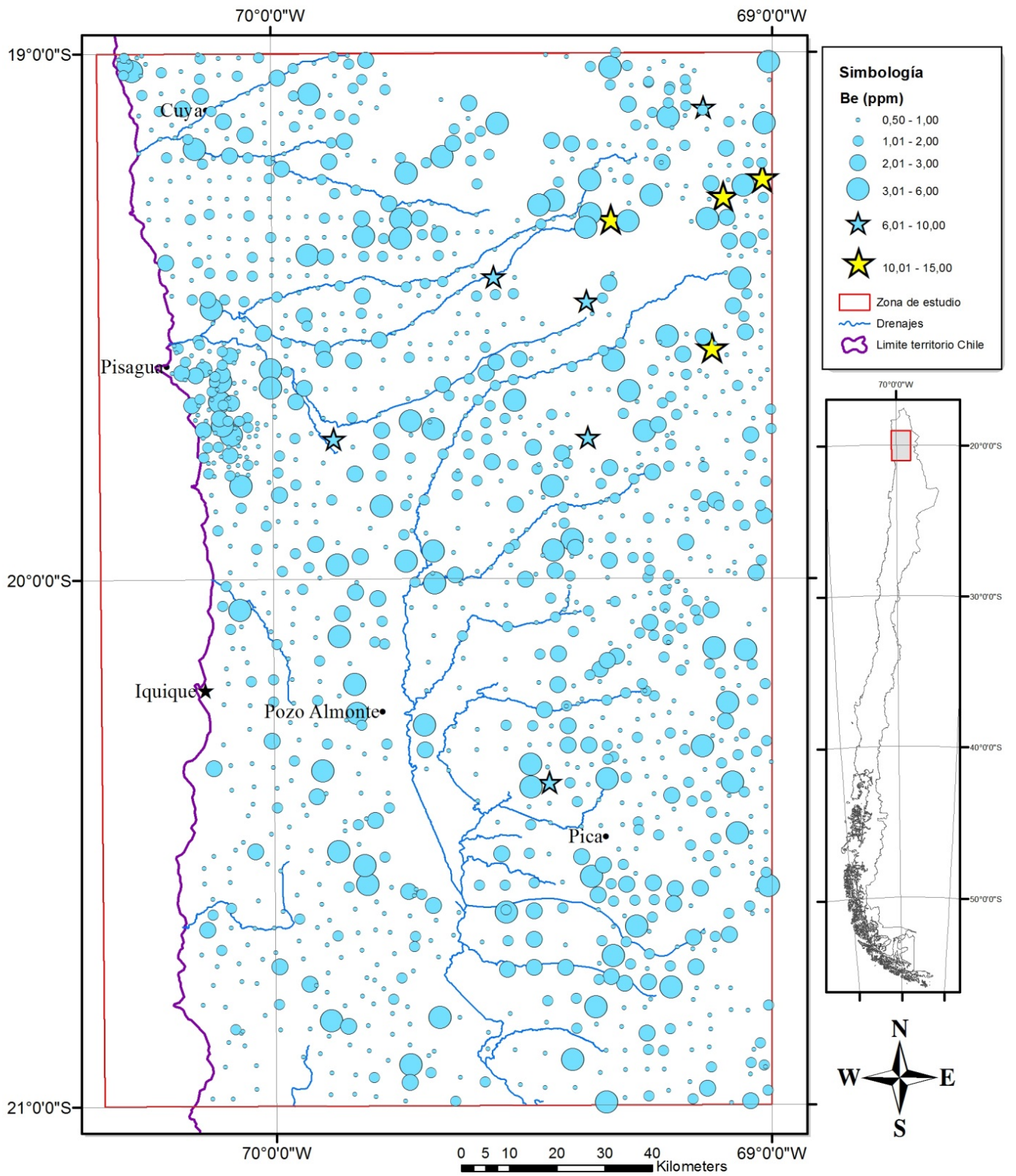
# Distribución de concentraciones de Oro (ppb)



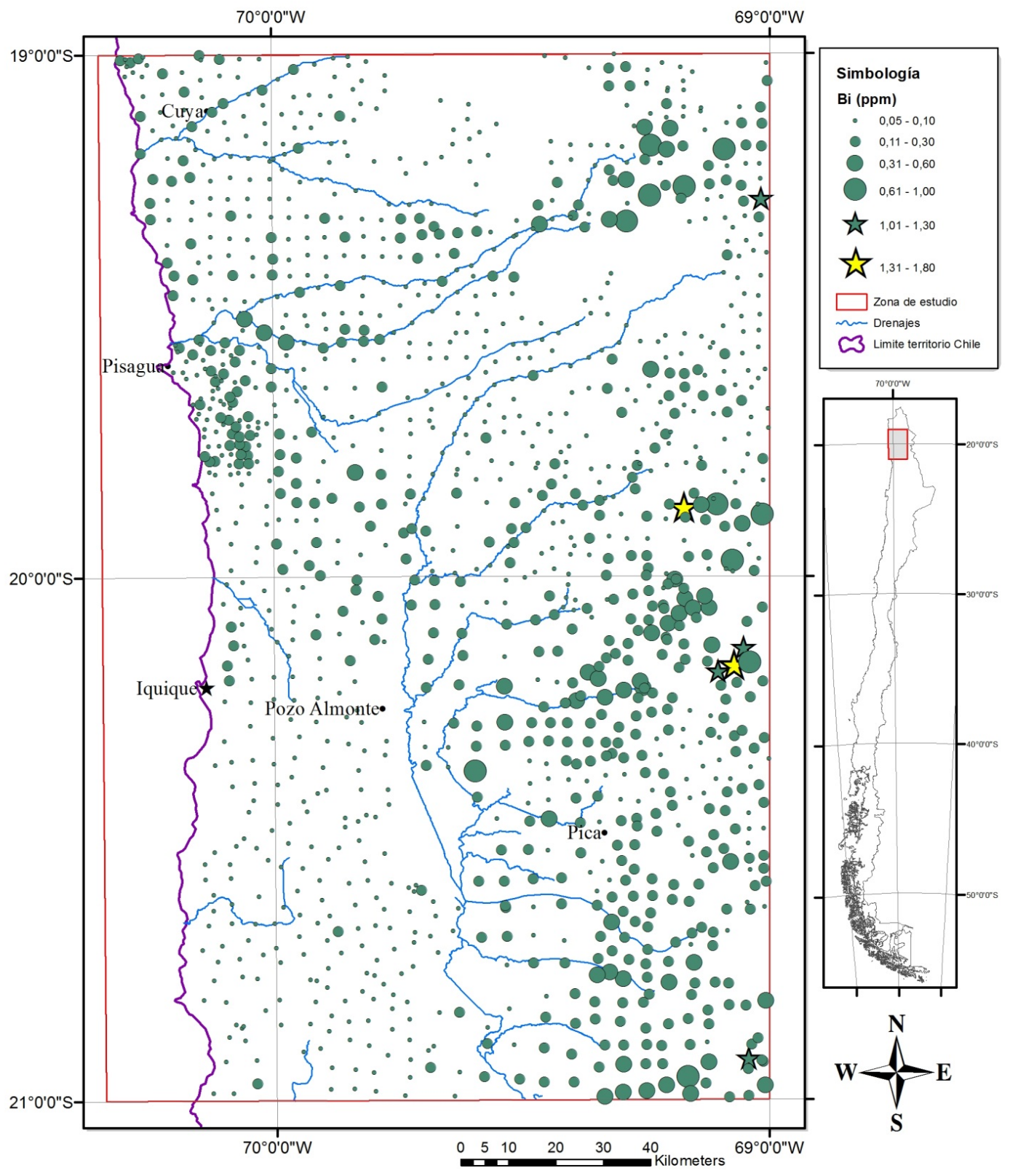
# Distribución de concentraciones de Bario (ppm)



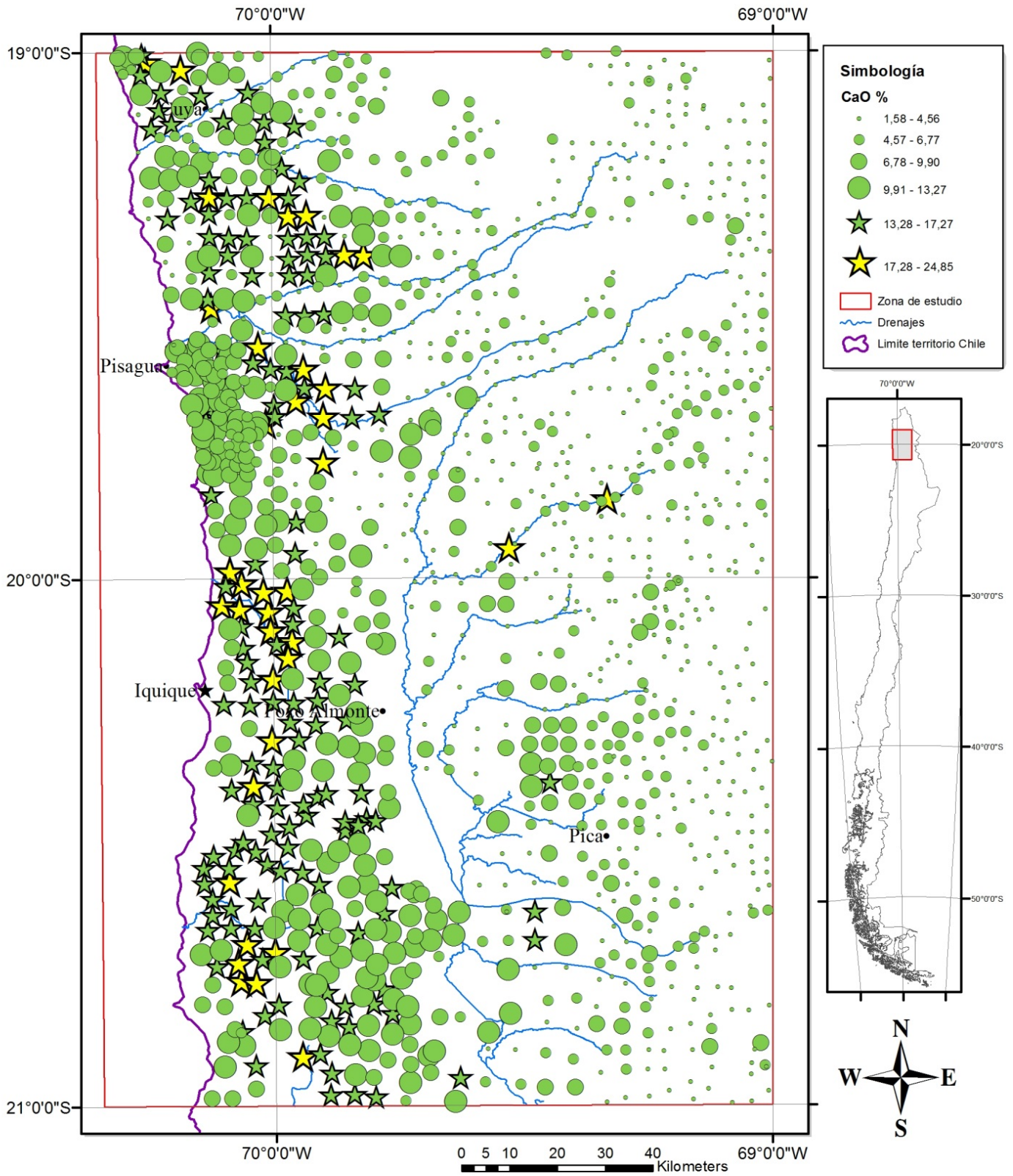
# Distribución de concentraciones de Berilio (ppm)



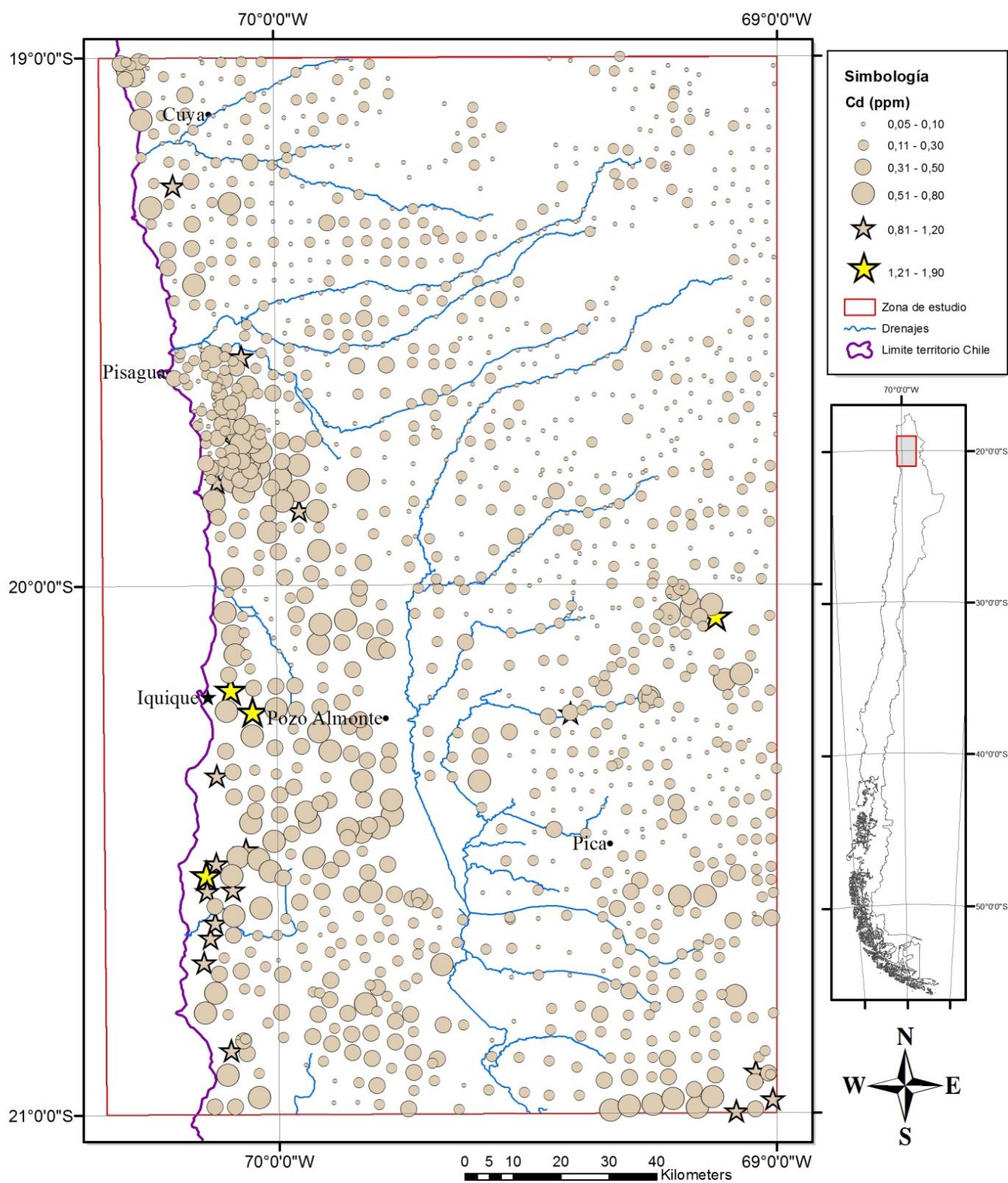
# Distribución de concentraciones de Bismuto (ppm)



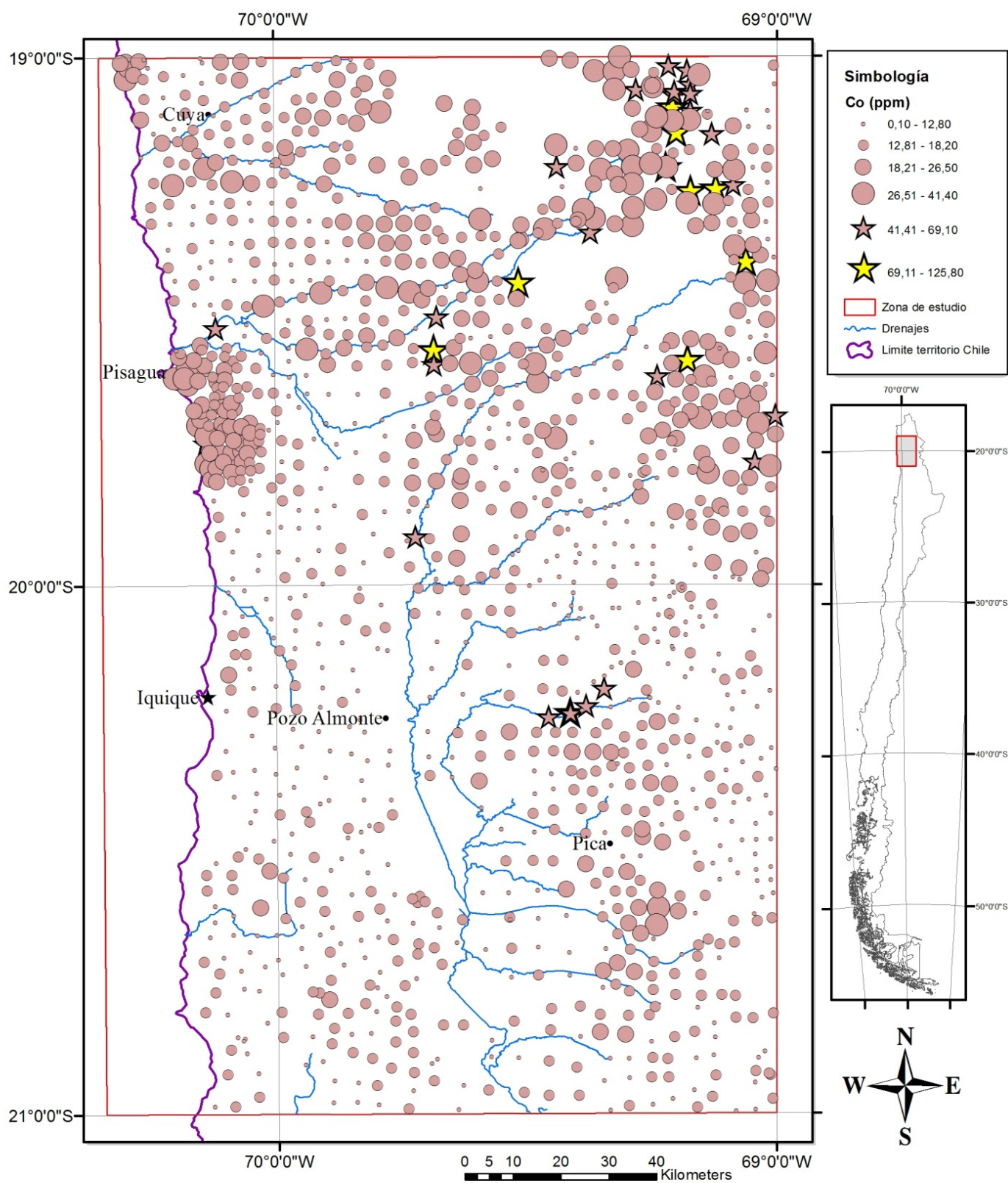
# Distribución de concentraciones de Calcio (%)



