



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SUELOS EN LA
CUENCA DE RANCAGUA (34°S - $34^{\circ}15'\text{S}$ Y $70^{\circ}30'\text{O}$ - 71°O).
REGION DEL LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O´HIGGINS.

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE GEÓLOGO

GUILLERMO ENRIQUE ALIAGA ALIAGA

PROFESORA GUIA:
DRA. ANA VERÓNICA VALDÉS DURÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DRA. KATJA DECKART
PAOLA RAMÍREZ CARVALLO

SANTIAGO DE CHILE
2016

Resumen

El presente trabajo se realizó en el marco del proyecto “Geología para el Ordenamiento Territorial y la Gestión Ambiental en el área de Rancagua”, desarrollado por el Servicio Nacional de Geología y su objetivo es caracterizar, por medio de la geoquímica, la condición actual de los suelos urbanos y agrícolas en la Depresión Central en el área de Rancagua.

La primera metodología utilizada, considera el procesamiento matemático-estadístico de la base de datos obtenida a partir de los análisis químicos de las muestras levantadas en los suelos presentes en el área de estudio. A partir de este proceso se desarrolla la línea base geoquímica de los suelos, la cual considera la caracterización de los elementos químicos según su concentración y distribución espacial elemental. El levantamiento y desarrollo sistemático de líneas base alineadas con criterios medio ambientales es importante para generar un conocimiento más acabado del medio estudiado. También da la posibilidad de poder cuantificar cambios en el futuro, ya sean debido a procesos de origen natural o antropogénico.

La segunda metodología, consistió en la aplicación de herramientas estadísticas multivariable para el análisis de la base de datos geoquímica. Esto permitió interpretar la información contenida, logrando caracterizar asociaciones geoquímicas e identificar posibles fuentes de proveniencia.

La tercera metodología considera una evaluación de primer orden acerca de la calidad medio ambiental de los suelos presentes en el área de estudio. Particularmente se dio mayor énfasis a aquellos elementos químicos que potencialmente pueden afectar la funcionalidad del suelo, incluso pudiendo generar degradación del mismo, a fin de prevenir cualquier problema asociado en el corto, mediano y largo plazo.

Dentro de los resultados más destacados se reconocieron asociaciones geoquímicas que se encuentran relacionadas íntimamente a los procesos naturales de tipo geológico o pedogénico que han dado origen a los suelos de la zona de estudio. En relación a procesos antropogénicos destacan las asociaciones *Cu-Mo* y *As-S-Ga-Hg-Ni*. Ambas presentan un origen asociado a la removilización de material producto de la actividad minera de metales base desarrollada en la alta cordillera del área de estudio (Yacimiento El Teniente). En especial, las altas concentraciones y distribución que presenta el par elemental *Cu-Mo* se relacionan al uso de aguas de regadío provenientes del río Cachapoal. El alto contenido de metales en las aguas del río se debe en parte a la removilización de material proveniente de los depósitos de relave, Tranque Barahona y Tranque Cauquenes, ubicados aguas arriba. La asociación *As-G-Ga-Hg-Ni*, tiene su origen en las emisiones de material particulado por parte de la fundición Caletones. Destaca también la asociación *C-P-Mn-Fe-Ca-Co*, relacionada con la intensa actividad agrícola desarrollada en la zona y la asociación *Pb-Cr-Ni*, relacionada con la combustión de combustibles fósiles en zonas urbanas e industrial.

Desde el punto de vista medio ambiental, el *Cu*, el *As* y el *Sb* revisten el mayor interés ya que presentan, en determinados casos, concentraciones que se encuentran por sobre los valores definidos como aceptables en las diferentes normativas internacionales consultadas. Se reconoce en aquellos elementos la capacidad de ser potencialmente peligrosos para la calidad medio ambiental e incluso para la salud humana.

Cuida tus pensamientos porque se volverán palabras.

Cuida tus palabras porque se transformarán en actos.

Cuida tus actos porque se convertirán en hábitos.

Cuida tus hábitos porque forjarán tu carácter.

Cuida tu carácter porque formará tu destino.

Y tu destino, será tu vida.

Agradecimientos

Gracias a mi profe guía (Ana) por haber confiado en mí para esta tarea. Gran parte de este trabajo se vio forjado por tu crítica siempre constructiva, tu enorme disposición, a pesar de la distancia, y paciencia.

Gracias Paola por haber sido mi tutora durante mi estadía en el Sernageomin y a la profe Katja por su guía durante esta tesis y durante la carrera. Fue un placer el poder discutir con ambas todas las preguntas y dudas que surgían a lo largo de este proceso.

Gracias a la gente de hidro, a los de peligros y a todos aquellos con quienes compartí durante mi estadía en el SNGM

Gracias a los brocas de la U, a los brocas de la penxon Rusamz, y a todos mis amigos por todos los momentos alegres compartidos en estos largos años de vida universitaria.

Gracias a mi vieja y al Ivan, a la mami Yiya y a Don Guille, a la tía Nora y al tío Jorge, y a toda mi familia por ser mi soporte y mi ejemplo de vida.

Gracias a todos!!!

Tabla de Contenido

Capítulo 1	Introducción.....	1
1.1	Fundamentación del Problema	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Antecedentes Teóricos.....	2
1.3.1	Conceptos Geoquímicos	2
1.3.2	Normas Ambientales y Calidad de Suelos.....	4
1.3.3	Estado del Arte	6
1.3.4	Sistema Edáfico	7
1.4	Hipótesis de Trabajo.....	8
Capítulo 2	Recopilación de Antecedentes	9
2.1	Ubicación y Accesos.....	9
2.2	Geomorfología	11
2.3	Geología	12
2.3.1	Secuencias Estratificadas	13
2.3.2	Depósitos Sedimentarios No Consolidados	16
2.3.3	Rocas Intrusivas	17
2.4	Suelos	18
2.5	Circulación Local de Vientos	19
Capítulo 3	Metodología	22
3.1	Metodología de Muestreo y Trabajo en Terreno.....	22
3.1.1	Grillado y Selección de Muestras	22
3.1.2	Validación Datos de Terreno	24
3.2	Metodología de Laboratorio	25
3.2.1	Preparación de Muestras.....	25
3.2.2	Adquisición y Procesamiento de Datos	25
3.2.3	Control de Calidad y Análisis Exploratorio de Datos	26
3.2.4	Validación de Base de Datos.....	28
3.3	Metodología de Análisis de Resultados Geoquímicos	28
3.3.1	Marco Teórico Estadístico	28
3.3.2	Línea Base.....	30
3.3.3	Identificación de Fuentes de Proveniencia	34

3.3.4	Comparación con Normas Internacionales	37
Capítulo 4	Resultados	40
4.1	Línea Base	40
4.1.1	Elementos Mayores	40
4.1.2	Elementos Traza	45
4.2	Identificación de Fuentes de Proveniencia	53
4.2.1	Factor de Enriquecimiento.....	53
4.2.2	Análisis de Correlación Múltiple.....	54
4.2.3	Análisis Multivariable.....	54
Capítulo 5	Discusiones	58
5.1	Concentraciones Elementales y Distribución Espacial (Línea Base)	58
5.1.1	Elementos Mayores	59
5.1.2	Elementos Traza	60
5.2	Identificación de Fuentes de Proveniencia	68
5.2.1	Factor de Enriquecimiento.....	68
5.2.2	Asociaciones Geoquímicas	69
5.3	Comparación con Normas Internacionales.....	83
Capítulo 6	Conclusiones y Recomendaciones	86
Bibliografía	89

Anexos

Anexo 1.	Composición Química Corteza Continental (Taylor & McLennan, 2009)
Anexo 2.	Base de Datos
Anexo 3.	Mapas Línea Base Geoquímica
Anexo 4.	Duplicados Analíticos

Lista de Figuras

Figura 2.1. Ubicación del Área de Estudio	9
Figura 2.2. Red Vial Área de Estudio.....	10
Figura 2.3. Mapa extendido área de estudio.....	10
Figura 2.4. Esquema Geomorfológico del Área de Estudio.....	11
Figura 2.5. Geología Base del área de estudio, escala 1:150.000.	13
Figura 2.6. Distribución de tipos de suelos en el área de estudio	18
Figura 2.7. Área Estudio Modelamientos 3D Campos de Viento.	20
Figura 2.8. Modelamiento 3D Campos de Viento 16/Mayo/2004 (01 AM)	20
Figura 2.9. Modelamiento 3D Campos de Viento 16/Mayo/2004 (18 PM)	21
Figura 2.10. Modelamiento 3D Campos de Viento 19/Mayo/2004 (19 PM).....	21
Figura 3.1. Uso del suelo en puntos de muestreo.	23
Figura 3.2. Cuadrángulo de muestreo tipo compósito	24
Figura 3.3. (a) Muestreo del perfil 0 a 5 cm. (b) Muestras tipo Compósito almacenadas en bolsas de polietileno.	24
Figura 3.4. Explicación gráfica de transformación <i>ilr</i> para dos componentes	30
Figura 3.5. Diagrama Box-Plot Teórico	31
Figura 3.6. Ejemplo de Diagrama Compuesto (Cobre).	32
Figura 3.7. Ejemplo de Clasificación Box-Plot (Cobre)	32
Figura 3.8. Ejemplo de Raster de Interpolación (Cobre).	33
Figura 4.1. Resultados Factor de Enriquecimiento.	53
Figura 4.2. Resultado Análisis de Componentes Principales.	55
Figura 5.1. Relación entre la proporción total elemental y la fase extraída.	84

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Periodo de mayor concentración de PM10 en Rancagua y Codegua (2004). ..	19
Tabla 3.1. Elementos Muestreados.	25
Tabla 3.2. Resumen Límite de Detección (LD).....	26
Tabla 3.3. Elementos Validados.....	28
Tabla 3.4. Definición algebraica de variables presentes en diagrama Box-Plot.	31
Tabla 3.5. Criterios de análisis de resultados del Factor de Enriquecimiento.....	34
Tabla 3.6. Criterios calidad de suelos en Canadá.	37
Tabla 3.7. Criterios calidad de suelos en el Reino de los Países Bajos.	38
Tabla 3.8. Criterios calidad de suelos en la República Federal de Alemania.....	39
Tabla 3.9. Criterios calidad de suelos en el Estado de Sao Paulo, Brasil.	39
Tabla 4.1. Resumen Análisis Químicos.	40
Tabla 4.2. Distribución Elementos Mayores	42
Tabla 4.3. Resumen Análisis Químicos.	45
Tabla 4.4. Distribución Elementos Traza	47
Tabla 4.5. Resumen Resultados Factor de Enriquecimiento.	53
Tabla 4.6. Matriz de Correlación.....	54
Tabla 4.7. Resultados Análisis Factorial	55
Tabla 5.1. Comparación Química Elementos Mayores v/s Química Roca Total (EMa) ..	59
Tabla 5.2. Distribución Espacial Asociación Geoquímica <i>Ti, Fe, V, (Mn) y (Co)</i>	70
Tabla 5.3. Distribución Espacial Asociación Geoquímica <i>K, Rb, Ba y (Si)</i>	71
Tabla 5.4. Distribución Espacial Asociación Geoquímica <i>Cu, Na, Ca, Sr, Mo, Mg y (P)</i> .	73
Tabla 5.5. Distribución Espacial Asociación Geoquímica <i>As, S, Ga, Hg y (Ni)</i>	76
Tabla 5.6. Distribución Espacial Asociación Geoquímica <i>C, P, (Mn), (Fe), (Ca) y (Co)</i> ...	77
Tabla 5.7. Distribución Espacial Asociación Geoquímica <i>Bi, W, (Co) y (Sc)</i>	79
Tabla 5.8. Distribución Espacial Asociación Geoquímica <i>Zn y Ga; -Cr</i>	81
Tabla 5.9. Distribución Espacial Asociación Geoquímica <i>Pb, Cr y Ni</i>	82
Tabla 5.10. Resumen criterios establecidos para la calidad de suelos.	83

Lista de Ecuaciones

Ecuación 3.1. Fórmula de control de duplicados.....	24
Ecuación 3.2. Conjunto de Datos Composicionales	28
Ecuación 3.3. Isometric Log-Ratio Transformation para dos componentes.	29
Ecuación 3.4. Fórmula de cálculo del Factor de Enriquecimiento (FE)	34
Ecuación 3.5. Fórmula Coeficiente de Correlación	35
Ecuación 5.1. Relación entre los aniones Arseniato y Fosfato.....	62

Capítulo 1 Introducción

1.1 Fundamentación del Problema

El levantamiento y desarrollo sistemático de líneas base alineadas con criterios medio ambientales en las diferentes matrices, entre las que se incluyen agua, suelo y sedimentos, es una necesidad cada vez más sentida a nivel global. Junto con esto, también es necesaria una correcta integración de la información, debido al impacto que tiene no tan sólo en el ámbito técnico-científico asociado a la geología u otras especialidades a fines, sino que también sobre las comunidades humanas circunscritas.

Es importante tener un conocimiento más acabado sobre aquellos elementos químicos que potencialmente pueden afectar la funcionalidad de las distintas matrices ambientales, incluso pudiendo generar la degradación del medio. Este conocimiento es necesario para prevenir cualquier problema asociado en el corto, mediano y largo plazo. Por esta razón es menester caracterizar las concentraciones y las distribuciones espaciales, e identificar posibles anomalías a fin de entender el comportamiento de aquellos elementos potencialmente peligrosos.

Prueba de lo anterior ha sido el desarrollo a nivel continental de dos proyectos de gran envergadura como lo son el Atlas Geoquímico de Europa (Salminen *et al.*, 2005) desarrollado por el Foro Europeo de Servicios Geológicos (FOREGS) y el Atlas Geoquímico de Suelos Agrícolas y de Pastoreo de Europa (Reimann *et al.*, 2014). Estos proyectos surgen a partir de la necesidad de generar información geoquímica sistematizada a nivel metodológico considerando las diversas matrices ambientales, además de avanzar en una homogenización de la terminología científica y que busca integrar la información generada en las discusiones asociadas a los criterios de calidad medio ambiental

A nivel país los primeros avances enfocados en la generación de líneas base se han dado de manera sistemática en el marco del Plan Nacional de Geología del Sernageomin, el cual contempla el desarrollo de líneas base de geoquímica al norte de los 47°S. El objetivo principal de este programa es la exploración minera, y de manera secundaria la aplicación ambiental. Además a nivel normativo Chile actualmente no posee criterios definidos para la calidad de suelos que establezcan las concentraciones límite para elementos potencialmente contaminantes.

El presente estudio fue financiado por el Departamento de Geología Aplicada del Sernageomin, quien desarrolló este estudio piloto en la temática de la geoquímica de suelos, enmarcado en un proyecto referido a la Geología para el Ordenamiento Territorial y la Gestión Ambiental en el área de Rancagua, Región del Libertador Bernardo O'Higgins (Sernageomin, 2013). Este busca contribuir al desarrollo y generación de líneas base de diversas matrices ambientales tales como agua, sedimentos o remociones en masa. Específicamente, el presente trabajo consiste en la caracterización geoquímica de los suelos en el área de estudio, a fin de lograr un mejor entendimiento de los complejos procesos dinámicos, ya sean naturales o antropógenos que afectan a este medio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Caracterizar, por medio de la geoquímica, la condición actual de los suelos urbanos y agrícolas de la Depresión Central, en el área de Rancagua, entre las coordenadas 34°S-34°15'S, y los 71°O-71°30'O, VI Región del Libertador Gral. Bernardo O`Higgins.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Generar una línea base de la química inorgánica de los suelos urbanos y agrícolas de la zona de estudio, representada en una serie de mapas geoquímicos tendientes a visualizar la distribución espacial de aquellos elementos considerados.
- Analizar distribución y detectar potenciales anomalías geoquímicas de los elementos químicos analizados en la zona de interés, en particular el comportamiento de aquellos que presenten valores anómalos y se relacionen con posibles efectos para la salud humana y la calidad de los recursos naturales.
- Determinar la proveniencia de los elementos químicos en el área de estudio, identificando los procesos naturales y antropógenos involucrados en procesos de enriquecimiento.

1.3 Antecedentes Teóricos

1.3.1 Conceptos Geoquímicos

Actualmente el uso de la geoquímica complementa un amplio abanico de áreas de interés, como lo es en este caso, las ciencias medioambientales. Para lograr un mejor entendimiento de la geoquímica, y basados en lo realizado por Tapia (2011) y Reimann & Garrett (2005), los siguientes párrafos introducirán al lector en los términos más importantes y ampliamente usados en el desarrollo de estudios de geoquímica ambiental.

El término “**contaminación**” según Galán y Romero (2008) define a un tipo de degradación caracterizada por la presencia en los suelos de concentraciones nocivas de algunos elementos y compuestos. Una característica de la contaminación es el hecho de que el contaminante siempre está en valores mayores de lo habitual (anomalía) y puede llegar a generar efectos adversos sobre algunos organismos.

El término **background geoquímico** (“**fondo geoquímico natural**”) fue definido por Hawkes & Webb (1962) como “la abundancia natural de un elemento en el material terrestre estéril” y según los mismos autores “es más realista visualizar el background como un rango antes que como un valor absoluto”. El concepto de background geoquímico fue pensado para diferenciar entre las concentraciones normales de un elemento y las **anomalías** (“**outliers**”). Por definición, “una anomalía es una desviación de la norma”. Una anomalía geoquímica, más específicamente, es la

desviación de los patrones geoquímicos considerados normales en un área” (Hawkes & Webb, 1962). Para poder diferenciar entre background y anomalía, se introdujo el término **threshold** (“**umbral**”) definido como “el límite superior de la fluctuación normal del background”. Una definición más general fue enunciada por Garrett (1991) y dice que “**threshold**” es el límite exterior de la variación del background”.

De acuerdo a lo anterior, es fácil notar que la palabra “**background**” sirve de referencia para dar origen a las otras definiciones. Sin embargo, aún persisten dentro de la geoquímica medioambiental dificultades para lograr una adecuada definición del término “**background**”. Uno de los principales problemas a la hora de hablar del “**background**” es que en algunas definiciones se asume una (geo)-química regional homogénea, por tanto, las variaciones en las concentraciones se deberían netamente a fuentes antropogénicas. Esto genera que exista la percepción, especialmente entre los organismos reguladores, de que todos los elementos químicos se encuentran naturalmente sólo en concentraciones menores que las generadas por contaminación antropogénica (Reimann & Garrett, 2005).

El término **background natural** es ampliamente utilizado para inferir niveles que reflejen procesos naturales no influenciados por actividades humanas. Sin embargo, se ha evidenciado la deposición de pequeñas cantidades de elementos en las capas de hielo y en los glaciares. Estos habrían sido transportados en un viaje de escala intercontinental hacia remotas regiones habiéndose depositado, luego de haber sido liberados a la atmósfera debido a la actividad humana. Análogamente, grandes masas de material de origen geogénico como por ejemplo las emanadas de las erupciones volcánicas o el polvo de las tormentas de arena del desierto, han sido liberadas a la atmósfera y han sido transportadas de manera similar. Como se puede observar, tanto la fuente de origen geogénica como la fuente de origen antropogénico alteran el background natural al depositar material de forma independiente. En un sentido práctico, más allá de una pequeña distancia desde la fuente antropogénica, las cantidades depositadas en las superficies biológicas y minerales son tan pequeñas que no logran enmascarar las variaciones presentes debido a los procesos bio-geoquímicos naturales (Reimann & Garrett, 2005).