# Distribución de concentraciones de Cadmio (ppm)

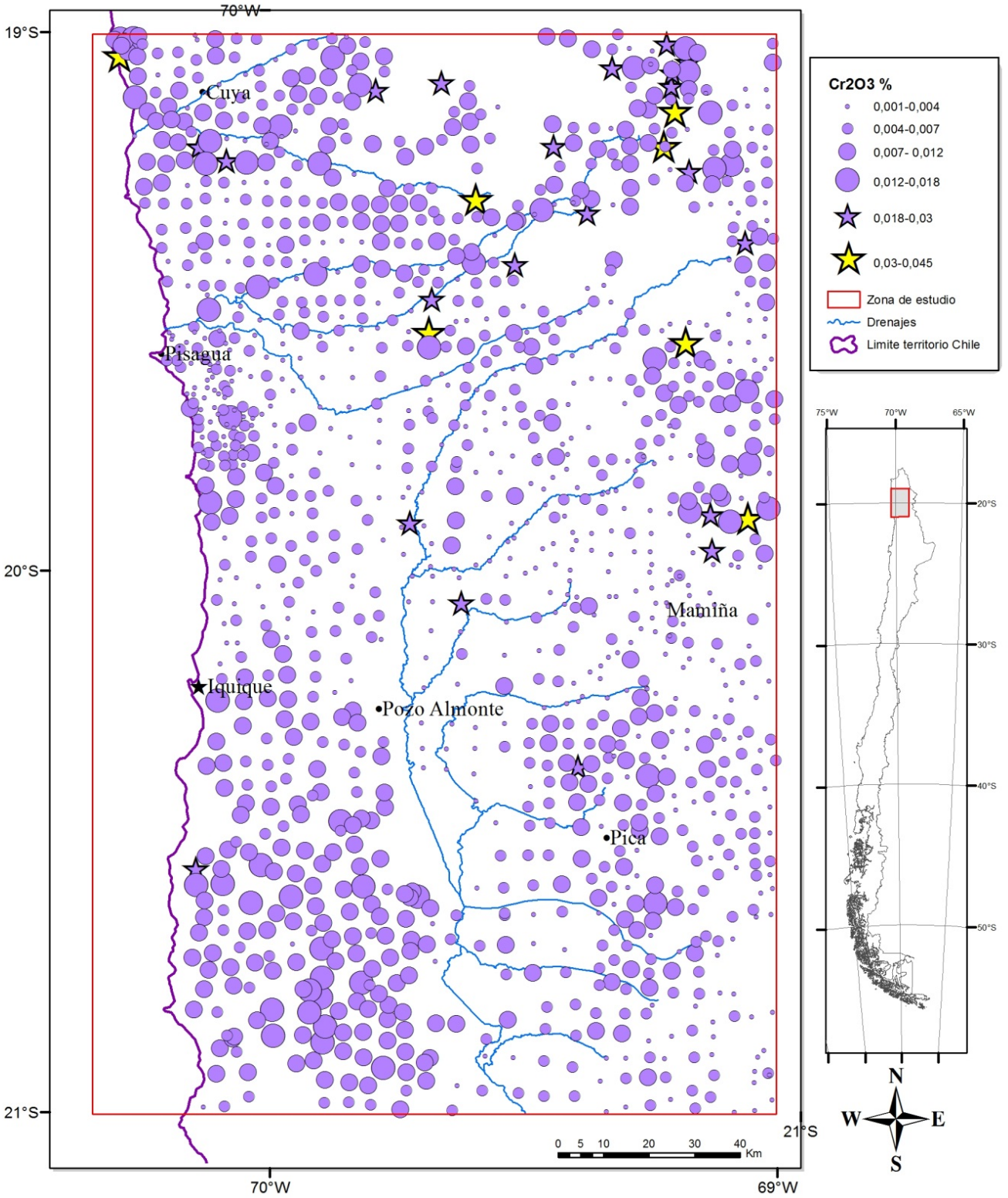


# Distribución de concentraciones de Cobalto (ppm)

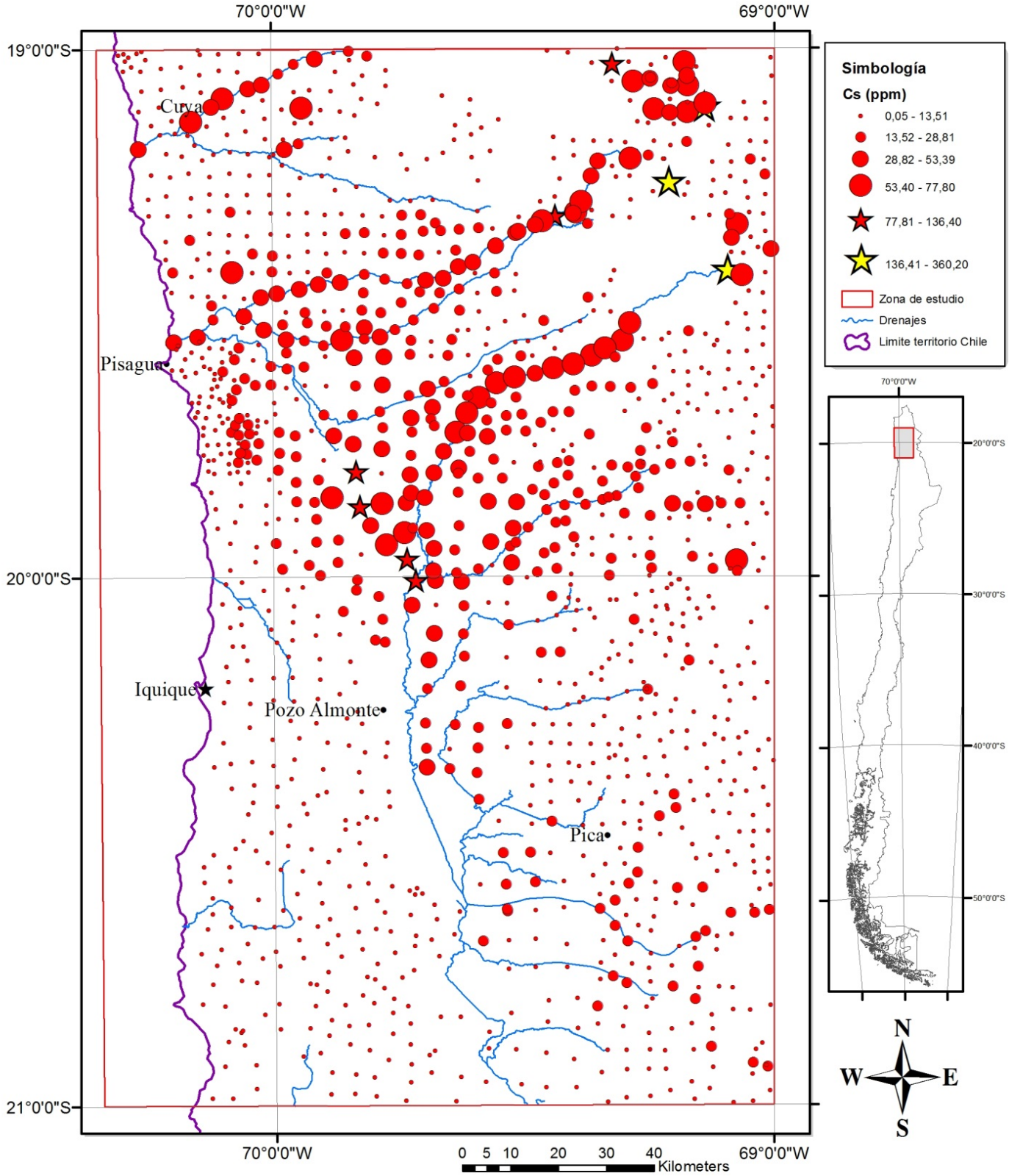




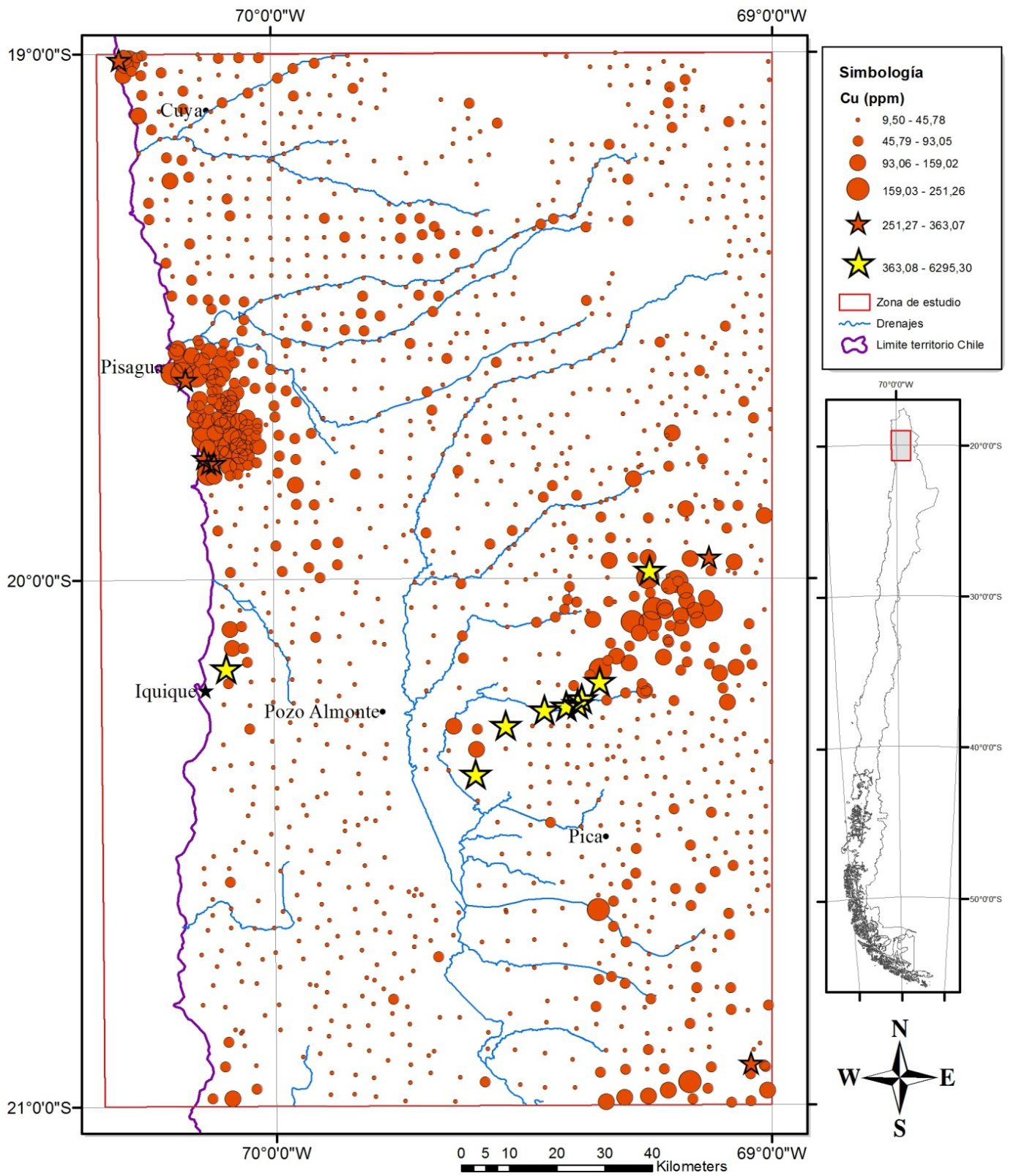
# Distribución de concentraciones de Cromo (%)



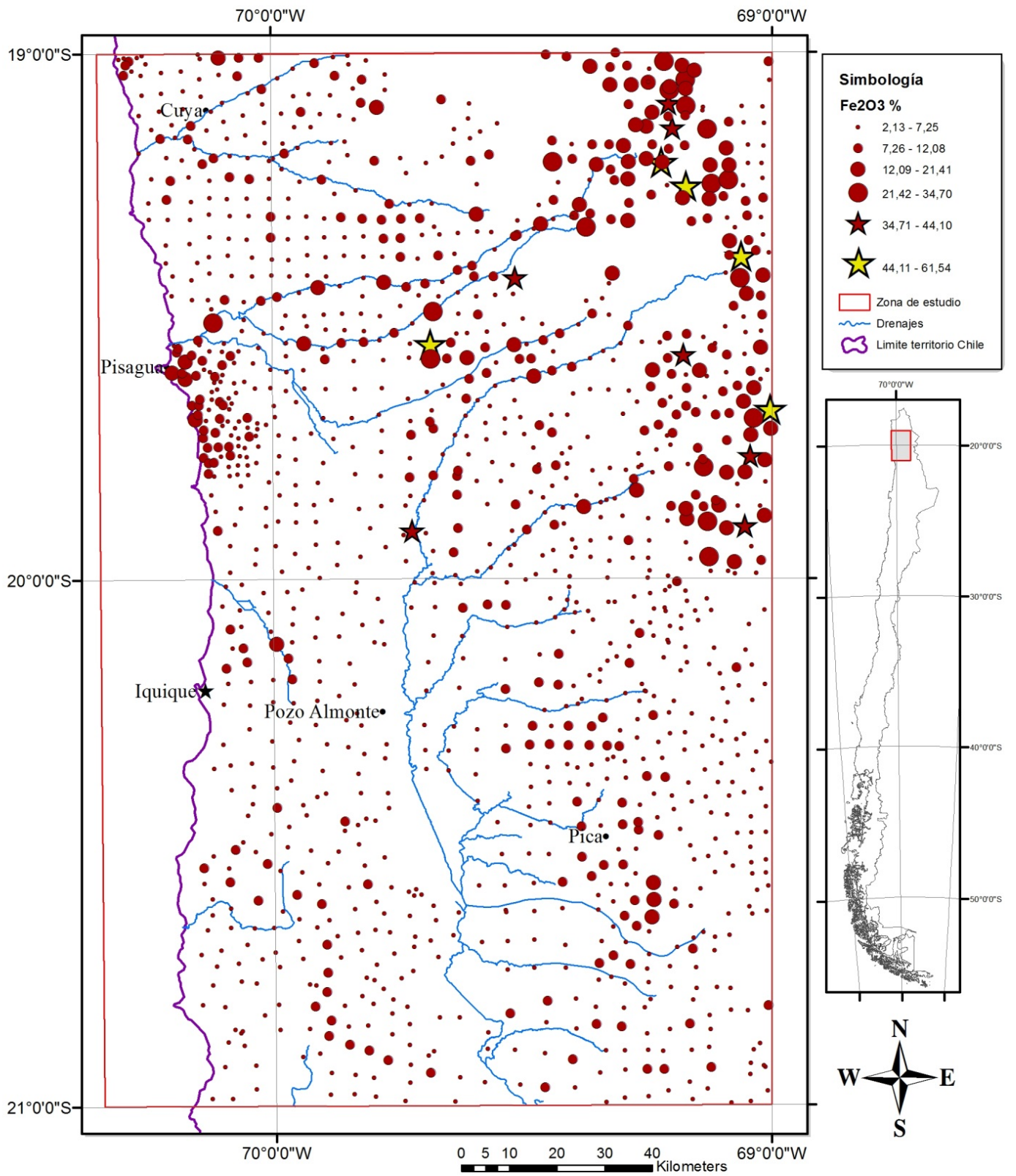
# Distribución de concentraciones de Cesio (ppm)



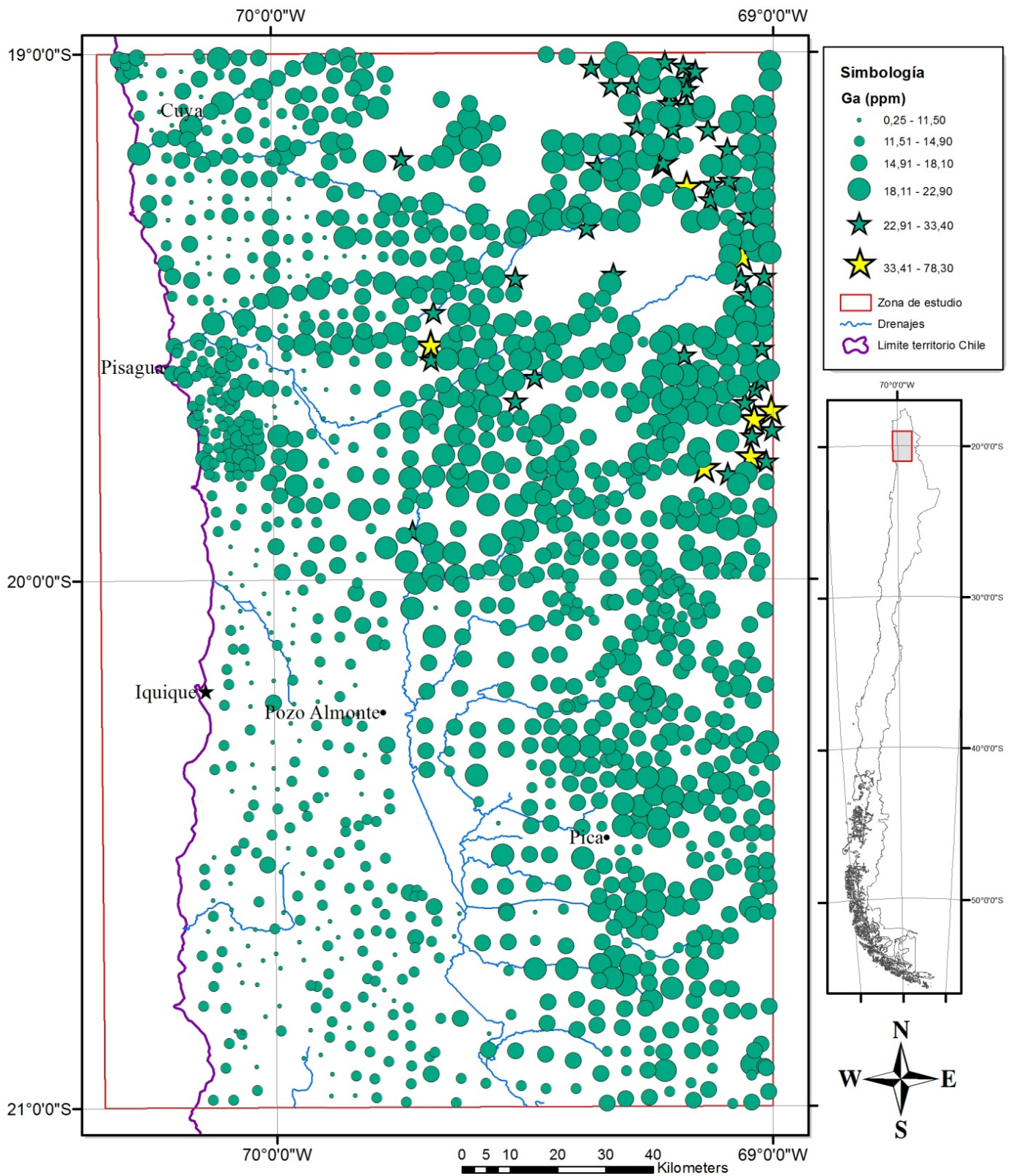
# Distribución de concentraciones de Cobre (ppm)



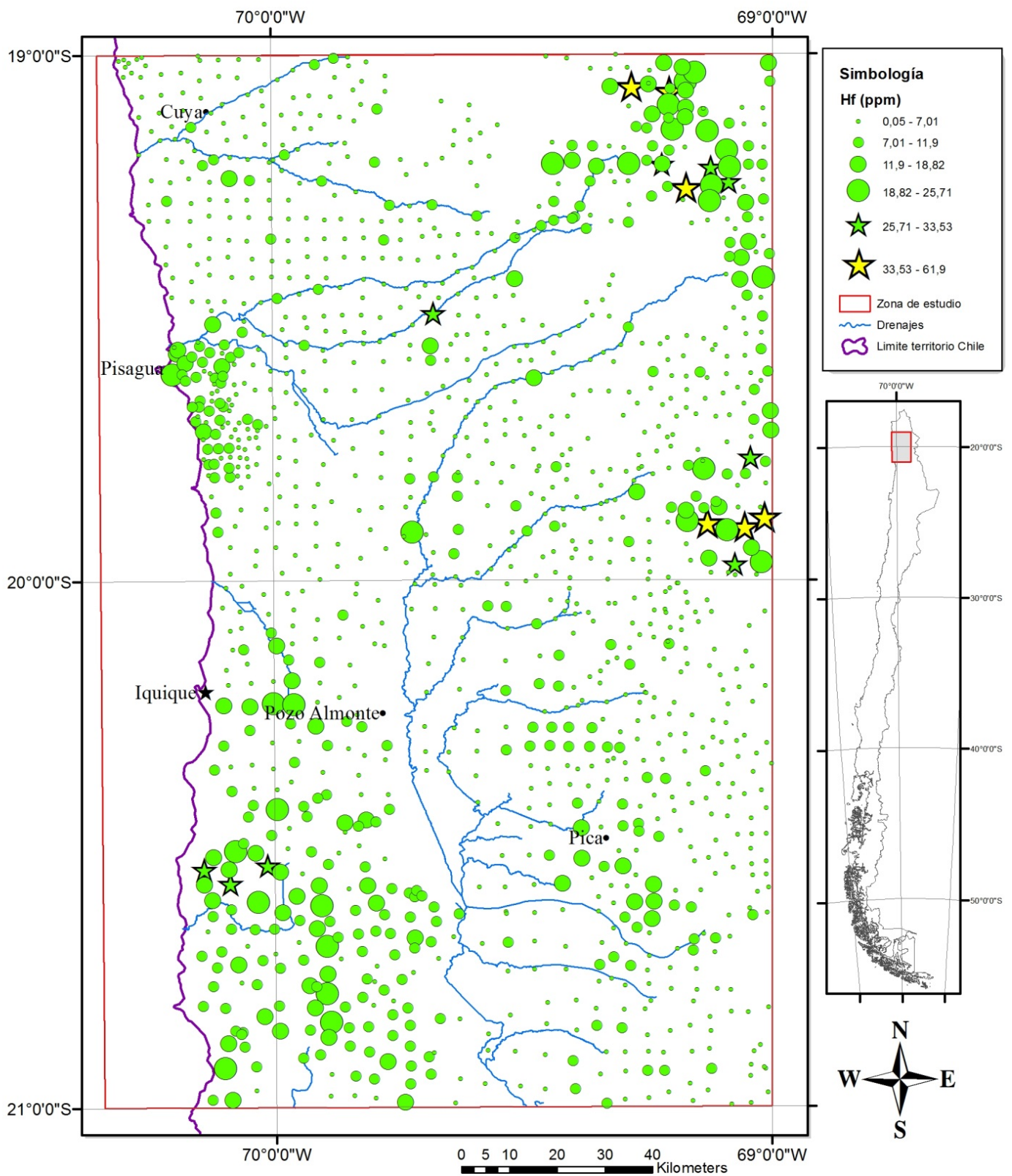
# Distribución de concentraciones de Hierro (%)



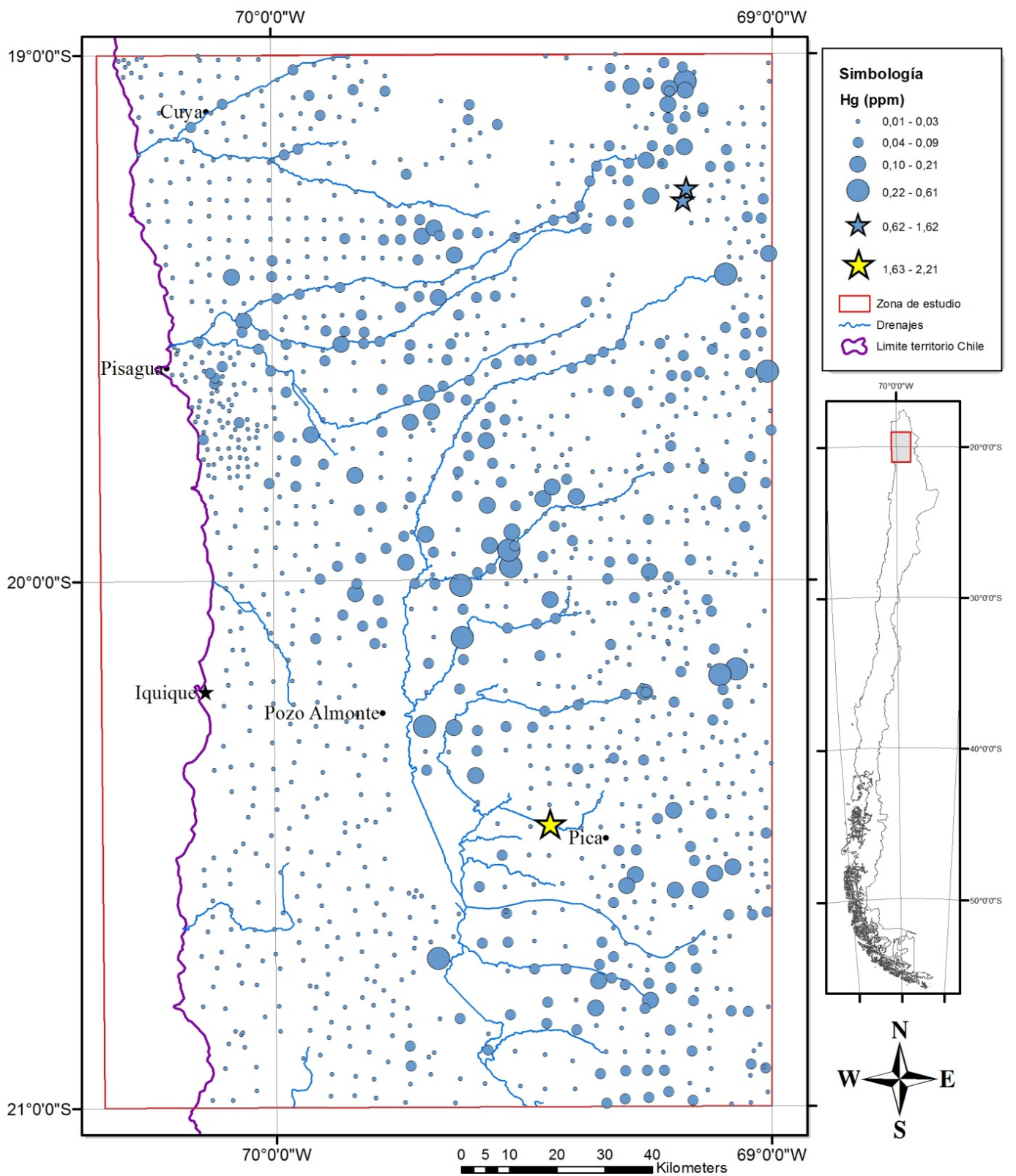
# Distribución de concentraciones de Galio (ppm)



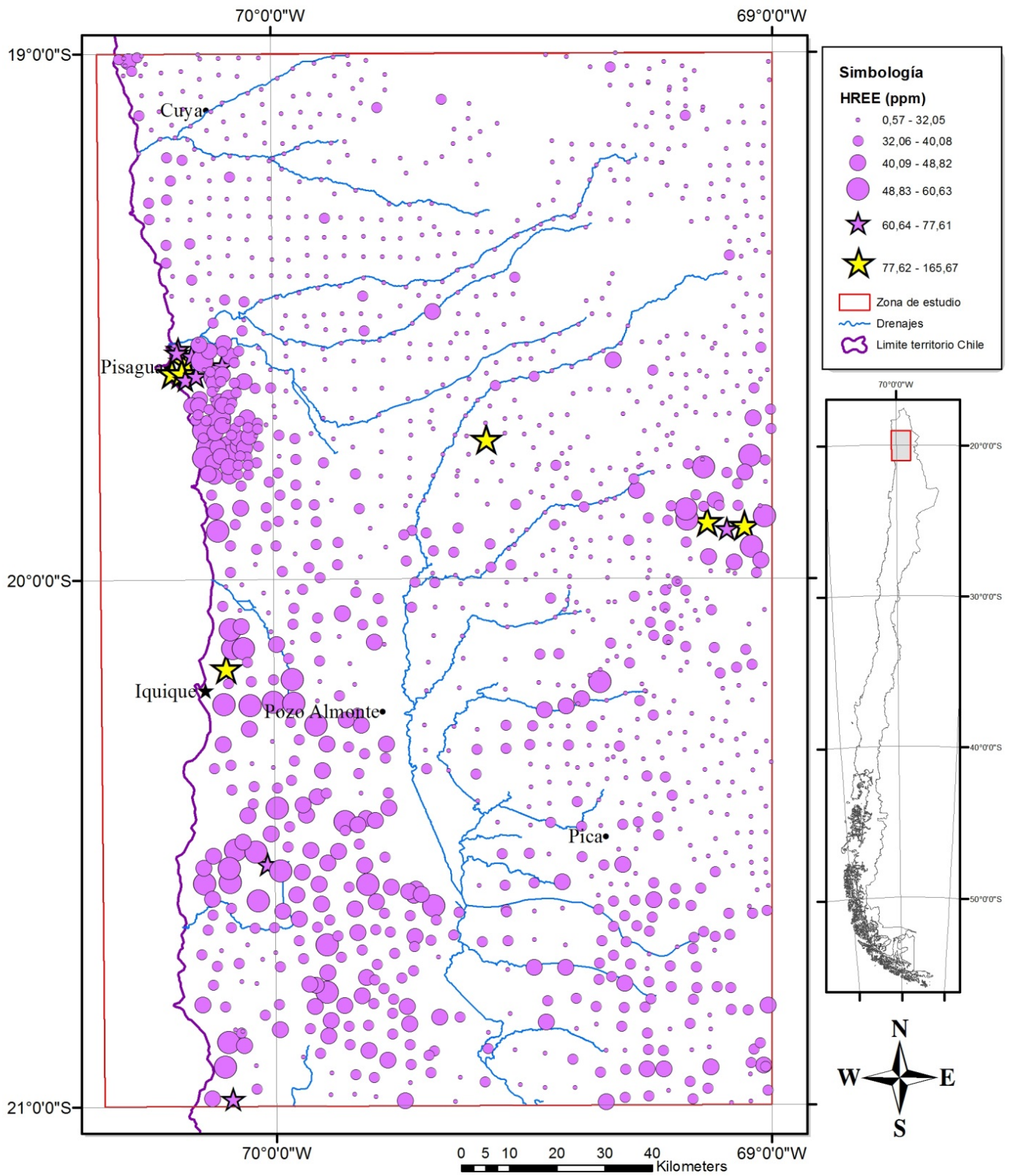
# Distribución de concentraciones de Hafnio (ppm)