El término **geochemical baseline** (“**línea base geoquímica**”), es usado ampliamente en las regulaciones medioambientales. Fue introducido oficialmente por el Programa de Correlación Geológica Internacional (Proyecto IGGP 360, *Línea Base Geoquímica Global*) a fin de crear una red internacional de bases de datos geoquímicos regionales y como insumo para el desarrollo de legislaciones medioambientales. Hace referencia a la variación natural en la concentración de un elemento en el ambiente superficial (Salminen & Tarvainen, 1997; Salminen & Gregorauskiene, 2000). Además indica el contenido actual de un elemento en un punto dado del tiempo y considera la concentración geogénica natural (background natural) y la difusa contribución antropogénica en los suelos (Tarvainen & Kallio, 2002)

Reimann & Garrett (2005) creen que “el uso del término *línea base* da la impresión que es sólo un valor puntual, cuando de hecho es un rango de valores que caracterizan cualquier área reflejando la heterogeneidad del medio ambiente”. Esto fue reconocido por Darnley *et al.* (1995), quien menciona que “un creciente número de jurisdicciones han ocupado en el desarrollo de criterios cuantitativos, aquellos

relacionados con constituyentes en traza en el agua, suelos o sedimentos”, además agrega “en un numero de instancias, poca atención se la ha puesto a la variabilidad...”, finalizando con la observación “el uso de términos como *valor de línea base* implícitamente ha asumido que los niveles de background natural para cada elemento es constante”.

Otro concepto utilizado generalmente en las ciencias medio ambientales es el **Factor de Enriquecimiento (FE)**. Este método se desarrolló inicialmente para develar el origen de los elementos en estudios atmosféricos, de aguas lluvia o de agua marina (Chester & Stoner, 1973; Zoller *et al.*, 1974; Duce *et al.*, 1975). Progresivamente su uso fue extendido al estudio de suelos o sedimentos lacustres entre otros (Loska *et al.*, 1997). Con el pasar del tiempo, algunos autores han cuestionado el uso e interpretación del FE (Reimann & De Caritat [2005, 2000]). Sus cuestionamientos se relacionan con la naturaleza variable de la composición de la corteza terrestre en cualquier punto del planeta comparado con el promedio mundial, con el fraccionamiento que pueden sufrir los elementos durante la transferencia entre la corteza y la atmósfera, y con la solubilidad diferencial de los minerales en las digestiones ácidas suaves que se utilizan en los estudios medio ambientales. Reimann & De Caritat (2005) no recomiendan el uso indiscriminado de FE locales para asumir que altos valores implican contaminación antropogénica, esto se justifica básicamente en que los valores del FE pueden ser altos o bajos debido a varias razones, de las cuales, la contaminación es sólo una. Adicionalmente, estos autores, concluyen que “el uso del FE para detectar o “comprobar” influencia antropogénica en zonas remotas debe evitarse porque en la mayoría de los casos, altos valores de FE no pueden demostrar concluyentemente, e incluso ni siquiera sugerir, dicha influencia”.

1.3.2 Normas Ambientales y Calidad de Suelos.

Los geoquímicos han estado al tanto de la variabilidad natural de los elementos en el medio ambiente y conocen la importancia de generar datos y mapas que permitan explicar dicho fenómeno a los entes reguladores y al público en general en pos de mejorar las regulaciones medio ambientales y la calidad de vida de población. Para tratar con este punto se han definido valores de **Concentraciones Máximas Admisibles (CMA)** medio ambientales en base a estudios eco-toxicológicos y evaluaciones de riesgo (Janssen *et al.*, 2000; Allen, 2002). De acuerdo a Reimann & De Caritat (2005), el desafío es traducir los resultados eco-toxicológicos en niveles adecuados en materiales en fase sólida, suelos y sedimentos. Los valores regulatorios, una vez fijados por la autoridad estatal, tienen importantes consecuencias, en especial en el ámbito económico. Además existen casos en que los valores naturales (elevados o muy bajos) en las concentraciones de elementos en agua potable, suelos o cultivos exponen a la población a severos daños en la salud. En un mundo ideal, la regulación debe preservar los ecosistemas que se han decidido proteger. En este contexto, los valores regulatorios podrían definirse en base a consideraciones eco-toxicológicas, por sobre los límites superiores de la variación del *background natural* si los valores naturales no causan daño al ecosistema. Cada valor regulatorio definido debe ser acompañado por una explicación de cómo fue derivado y las cuestiones que fueron tomadas en cuenta (Reimann & Garrett, 2005).

En Chile, la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (MINSEGPRES, 1994), establece que la contaminación es “la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente”. A partir del artículo citado se desprende que para que legalmente se considere contaminado cualquier componente medio ambiental, debe existir una norma (o estándar) de calidad que estipule cuáles son los niveles (valor absoluto o rango) aceptados para cualquiera de los componentes del medio.

Actualmente, Chile no posee una normativa con respecto a la calidad de los suelos que permita establecer cuáles son los criterios aceptados para distintos elementos y compuestos químicos, de tal forma que se pueda declarar al suelo como apto (de calidad suficiente) o no para un determinado uso, sin que represente un riesgo para la salud humana o para la calidad del medio ambiente. Por consiguiente, en virtud de la legislación vigente, no es posible hablar de contaminación de suelo en el territorio nacional.

Respecto a lo anterior, en el artículo N°7 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (MMA, 2012) se establece que “las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si se genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos señalados en la letra b), ambas del artículo 11 de la Ley 19.300, serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República Argentina, Australia, República Federativa del Brasil, Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de América, Nueva Zelandia, Reino de los Países Bajos, República Italiana, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza. Para la utilización de las normas de referencia, se priorizará aquel Estado que posea similitud en sus componentes ambientales, con la situación nacional y/o local, lo que será justificado razonablemente por el proponente. Cuando el proponente señale las normas de referencia extranjeras que utiliza deberá acompañar un ejemplar íntegro y vigente de dicha norma”.

A pesar de lo enunciado por el SEIA, se debe recalcar que el objetivo del mismo es utilizar la legislación internacional como antecedentes a la hora de evaluar si un proyecto aprueba o no aprueba la Evaluación de Impacto Ambiental y no como norma de calidad ambiental.

1.3.3 Estado del Arte

V.M. Goldschmidt, quien es considerado el padre de la geoquímica moderna, declaró que el propósito básico de la geoquímica es el determinar cuantitativamente la composición química del planeta Tierra y sus partes, y a partir de allí descubrir las leyes que controlan la distribución de los elementos químicos individualmente (Goldschmidt 1937, 1954).

A partir de la segunda mitad del siglo pasado, hubo un importante auge y desarrollo de estudios geoquímicos multi-elementos, ya sea en sedimentos activos o en suelos, debido a su importancia en la búsqueda a escala regional de depósitos metálicos económicamente explotables. Las bases metodológicas para los mapeos regionales fueron desarrolladas principalmente en la década del 60. Uno de los principales avances de esa época fue desarrollado por el Servicio Geológico de Zambia (1964) en África, quienes publicaron un mapa para 10 elementos químicos (*Cu disponible, Cu total, Pb, Zn, Co, Ni, Cr, Ti, V y Mn*). Este estudio fue uno de los primeros que permitió reconocer la importancia de poner en valor los estudios geoquímicos como una herramienta de mapeo capaz de dar soporte a un amplio rango de actividades geológicas relacionadas. Además no sólo estudios con interés en la exploración minera se estaban desarrollando a nivel mundial. Con la publicación de los primeros mapas geoquímicos de escala nacional desarrollados por Shacklette *et al.* (1971) en el Servicio Geológico Estadounidense (USGS), el atlas geoquímico de Uganda desarrollado por el Servicio Geológico y Minero de Uganda (1973) y los Atlas Geoquímicos de Inglaterra y Gales por Webb *et al.* (1978), el interés en el mapeo geoquímico se amplió debido a que los distintos países, por medio de sus servicios geológicos comenzaron a considerar que la información generada por los mapeos geoquímicos es una componente valiosa dentro del conocimiento básico que se debe tener de las geo ciencias en un país.

Ya por la década de los 80 se comenzó a plantear la necesidad de tener líneas base geoquímicas de escala continental, en virtud del reconocimiento de los cambios globales producto de la actividad antropogénica. Esta idea tuvo mayor impulso debido a la falta de información sobre la cual evaluar el lamentable desastre ocurrido en Chernóbil en 1986. Ya a finales de aquella década, se propuso al IGCP (Programa Internacional de Correlación Geológica) el dar soporte a un proyecto internacional de mapeo geoquímico. En 1988 se aprobó el Proyecto 259 (Mapeo Geoquímico Internacional) bajo el liderazgo de A. Darnley, el objetivo de este proyecto fue el de revisar todas las actividades de mapeo geoquímico alrededor del planeta y preparar recomendaciones necesarias para llevar a cabo posteriormente los esfuerzos necesarios para lograr mapeos geoquímicos internacionalmente consistentes, hasta llegar a cubrir todo el globo. Las recomendaciones de este proyecto fueron publicadas en 1995 (Darnley *et al.*, 1995), las cuales fueron un catalizador para nuevos proyectos de investigación, entre los cuales se puede nombrar el Proyecto Kola (Reimann *et al.*, 1998), también conocido como Atlas Geoquímico Medio Ambiental de la Región Central de Barents. Posteriormente sobre las bases del Proyecto 259, se dio inicio al Proyecto 360, el cual tenía como objetivo la cooperación de las agencias nacionales a nivel global para dar soporte económico a un programa de mapeo geoquímico de escala global. Este proyecto lamentablemente no prosperó y desde ese entonces, los mapeos geoquímicos de gran escala han sido operados por los servicios geológicos de cada nación, o también bajo el alero de grupos de países que han llevado a cabo mapeos de escala continental o sub-continental consistentes con las recomendaciones de los proyectos 259 y 360 del IGCP (Darnley,

1997). Dentro de estos proyectos conjuntos se pueden nombrar en Europa por ejemplo el Atlas de Suelos Agrícolas del Norte de Europa (Reimann *et al.*, 2003), el Atlas Geoquímico de la Región Este de Barents (Salminen *et al.*, 2004), el Atlas Geoquímico de Europa (Salminen *et al.*, 2005) desarrollado por el Foro Europeo de Servicios Geológicos (FOREGS) y el Atlas Geoquímico de Suelos Agrícolas y de Pastoreo de Europa (Reimann *et al.*, 2014).

A nivel continental se puede mencionar la publicación del Mapa Geoquímico y Mineralógico de los Estados Unidos de América (Smith *et al.*, 2013; USGS). Este proyecto considera la colaboración activa entre el USGS y el Servicio Geológico Mexicano en el desarrollo de mapas geoquímicos consistentes entre Estados Unidos y México. También se encuentra actualmente en desarrollo el mapeo geoquímico a escala regional (1:100.000) en Brasil, por medio del CPMR – Servicio Geológico de Brasil, el cual considera una serie de ambientes de deposición como suelos, sedimentos activos, aguas superficiales e incluso concentración de minerales pesados, o en Colombia, por medio del Servicio Geológico Colombiano en zonas estratégicas para el gobierno local, como lo son la zona andina y parte este del país (IUGS/IAGC Task Group on Global Geochemical Baselines Annual Report, 2014).

A nivel país, en el marco del Plan Nacional de Geología (PNG) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), se contempla el desarrollo de líneas base de geoquímica al norte de los 47°S. Este programa contempla cartas geoquímicas a escala 1:250.000 y considera el muestreo de sedimentos activos de las principales cuencas fluviales del país. El objetivo principal de este programa es la exploración minera, y de manera secundaria la aplicación ambiental (SERNAGEOMIN-IGME, 2010). Al día de hoy ya se han publicado la hoja Iquique (Lacassie *et al.*, 2012) la hoja Arica (Baeza *et al.*, 2014) y la hoja Pisagua (Astudillo *et al.*, 2014), mientras se encuentran en desarrollo las cartas en otros sectores del norte del país (hojas Vallenar y La Serena).

Este proyecto piloto en particular apunta a la generación de líneas base de geoquímica en los suelos agrícolas y urbanos con un claro objetivo enfocado en la aplicación ambiental, a diferencia del enfoque que presenta el Plan Nacional de Geoquímica.

1.3.4 Sistema Edáfico

El sistema edáfico, también conocido como suelo es la capa superficial, disgregada y de espesor variable que recubre la corteza terrestre. Se origina como producto de la interacción compleja y constante entre la litósfera, la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera. Se compone de tres fases: la fase sólida (mineral y orgánica), la fase líquida y la fase gaseosa, y exhibe las propiedades resultantes del equilibrio químico y físico entre estas. La composición del suelo es muy diversa, y se encuentra controlada por una serie de factores, como lo son la topografía, la vegetación, el tiempo, la actividad humana, las condiciones climáticas y el material parental, siendo las dos últimas las que comúnmente predominan. Dentro de los factores que más influyen en las propiedades del suelo se encuentran la composición química de la fracción sólida, la estructura mineral y el estado de dispersión, el cual hace referencia a la composición granulométrica de los elementos que componen el suelo (textura) y como estos se disponen espacialmente.

Se reconocen principalmente dos etapas en la formación del suelo. La primera es la alteración del material primario (roca parental) por medio de los procesos físicos y químicos de meteorización. La segunda etapa (pedogénesis) es la generación de perfiles de suelo a partir del material meteorizado, teniendo como punto final el desarrollo de un suelo maduro. Estas etapas no son fácilmente distinguibles una de la otra, ya que ambas se encuentran íntimamente relacionadas y toman lugar simultáneamente en el mismo lugar.

Los suelos son componentes claves del sistema terrestre ya que estos son capaces de soportar la vegetación y proveer los recursos necesarios para su nutrición (Alloway *et al.*, 2013). Además, el suelo también actúa como un sistema de amortiguación natural que controla el transporte de sustancias removilizadas por la actividad antropogénica hacia la atmósfera, hidrósfera y biósfera (Kabata-Pendias, 2011). Sin embargo, la degradación de los suelos es un tema de preocupación debido a la limitada capacidad del suelo de actuar como filtro de contaminantes. Los metales pesados pueden alterar la dinámica de los sistemas edáficos, pudiendo degradar la funcionalidad del suelo (Bowen, 1980), afectando directamente las actividades humanas.

1.4 Hipótesis de Trabajo

Tomando en cuenta las características geológicas propias de la zona de estudio (corteza andesítica), y en especial la presencia de un mega depósito tipo pórfido cuprífero en la alta cordillera del área de estudio (Yacimiento El Teniente), se espera demostrar, mediante la caracterización geoquímica de los suelos urbanos y agrícolas, que si bien existe una relación inherente entre la geología y los procesos pedogénicos, también existe un enriquecimiento en ciertos elementos químicos, y que este responde a una serie de procesos antropogénicos relacionados con las diversas actividades que se desarrollan en la zona (actividad urbana, minera, agrícola, pecuaria, entre otras).

Capítulo 2 Recopilación de Antecedentes

2.1 Ubicación y Accesos

El área de estudio se localiza en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, con una superficie aproximada de 1.279 km², ubicada entre los paralelos 34°S y 34° 15' S, y los meridianos 70° 30' O y 71° O (Fig. 2.1).

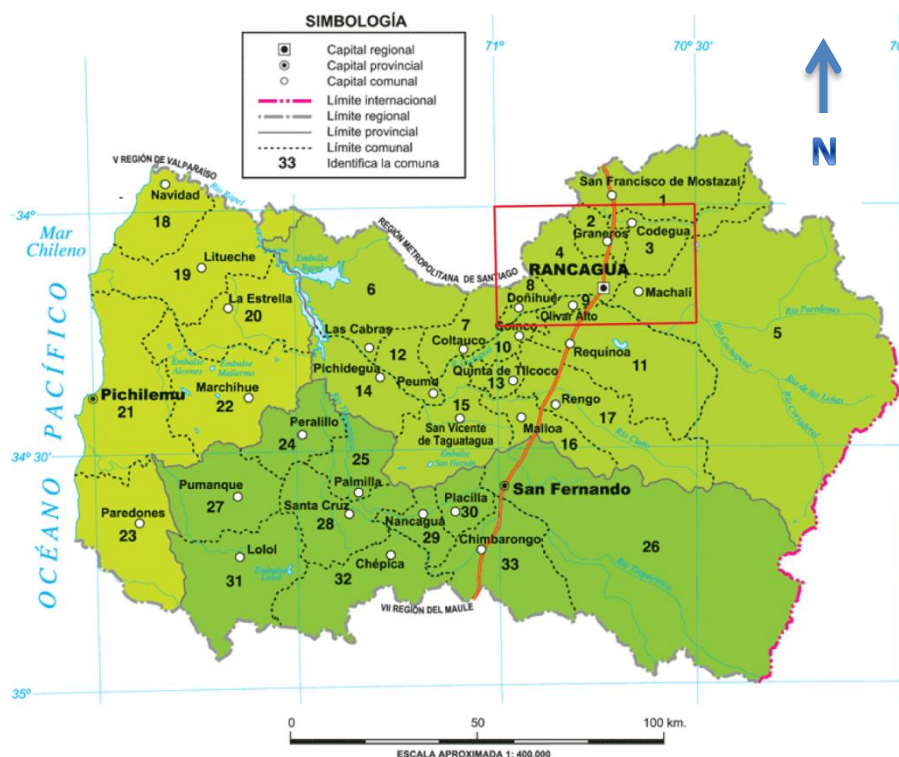


Figura 2.1. Ubicación del Área de Estudio
Modificado del Mapa Político Administrativo de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (IGM, 2008)

Abarca las comunas de Rancagua, Graneros, Doñihue, y parte de las comunas de, Codegua, Machalí, Requinoa y Olivar, e incluye la ciudad de Rancagua, capital regional, las localidades de Graneros, Codegua, Gultro, El Olivar, La Compañía, Machalí, Doñihue y los sectores rurales adyacentes (IGM, 2008).

El acceso terrestre al área de estudio es a través de la carretera panamericana, Ruta 5 Sur, la cual atraviesa la región en su totalidad de norte a sur. Para acceder a los distintos puntos de muestreo se utilizaron los caminos habilitados para ello, ya sean de carácter intercomunal, rural o local (Fig. 2.2).

La Mina El Teniente de Codelco, ubicada en la comuna de Machalí, en plena cordillera de Los Andes, distante a 54 kilómetros de Rancagua, capital de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta.

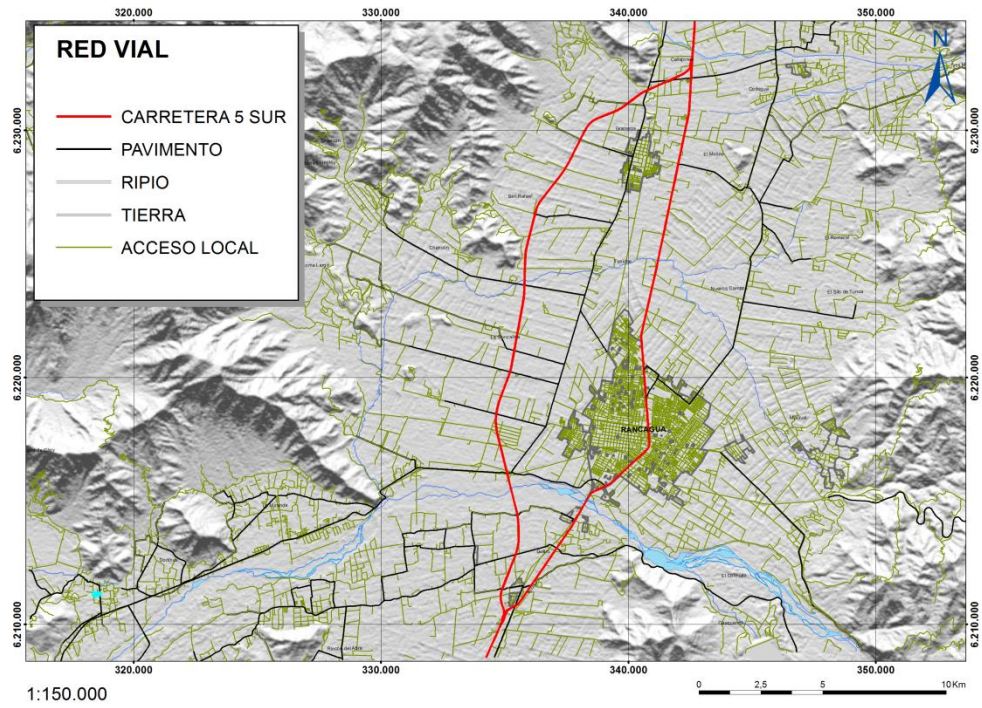


Figura 2.2. Red Vial Área de Estudio.
Modificado de Red Vial Región Libertador General Bernardo O'Higgins. (MOP. 2013).

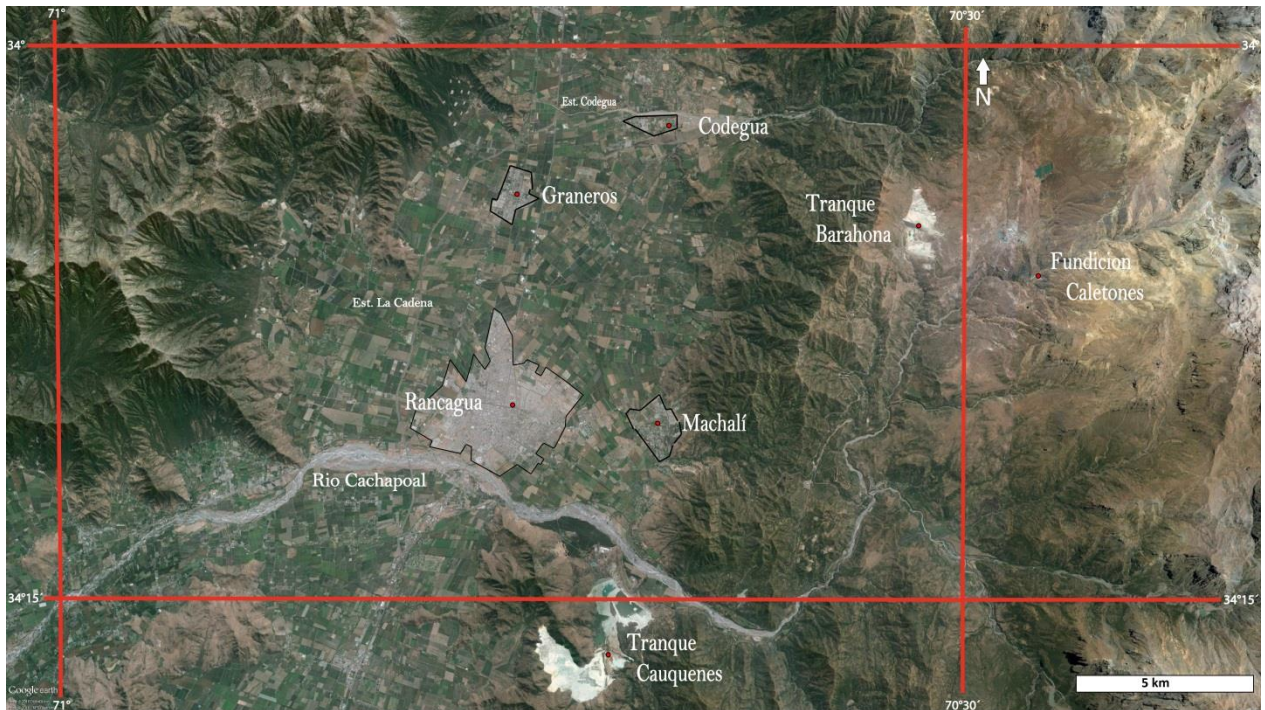


Figura 2.3. Mapa extendido del área de estudio

Desde el punto de vista ambiental, la actividad minera constituye una de las actividades que más removiliza elementos químicos hacia las distintas matrices ambientales. La fundición Caletones, ubicada en las cercanías de la Mina y los tranques de relaves Barahona, ubicado en la naciente del río Coya y Cauquenes, ubicado en la parte media del curso del río Cachapoal, son puntos de interés para este proyecto debido al enorme potencial contaminante que representan (Fig. 2.3).

2.2 Geomorfología

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de tres unidades geomorfológicas principales: los faldeos occidentales de la cordillera de los Andes (cordillera Principal), los faldeos orientales de la cordillera de la Costa, y la Depresión Central ubicada entre ambas cordilleras (Fig. 2.4).

La Depresión Central limita al oeste con el borde oriental de la cordillera de la Costa, y al este, con el flanco occidental de la cordillera de los Andes. Presenta un ancho medio de 30 km y se extiende en dirección norte-sur, 60 km aproximadamente, entre la Angostura de Paine y la Angostura de Pelequén, respectivamente. Esta cuenca se encuentra rellena principalmente por sedimentos de origen fluvio-glacio-volcánico (Godoy *et al.*, 2009). El área de estudio comprende la Depresión Central, abarcando las comunas de Rancagua, Graneros, Codegua y Machalí, y es drenado principalmente por el río Cachapoal y, en menor medida, por el estero La Cadena que también drena el sector norte de la cuenca hasta la confluencia con el río Cachapoal y el estero Codegua. Este último drena en dirección al norte y luego al noroeste hacia la cuenca del río Maipo. Las alturas promedio tanto de las ciudades como pueblos, varían entre 600 m s.n.m. en Machalí, y 300 m s.n.m. en Doñihue (SERNAGEOMIN, 2013).

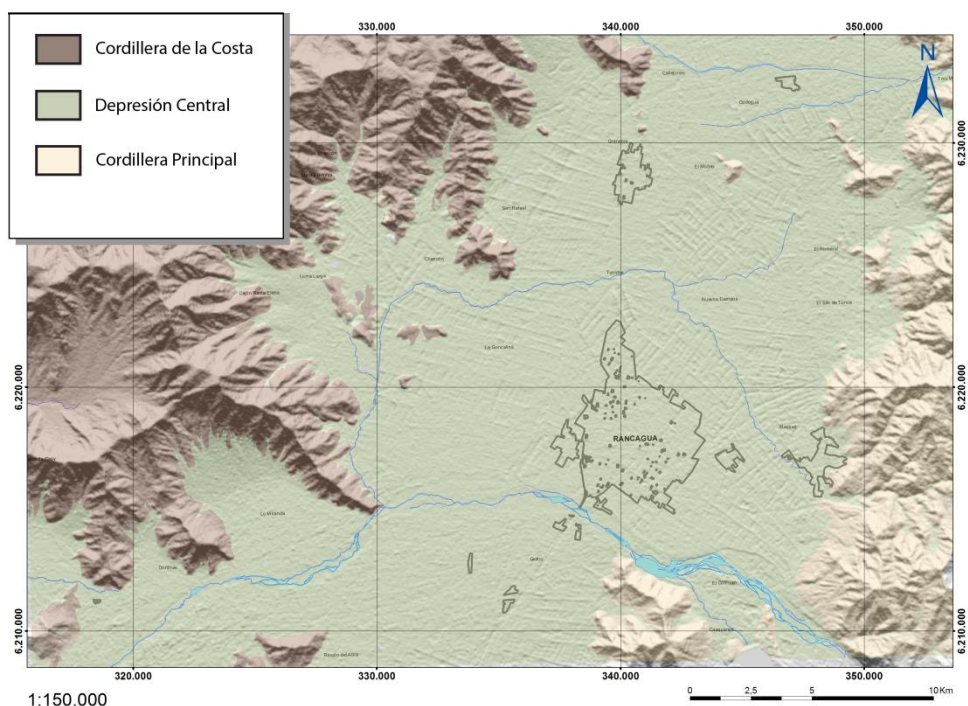


Figura 2.4. Esquema Geomorfológico del Área de Estudio.

2.3 Geología

La geología que se describe a continuación fue modificada, a partir de la Carta Geológica Rancagua – San Vicente de Tagua Tagua desarrollada por Godoy *et al.* (2009), por las geólogas Francisca Falcón, Natalia Garrido, Carolina Espinoza y Mariana Cervetto como insumo para los estudios que fueron llevados a cabo en el proyecto “Geología para el Ordenamiento Territorial y la Gestión Ambiental en el área de Rancagua”, Región del Libertador Bernardo O’Higgins por parte del Sernageomin. Esta geología presenta mayor detalle en las descripciones referidas a los cuerpos sedimentarios no consolidados como lo son por ejemplo las remociones en masa o los depósitos fluviales, entre otros. Debido al carácter ambiental que presenta este proyecto, se adecuo la información geológica ya existente a las necesidades que presentan los estudios desarrollados.

Geomorfológicamente el área de estudio se centra en la Depresión Central, unidad morfo estructural rellena con depósitos sedimentarios del Pleistoceno?-Holoceno, que separa las rocas del Mesozoico que afloran al oeste (cordillera de la Costa), de las rocas del Cenozoico que afloran al este (cordillera de los Andes) (Godoy *et al.*, 2009).

Acorde a la geología base del área de estudio (Fig. 2.5), en el borde occidental del área de estudio se encuentra el flanco oriental de la cordillera de la Costa, donde aflora la Formación Las Chilcas (**Kilc**), de edad Cretácica Inferior. Corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria principalmente de origen continental, que en el área de estudio se encuentra intruída por rocas plutónicas e hipabisales del Cretácico Superior, agrupadas en la unidad (**Ksi**).

En el borde oriental del área de estudio (Fig. 2.5), aflora la Formación Abanico (**EMa**), de edad Eoceno Superior-Mioceno, en el flanco occidental de la cordillera de los Andes. Su relación de contacto con la Formación Las Chilcas no está expuesta. En el área de estudio corresponde a una secuencia de lavas de composición andesítica a basáltica, con intercalaciones de rocas piroclásticas y sedimentarias, que se encuentra intruída por la unidad Stocks, Filones y Filones-Manto (**Mgh**), del Mioceno (Godoy *et al.*, 2009).

La Ignimbrita Pudahuel (**Plip**) representa los depósitos generados en el último evento volcánico registrado en las inmediaciones del área de estudio (Fig. 2.5). El evento de edad Pleistocena corresponde a una gran explosión de carácter riolítico, lo que queda evidenciado en los extensos depósitos ampliamente dispersos, desde la cordillera de la Costa hasta la región de tras arco, en Argentina.

El registro geológico del área de estudio se completa con los depósitos sedimentarios no consolidados, los cuales cubren gran parte de la Depresión Central (Fig. 2.5) e incluyen al conjunto de depósitos aluviales (**PlHa**), depósitos aluviales de piedemonte y quebradas (**PlHac**), los depósitos de remoción en masa (**PlHrm**), los depósitos fluviales modernos que se depositan a lo largo de los cauces actuales (**Hf**) y los depósitos de origen antrópico (**Hra**).

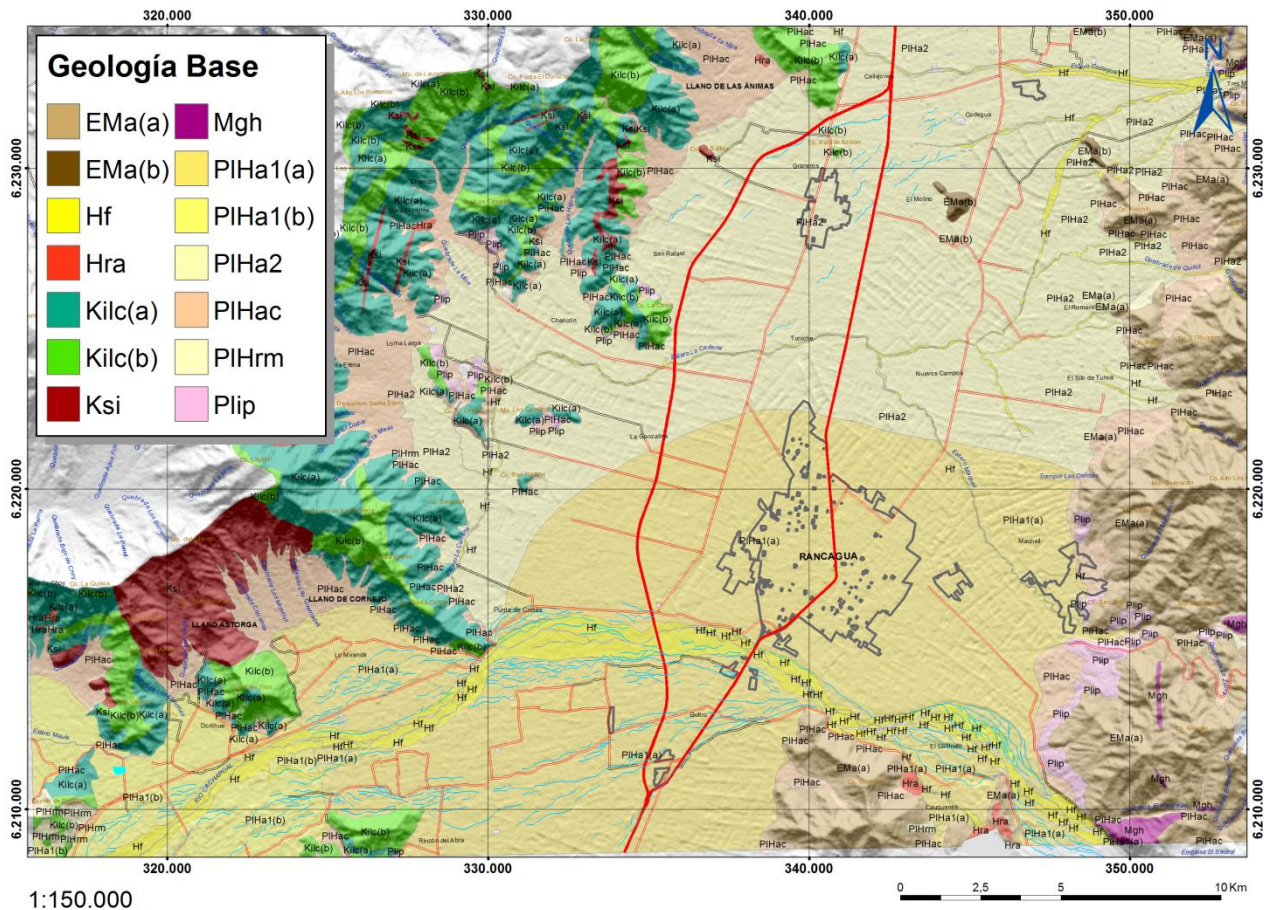


Figura 2.5. Geología Base del área de estudio, escala 1:150.000. Modificado de Godoy *et al.* (2009)

2.3.1 Secuencias Estratificadas

2.3.1.1 Formación Las Chilcas Kilc (Barremiano – Alviario) (Thomas, 1958)

La Formación Las Chilcas corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria de origen principalmente continental, con un amplio espectro de litologías. El área de estudio incluye litologías principalmente volcánicas, efusivas y piroclásticas de composición intermedia a ácida, con andesitas, ignimbritas y tobas de composición dacítica a riolítica, y domos riódacíticos.

La formación aflora como una franja NS a NE-SW, a lo largo del borde oriental de la cordillera de la Costa, donde se encuentra intruida por rocas de edad cretácica superior. Sobreyace en discordancia angular a la Formación Lo Prado fuera del área, y subyace en discordancia de erosión a la Formación Abanico en las laderas del Cerro Challay, inmediatamente al norte del área.

En el área de la Carta Rancagua (Godoy *et al.*, 2009) se incluyen en la Formación Las Chilcas, litologías principalmente volcánicas y piroclásticas de composición intermedia a ácida, diferenciadas de acuerdo a su composición litológica, entre **Kilc(a)** y **Kilc(b)**, las cuales se describen a continuación:

Kilc(a) Lavas y filones manto andesíticos que afloran en distintos niveles de la formación, de textura porfídica y amigdaloidales. Las lavas muestran, en general, diversos grados de alteración a calcita, sericita, epidota, clorita, cuarzo y zeolita. Las lavas incluyen capas métricas a centimétricas de areniscas y limolitas tobáceas.

Kilc(b)

- (1) Ignimbritas dacíticas a riodacíticas de biotita afloran en el borde oriental de la cordillera de la Costa, al sur del río Cachapoal, con manteo variable entre 30° y 40° al este. Presentan diversos grados de soldamiento y las fiamme exhiben frecuentemente amígdalas de zeolitas y calcedonia, junto con hematita, epidota y sericita.
- (2) Tobas con abundantes líticos subredondeados andesíticos y tobáceos, y tobas ricas en cristales de plagioclasas, y en menor proporción anfíbol. Su habitual color verde se debe a la presencia de epidota, tanto en la matriz cinerítica como en algunos clastos.
- (3) Domos subvolcánicos a extrusivos, de rocas porfídicas con masa fundamental vítrea y diversos grados de desvitrificación, con plagioclasa, cuarzo y biotita comúnmente oxidada.
- (4) Toba riolítica de caída, rica en cuarzo y líticos andesíticos y félsicos calcitizados, que se identifica a media falda al NW de Chancón con un característico color blanco.

2.3.1.2 Formación Abanico *EMa* (Eoceno Superior - Mioceno Medio) (Aguirre, 1960)

La Formación Abanico corresponde a una secuencia principalmente volcánica andesítica a basáltica, con frecuentes intercalaciones piroclásticas y sedimentarias continentales, que puede alcanzar espesores mayores a los 2.000 metros y muestra un intenso plegamiento. Las lavas y tobas se presentan en gran parte con abundantes líticos y estas últimas ocasionalmente se hallan soldadas junto a areniscas conglomerádicas y limolitas de origen continental.

Su base no se expone en el área, y la relación de contacto en su base ha sido interpretada como concordante, discordante y tectónica, dependiendo de la localidad donde se observa; hacia el techo, su contacto con la Formación Farellones, fuera del área de estudio, corresponde a la Falla los Arrayanes.

En el área de la Carta Rancagua (Godoy *et al.*, 2009) se incluyen en la Formación Abanico, litologías principalmente volcánicas y piroclásticas, diferenciadas de acuerdo a su composición litológica, entre ***EMa(a)*** y ***EMa(b)***, las cuales se describen a continuación:

EMa(a) Comprende las rocas que predominan en el área, y corresponden a secuencias de rocas piroclásticas y lavas andesíticas indiferenciadas, con conglomerados, areniscas, limolitas intercaladas y espesores variables de hasta 60 m. Incluye intercalaciones de limolitas y areniscas bandeadas, en capas ocres a marrón-grisáceas, que afloran en el sector comprendido entre la carretera del Cobre y el río Cachapoal, coincidiendo con las zonas de plegamiento más intenso.

EMa(b) Corresponde a afloramientos menores de lavas andesíticas y andesítico-basálticas, compuestas por coladas y filones manto de andesitas porfídicas de piroxenos y andesitas basálticas de clinopiroxeno y olivina, habitualmente iddingsitizada. Son de color negro o de tonos rojizos, y pueden presentar una textura traquítica que origina un marcado clivaje. Parte de los filones manto corresponden a dacitas de anfíbola con avanzada alteración a calcita y epidota, alteración frecuente también en las lavas andesíticas. La unidad incluye escasas tobas y microconglomerados de clastos andesíticos.

2.3.1.3 Ignimbrita Pudahuel *Plip* (Pleistoceno) (Wall *et al.*, 1996)

La Ignimbrita Pudahuel corresponde a un depósito cinerítico de composición riolítica (SiO₂ =75%), fragmentos piroclásticos y líticos volcánicos e intrusivo; localmente puede ser muy rica en pómez. Esta unidad representa un evento volcánico registrado en el área de estudio, ocurrido durante el Pleistoceno y asociado con la caldera Diamante.

Su potencia es mayor a los 10 metros al SE de Machalí y al este de Laguna Cauquenes, y se conservan espesores de 1 a 2 metros en placetas de variada elevación en las cercanías del estero Codegua, el río Cachapoal, y al este de Machalí. Existen pequeños afloramientos en rinconadas de la cordillera de la Costa, que corresponden a los sectores

Lo Chancón/La Gonzalina (8 m de espesor) y Rincón del Abra (<2 metros) (Godoy *et al.*, 2009). Cabe destacar que en los sondajes estratigráficos situados en la depresión Central, se reconocen estratos con material cinerítico que correspondería al producto del retrabajo de esta unidad.

2.3.2 Depósitos Sedimentarios No Consolidados

2.3.2.1 Relleno Artificial *Hra* (Holoceno)

Consisten en depósitos de relleno resultante de la actividad humana, principalmente obras relacionadas a la actividad minera. En la zona de estudio se destacan las instalaciones del tranque de relave Cauquenes y depósitos de la Mina El Inglés.