# Distribución de concentraciones de Mercurio (ppm)

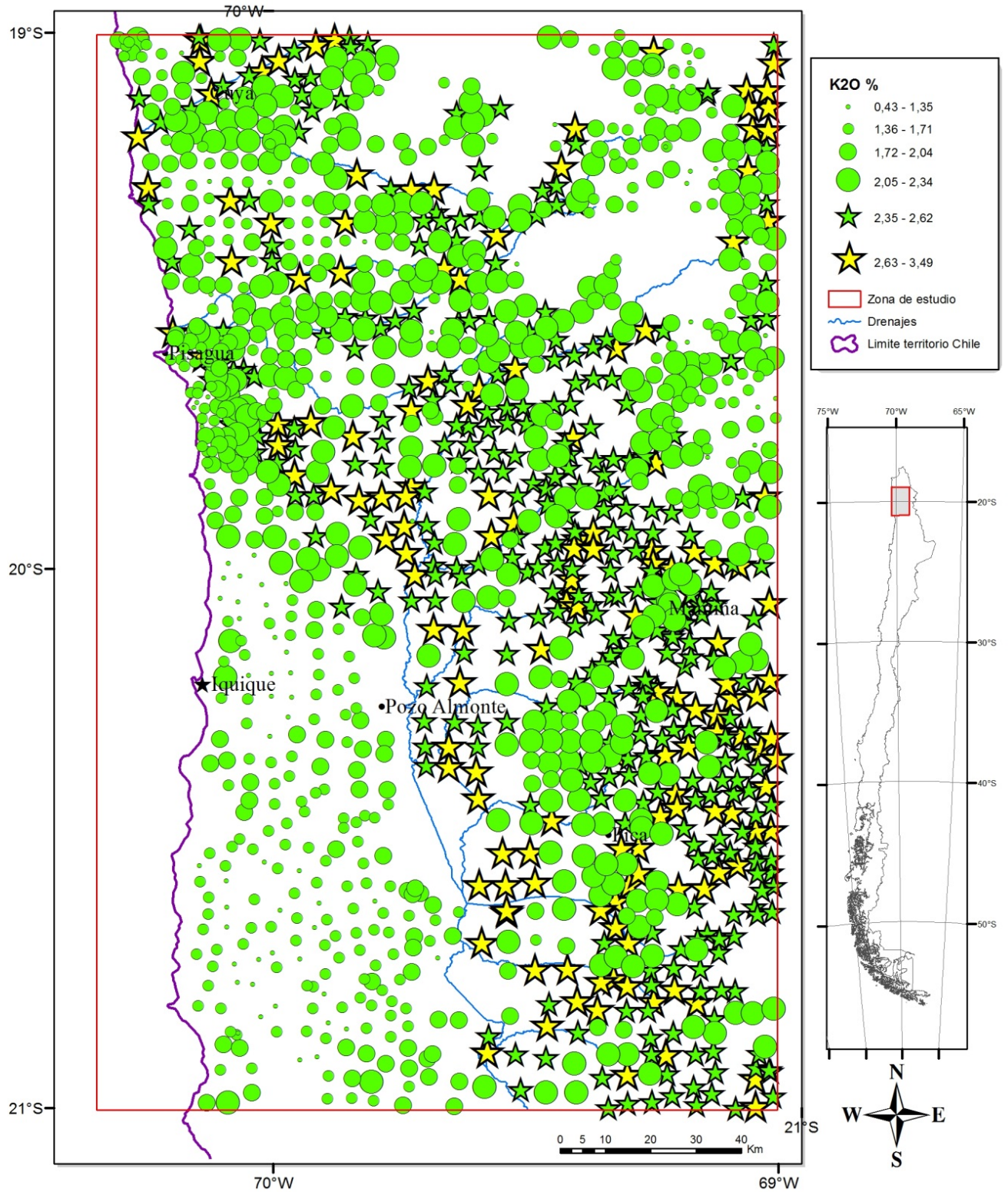


# Distribución de concentraciones de HREE (ppm)

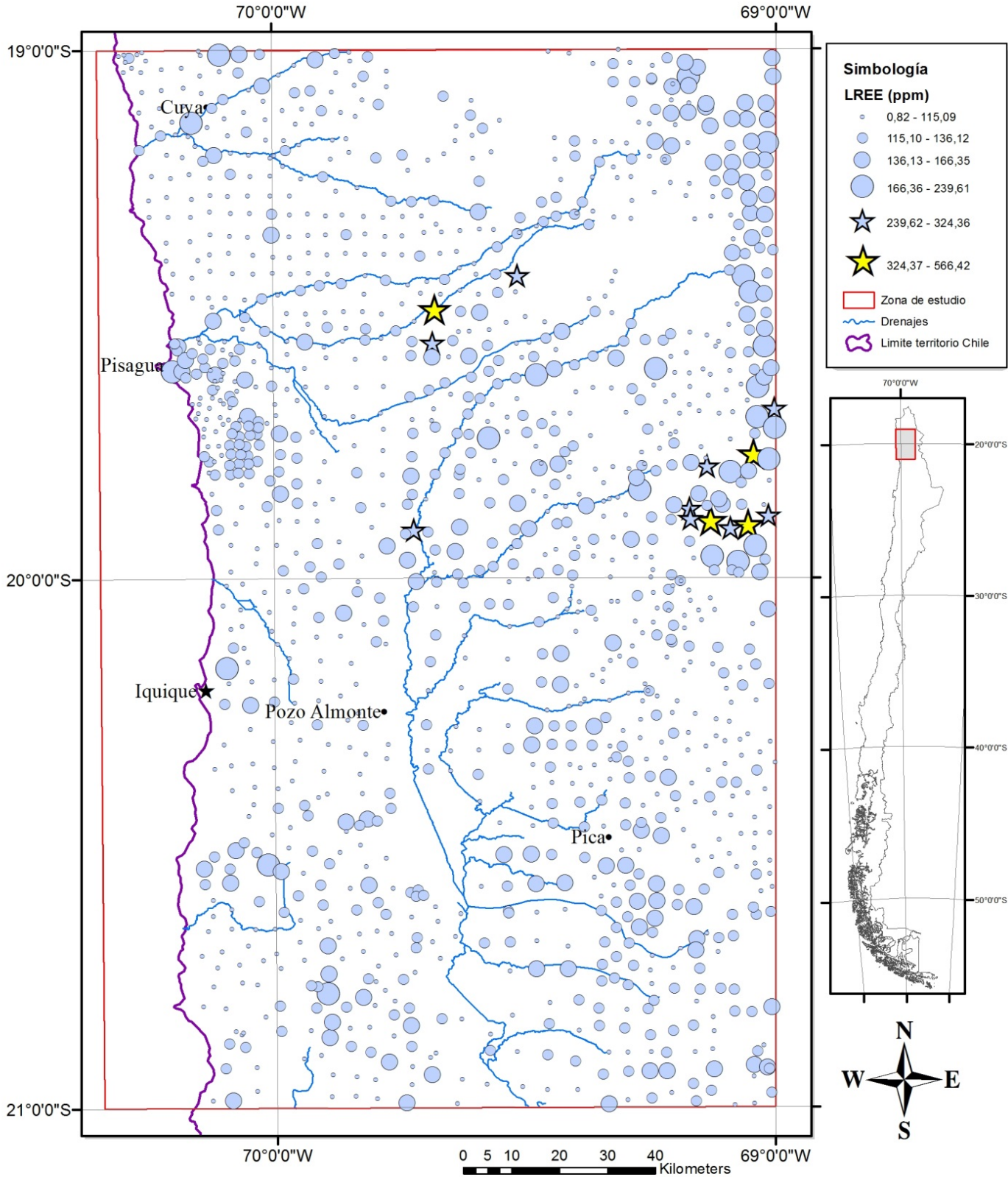




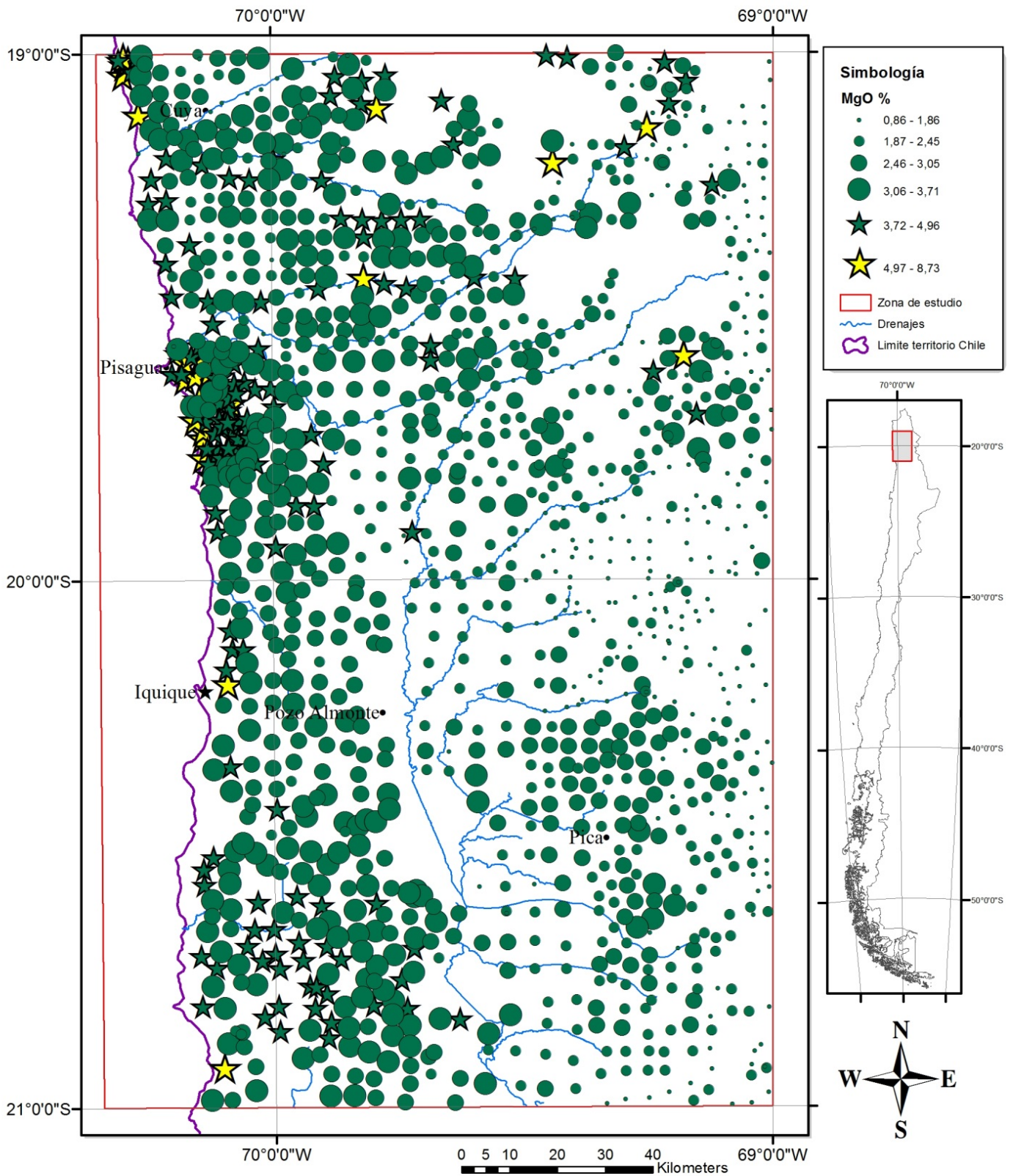
# Distribución de concentraciones de Potasio (%)



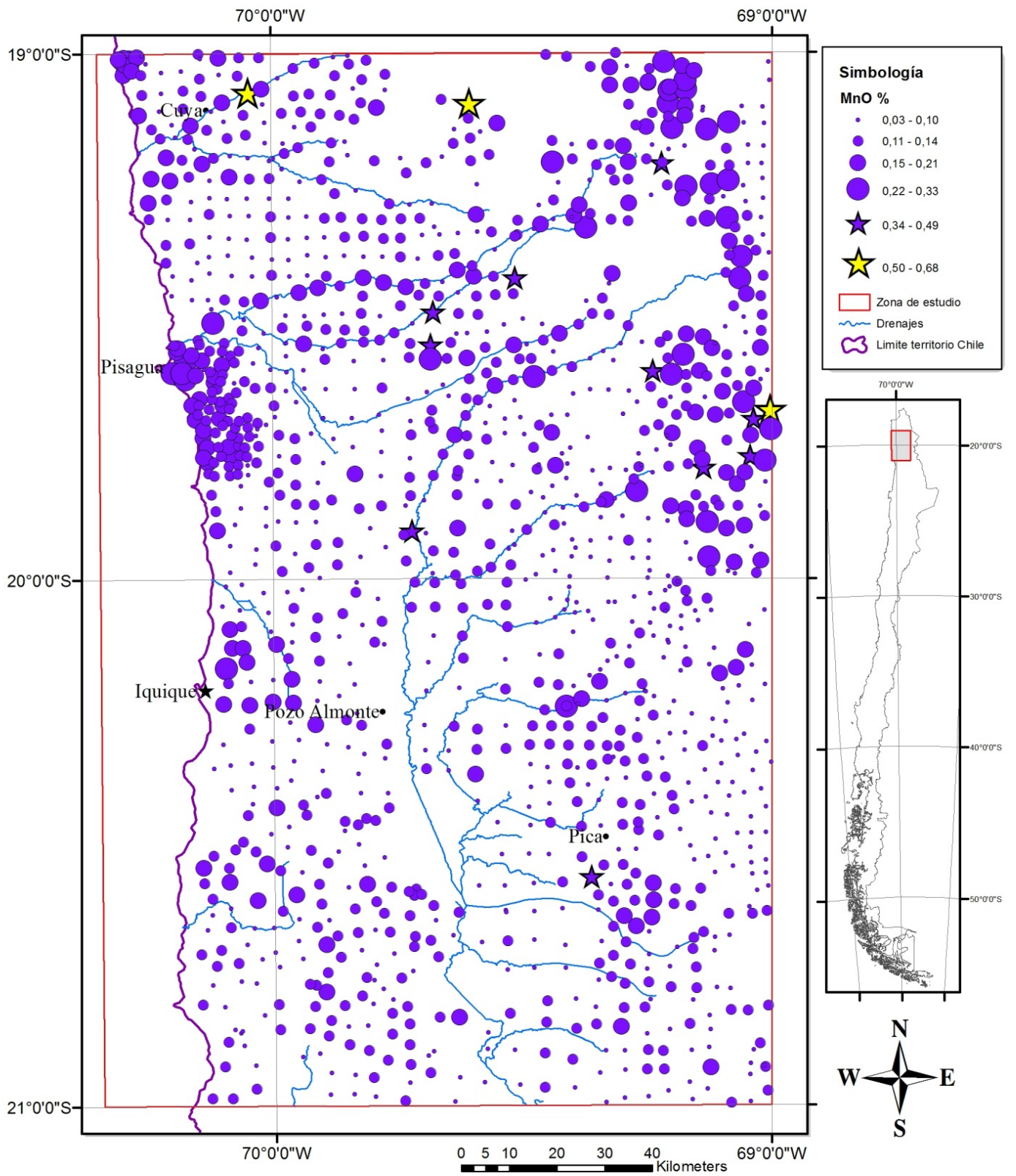
# Distribución de concentraciones de LREE (ppm)



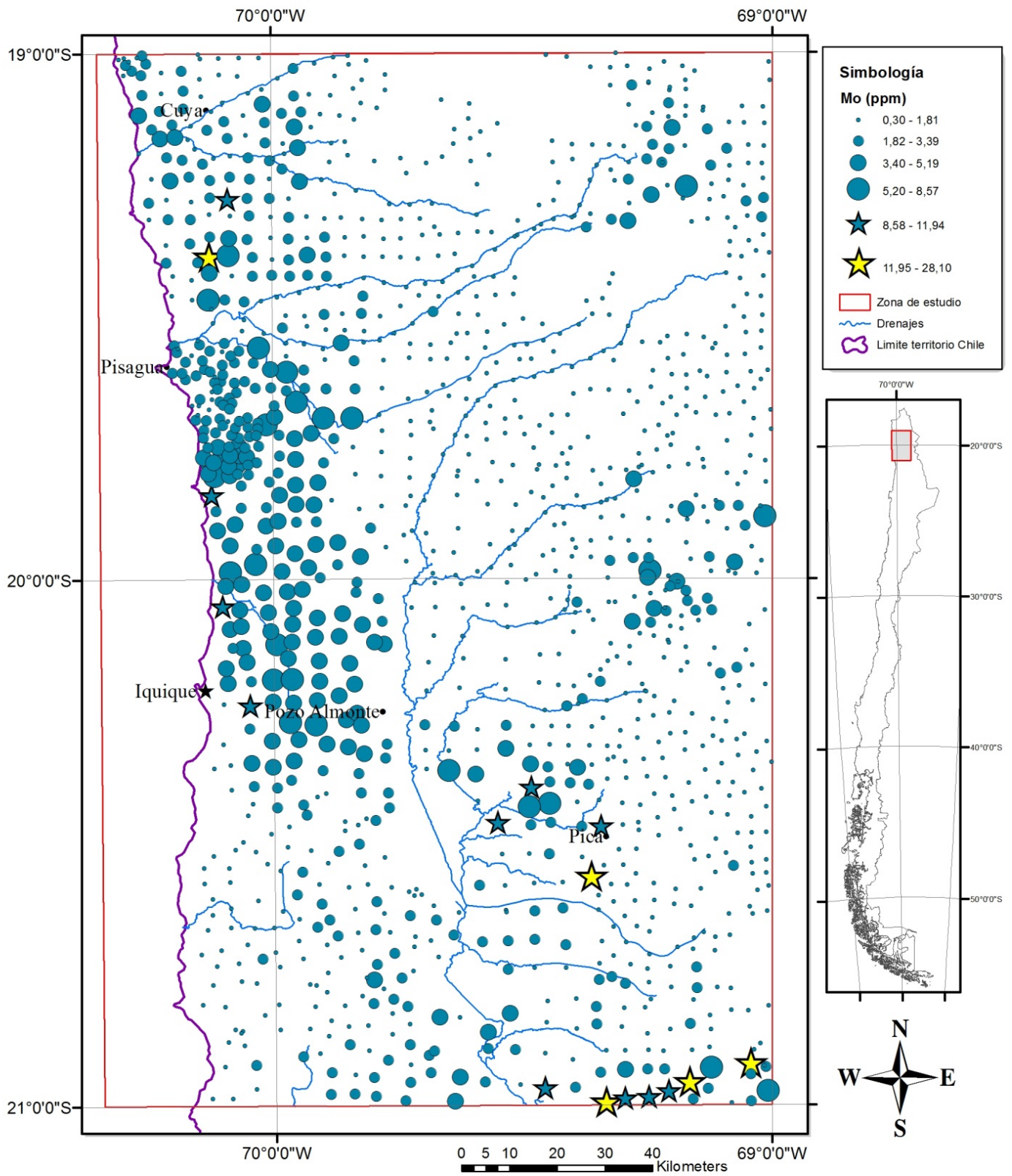
# Distribución de concentraciones de Magnesio (%)



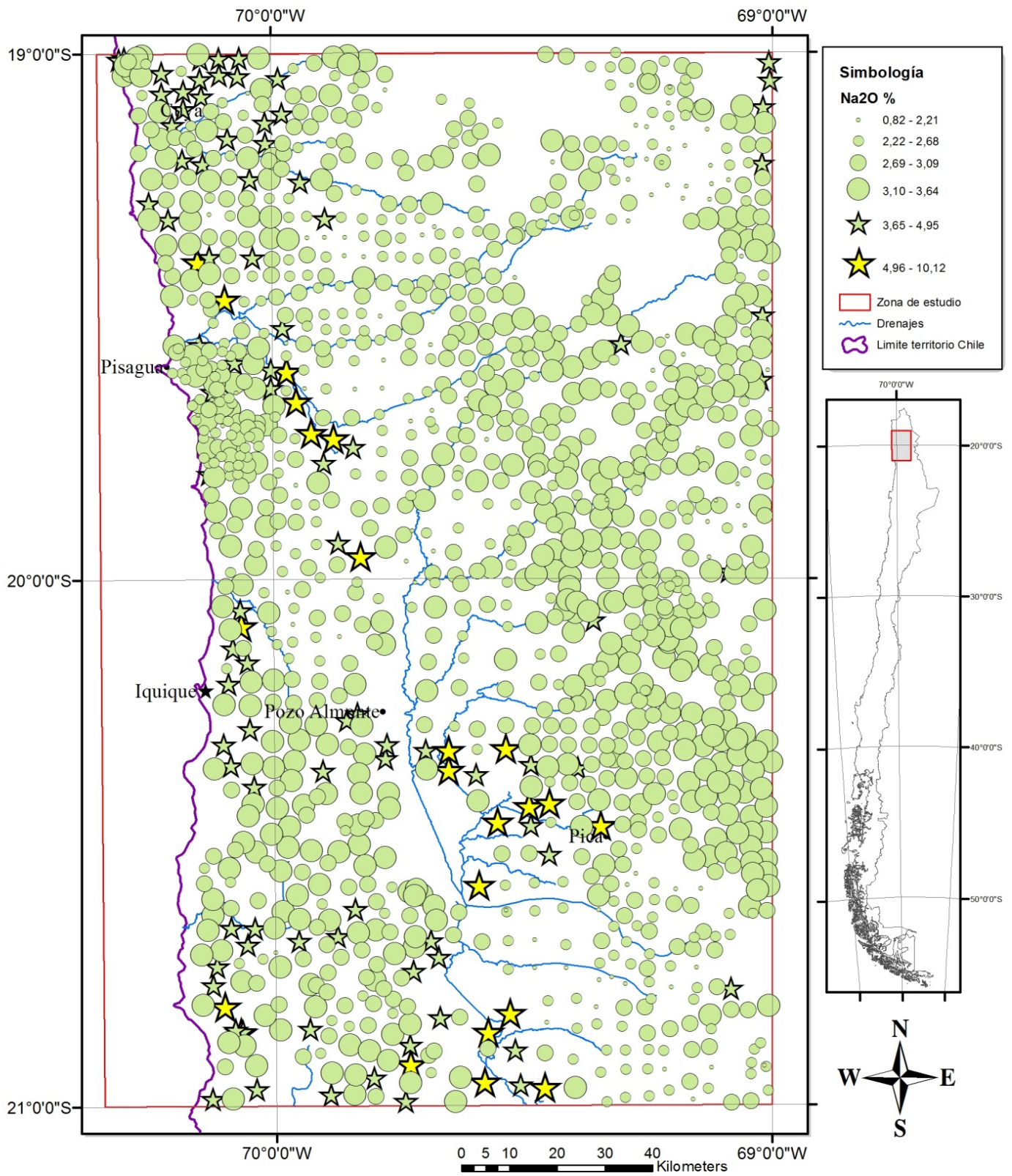
# Distribución de concentraciones de Manganeso (%)



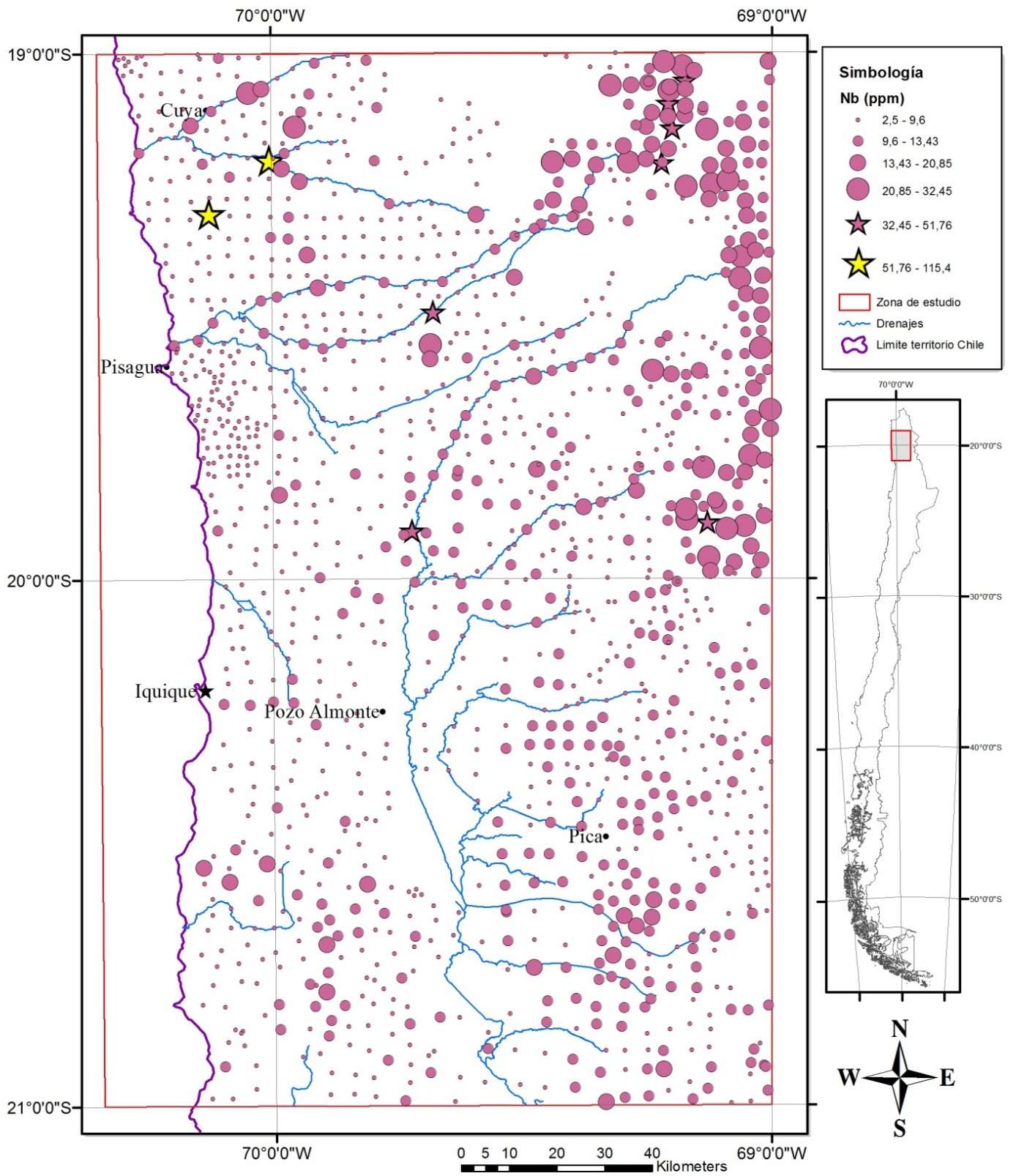
# Distribución de concentraciones de Molibdeno (ppm)



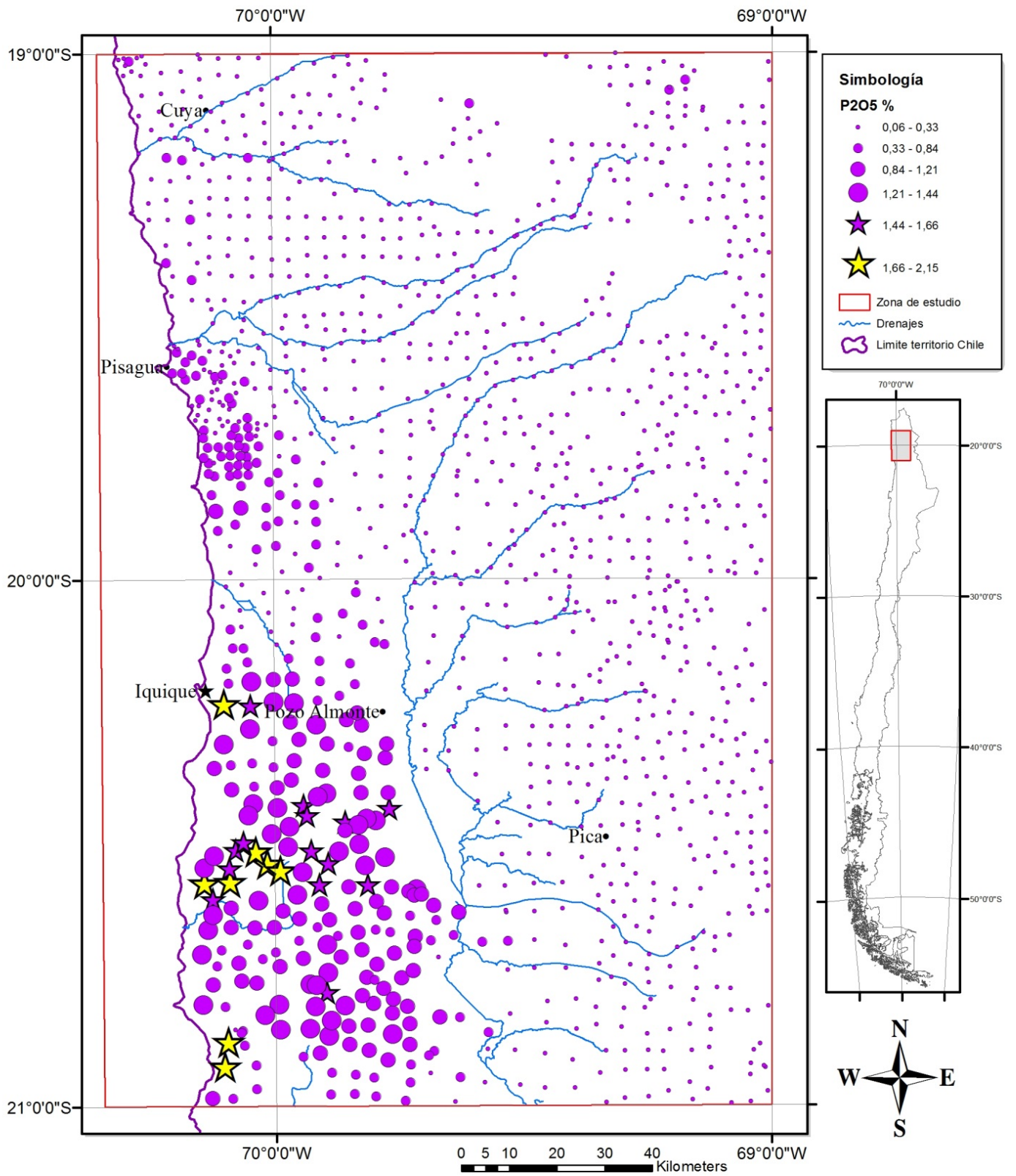
# Distribución de concentraciones de Sodio (%)



# Distribución de concentraciones de Niobio (ppm)

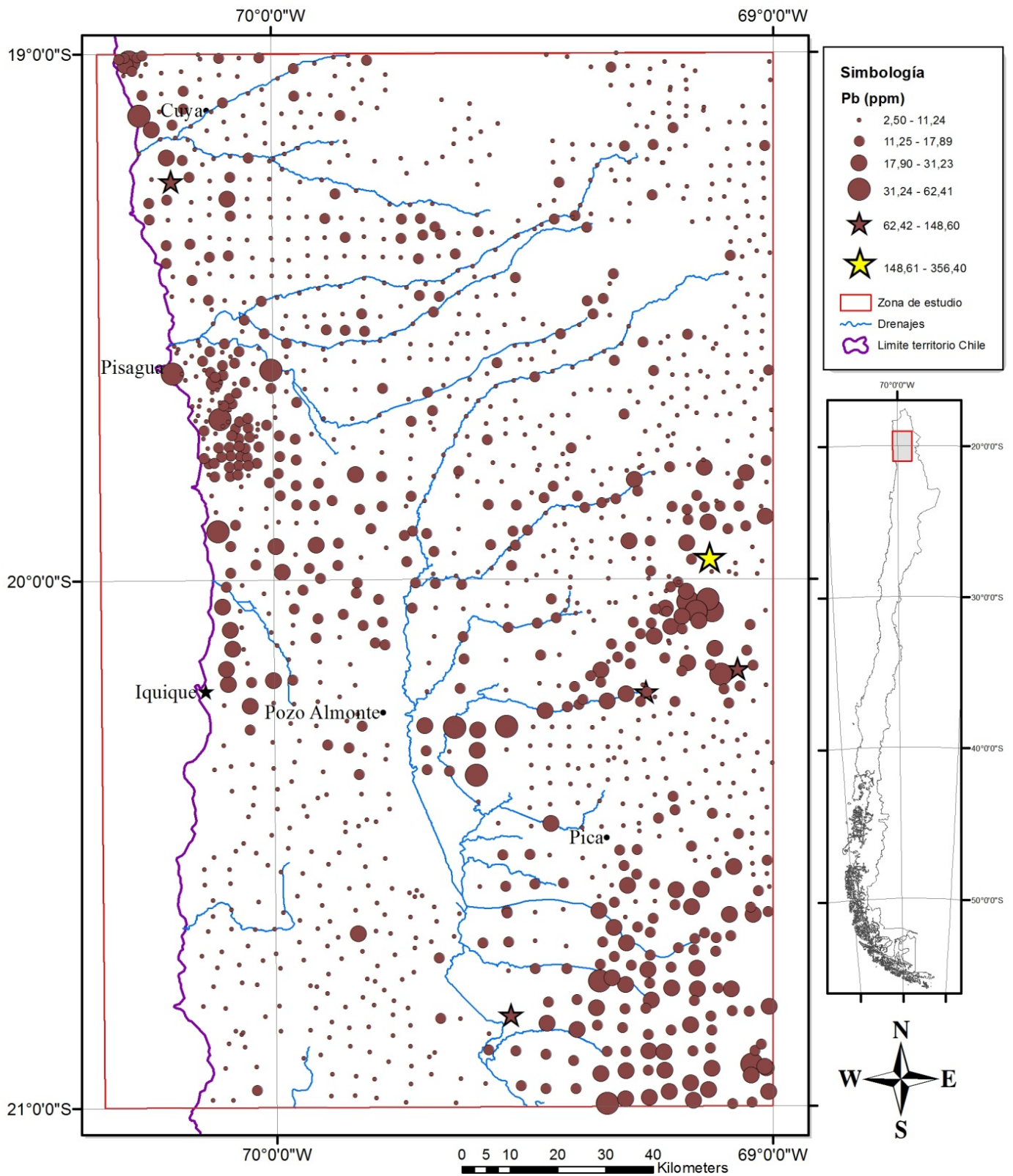


# Distribución de concentraciones de Fósforo (%)

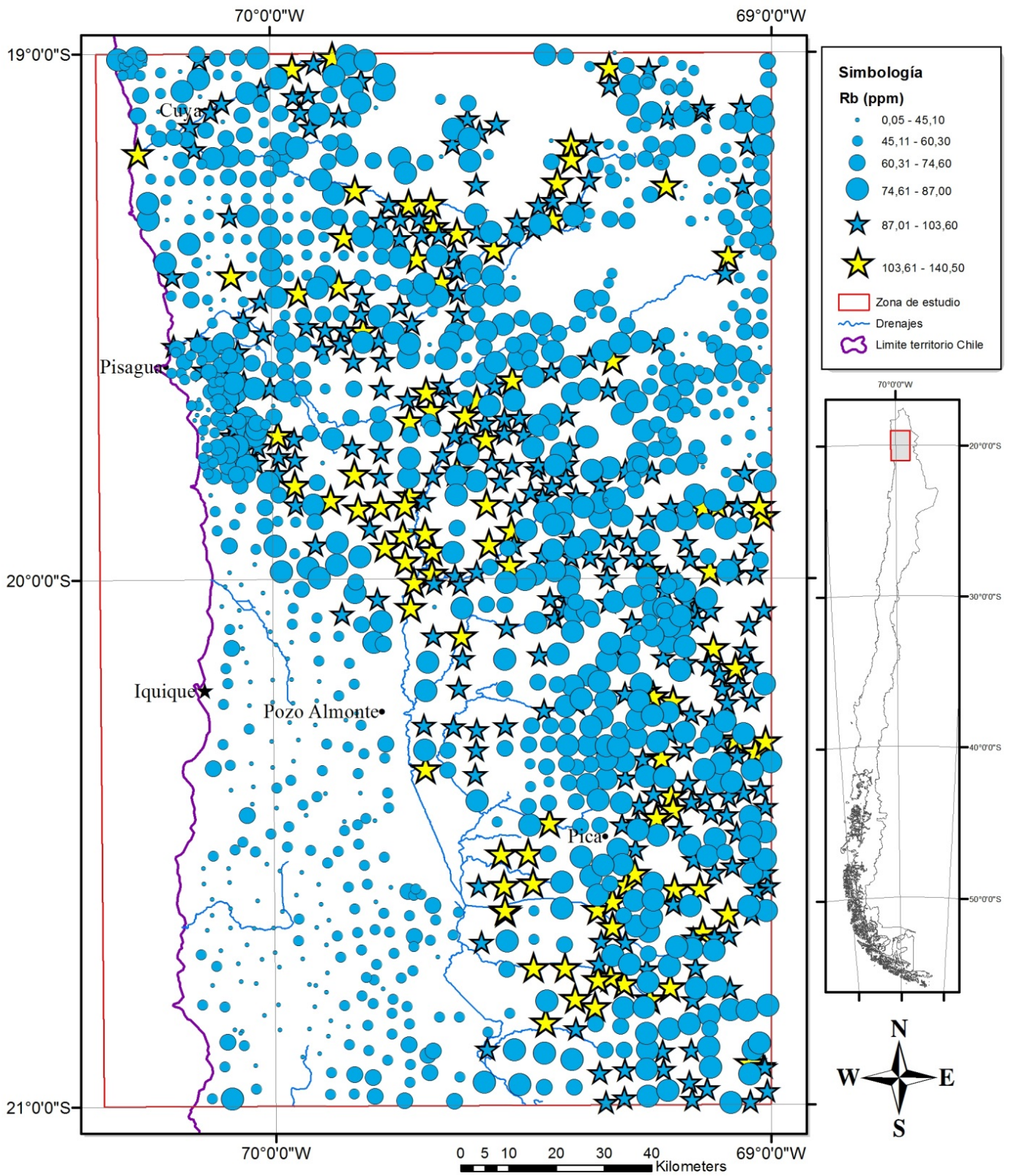




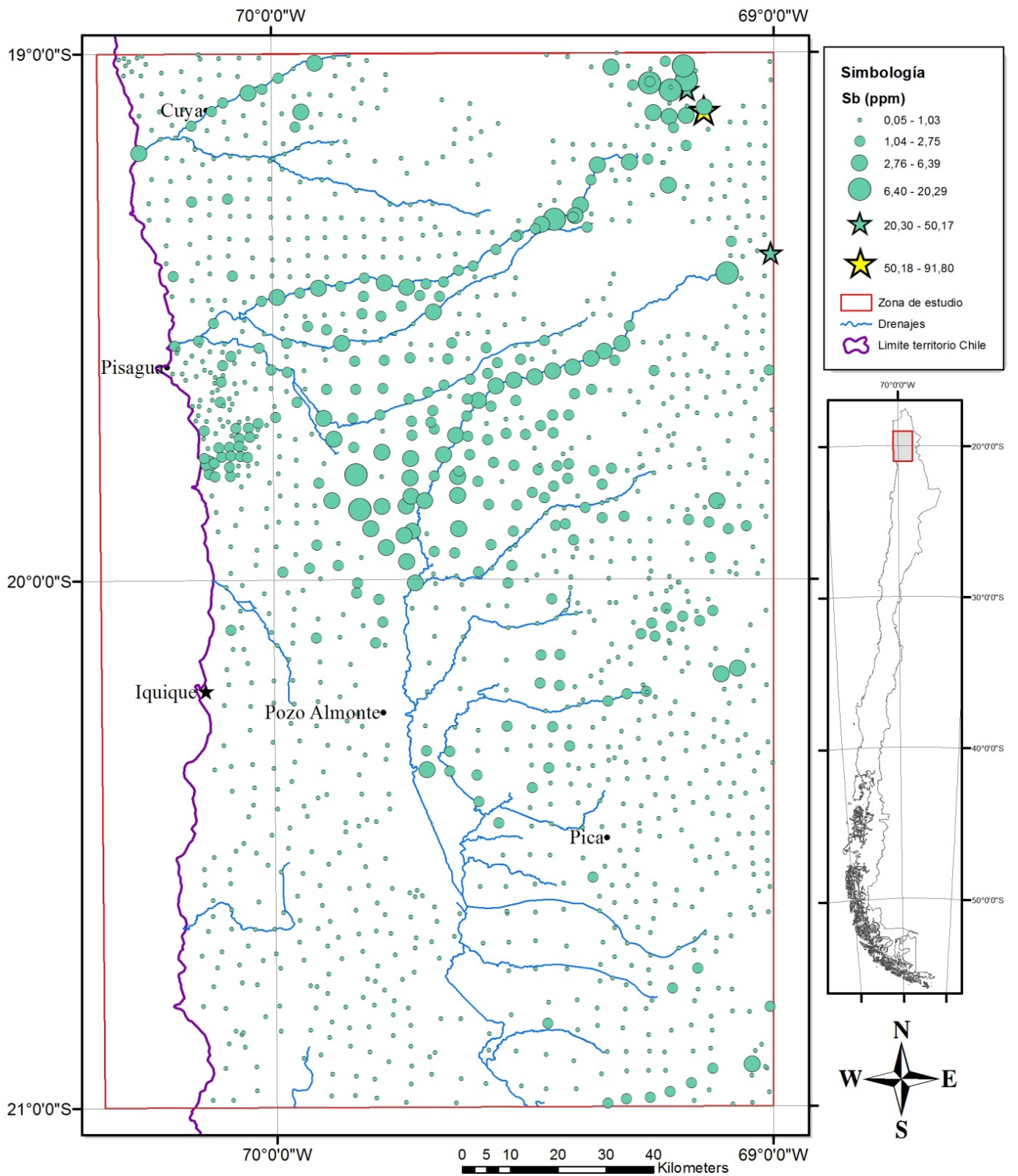
# Distribución de concentraciones de Plomo (ppm)