2.3.2.2 Depósitos Fluviales *Hf* (Holoceno)

Sedimentos compuestos por bolones y gravas no consolidadas, redondeados a bien redondeados, de baja esfericidad, ocasionalmente imbricadas, clasto soportado, polimícticos y con intercalaciones esporádicas de arenas y limos. Se asocian a la llanura de inundación actual del río Cachapoal y los esteros Codegua y La Cadena.

2.3.2.3 Depósitos Aluviales *PIHa* (Pleistoceno?-Holoceno)

Corresponden a sedimentos acumulados en las partes topográficamente más bajas de la Depresión Central, se presentan poco consolidados, estratificados, compuestos por bolones, gravas, arenas, limos y arcillas. Conforman amplios abanicos en la Depresión Central, y terrazas ubicadas en ambas riberas del río Cachapoal y el estero Codegua.

Los contactos entre los distintos miembros de esta unidad, han sido inferidos según la granulometría de los primeros 30 m de suelo, obtenida de la estratigrafía básica de los pozos de los expedientes de solicitudes de derechos de agua subterránea de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y complementado con datos de terreno. Se reconocen litológicamente distintos depósitos aluviales, los ***PIHa1*** se encuentran asociados al río Cachapoal y los ***PIHa2*** se encuentran asociados a los esteros La Cadena y Codegua.

PIHa1(a) Se compone, principalmente, por bolones, gravas, y arenas estratificadas y, en menor cantidad, intercalaciones métricas de limos y arcillas. Se distribuyen en las partes medias y altas del abanico asociado a antiguos cursos del río Cachapoal.

PIHa1(b) Sedimentos estratificados compuestos principalmente por arenas, arcillas, gravas y en menor cantidad gravas gruesas y bolones. Se distribuyen en los sectores distales del abanico del río Cachapoal, en las cercanías de la vertiente oriental de la cordillera de la Costa.

PLHa2 Depósitos compuestos, principalmente, por gravas, arenas, limos y arcillas, y en menor proporción bolones, que se asocian a los esteros Codegua y La Cadena. Se observa una gradación granulométrica, en sentido este-oeste, desde sedimentos compuestos por bolones y gravas con intercalaciones de arena, a sedimentos medios a finos, estratificados, compuestos por arena, limos y arcilla.

2.3.2.4 Depósitos de Remoción en Masa *PLHrm* (Pleistoceno?-Holoceno)

Depósitos compuestos por sedimentos mal seleccionados y escasamente consolidados, ubicados al pie de laderas. Al oeste de Doñihue se reconocen deslizamientos de suelo y roca, delimitados por múltiples planos de ruptura que han generado escarpes de diversas alturas.

2.3.2.5 Depósitos Aluviales y Coluviales *PLHac* (Pleistoceno?-Holoceno)

Depósitos formados por bloques, gravas, arenas y limos no consolidados de forma sub-angulosa a sub-redondeada, con mala esfericidad y mala estratificación, generalmente clasto soportados por bolones o gravas. Estos depósitos generalmente se presentan como escombros de falda, al pie de las laderas y formando conos de deyección.

2.3.3 Rocas Intrusivas

2.3.3.1 Intrusivos Filones Mantos, Filones y Cuerpos Irregulares de Composiciones Intermedias a Ácidas *Ksi* (Cretácico Superior)

Complejo intrusivo integrado por los siguientes cuerpos magmáticos: Monzodioritas y dioritas cuarcíferas de Doñihue, Complejo plutónico Alhué y Rocas intrusivas hipabisales (Godoy *et al.*, 2009), que intruyen a la Formación Las Chilcas. Las primeras contienen biotita y piroxeno, en parte ortopiroxeno, el cual muestra diversos grados de alteración, y localmente presentan texturas porfídicas. El Complejo plutónico Alhué está integrado por tonalitas, granodioritas y dioritas cuarcíferas, con hornblenda y anfíbola, y las Rocas intrusivas hipabisales corresponden a filones, filones-manto y cuerpos irregulares de composiciones intermedias a ácidas, con biotita y/o anfíbola.

2.3.3.2 Stocks, Filones, Filones-Manto, Dioríticos, Dacíticos y Andesíticos *Mgh* (Mioceno)

Esta unidad comprende los stocks, filones y diques dioríticos, dacíticos y andesíticos, con edades variables entre los 19 y 9 Ma. Los stocks son de contorno irregular, entre 2 y 4 km de diámetro, y se presentan junto a filones y filones-manto de rumbos NW a EW, los que intruyen a la Formación Abanico en el sector oriental del área de estudio.

2.4 Suelos

Los suelos presentes en el área de estudio son predominantemente de origen aluvial y pertenecen a los órdenes *Molisol*, *Inceptisol* y *Alfisol*.

El termino *Molisol* corresponde a suelos altamente permeables, capaces de absorber una gran cantidad de agua. Se pueden encontrar en la cercanía de los cursos de los ríos, donde existen suelos superficiales a moderadamente profundos. En la zona que corresponde a Rancagua (Fig. 2.6), los *Molisoles* tienen un desarrollo moderado.

El termino *Inceptisol* corresponde a suelos moderadamente permeables, ubicados en la depresión central, donde se ubica una gran cuenca de sedimentación, con suelos jóvenes y poco desarrollados. Estos suelos son derivados de sedimentos fluviales recientes, de texturas medias a pesadas, que los hace moderadamente permeables; utilizados con fines agrícolas.

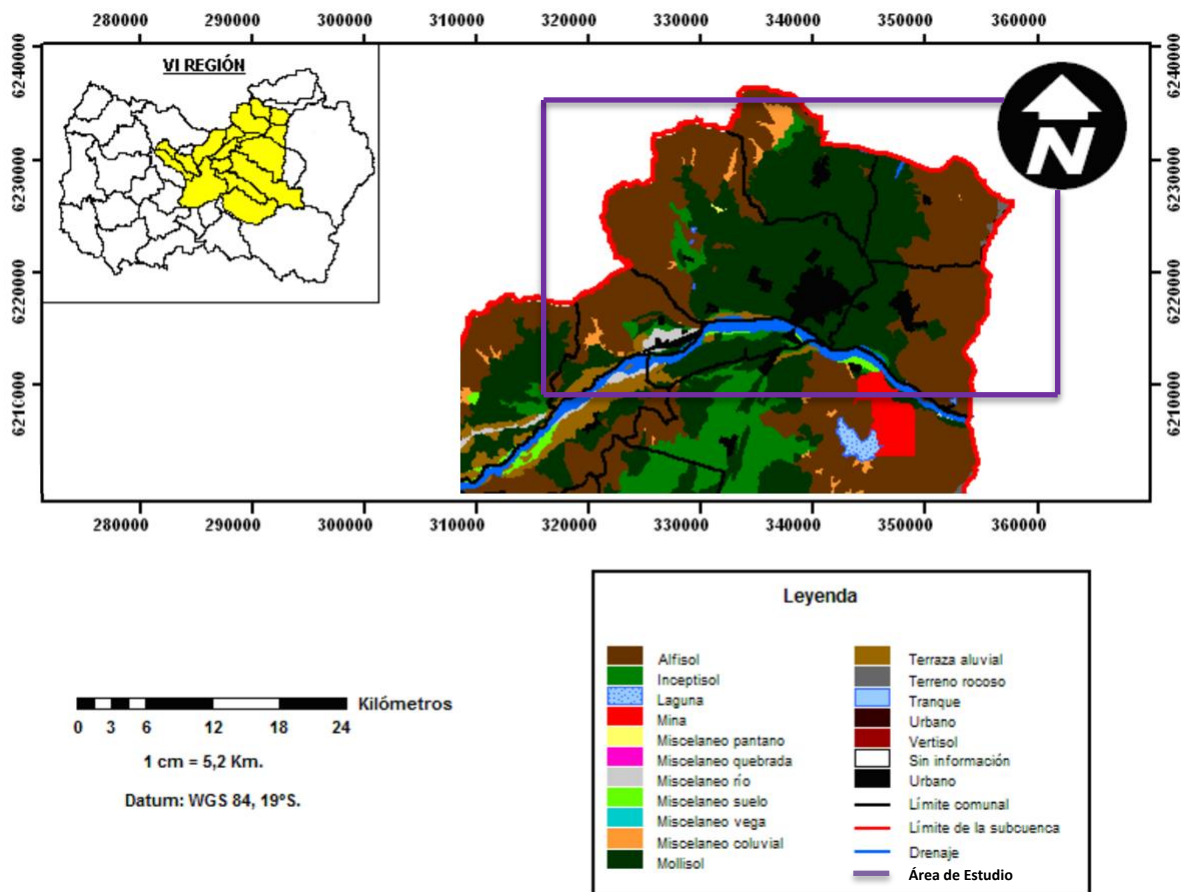


Figura 2.6. Distribución de tipos de suelos en el área de estudio. Información CIREN-CORFO (2002), Modificado de Iriarte (2007).

El termino *Alfisol* corresponde a suelos impermeables, formados a partir de materiales graníticos, los cuales se encuentran concentrados principalmente en la cordillera de la costa, poseen texturas livianas a medias en el horizonte superficial, mientras que en el horizonte que subyace registra abundante contenido de arcillas; esta ordenación de texturas favorece la impermeabilidad de los suelos.

Es indiscutible, afirmar que es en esta zona donde se encuentran los suelos más aptos para el desarrollo de la agricultura. (Luzio y Alcayaga, 1992).

2.5 Circulación Local de Vientos

Los modelos 3D de los campos de viento en el área de estudio que a continuación se presentan fueron desarrollados por el Dr. en Ing. Ambiental Pedro Sanhueza para el estudio denominado “Análisis Efectos en Salud por Material Particulado Respirable (PM₁₀) y Ozono (O₃) en la VI Región” (2006) realizado en las comunas de Rancagua, Machalí, Graneros y Codegua (Fig 2.7). Particularmente, debido a los altos niveles del PM₁₀ durante el periodo correspondiente entre el 15 y 20 de Mayo del 2004, se desarrollaron tres modelamientos 3D de los campos de vientos a fin de complementar la información registrada con el comportamiento de las masas de aire desde un punto de vista meteorológico. Si bien esta información es puntual en el tiempo, nos permite tener un mejor entendimiento del comportamiento local de la circulación atmosférica en la zona, a fin de complementar el estudio realizado en este trabajo de título.

Tabla 2.1. Periodo de mayor concentración de PM₁₀ en Rancagua y Codegua en el año 2004.

Fecha	16-Mayo	17-Mayo	18-Mayo	19-Mayo	20-Mayo
[PM ₁₀] Rancagua	181	179	221	235	180
[PM ₁₀] Codegua	151	-	-	226	-

Las figuras 2.8 y 2.9 muestran dos modelamientos correspondientes al día 16 de mayo en distinto horario (01 AM y 18 PM) y la figura 2.10 muestra un modelamiento correspondiente al día 18 de mayo a las 19 PM.

En la figura 2.8 se aprecia que los vientos recirculan en un sector en torno a la ciudad de Graneros, con aportes provenientes desde Rancagua y Codegua.

En la figura 2.9 se observa que las masas de aire que pasan por Rancagua se dirigen al noreste impactando a Graneros y Codegua.

La principal diferencia entre los modelamientos del día 16 de mayo (Figuras 2.8 y 2.9) y el modelamiento del 19 de mayo (Fig. 2.10) radica en el hecho que en este último se aprecia movimiento de componentes de viento en dirección al valle, desde la montaña. Precisamente el día 19 de Mayo, se presenta la mayor concentración de MP₁₀ en Rancagua y Codegua. Este antecedente sumado a la información que entrega el modelamiento del movimiento atmosférico 3D podría indicar que un aporte de masas de aire con una alta carga de material particulado proveniente desde la fundición Caletones (ver Fig. 2.3), impacta Codegua. En cambio, para la ciudad de Rancagua, las masas de aire provendrían desde el norte.

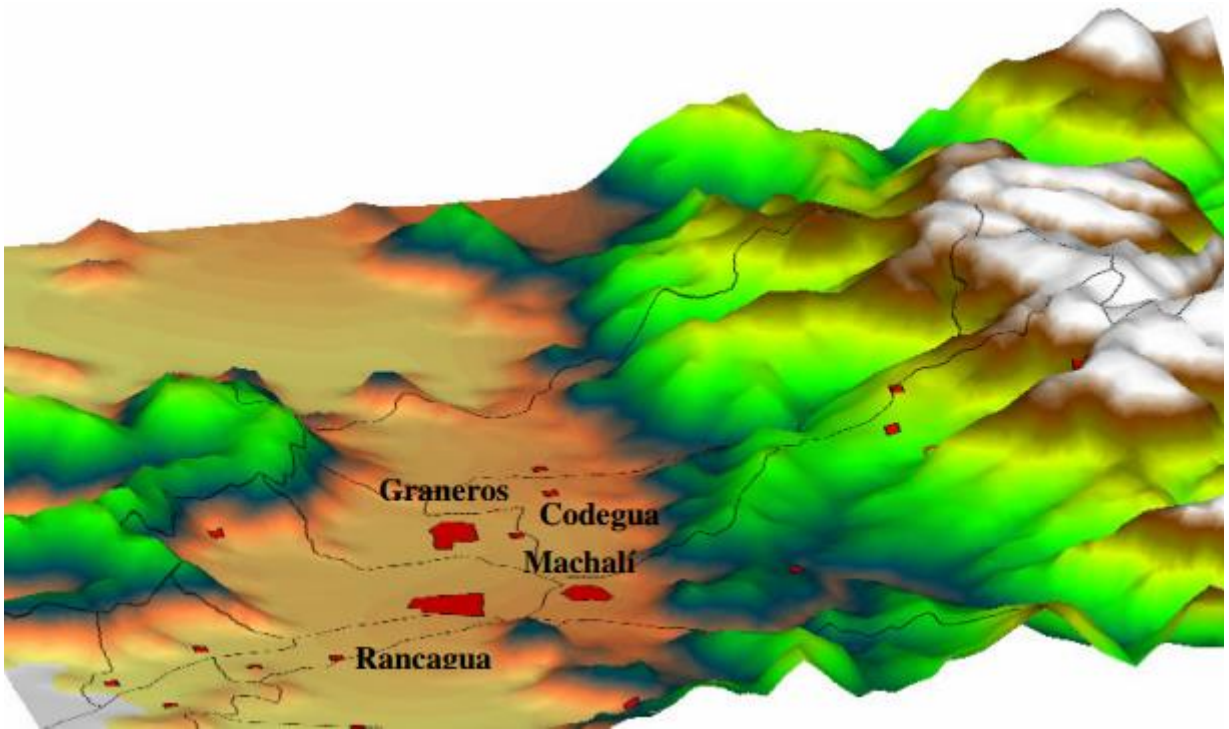


Figura 2.7. Área Estudio Modelamientos 3D Campos de Viento.

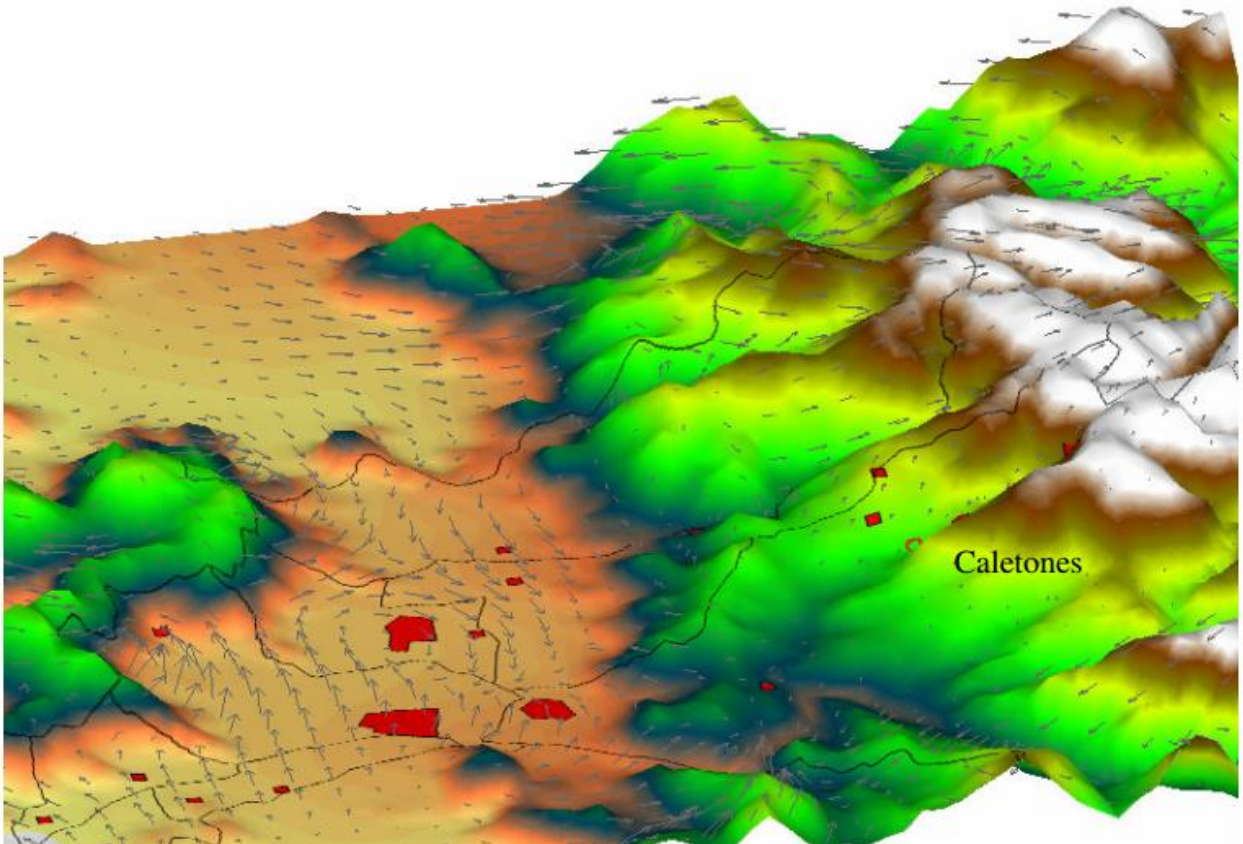


Figura 2.8. Modelamiento 3D Campos de Viento 16/Mayo/2004 (01 AM)