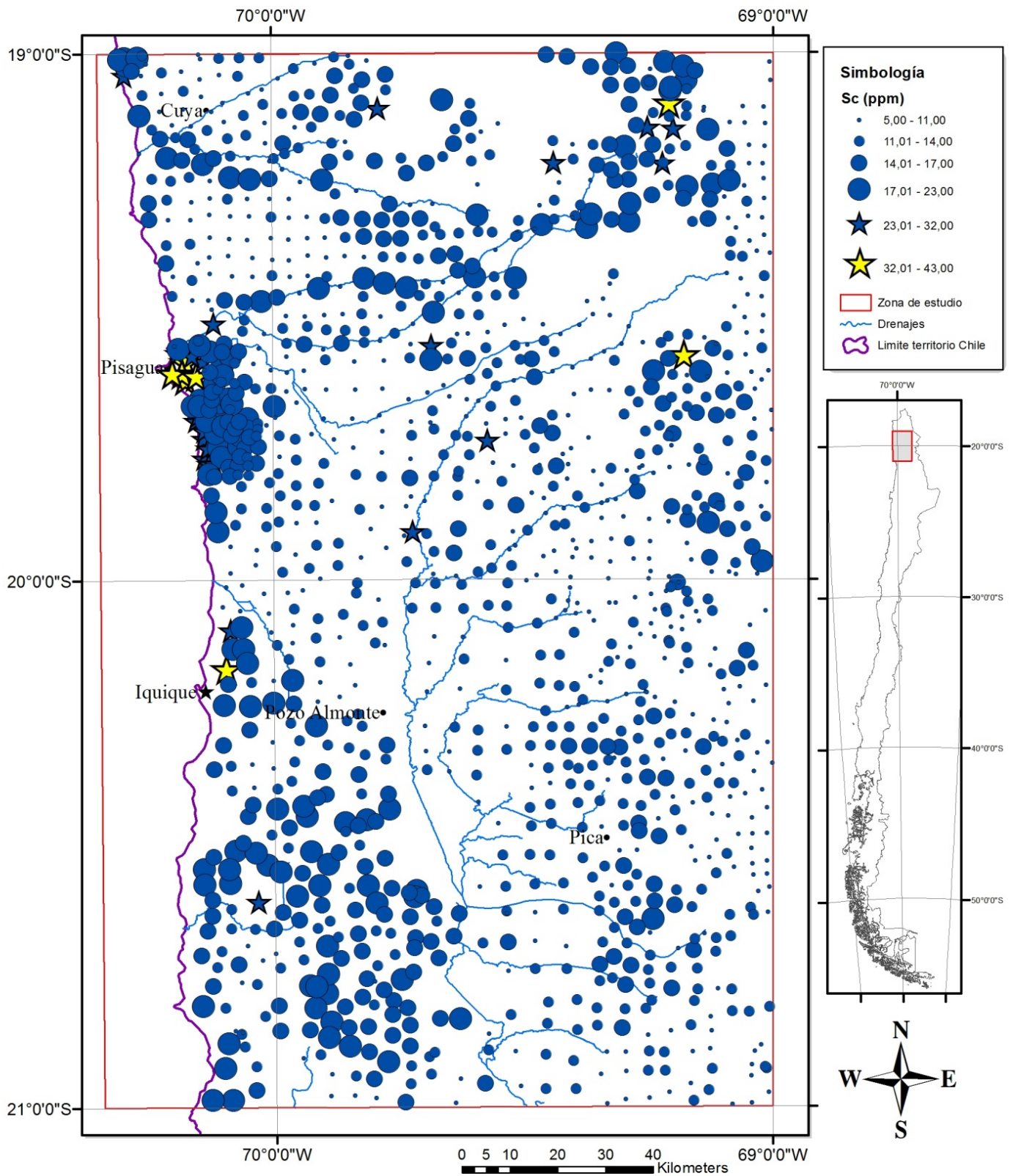
# Distribución de concentraciones de Rubidio (ppm)



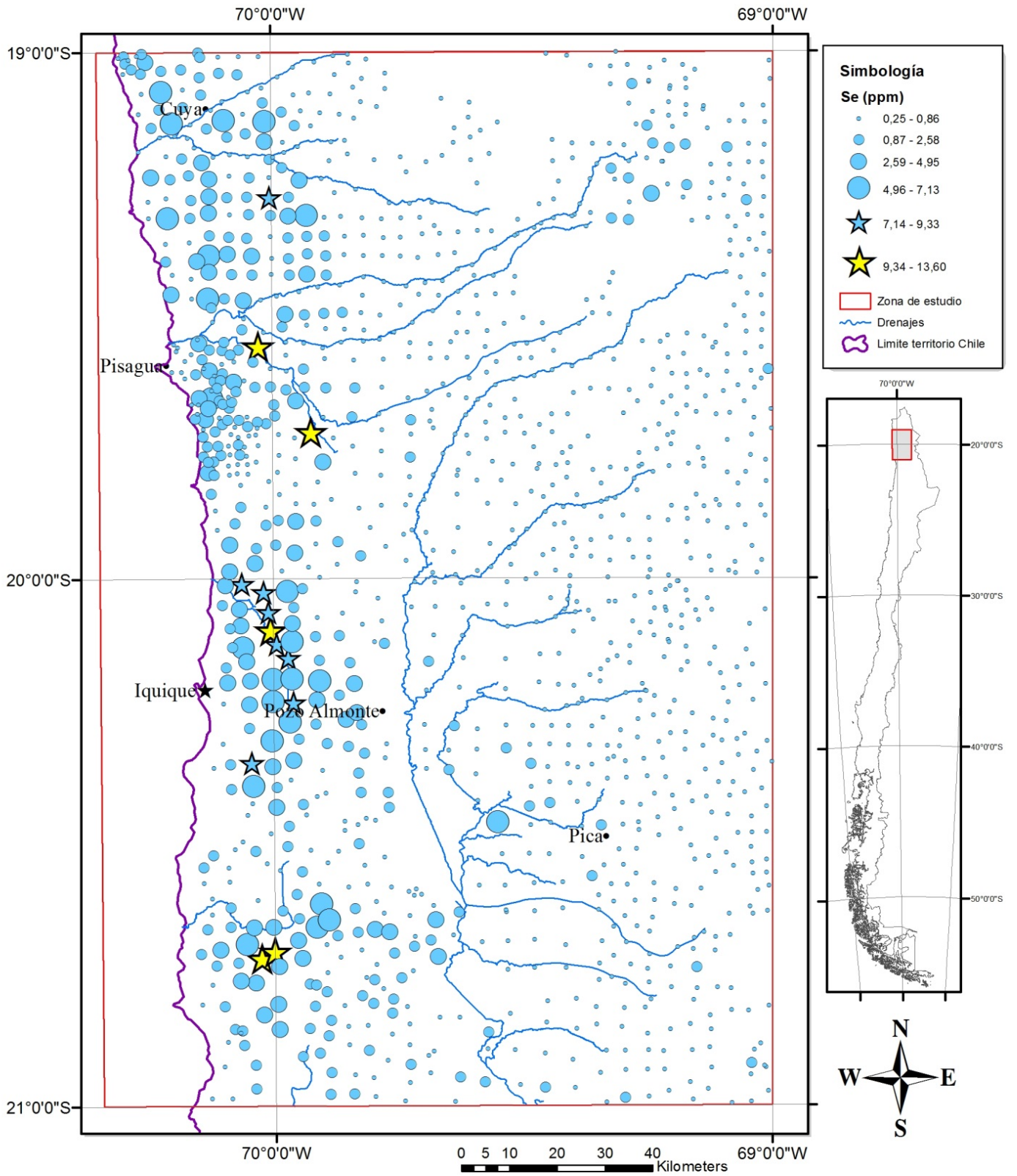
# Distribución de concentraciones de Antimonio (ppm)



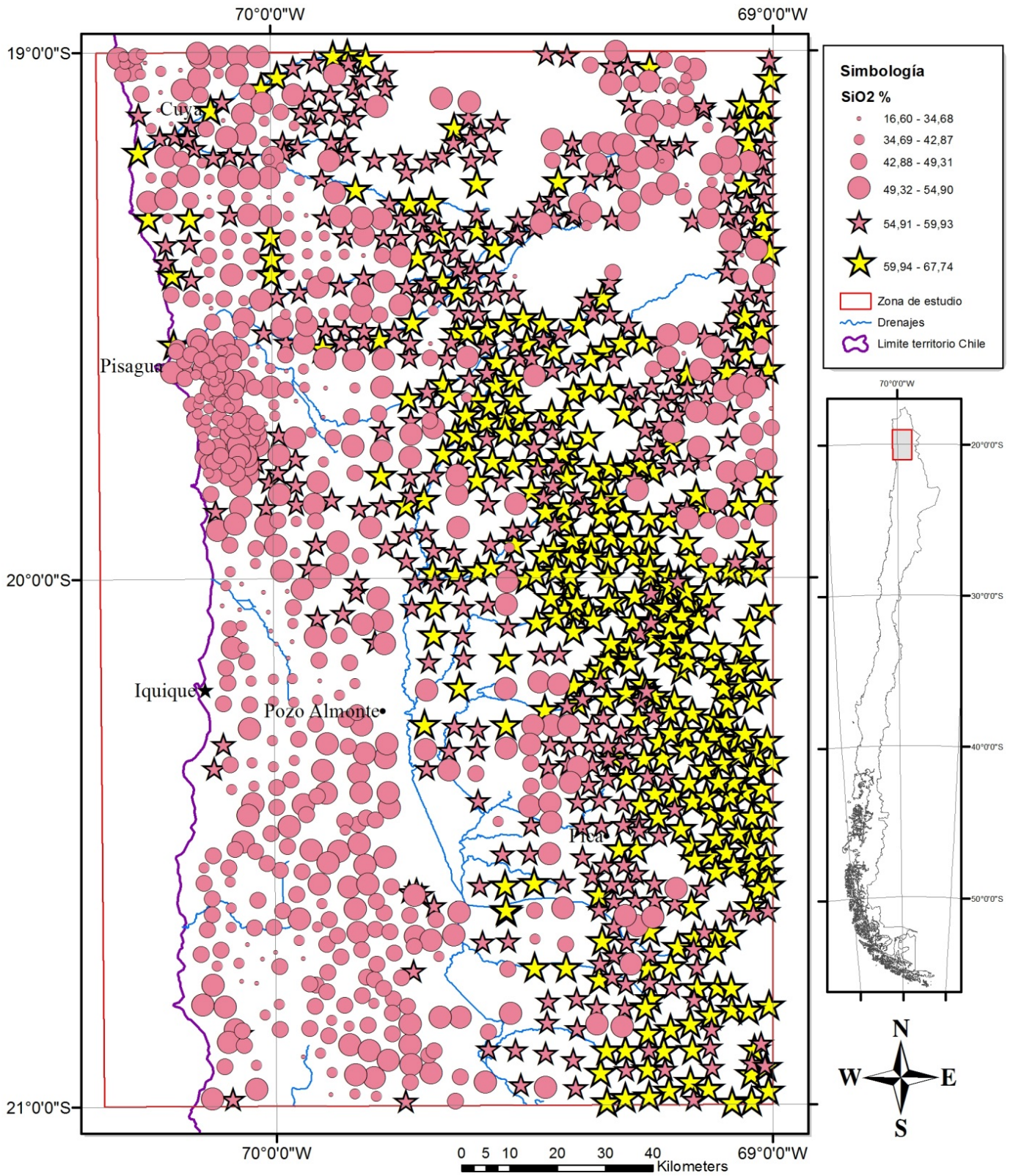
# Distribución de concentraciones de Escandio (ppm)



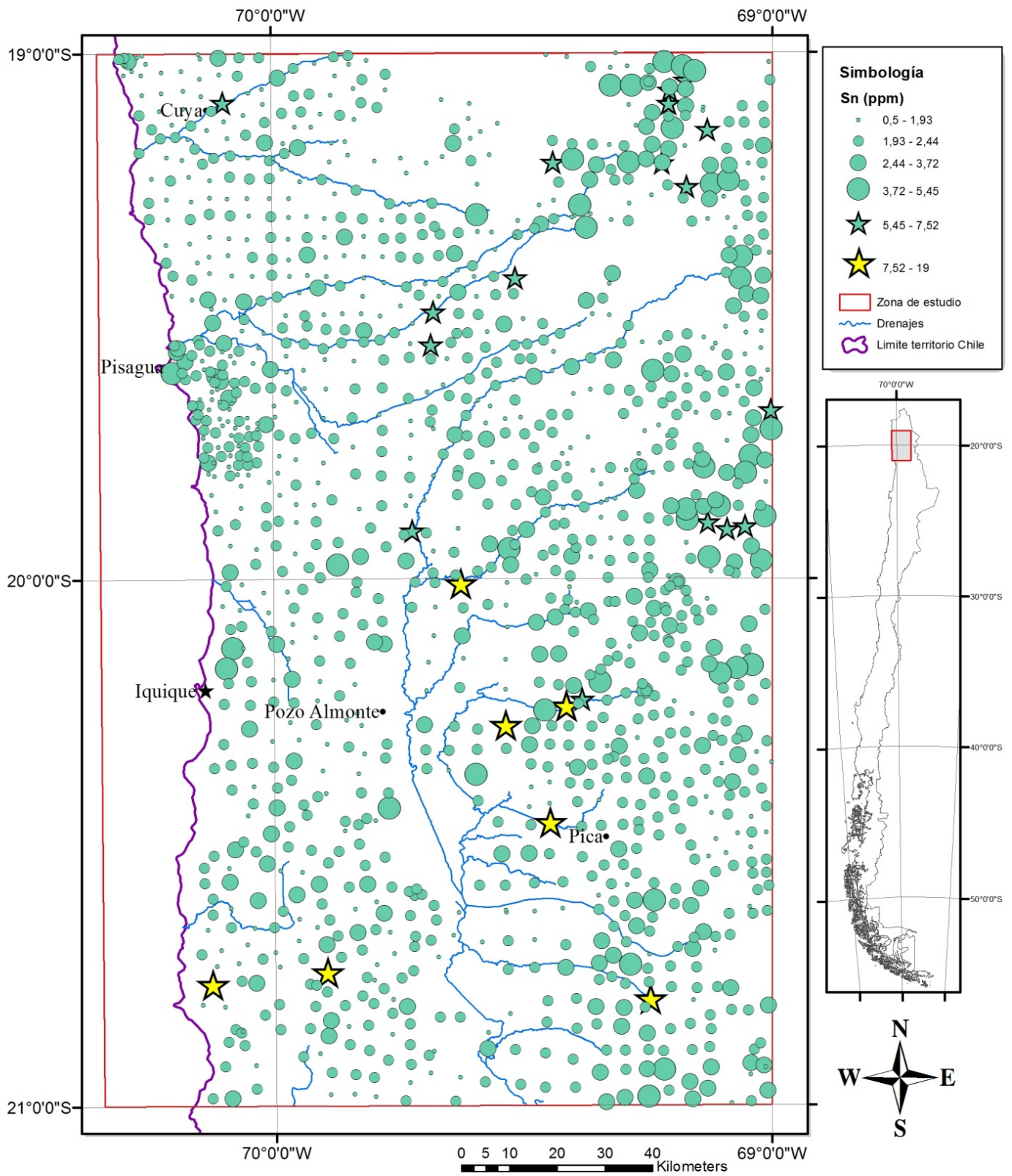
# Distribución de concentraciones de Selenio (ppm)



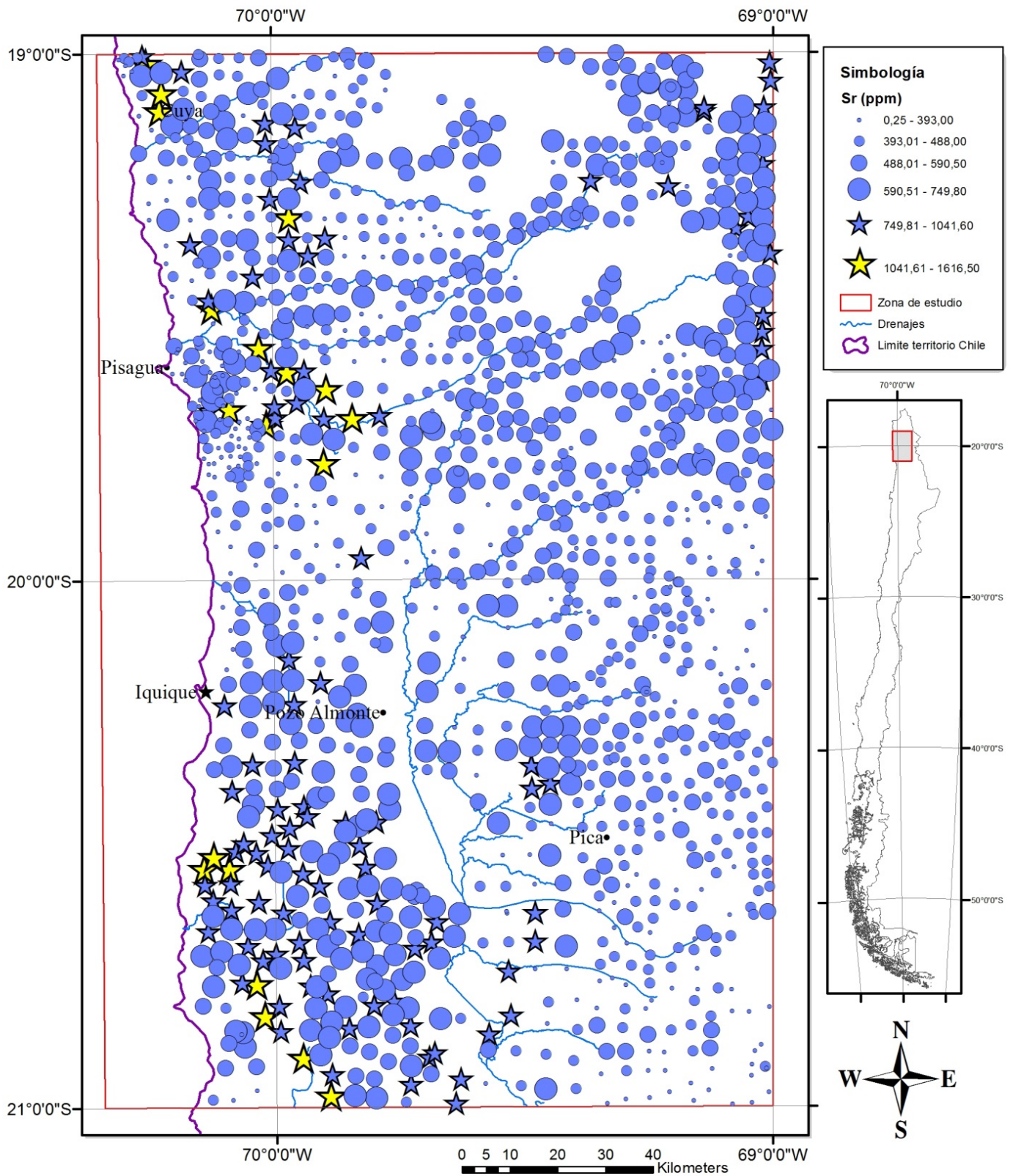
# Distribución de concentraciones de Sílice (%)