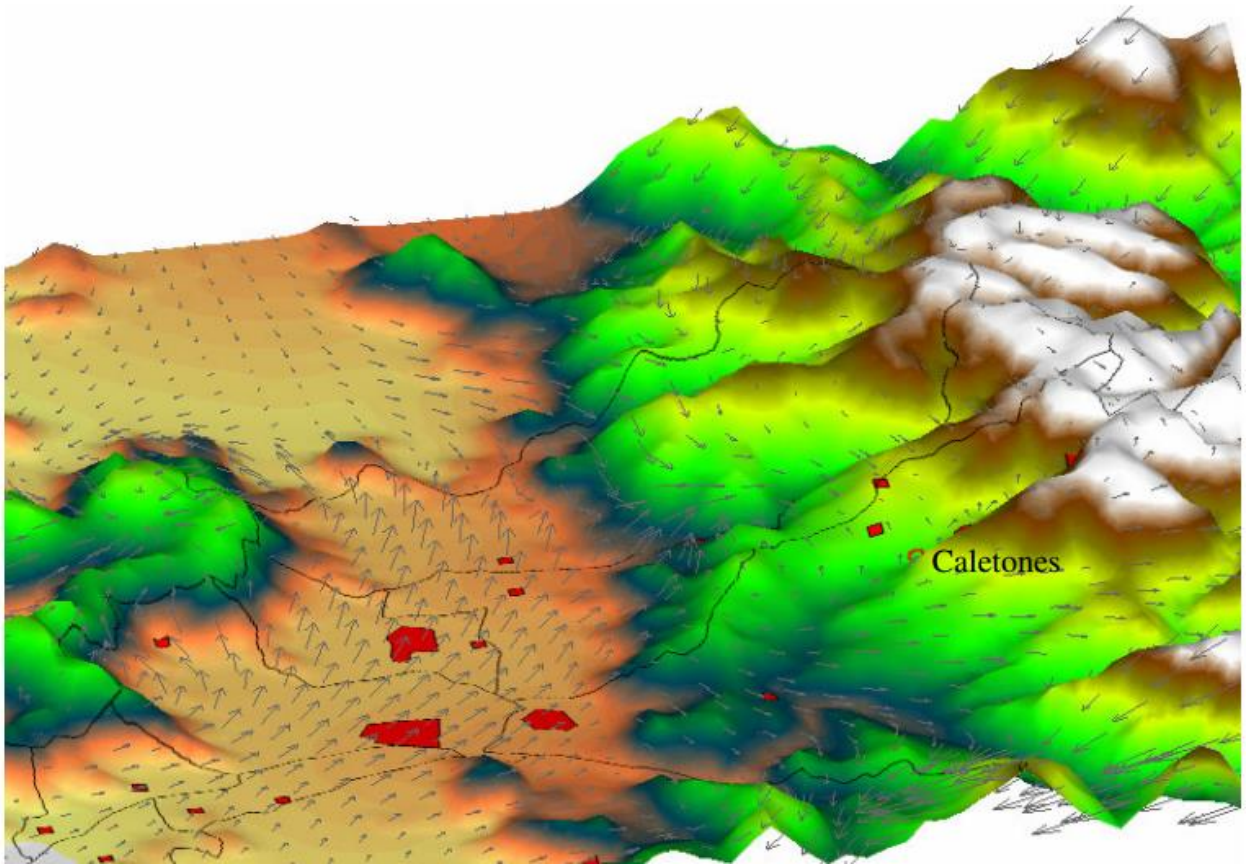


Figura 2.9. Modelamiento 3D Campos de Viento 16/Mayo/2004 (18 PM)

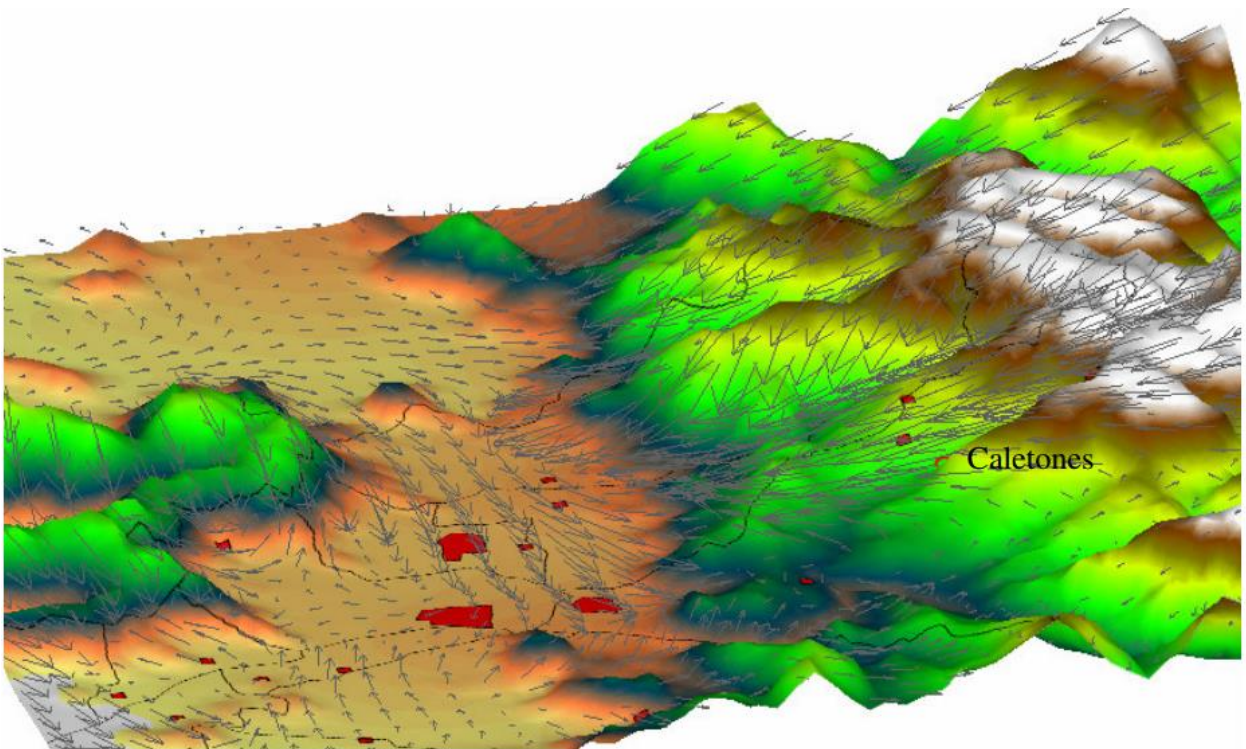


Figura 2.10. Modelamiento 3D Campos de Viento 19/Mayo/2004 (19 PM)

Capítulo 3 Metodología

Los resultados que se presentan en los capítulos siguientes fueron obtenidos a partir del procesamiento de los datos adquiridos por la Dra. Ana Valdés Durán. Para este trabajo, la metodología descrita en los puntos 3.1 y 3.2, corresponde a la metodología presente en el capítulo de geoquímica de suelos del informe registrado IR-13 Geología para el Ordenamiento Territorial y la Gestión Ambiental en el área de Rancagua, Región del Libertador Bernardo O'Higgins (Sernageomin, 2013).

3.1 Metodología de Muestreo y Trabajo en Terreno

Para la elaboración de una línea base de suelos del área de estudio, se realizó un levantamiento de muestras, que consideró el protocolo de muestreo y de análisis de laboratorio propuesto por Salminen *et al.* (2005). En general, la metodología del autor, considera la toma de muestras en lugares prístinos de distintas matrices ambientales. Sin embargo, debido a la imposibilidad de encontrar estas características en el área de interés, altamente impactada por actividad industrial y agrícola, entre otras, se elabora un protocolo de muestreo de suelos de acuerdo a la realidad del área de estudio. Este protocolo es el resultado de la suma de criterios, tomados tanto de Salminen *et al.* (2005) como del protocolo de muestreo de suelos del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) (Zagal y Sadzawka, 2007).

3.1.1 Grillado y Selección de Muestras

Dentro del área de estudio, existen una serie de asentamientos humanos de carácter urbano, los cuales hacen uso de importantes extensiones, que ordenados de mayor a menor superficie, son: Rancagua (60 km^2), Machalí (15 km^2), Codegua (12 km^2), Doñihue (10 km^2), Graneros (9 km^2) y Requinoa ($7,5 \text{ km}^2$). En la mayoría de los casos, fuera de las zonas urbanas, existen zonas rurales así como también sectores periurbanos ubicados entre localidad y localidad

De acuerdo a Reimann *et al.* (2008), se propone una malla de muestreo de $0,5 \times 0,5 \text{ km}^2$ en las localidades ubicadas en el área de interés definidas como urbanas, de $1 \times 1 \text{ km}^2$ en las zonas periurbanas y de $1-5 \text{ km}^2$ en las zonas rurales.

Según los antecedentes previamente expuestos, el mapeo geoquímico urbano en las ciudades de Graneros, Rancagua y Machalí se realizó a escala urbana, con una grilla de $0,5 \times 0,5 \text{ km}^2$, e incluyó muestreo en parques, espacios públicos abiertos, humedales, campos y áreas industriales. La grilla de muestreo propuesta para las muestras tomadas en la Depresión Central fue de 1 muestra por cada $1-5 \text{ km}^2$, según el terreno lo permita, y el muestreo corresponde principalmente a plantaciones de viñedos o frutales, praderas (maizales en su mayoría) o sitios abandonados. La imagen a continuación (Fig. 3.1) muestra los puntos de muestreo, con su respectivo uso de suelo, para efectos de este estudio.

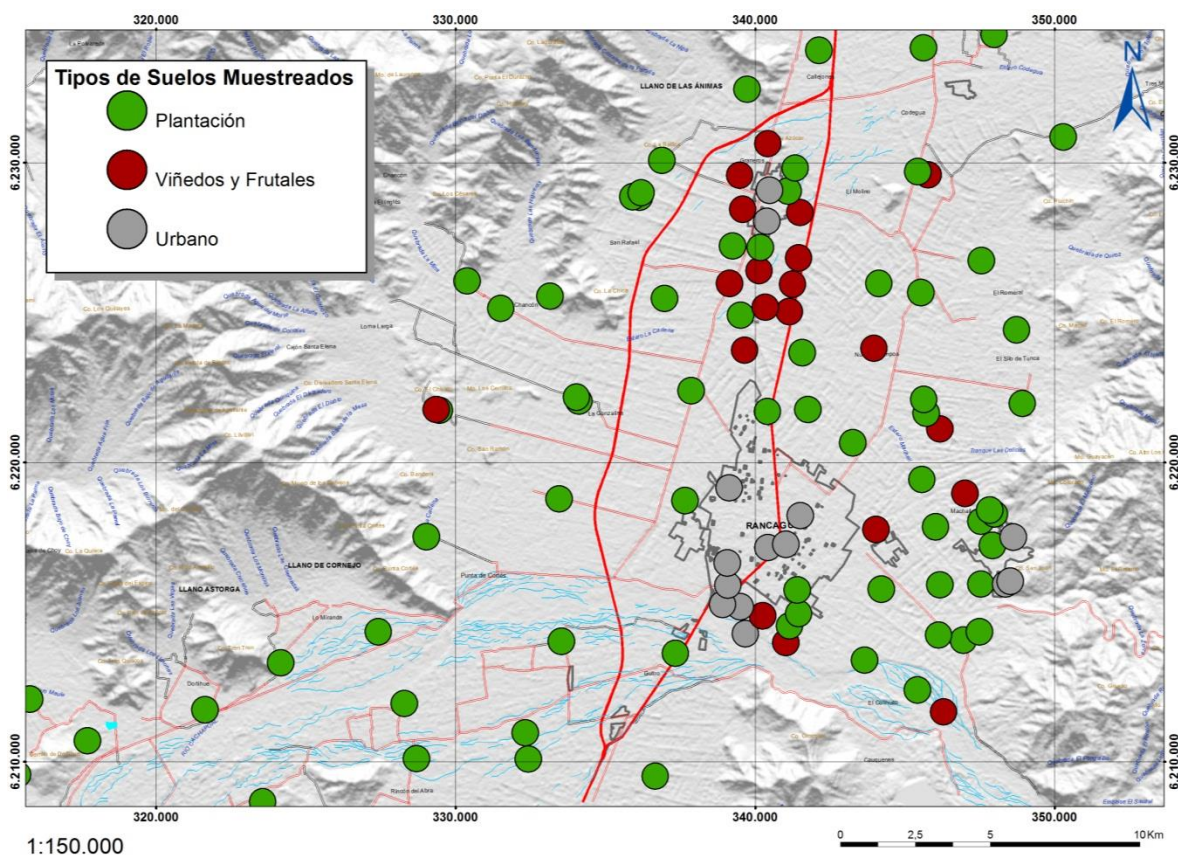


Figura 3.1. Uso del suelo en puntos de muestreo.

El procedimiento de la toma de muestras, tanto en suelos urbanos como en suelos agrícolas de los espacios periurbanos y rurales, fue el mismo, y se detalla a continuación.

El muestreo realizado en las antiguas llanuras de inundación como en los conos coluviales y/o aluviales es de tipo compuesto, es decir, cada muestra de aproximadamente 2 kg está compuesta de 5 sub-muestras, correspondientes a los vértices de un cuadrángulo de 5x5 mts, más una sub-muestra tomada en el centro de este cuadrángulo (Fig. 3.2). El objetivo de este método es velar por la homogeneidad del terreno muestreado, ya que es posible que existan variaciones geoquímicas centimétricas o métricas que pueden alterar la interpretación de los resultados. Para la obtención de la muestra (Fig. 3.3(a)) se procede a excavar con una pala plástica un agujero de aproximadamente 20 x 20 cm, de donde se obtienen las sub-muestras para los primeros 05 cm de suelo. Cada sub-muestra es depositada en bolsas de muestras de polietileno, hasta reunir el total de sub-muestras y posteriormente la bolsa es sellada y rotulada (Fig. 3.3(b)). Posteriormente, se toman las muestras para los 20 cm de profundidad y si es posible se toman muestras a mayor profundidad. Si bien es cierto que la metodología considera el muestreo de suelos a los 5 cm y a los 20 cm, cabe señalar que los datos analizados en el presente trabajo de título, corresponden a los análisis químicos realizados sobre las muestras tomadas a mayor profundidad (20-30 cm).



Figura 3.2. Cuadrángulo de muestreo tipo compósito



Figura 3.3. (a) Muestreo del perfil 0 a 5 cm. (b) Muestras tipo Compósito almacenadas en bolsas de polietileno.

3.1.2 Validación Datos de Terreno

Durante el proceso de muestreo se tomaron de manera aleatoria una serie de duplicados equivalentes al 10-15% del total de las muestras. Estos duplicados tienen como finalidad generar un mecanismo de control de los resultados entregados por el laboratorio. Cada duplicado muestra la diferencia entre dos análisis realizados en el mismo punto, y serán analizados según la siguiente fórmula (Ec. 3.1)

$$\left(\frac{(X - Y)^2}{X + Y} \right) * 100$$

Ecuación 3.1. Fórmula de control de duplicados

Donde X representa la concentración de un elemento en el duplicado e Y representa la concentración del mismo elemento en el primer análisis.

3.2 Metodología de Laboratorio

3.2.1 Preparación de Muestras

Las muestras obtenidas en el trabajo en terreno, fueron guardadas a temperatura ambiente en las bodegas del SERNAGEOMIN, hasta su ingreso al laboratorio de preparación de muestras. Ya en el laboratorio, se extrajo una parte de la muestra para medir el pH del suelo. Posteriormente, el resto de la muestra fue secado en un horno electrónico Memmert, a una temperatura de 30,1°C durante una semana aproximadamente. Una vez terminado el proceso de secado, se procedió al tamizado de las muestras, para lo cual se utilizaron tamices marca VWR, uno de malla N°10 equivalente a 2mm y otro de malla N°80 equivalente a 0,18 mm, obteniéndose dos fracciones, una entre los 2 mm y los 180 µm y la otra de tamaño inferior a los 180 µm. Ambas fueron almacenadas en frascos de polipropileno. Previo a los análisis químicos, la primera fracción fue guardada y 40 gr de la fracción fina (<180 µm) fueron cuarteados y molidos en un pulverizador de rocas ROCKLABS de ágata, los cuales posteriormente fueron tamizados mediante una malla 200 (<75 µm). Esta última fracción obtenida, fue utilizada para los análisis químicos que se detallan a continuación.

3.2.2 Adquisición y Procesamiento de Datos

Para este estudio geoquímico de suelos se analizaron las concentraciones totales de un total de 39 elementos químicos (Tabla 3.1) en 109 puntos de muestreo distribuidos a través de toda el área. Los elementos mayores y los elementos traza fueron analizados mediante Fluorescencia de Rayos X (XRF).

Tabla 3.1. Elementos Muestreados.

Elementos Mayores	<i>SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, CaO, MgO, MnO, Na₂O, K₂O, P₅O₂.</i>
Elementos Traza	<i>Cu, V, Cr, Co, Ni, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Pb, Sc, C, S, Hg, As, Mo, Sb, Sn, Au, Cd, Ag, Bi, W, Se, Te, Ga.</i>

3.2.2.1 Validación Procedimiento de Laboratorio

El manual de procedimientos del ensayo realizado (XRF) en la Unidad de Laboratorio Químico del SNGM contempla controles de calidad propios. Durante el desarrollo de este trabajo no se tuvo acceso a dicha información.

3.2.3 Control de Calidad y Análisis Exploratorio de Datos

3.2.3.1 Límite de Detección

El tratamiento de los datos obtenidos comienza con la eliminación de todas las variables que presenten un porcentaje de muestras con valores bajo el límite de detección mayor a un 70%. Este valor se estableció en base al elemento As, el cual es un elemento de interés para este estudio.

Acorde al criterio anteriormente definido, se eliminaron del total de 39 elementos los siguiente elementos: Oro (*Au*), Cadmio (*Cd*), Selenio (*Se*), Estaño (*Sn*), Teluro (*Te*).

Para aquellos elementos que poseen más del 30% de los datos con concentraciones por sobre el límite de detección pero con algunos datos bajo el límite de detección (Tabla 3.2), el valor de los puntos bajo el límite de detección es modificado por la mitad del mismo (Reimann *et al.*, 2008). A modo de ejemplo, si el límite de detección es igual a 10 ppm, para aquellos puntos con concentraciones <LD, el valor a utilizar en dichos puntos es igual a 5 ppm.

Tabla 3.2. Resumen Límite de Detección (LD).

Elemento	LD	N <LD	% <LD	Elemento	LD	N <LD	% <LD
Cr	10 ppm	4	4	Mo	5 ppm	50	46
Ni	5 ppm	2	2	Sb	5 ppm	35	32
Nb	5 ppm	50	46	Ag	1 ppm	51	47
Pb	5 ppm	1	1	Bi	10 ppm	56	51
Hg	0.015 ppm	27	25	W	10 ppm	44	40
As	20 ppm	71	65	Ga	1 ppm	5	5

3.2.3.2 Análisis Exploratorio de Datos

Cuando se tiene un set de datos recolectados en un espacio geográfico, se deben considerar dos tipos de distribuciones: la distribución estadística de los valores medidos y la distribución espacial de los datos en el área de estudio (Reimann *et al.*, 2008).

La distribución estadística se determina mediante el análisis exploratorio de los datos. Este se realiza para las variables que poseen un nivel de confianza razonable, determinando los estadígrafos básicos, entre ellos: valores máximo/mínimo, mediana, percentiles principales (25 y 75) y coeficiente robusto de variación (%CVR).

A partir de estos valores se realiza una búsqueda de las muestras outliers. Junto con ello, se grafican los diagramas compuestos.

3.2.3.3 Muestras “Outliers”

La detección de datos anómalos “*outliers*” y el comportamiento inusual de algunos datos, es una de las principales tareas del análisis estadístico de datos geoquímicos. Se han generado diversos métodos (univariable y multivariable) para la determinación de estos valores tomando consideraciones de escala, distribución espacial y parámetros estadísticos (Reimann *et al.*, 2005; 2008). No obstante, dado que los valores anómalos pueden poseer una importancia crítica en la comprensión geoquímica de un estudio, es necesario utilizar un razonamiento caso a caso, además de la ayuda de parámetros estadísticos o gráficos.

En el presente trabajo la identificación de *outliers* se basa en el siguiente principio, los valores anómalos se consideran como datos puntuales, es decir no representan una población de datos, es decir sólo son valores anómalos para la variable unitaria analizada. Estos valores debido a la información que reportan se mantienen en la base de datos.

El criterio de búsqueda utilizado se fija en las estadísticas básicas definidas para el análisis box plot (ver sección 3.3.2.1), el cual evalúa los valores de cada variable en relación al parámetro del Límite Superior [$LS = (Q3) + 1.5 (Q3 - Q1)$]. A partir de este se define la variable Bigote Superior $\{BS = \max(x, [x \leq LS])\}$, la cual se define como el valor más cercano al LS dentro de los datos presentes. Existe la posibilidad de que ciertos elementos no presenten valores para la variable BS debido a que el análisis Box-Plot realizado en dichas variables considera al valor máximo obtenido como un valor no atípico, es decir, no existen valores anómalos para dichos elementos ya que no existen valores mayores que el Bigote Superior.

3.2.3.4 Duplicados

Para el set de datos (20 a 30 cm) utilizado en este trabajo se levantaron 21 duplicados en total.