# Distribución de concentraciones de Estaño (ppm)

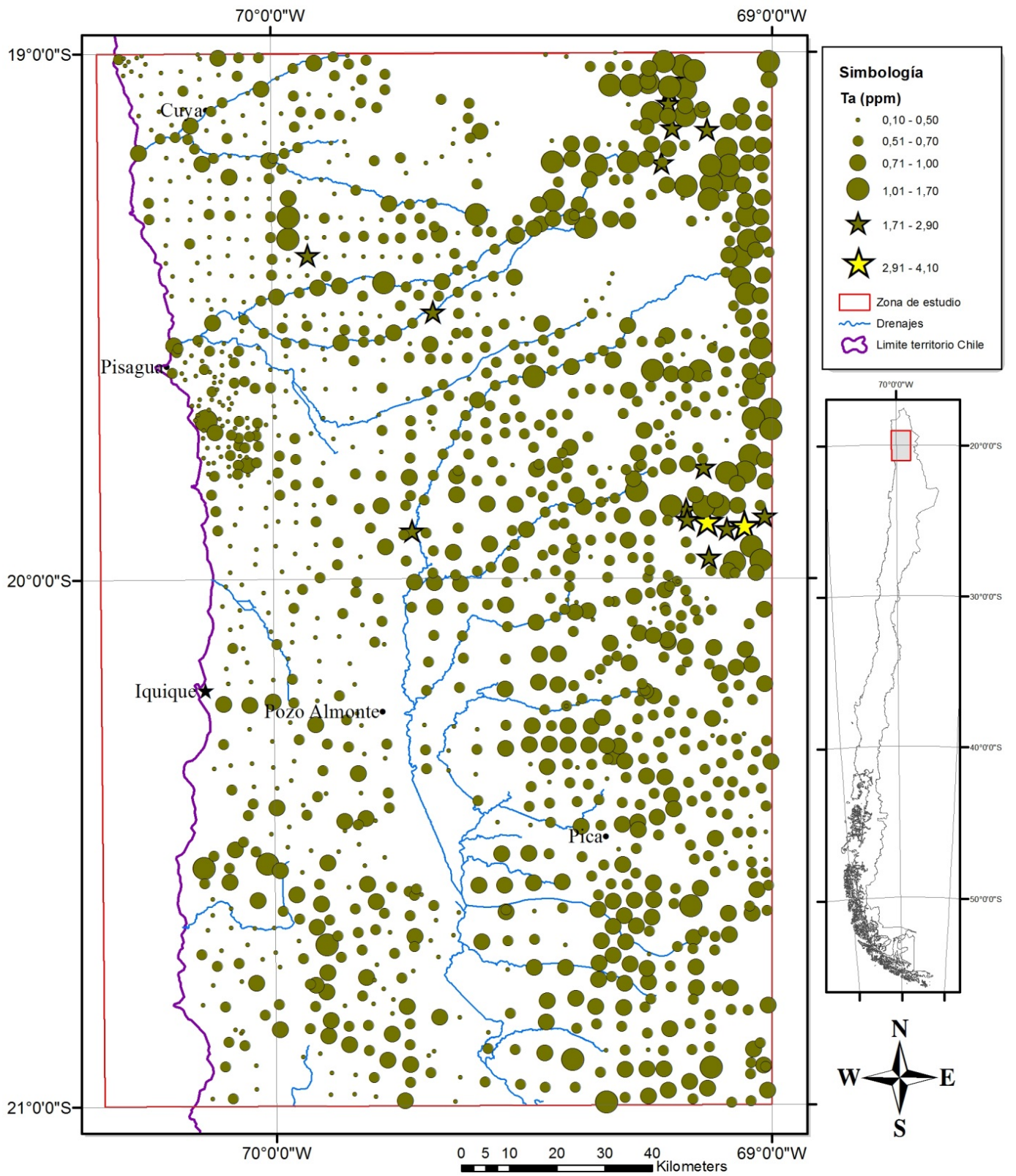


# Distribución de concentraciones de Estroncio (ppm)

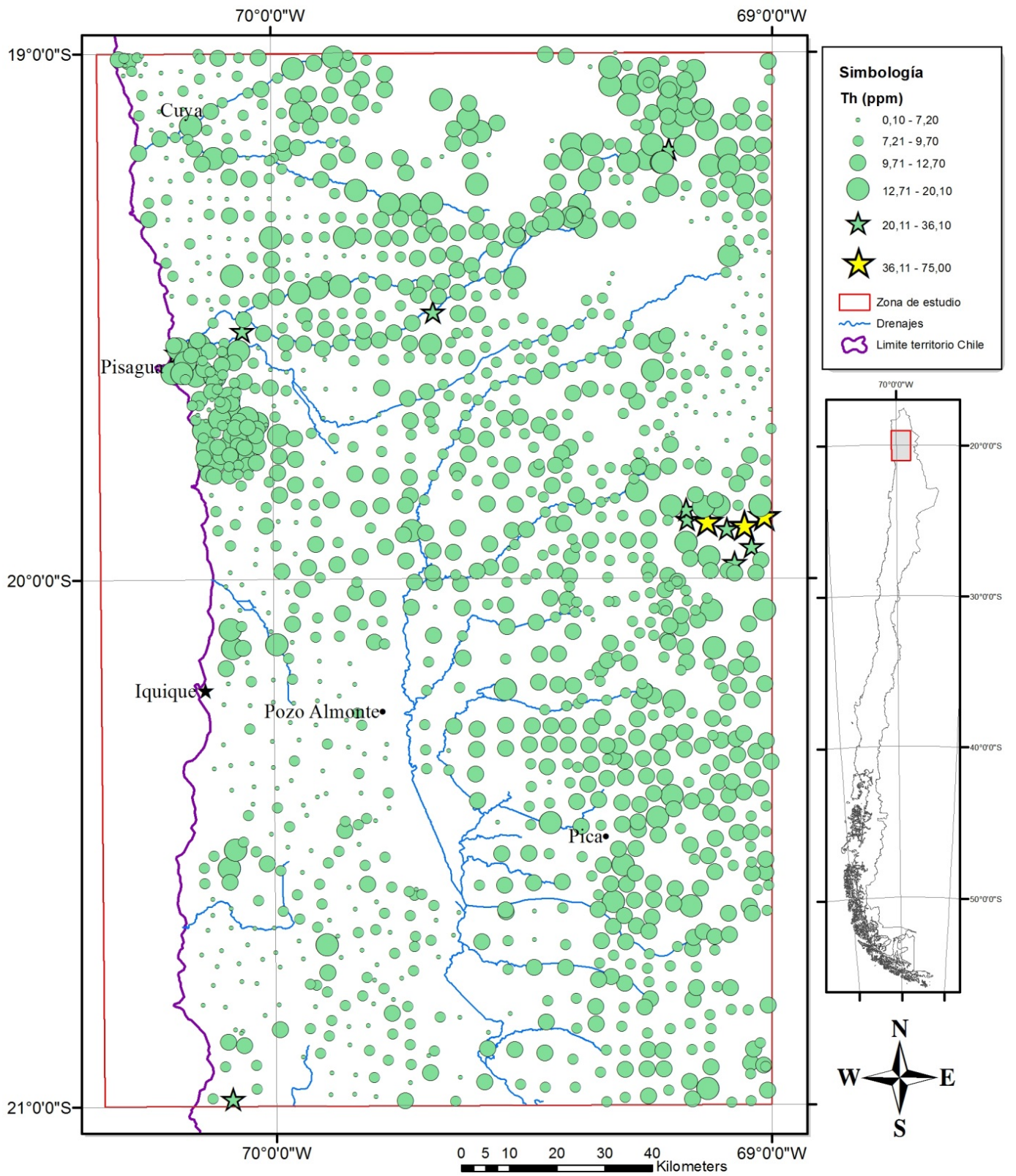




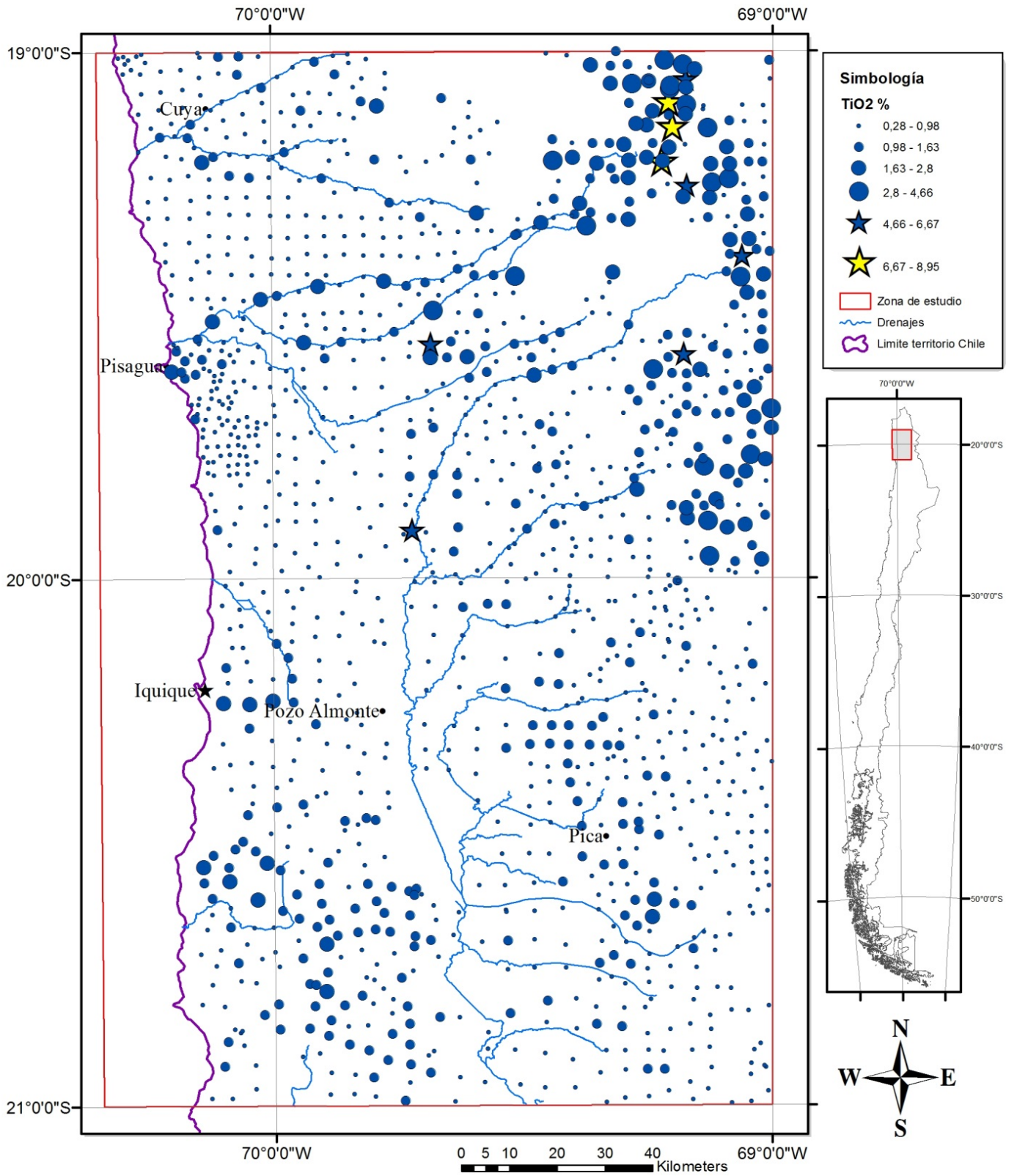
# Distribución de concentraciones de Tantalio (ppm)



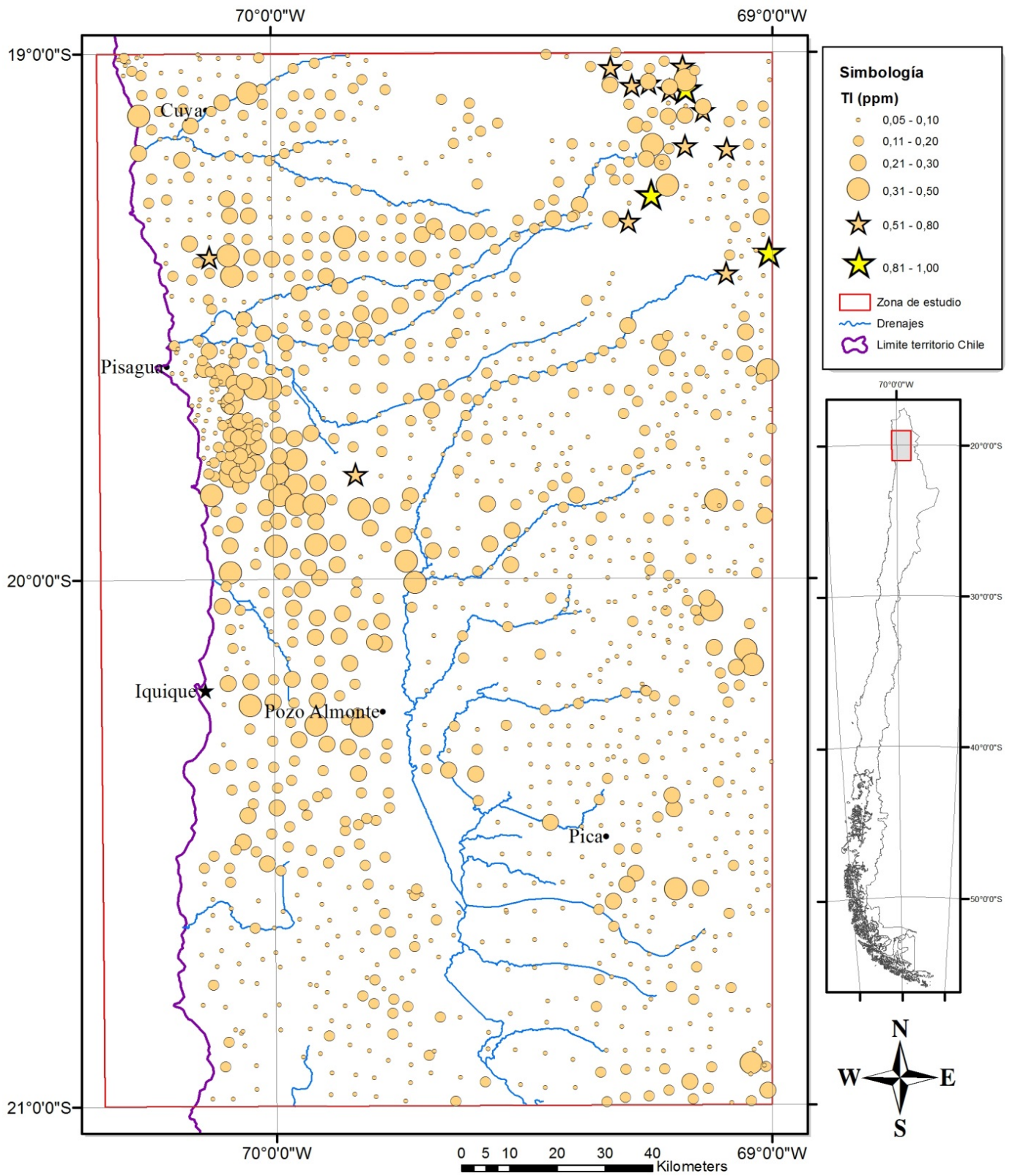
# Distribución de concentraciones de Torio (ppm)



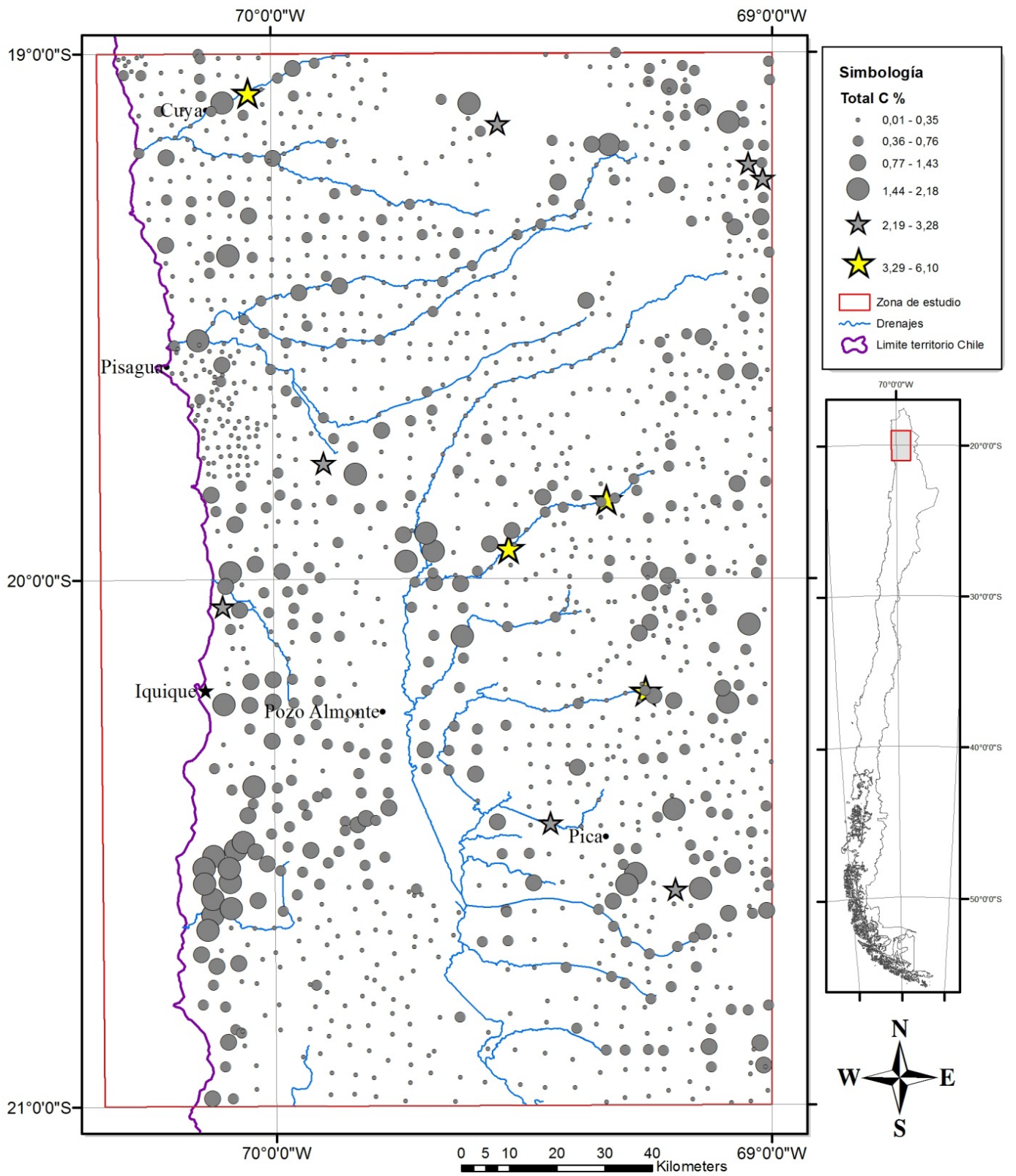
# Distribución de concentraciones de Titanio (%)



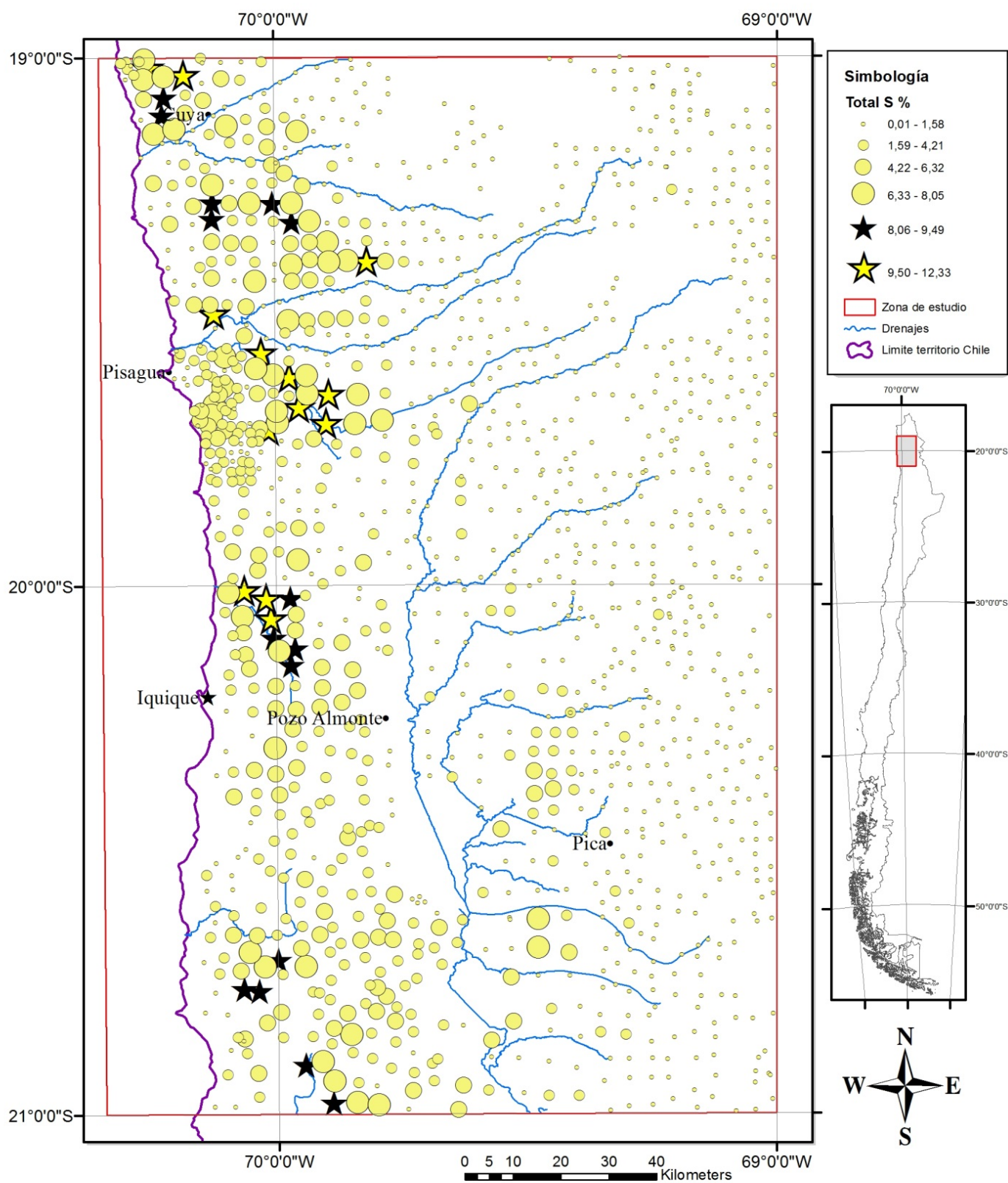
# Distribución de concentraciones de Talio (ppm)



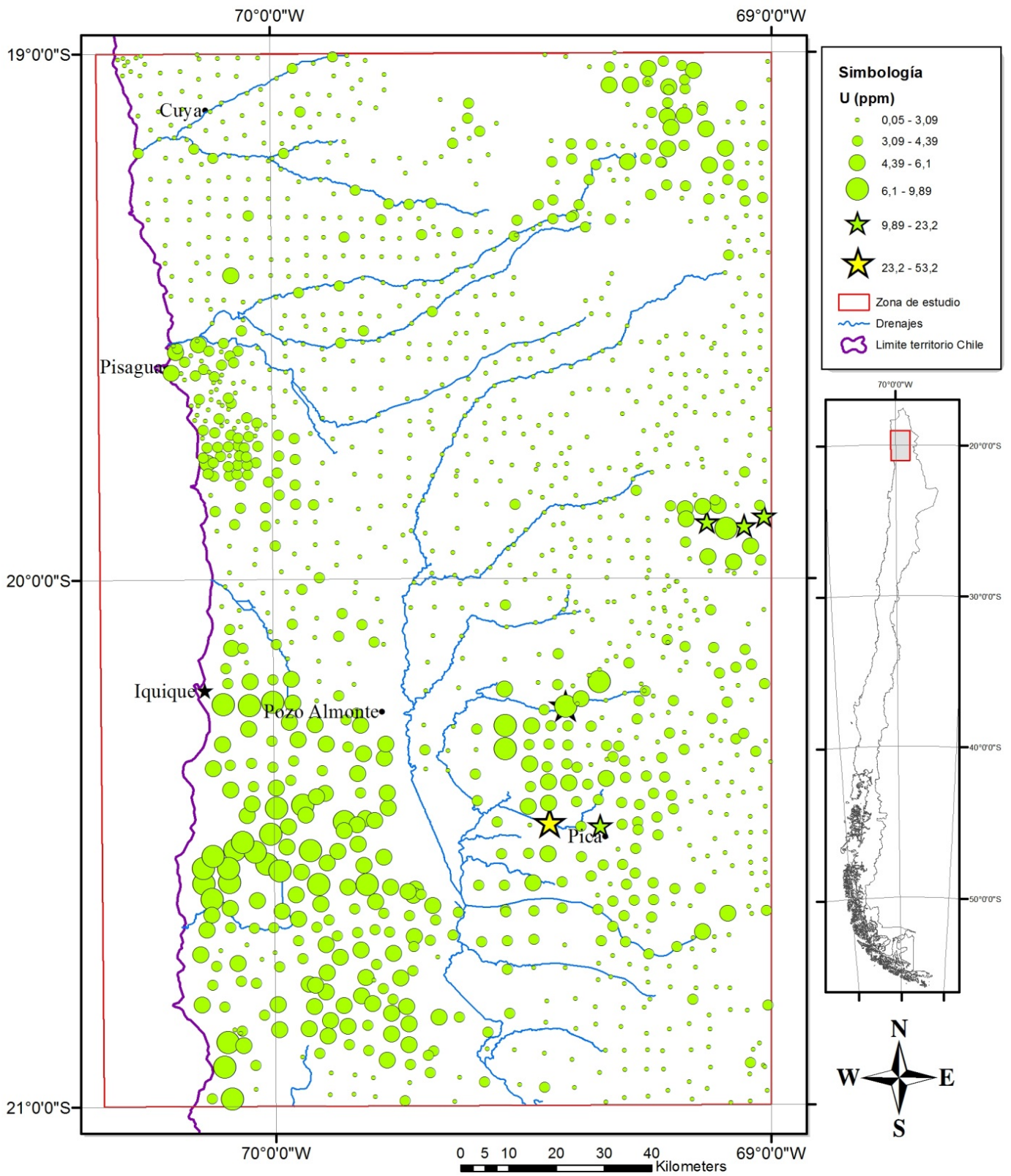
# Distribución de concentraciones de Carbono Total (%)



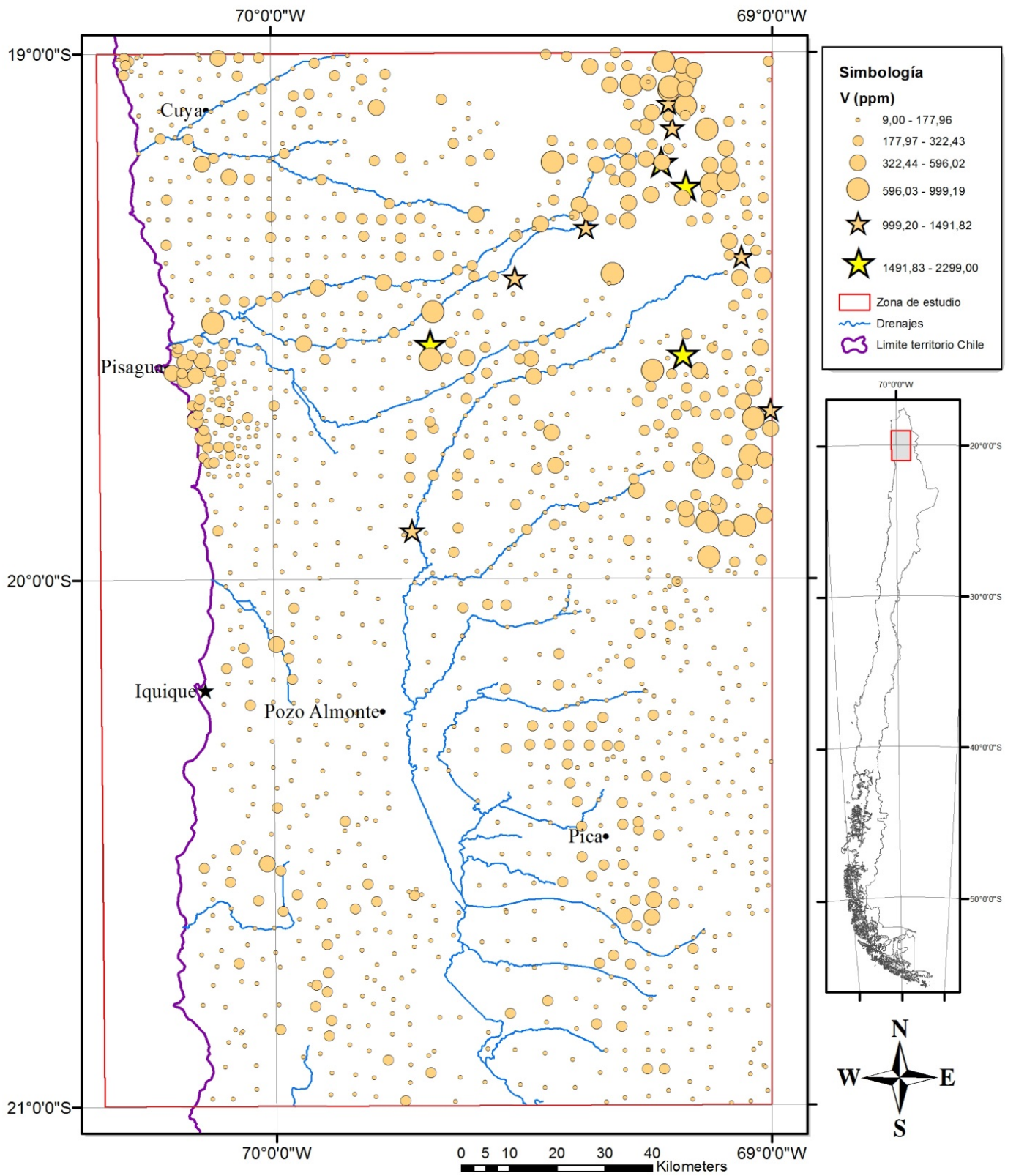
# Distribución de concentraciones de Azufre Total (%)



# Distribución de concentraciones de Uranio (ppm)

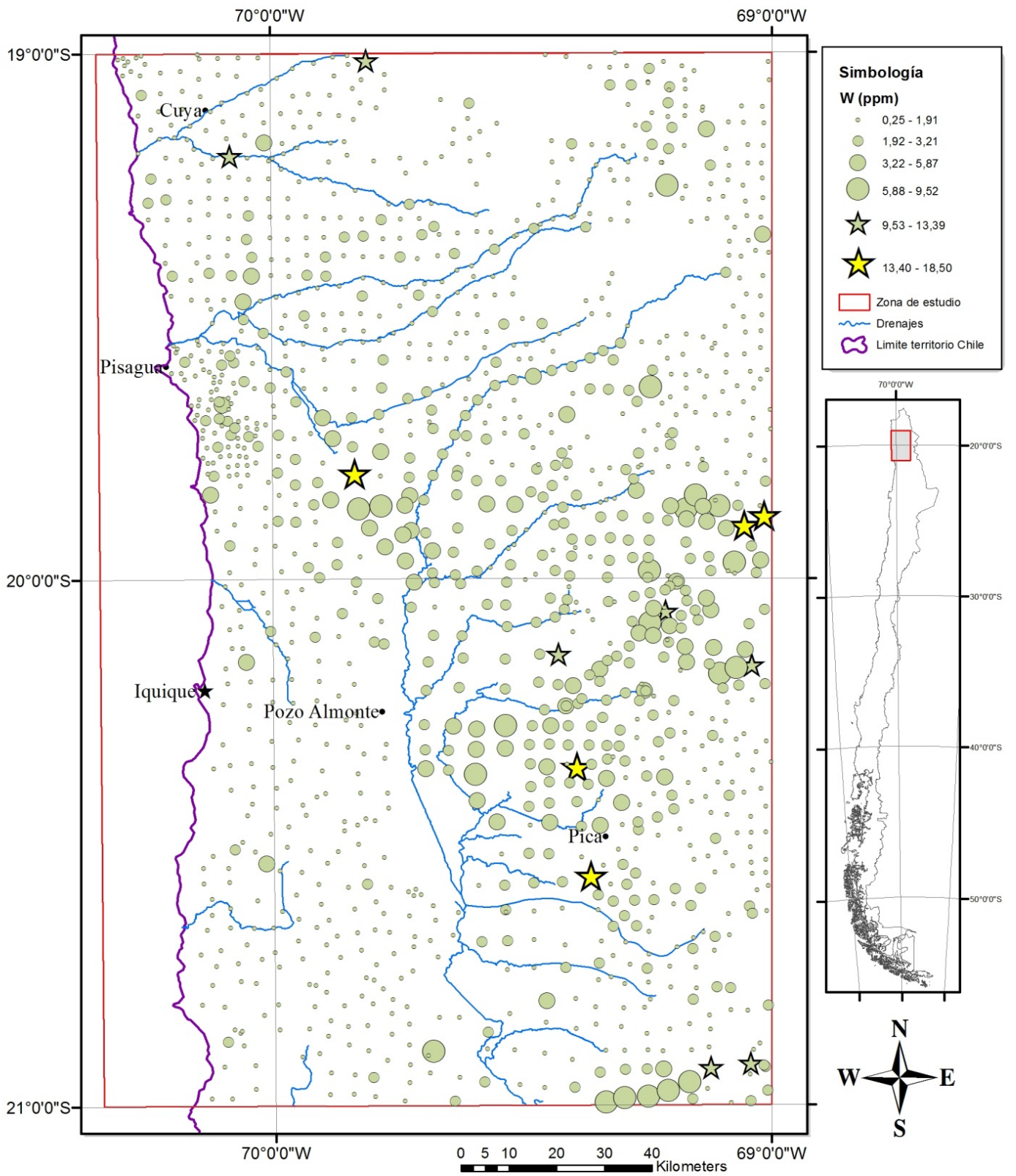


# Distribución de concentraciones de Vanadio (ppm)

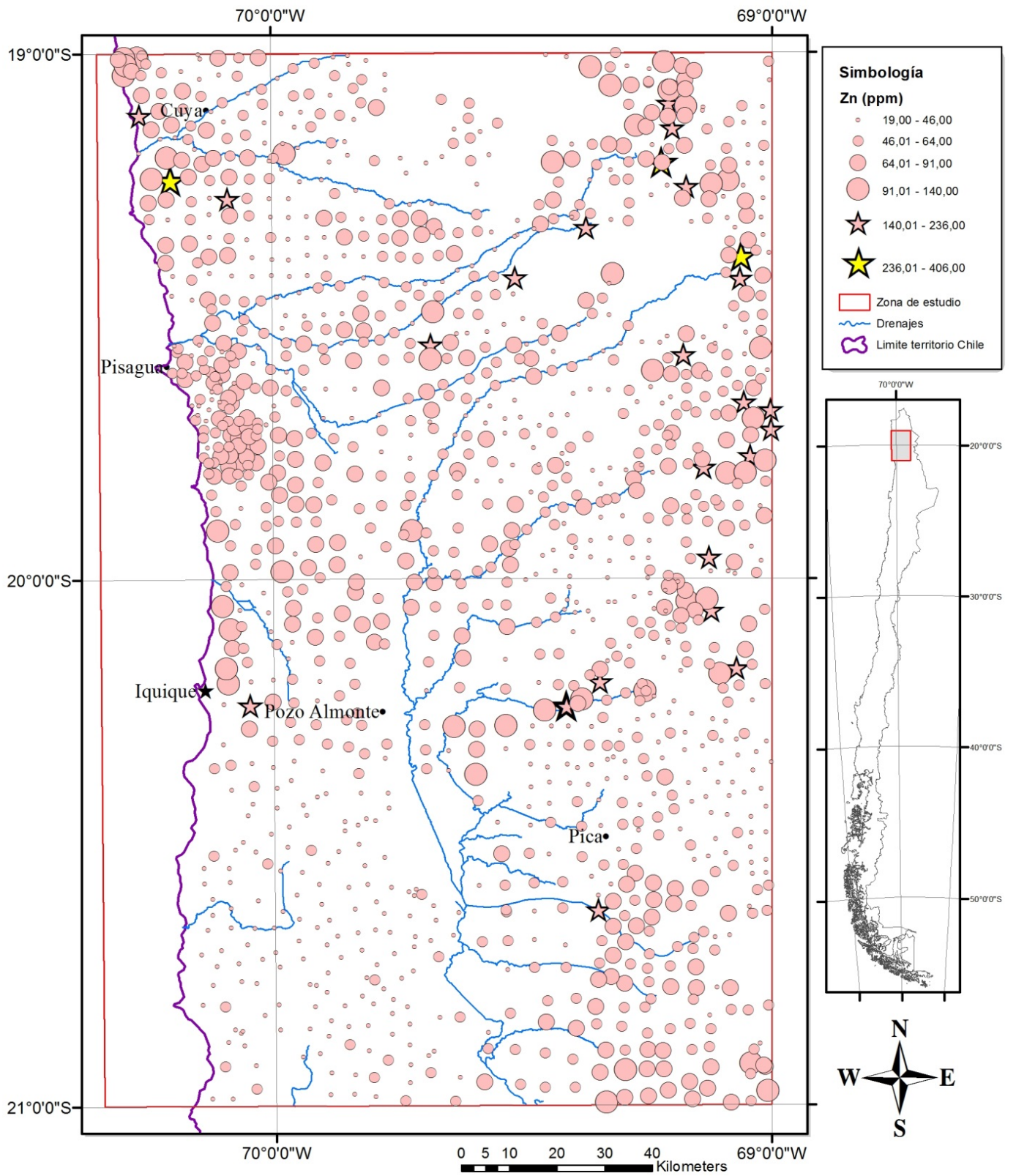




# Distribución de concentraciones de Tungsteno (ppm)



# Distribución de concentraciones de Zinc (ppm)



# Distribución de concentraciones de Zirconio (ppm)