Los elementos mayores *Si*, *Al*, *Ti*, *Fe*, *Ca*, *Mn*, *Na* y *K* presentaron la mejor reproducibilidad con más del 85% de las muestras con diferencias <10% de la concentración. El *P* y *Mg* presentaron una menor reproducibilidad con diferencias incluso mayores al 50%. En los elementos traza el *V*, *Cr*, *Co*, *Zn*, *Rb*, *Sr*, *Y*, *Zr*, *Nb*, *Ba*, *S*, *As*, *Mo*, *Bi* y *Ga* presentaron las mejores reproducibilidades con gran parte de los duplicados con diferencias menores al 20% en las concentraciones. El *Cu*, *Ni*, *Pb*, *Sc*, *C*, *Sb* y *W* presentaron en mayor medida diferencias en las concentraciones entre el 20% y el 40%. La menor reproductibilidad para los elementos traza se reportan en el *Hg* y la *Ag* con diferencias que predominantemente mayores al 40% de diferencia. En el anexo IV se adjunta la base de datos relacionada a los duplicados.

3.2.4 Validación de Base de Datos

A continuación se presentan (Tabla 3.3) los 34 elementos validados, 10 mayores y 24 traza, con los cuales se trabajó en el presente estudio.

Tabla 3.3. Elementos Validados.

Elementos Mayores	<i>SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, CaO, MgO, MnO, Na₂O, K₂O, P₅O₂.</i>
Elementos Traza	<i>Cu, V, Cr, Co, Ni, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Pb, Sc, C, S, Hg, As, Mo, Sb, Ag, Bi, W, Ga.</i>

3.3 Metodología de Análisis de Resultados Geoquímicos

3.3.1 Marco Teórico Estadístico

3.3.1.1 Datos Composicionales

Un arreglo cerrado o un conjunto de datos cerrados (*closed data array*) es una base de datos que se caracteriza por el hecho de que cada variable individual no es independiente de las demás variables, si no que todas las variables se encuentran relacionadas al ser expresadas como partes de un total. La composición geoquímica total de cada muestra constituye, además de un arreglo cerrado, un conjunto de datos composicionales, ya que la suma de las partes de cada muestra es igual a un valor constante, el cual en nuestro caso es igual a 100% o 1.000.000 ppm (Filzmoser *et al.*, 2009). Esto significa que no existe variable singular que pueda variar independientemente del resto ya que cuando la proporción de una parte del total se incrementa, al menos una de las restantes partes debe decrecer. Incluso, en el caso de que no todos los elementos químicos de la composición geoquímica total sean medidos, aun así los datos no son totalmente independientes del resto. Estas características son inherentes a los datos geoquímicos.

Esta restricción impuesta al set de datos, trae consecuencias al uso de métodos estadísticos tradicionales. Aitchinson (1986) presenta los primeros avances en la búsqueda de la solución a dicho problema. Define al conjunto de datos composicionales con D-componentes como un vector $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_D)$, en el cual todos los componentes son números reales y cada uno aporta información relativa con respecto del total, conteniendo toda la información importante en la relación entre ellos (Ec. 3.2). La solución que planteó a esta problemática se basa en la transformación de la base de datos por medio de una familia de transformaciones logarítmicas denominada *Log-Ratio Transformations*.

$$\{\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_D), x_i > 0, \sum_{i=1}^D x_i = cte\}$$

Ecuación 3.2. Conjunto de Datos Composicionales

Para el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, mediante los análisis químicos, se contempla la utilización de la transformación matemática de tipo logarítmica denominada Isometric Log-Ratio Transformation (*ilr*) (Egozcue *et al.*, 2003), la cual será aplicada a la totalidad del conjunto de datos. El porqué de la aplicación de dicha transformación se debe al hecho de que la mayoría de los métodos estadísticos comúnmente utilizados se definen en base al espacio geométrico euclidiano. Sin embargo, a raíz de que los datos geoquímicos de carácter ambiental son un conjunto de datos composicionales (Ec. 3.2), la geometría espacial euclidiana utilizada en el diario vivir no se ajusta adecuadamente, generando que los análisis estadísticos comúnmente usados, como la media aritmética, la desviación estándar o la correlación entre variables, carezcan de sentido estadístico en ciertos casos.

Por lo tanto, lo que se busca es que la información estadística extraída de la base de datos presente el menor error posible y permita realizar un análisis correcto de la información. Reimann *et al.* (2008) declara que en el desarrollo del Atlas Geoquímico de Europa (Salminen *et al.*, 2005) se observó que la tendencia de los datos es a presentar un comportamiento de tipo logarítmico, y por recomendación del mismo autor se decide utilizar la transformación *ilr* en este estudio.

3.3.1.2 Transformación Isometric Log-Ratio (*ilr*)

Permite analizar la información de un conjunto de datos composicionales, en el cual todos los componentes son números reales y cada uno aporta información relativa con respecto del total ya que la información importante se encuentra presente en la relación entre las componentes, a diferencia de los datos individuales (puntuales), en los cuales la información es absoluta para cada dato.

3.3.1.2

En este trabajo se considerará que el conjunto de datos composicionales consta de solo dos componentes. El valor medido para cada variable será el dato observado (x , representa a cada elemento químico medido en cada muestra) y el otro componente será el resto ($1-x$, que representa la suma de todas las partes restantes en cada muestra). De tal forma que la ecuación de la *ilr* para dos componentes (Ec. 3.3) queda definida como:

3.3.1.2

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

Ecuación 3.3. Isometric Log-Ratio Transformation para dos componentes.

Una de las propiedades teóricas de mayor importancia que presenta esta transformación es la *isometría*, la cual relaciona directamente la geometría euclidiana con el espacio geométrico definido para la transformación (espacio *ilr*), de tal forma que es posible trabajar con las variables transformadas adimensionales y posteriormente retransformar los resultados obtenidos hacia la base de datos original que contiene las variables reales, tal cual como se observa en la figura a continuación (Fig. 3.4).

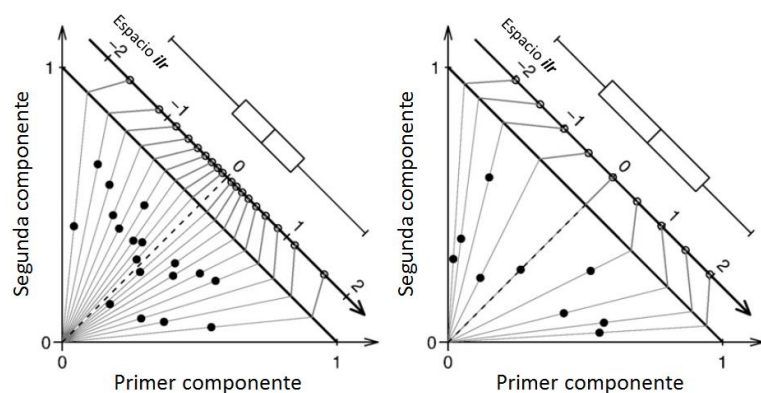


Figura 3.4. Explicación gráfica de transformación *ilr* para dos componentes (Modificado de Filzmoser, 2010)

3.3.2 Línea Base

Tomando en cuenta los objetivos propuestos, la metodología utilizada en este trabajo y que a continuación se describe, busca conocer la concentración y distribución espacial elemental, estableciendo rangos que permitan establecer una línea base geoquímica, definiendo la mediana de las concentraciones elementales y rango de concentraciones anómalas a fin de poder determinar la presencia posible de suelos anómalamente enriquecidos. Finalmente, dilucidar las posibles fuentes contaminantes, distinguiendo entre orígenes antropogénicos o naturales. En este sentido, se utilizan cuatro herramientas: Análisis Box-Plot, Elaboración de Mapas de Distribución Espacial, Factor de Enriquecimiento y Análisis Factorial.

3.3.2.1 Análisis Box-Plot

Los diagramas de tipo Box-Plot (*Diagrama de caja y bigote*), definido por Tukey (1977), son una herramienta de la estadística descriptiva que permite representar como se distribuye una variable con respecto a los valores máximo, mínimo, mediana (Q_2), y los cuartiles 1 (Q_1 , 25% de los datos) y 3 (Q_3 , 75% de los datos), además entrega información sobre la existencia de valores anómalos (*outliers*) y la simetría de la distribución.

El análisis Box-Plot se construye en base a la Mediana (Q_2) de la distribución, variable que divide cualquier set de datos en dos mitades iguales. A partir de los percentiles 25 y 75 (Q_1 y Q_3) se define una nueva variable denominada Rango Intercuartílico (RI), la cual contiene aproximadamente el 50% de los datos. El RI define la longitud de la caja (*box*). Dos nuevas variables se construyen en base a los datos que proporciona la distribución. Estas son el Límite Inferior (LI) y Superior (LS), estos límites indican que los valores que se ubiquen más allá de estos, serán considerados como valores extremos o anómalos (*outliers*). Hay que aclarar que los valores utilizados para LI y LS no necesariamente son valores que se encuentren dentro del set de datos. Para solucionar dicho problema se definen dos nuevas variables, denominadas Bigote Superior (BS) e Inferior (BI), que se definen como el valor más cercano a los límites (LI y LS) dentro de los datos presentes en la distribución. A continuación se presenta un ejemplo gráfico del diagrama box-plot teórico (Fig. 3.5), además la definición algebraica de cada una de las variables definidas previamente se presenta en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Definición algebraica de variables presentes en diagrama Box-Plot.

	Variable	Fórmula
LI	Límite Interno Inferior	$LI = Q1 - 1.5 * RI$
BI	Bigote Inferior	$BI = \min(x, [x \geq LI])$
RI	Rango Intercuartílico	$RI = Q3 - Q1$
BS	Bigote Superior	$BS = \max(x, [x \leq LS])$
LS	Límite Interno Superior	$LS = Q3 + 1.5 * RI$

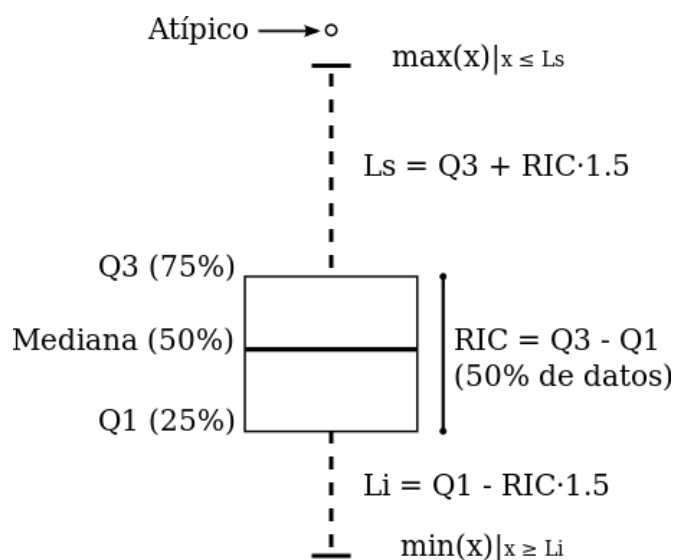


Figura 3.5. Diagrama Box-Plot Teórico

3.3.2.2 Distribución Elemental Espacial

Los mapas de concentración de puntos elaborados en este trabajo están compuestos por una serie de insumos generados en base a las concentraciones registradas para cada elemento en los puntos de muestreo en la zona de estudio. Los insumos a utilizar en estos mapas serán descritos a continuación.

- **Diagramas Compuestos:** Este tipo de diagrama es utilizado para representar gráficamente la distribución estadística de los datos. Presenta la ventaja de que permite observar conjuntamente la dispersión de los puntos, el histograma, la densidad y el box-plot (Fig. 3.6)

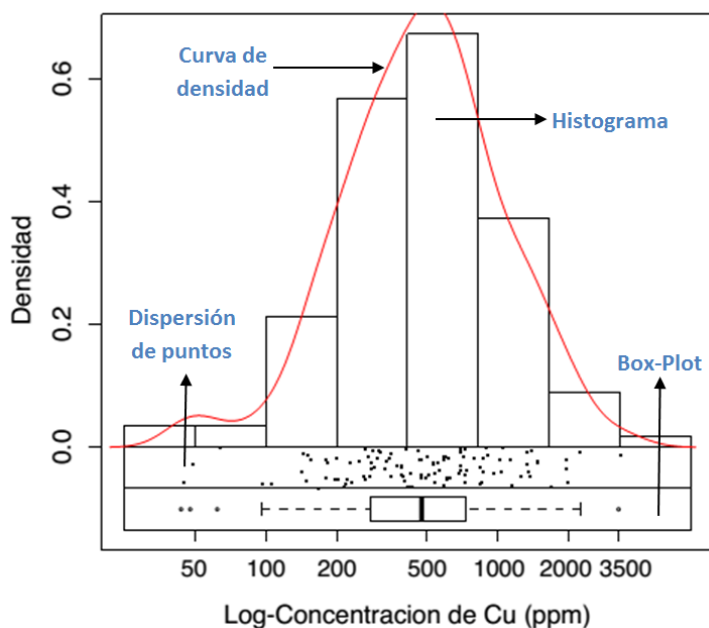


Figura 3.6. Ejemplo de Diagrama Compuesto (Cobre).

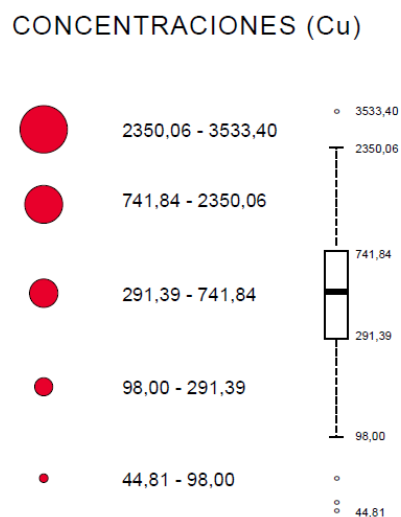


Figura 3.7. Ejemplo de Clasificación Box-Plot (Cobre)

- **Clasificación Box-Plot:** El análisis box-plot genera como resultado hasta un máximo de cinco clases. La cantidad de clases presentes para cada variable depende sólo de la distribución presente en cada uno de los elementos. Estas clases proveen los límites que definen la representación gráfica que se utilizará en cada punto muestreado. Los símbolos asignados a cada clase tienen un tamaño definido y se presentan de modo creciente. En la Fig. 3.7 se puede apreciar como ejemplo la representación gráfica generada para las clases definidas para la variable Cobre.

- **Raster de Interpolación:** Para la creación de este insumo se utilizó la técnica Spline con Barreras presente en el software ArcGis 10 (ESRI). El Spline con barreras es una técnica de interpolación que aplica un método de curvatura mínima, es decir, se puede representar como si uno extendiera y curvara una superficie flexible a través de todos los puntos conocidos en el espacio, estimando los valores desconocidos. Otra característica útil de este método es la posibilidad de incorporar discontinuidades como por ejemplo un acantilado o fallas geológicas, o en este caso en particular, el contacto entre las unidades no estratificadas y las unidades estratificadas definidas en la geología base de la zona de estudio, es decir en la Carta Geológica Rancagua – San Vicente de Tagua Tagua (Godoy *et al.*, 2009). El método del Spline con Barreras puede presentar limitaciones cuando los puntos de muestra se encuentran espacialmente cercanos pero además presentan diferencias extremas en los valores de entrada ya que el Spline calcula en base a variaciones sobre distancia para ajustar la forma de la capa flexible de tal forma que cambios muy bruscos sobre distancias muy cortas no permiten sacarle provecho al método. Por lo tanto, es altamente recomendable que el muestreo se realice en base a una malla regular equiespaciada. Para la generación de cada raster de interpolación se utilizó la base de datos transformada. La figura a continuación (Fig. 3.8) muestra, a modo de ejemplo, el resultado obtenido para el raster de interpolación del Cobre en la base de datos de 0 a 5 cms.

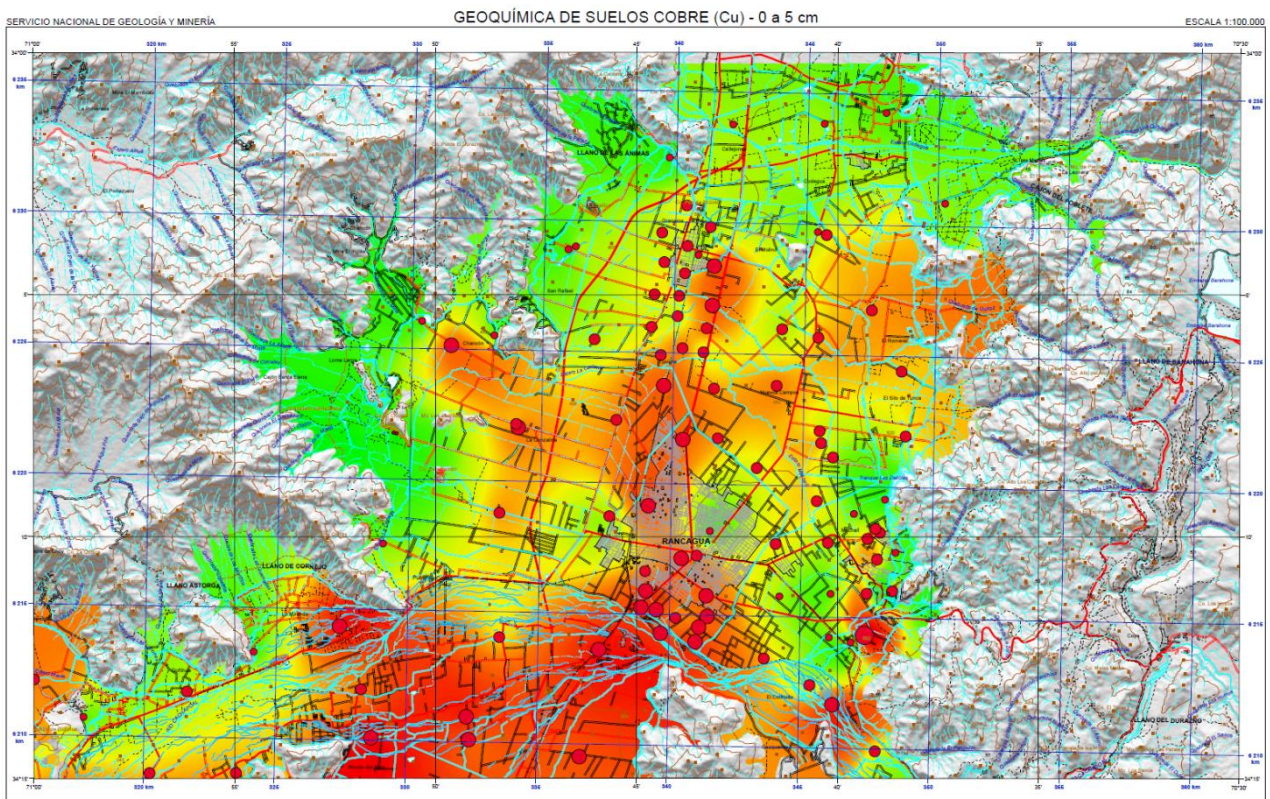


Figura 3.8. Ejemplo de Raster de Interpolación (Cobre).

3.3.3 Identificación de Fuentes de Proveniencia

3.3.3.1 Factor de Enriquecimiento

El análisis del Factor de Enriquecimiento tiene como fin el establecer la posible influencia de las fuentes naturales y antrópicas en las concentraciones medidas de los elementos analizados. Este método se desarrolló inicialmente para ser utilizado en estudios atmosféricos, de aguas lluvia o de agua marina (Chester and Stoner, 1973; Zoller *et al.*, 1974). Progresivamente su uso fue extendido al estudio de suelos o sedimentos lacustres entre otros (Loska *et al.*, 1997). A pesar de los cuestionamientos realizados por algunos autores (ver 5.2.1), el presente estudio considera al Factor de Enriquecimiento, una herramienta útil para una fase exploratoria de las posibles fuentes que pueden estar impactando el área de estudio. El uso de este Factor otorga una primera orientación, la cual es evaluada junto a una serie de análisis, espaciales y estadísticos.

La fórmula para calcular el Factor de Enriquecimiento (FE) se puede generalizar a partir de Chester and Stoner, 1973; Zoller *et al.*, 1974) (Ec. 3.4)

$$FE_{elemento\ x} = \frac{\left[\frac{C_{elemento\ x}}{C_{elemento\ referencia}} \right]_{muestra}}{\left[\frac{C_{elemento\ x}}{C_{elemento\ referencia}} \right]_{corteza\ continental}}$$

Ecuación 3.4. Fórmula de cálculo del Factor de Enriquecimiento (FE)

El FE se basa en la normalización de las concentraciones elementales del elemento a evaluar ($C_{elemento\ x}$) con respecto a un elemento conservativo representativo de la corteza superficial ($C_{elemento\ referencia}$), el cual puede ser *Al*, *Th* o *Zr*, elegidos por su estabilidad en la mayoría de los procesos ambientales. Posteriormente, los valores se comparan con su equivalente representativo natural normalizado, obtenido a partir de valores referenciales del medio geológico, para estos efectos se utilizó la compilación de Taylor & McLennan (2009) como referencia.

Los resultados obtenidos en el análisis de FE permiten reconocer diferencias en el nivel de influencia de la fuente en el origen de los elementos según tres categorías distintas, las cuales se detallan en el cuadro a continuación (Tabla 3.5)

Tabla 3.5. Criterios de análisis de resultados del Factor de Enriquecimiento.

Rango	Origen
$FE < 1$	Natural, litogénico.
$1 < FE \leq 10$	Fuentes naturales como antrópicas
$FE > 10$	Importante contribución antropogénica.

3.3.3.2 Análisis de Correlación Múltiple

El análisis de correlación estima el grado de linealidad que existe entre dos variables distintas. Para eso calcularemos la matriz de correlación de Pearson. El cálculo de esta matriz corresponde al cálculo de un coeficiente ($Corr_{x-y}$), el cual se define como la división de la covarianza entre las dos variables por el producto de las desviaciones estándar de cada variable (Ec. 3.5)

$$Corr_{x-y} = \frac{cov_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}$$

Ecuación 3.5. Fórmula Coeficiente de Correlación

Para un par de variables, el valor del coeficiente de correlación, puede tomar valores entre -1 y +1. Si la relación entre ambas variables es directa, el coeficiente de correlación toma valores positivos, así mismo si la relación entre ambas variables es inversa, este coeficiente toma un valor negativo. Un valor de coeficiente de correlación igual a ± 1 refleja una correlación lineal perfecta entre ambas variables, mientras que un valor igual a “cero” refleja que no existe relación lineal entre las variables. El coeficiente de correlación de Pearson es sensible a la presencia de outliers, como así también a la presencia de relaciones no lineales entre las variables evaluadas (Reimann *et al.*, 2008).

En general una correlación sobre ± 0.5 , indica una asociación significativa entre dos variables. No obstante, eso variará según el número de muestras, ya que a mayor número de muestras, suelen disminuir los valores absolutos del coeficiente de correlación (Reimann *et al.*, 2008).

3.3.3.3 Análisis Multivariable

Para realizar el análisis y detección de posibles fuentes de origen de los elementos químicos muestreados se utilizan dos herramientas estadísticas a fin. El Análisis Factorial (AF) y el Análisis de Componentes Principales (ACP) buscan identificar las variables subyacentes que puedan explicar el patrón de relaciones que existe dentro del conjunto de variables reales observadas (Reimann *et al.*, 2008). Ambos análisis se realizan en el software DAS+R, desarrollado para el lenguaje de programación R. DAS+R fue desarrollado por los estadísticos P. Filzmoser y R. Dutter, participantes activos en la edición del libro “Statistical Data Analysis Explained” (Reimann *et al.*, 2008).

3.3.3.3.1 Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) permite reducir la dimensionalidad de la base de datos, transformando el conjunto de variables originales p en otro grupo con un número q de variables sintéticas no correlacionadas ($q < p$), que reciben el nombre de *componentes principales*. Si la base de datos consta de variables altamente dependientes entre ellas, es frecuente que un pequeño número de las nuevas variables (<20% de las variables originales) explique la mayor parte (>80%) de la variabilidad original de la base de datos (Filzmoser *et al.*, 2003)

El ACP contabiliza la máxima varianza entre todas las variables y las “ q ” nuevas variables (componentes principales) se definen como combinaciones lineales de las variables originales “ p ”. Las componentes se ordenan en forma decreciente en función del porcentaje de variabilidad explicada por cada una. En este sentido, la primera componente principal es aquella que explica el mayor porcentaje de la varianza de los datos. Este método siempre mostrará la estructura total en los datos (todas las variables están forzadas dentro del resultado).

3.3.3.3.2 Análisis Factorial

Análisis Factorial (AF), al igual que el ACP, es una técnica estadística multivariable que busca reducir la dimensionalidad de la base de datos, a fin de explicar las relaciones entre las variables observadas en función de un número menor de variables sintéticas denominadas *factores*.

Propiamente tal el AF es una modificación del ACP, ya que a diferencia del ACP que está basado en la estructura de varianza de las variables, el AF está basado en la estructura de correlación de las variables. El modelo de este método permite que los factores no expliquen la variación total de los datos. Esto implica que admite la existencia de algunos únicos factores, que poseen un desarrollo completamente diferente al resto de factores (Reimann *et al.*, 2002). Esto significa que el Análisis Factorial se adapta mejor para encontrar estructuras comunes en los datos. De este modo, el análisis de factores es geoquímicamente más útil ya que permite detectar procesos comunes determinados por el comportamiento de los elementos (Reimann *et al.*, 2002).

Lo que se busca con el AF es, a través de las asociaciones geoquímicas (señal química), poder identificar las fuentes de las cuales proceden aquellos elementos. Para ello, se consideran aquellos elementos que tienen un factor de carga (“*loading*”) entre $|0.5|$ y $|1|$ para cada factor en particular, además también se consideran que existen señales secundarias de elementos que tienen un factor de carga entre $|0.3|$ y $|0.5|$. En cada factor existe la posibilidad de que se presente una asociación química principal con un factor de carga >0.5 para cada elemento, al igual que una asociación geoquímica principal inversa con factor de carga <-0.5 para cada elemento. Es normal que algunos elementos se repitan en diversos factores, así como también es posible que se presente más de una asociación geoquímica por factor debido a lo complejo que puede ser la señal química, la cual depende de la múltiple cantidad de fuentes existentes.

3.3.4 Comparación con Normas Internacionales

Chile actualmente no posee una norma de calidad de suelos que haga posible establecer los valores de concentración, para cualquier compuesto detectado en el suelo, que permitan catalogarles como potencialmente contaminados, o de calidad no aceptable. De acuerdo al artículo 7 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), una serie de normas internacionales son aceptadas como referencias válidas para evaluar si se genera o presenta riesgo para los puntos a) y b) del art. 11 de la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (MINSEGPRES, 1994), es decir, para la salud de la población o efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.

Para efectos de este estudio, se consideraron los valores que entregan las normas medio ambientales de suelos de los siguientes estados (Canadá, Reino de los Países Bajos, República Federal de Alemania y República Federativa del Brasil).

Las comparaciones directas con criterios (o Valores de Referencia) utilizados en diversas legislaciones según cada país se debe realizar si se tiene un entendimiento adecuado de los criterios asumidos para su diseño y también el contexto en el que los criterios son utilizados.

3.3.4.1 Normativa Canadiense

La normativa de suelos existente en Canadá (Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (CCME, 1999)) proporciona valores de concentraciones para diversos parámetros según los distintos escenarios de uso del suelo (agrícola, residencial, comercial o industrial). En la tabla 3.6 se presentan los valores de las Normas Canadienses de la Calidad del Suelo para los elementos químicos de interés, según la multifuncionalidad del uso de suelo (agrícola y residencial).

Tabla 3.6. Criterios establecidos para la calidad de suelos en Canadá.

	Uso Agrícola	Uso Residencial
Elemento	[mg/kg suelo seco]	
As	12	12
Co	35	50
Cr ^{total}	64	64
Cu	63	63
Hg	6.6	6.6
Mo	15	15
Ni	50	50
Pb	70	140
Sb	20	20
V	130	130
Zn	200	200

3.3.4.2 Normativa Holandesa

Los criterios definidos para la calidad de los suelos en el Reino de los Países Bajos (Dutch Target and Intervention Values for Soil Remediation (VROM, 2000)) por el Instituto Nacional de Salud Pública y Protección Medioambiental (RIMV) considera dos parámetros. El primer criterio (Valores Objetivo), considera los niveles en los cuales existe una calidad de suelo sostenible (Tabla 3.7). En términos legales se considera a este parámetro como el nivel a alcanzar en caso de intervención, para lograr una recuperación satisfactoria de las propiedades funcionales del suelo para humanos, plantas y animales. El segundo criterio (Valor de Intervención), es indicativo del nivel sobre el cual las propiedades funcionales del suelo para humanos, plantas y animales se encontrarían seriamente deterioradas (Tabla 3.7). Son representativas de un potencial caso serio de contaminación. En la siguiente tabla se entregan los valores definidos para la calidad de suelos en el Reino de los Países Bajos. Los valores para suelos consideran una configuración de suelo estándar (10% materia orgánica y 25% de arcillas).

Tabla 3.7. Criterios establecidos para la calidad de suelos en el Reino de los Países Bajos.

	Valor Objetivo	Valor de Intervención
Elemento	[mg/kg suelo seco]	
As	29	55
Co	9	240
Cr ^{total}	100	380
Cu	36	190
Hg	0.3	10
Mo	3	200
Ni	35	210
Pb	85	530
Sb	3	15
V	42	250
Zn	140	720

3.3.4.3 Normativa Alemana

Los criterios para la calidad de suelos en la República Federal de Alemania se encuentran definidos en la Ley Federal de Protección de Suelos y la Ordenanza de Protección de Suelos (Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), 1998). La finalidad de esta legislación es la de proteger o restaurar las funciones del suelo con una base sustentable permanente. Una particularidad de esta normativa es que considera valores diferentes según la textura predominante del suelo estudiado (Tabla 3.8). La tabla a continuación presenta los valores definidos para la calidad de suelos en la República Federal de Alemania.

Tabla 3.8. Criterios establecidos para la calidad de suelos en la República Federal de Alemania.

Elemento	Tipo de suelo		
	Arcilloso	Limoso	Arenoso
	[mg/kg suelo seco]		
As	20	15	10
Co	-	-	-
Cr ^{total}	100	60	30
Cu	60	30	100
Hg	1	0.5	0.1
Mo	-	-	-
Ni	70	50	15
Pb	100	70	40
Sb	-	-	-
V	-	-	-
Zn	200	150	60

3.3.4.4 Normativa Estado de Sao Paulo (Brasil)

Los valores orientadores para la calidad de los suelos en el Estado de Sao Paulo, perteneciente a la República Federativa del Brasil, fueron definidos por la Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) mediante la directriz N° 195-2005-E. Esta normativa considera dos parámetros. El primero, denominado Valor de Prevención (VP), se considera como la concentración de una determinada sustancia por encima de la cual pueden ocurrir alteraciones perjudiciales a la calidad del suelo. El segundo parámetro, denominado Valor de Intervención (VI), se considera como la concentración de una sustancia en suelo por encima de la cual existe un alto riesgo potencial directo e indirecto sobre la salud humana, considerando un escenario de exposición genérico. La tabla a continuación presenta los valores definidos para la calidad de suelos en el estado de Sao Paulo, Brasil (Tabla 3.9). Estos se han definido según la multifuncionalidad en los tipos de suelo.

Tabla 3.9. Criterios establecidos para la calidad de suelos en el Estado de Sao Paulo, Brasil.

Elemento	VP	VI	
		Uso Agrícola	Uso Residencial
	[mg/kg suelo seco]		
As	15	35	55
Co	25	35	65
Cr ^{total}	75	150	300
Cu	60	200	400
Hg	0.5	12	36
Mo	30	50	100
Ni	30	70	100
Pb	72	180	300
Sb	-	-	-
V	-	-	-
Zn	300	450	1000

Capítulo 4 Resultados

4.1 Línea Base

A partir del análisis box-plot aplicado a las concentraciones obtenidas para los 34 elementos químicos en los 109 puntos de muestreo, se obtuvo para cada uno de ellos los parámetros estadísticos que permiten establecer el rango medio de las concentraciones de cada elemento en el área de estudio. Además en determinados casos, se detectaron anomalías elementales. En conjunto con los mapas de concentración que permiten apreciar la distribución espacial de cada elemento, se define la línea base geoquímica del área de estudio.

4.1.1 Elementos Mayores

4.1.1.1 Concentraciones Elementales

Los elementos mayores fueron cuantificados en función de su concentración en óxidos. La tabla 4.1 a continuación, presenta el resumen de las concentraciones elementales obtenidas para las variables en cuestión.

Tabla 4.1. Resumen Análisis Químicos.

Elementos Mayores									
Elemento	Unidad	N	Mínimo	Q1 (25%)	Mediana (50%)	Q3 (75%)	Bigote Superior	Máximo	%CVR
<i>SiO₂</i>	wt %	109	48.13	54.57	55.17	56.02	57.85	68.43	2.04
<i>Al₂O₃</i>	wt %	109	14.44	16.24	16.58	17.01	18.05	21.43	3.48
<i>TiO₂</i>	wt %	109	0.42	0.93	1.00	1.04	1.18	1.55	8.90
<i>Fe₂O₃</i>	wt %	109	3.09	7.96	8.33	8.67	9.22	10.75	6.24
<i>CaO</i>	wt %	109	1.05	2.88	3.21	3.91	5.84	6.83	20.30
<i>MgO</i>	wt %	109	0.50	2.99	3.48	3.74	-	5.2	15.80
<i>MnO</i>	wt %	109	0.09	0.14	0.15	0.17	0.21	0.30	9.88
<i>Na₂O</i>	wt %	109	1.25	1.93	2.17	2.57	-	2.85	24.30
<i>K₂O</i>	wt %	109	0.57	1.78	1.89	2.00	2.28	3.01	8.63
<i>P₅O₂</i>	wt %	109	0.07	0.26	0.29	0.34	0.50	0.75	19.80

[Q1, 1er cuartil; Q3, 3er cuartil; %CVR, coeficiente de variación robusto; wt. %, porcentaje en peso; Bigote Superior: $\max \{x, [x \leq Q3 + 1.5 * (Q3 - Q1)]\}$]

4.1.1.2 Distribución Espacial

A continuación (Tabla 4.2) y en mayor detalle en el anexo III, se presenta la distribución espacial de los elementos mayores. Por medio de un análisis general se observa que determinados elementos presentan un comportamiento bastante similar, el cual se detalla a continuación.

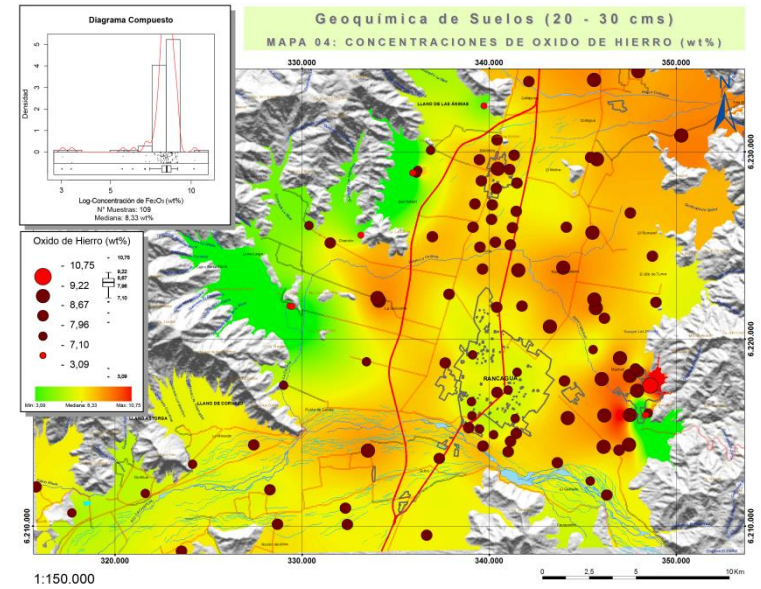
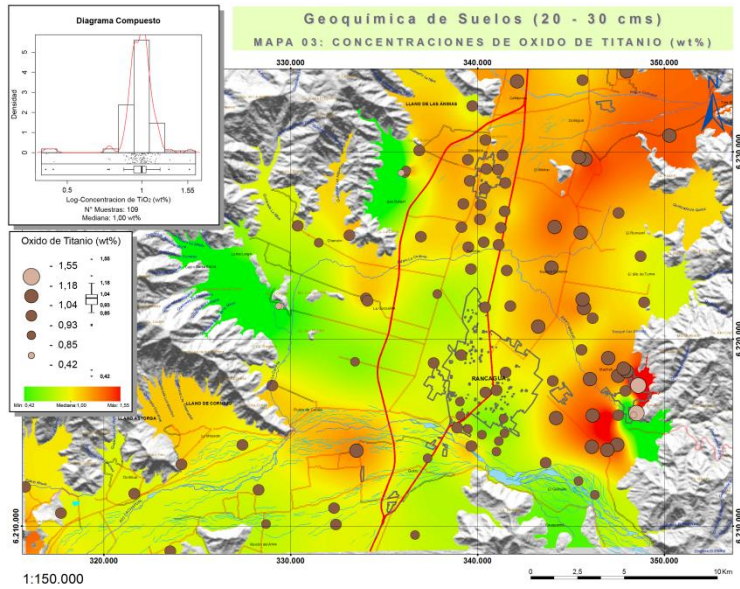
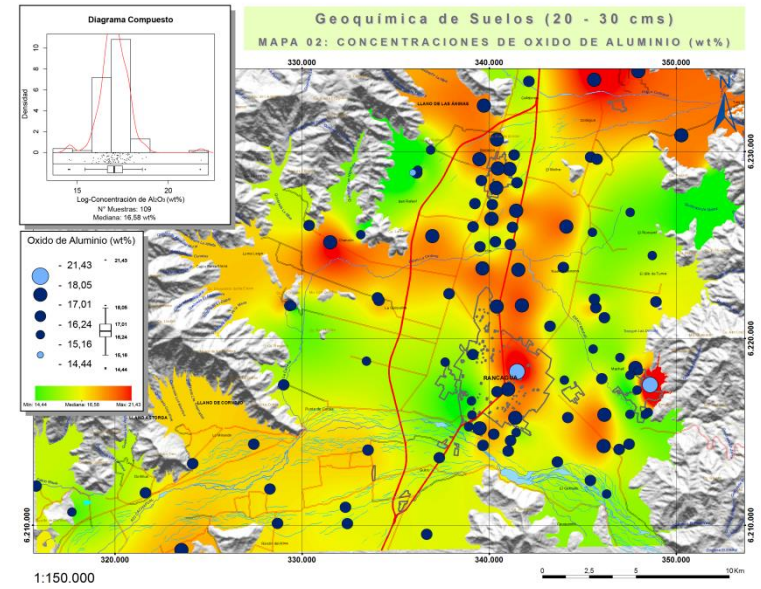
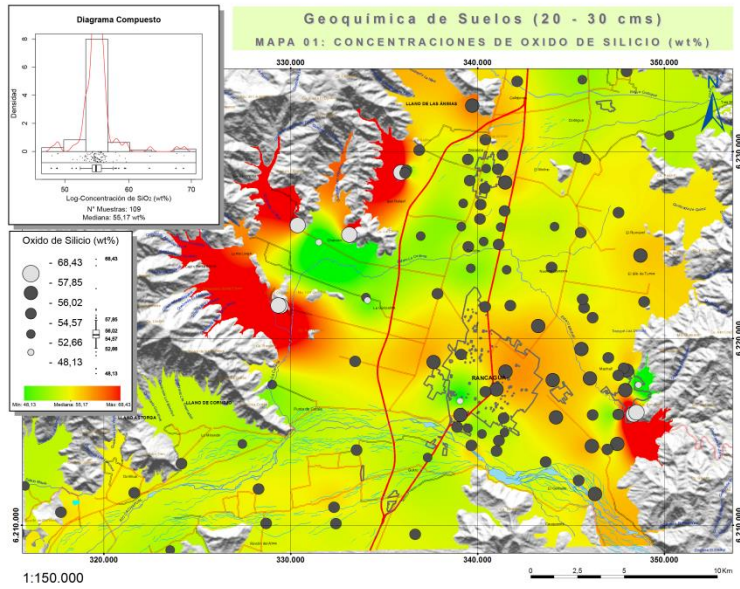
El Silicio y el Potasio (Mapas 01 y 09), presentan altas concentraciones en el segmento norte del margen occidental de la Depresión Central, en los depósitos coluviales (**Plhac**) cercanos a los afloramientos asociados tanto a cuerpos intrusivos cretácicos (**Ksi**) de composiciones intermedia a ácida, como a la presencia de la Fm. Las Chilcas (**Kilc**), correspondiente a tobas de composición ácida, dacítica o riolítica. También se observan altas concentraciones en los depósitos coluviales (**Plhac**) que se relacionan íntimamente con los depósitos de cenizas volcánicas asociados a la unidad Ignimbrita Pudahuel (**Plip**).

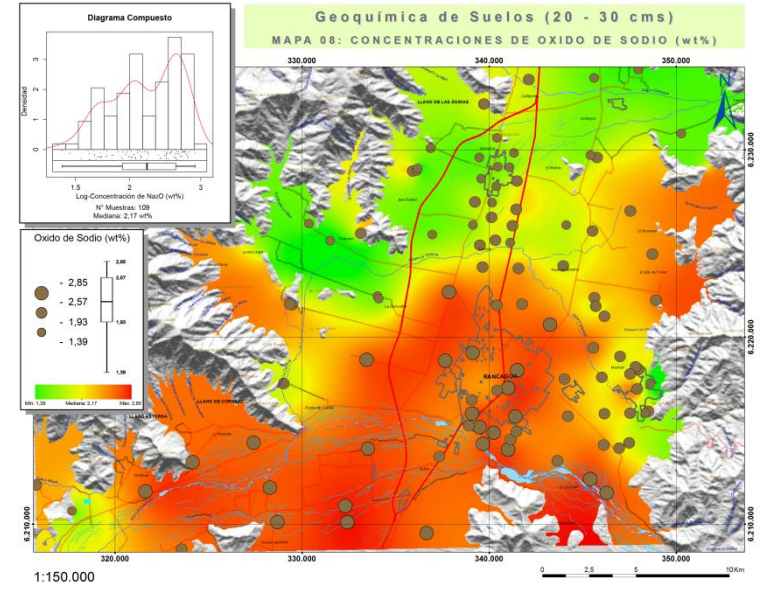
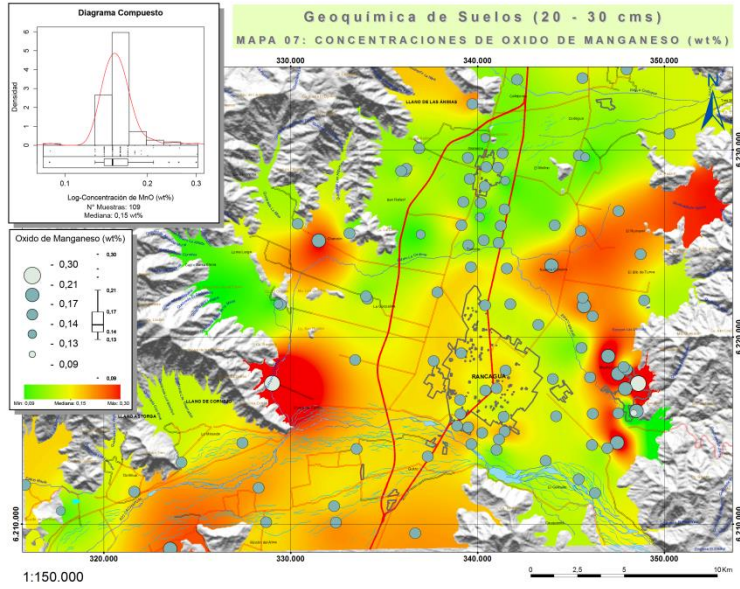
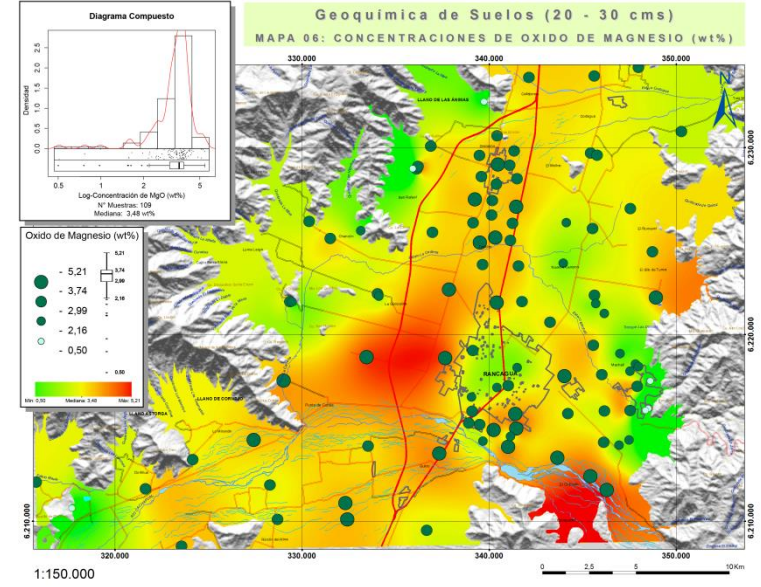
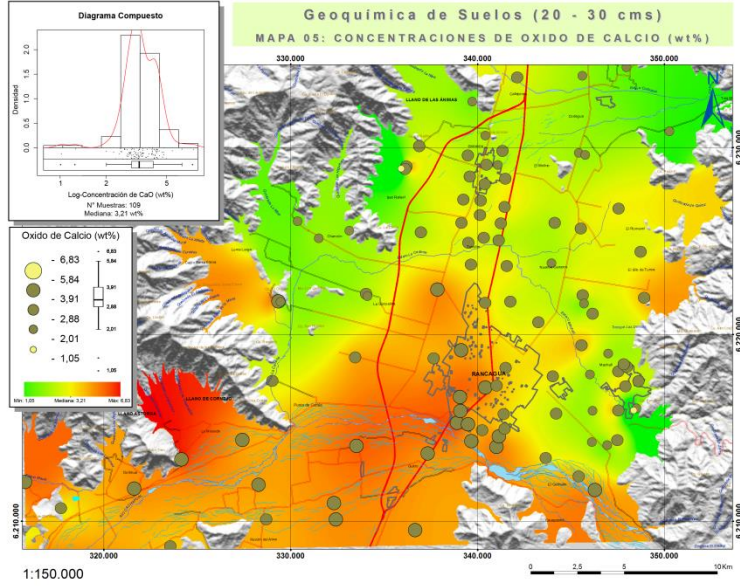
El Hierro y el Titanio (Mapas 03 y 04), y en menor medida el Manganeseo presentan altas concentraciones distribuidas similarmente a lo largo del margen oriental de la Depresión Central, relacionadas con la disposición espacial que presenta la Fm. Abanico (**EMa**).

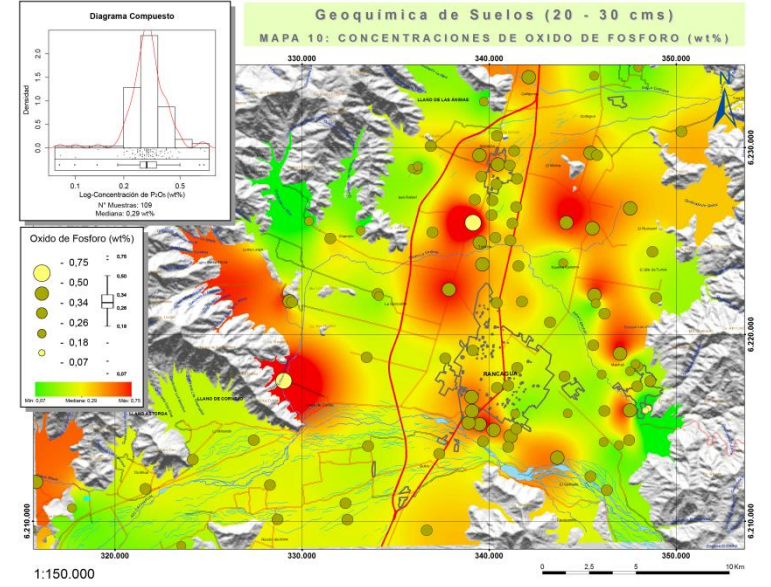
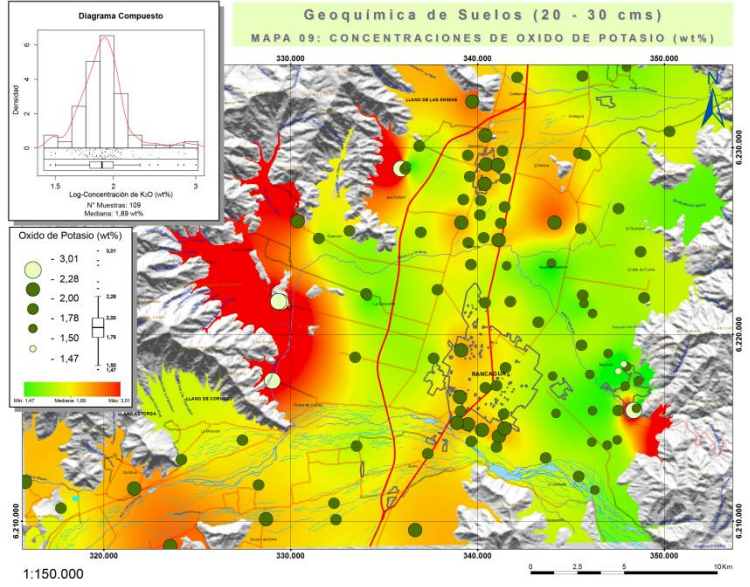
El Aluminio (Mapa 02), presenta concentraciones altas en el sector norte del área de estudio, las cuales disminuyen gradualmente en dirección sur. Esto se relacionaría con la distribución de las unidades no estratificadas ya que los depósitos aluviales (**PIHa(2)**), compuestos principalmente por arenas, arcillas y gravas con menor cantidad de bolones estratificados, asociados a los esteros La Cadena y Codegua, se encuentran en la zona norte, mientras que al sur de Rancagua y del río Cachapoal, se encuentran depósitos aluviales (**PIHa(1a)**), compuestos principalmente por bolones, gravas y arenas estratificadas, con intercalaciones menores de limo y arcilla. Esta diferencia relativa en el contenido de arcillas de los suelos podría explicar la disminución del Al en dirección NS.

Altos valores de Calcio y Sodio (Mapas 05 y 08), y en menor medida de Magnesio (Mapa 06), se aprecian en depósitos asociados a la unidad (**PIHa(1a)**), relacionada con antiguos cursos del río Cachapoal. Posiblemente, el río a lo largo de su curso habría erosionado a la Fm. Abanico, removiendo sedimentos depositados en los abanicos aluviales adscritos, hacia la Depresión Central y las terrazas fluviales ubicadas en ambas riberas del río, lo cual explicaría las mayores concentraciones de estos elementos en el sector.

Tabla 4.2. Distribución Elementos Mayores







4.1.2 Elementos Traza

4.1.2.1 Concentraciones Elementales

Las tabla 4.3 a continuación, presenta el resumen estadístico de las concentraciones elementales obtenidas para los elementos traza.

Tabla 4.3. Resumen Análisis Químicos.

Elementos Traza									
Elemento	Unidad	N	Mínimo	Q1 (25%)	Mediana (50%)	Q3 (75%)	Bigote Superior	Máximo	%CVR
Cu	ppm	109	34.83	225.98	419.98	677.27	-	2497.08	72.10
V	ppm	109	60.43	163.60	182.96	195.02	-	227.19	14.10
Cr	ppm	109	<10	25.45	30.25	34.68	47.08	206.55	21.60
Co	ppm	109	7.70	25.22	26.55	29.79	38.06	46.46	9.55
Ni	ppm	109	<5	10.68	14.22	17.45	-	26.40	35.80
Zn	ppm	109	12.02	83.45	92.22	104.00	140.00	180.26	17.30
Rb	ppm	109	27.85	63.12	69.38	75.45	93.46	146.36	13.40
Sr	ppm	109	89.09	374.00	406.61	455.14	-	543.28	13.60
Y	ppm	109	18.97	21.14	22.14	23.41	25.99	27.42	7.44
Zr	ppm	109	118.62	158.07	166.76	175.91	204.64	332.94	8.25
Nb	ppm	109	<5	<5	5	5.95	12.66	12.66	ND
Ba	ppm	109	271.53	348.01	374.06	405.74	470.04	751.47	10.60
Pb	ppm	109	<5	13.95	21.34	27.71	-	61.71	49.20
Sc	ppm	109	6.33	16.29	20.29	25.54	40.00	110.07	35.10
C	wt %	109	0.16	1.24	1.52	1.80	3.07	5.59	27.30
S	wt %	109	0.02	0.05	0.08	0.33	-	0.93	92.70
Hg	ppm	109	<0.015	0.02	0.05	0.09	-	0.19	ND
As	ppm	109	<20	<20	<20	20	55.45	134.62	ND
Mo	ppm	109	<5	<5	5	5.81	20.25	26.50	ND
Sb	ppm	109	<10	<10	12.61	25.61	-	79.43	ND
Ag	ppm	109	<1	<1	1	1.77	-	7.56	ND
Bi	ppm	109	<10	<10	<10	21.59	-	32,97	ND
W	ppm	109	<10	<10	11.01	25.36	-	59.39	ND
Ga	ppm	109	<1	12,16	79.29	108.70	-	142.00	114

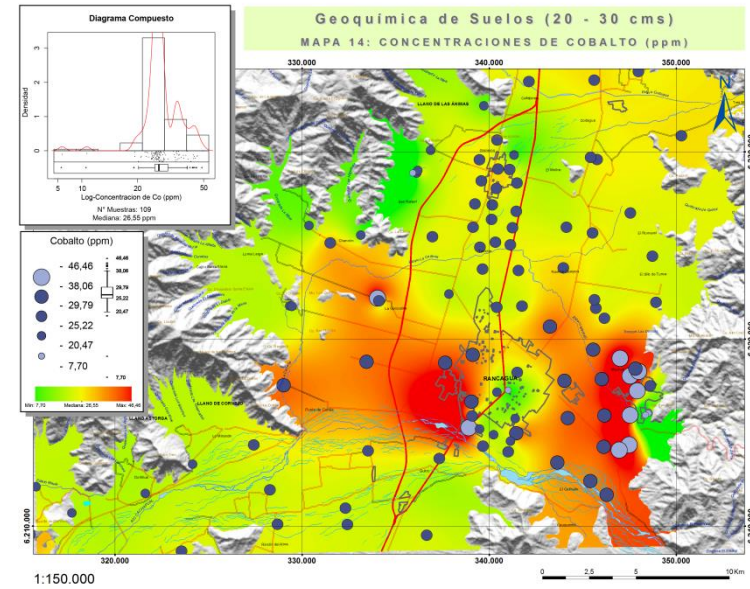
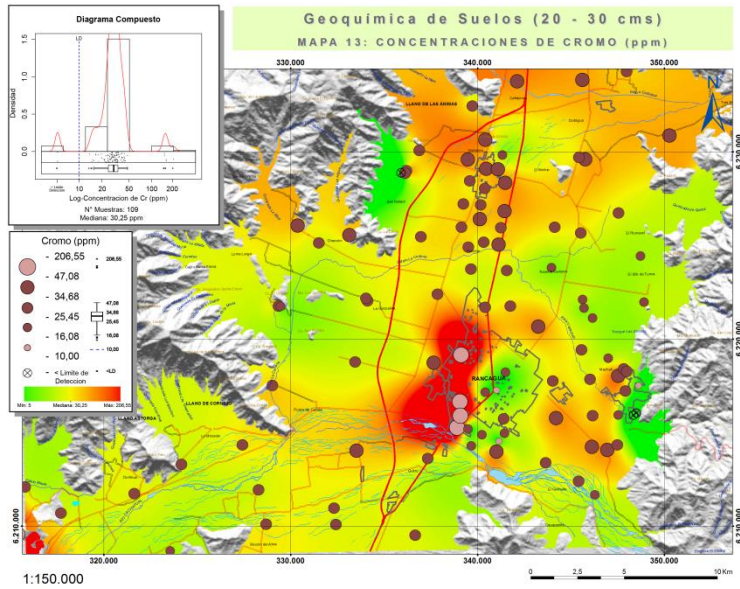
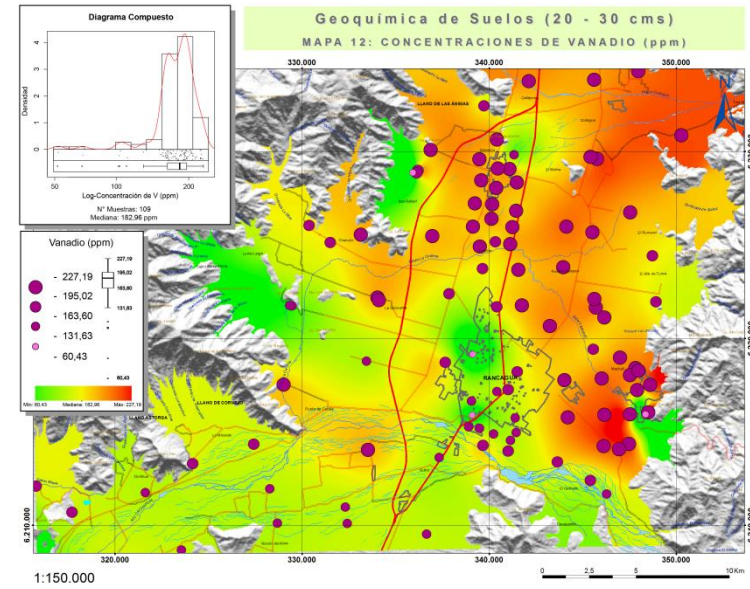
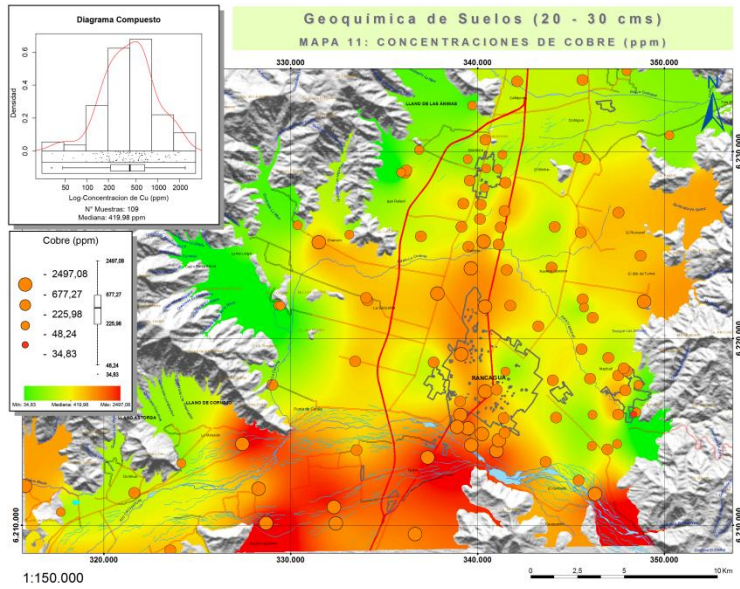
[Q1, 1er cuartil; Q3, 3er cuartil; %CVR, coeficiente de variación robusto; wt. %, porcentaje en peso; ppm, partes por millón = mg/kg, miligramos por kilo; <, menor que; ND, no determinado; Bigote Superior: $\max \{x, [x \leq Q3 + 1.5 * (Q3 - Q1)]\}$]

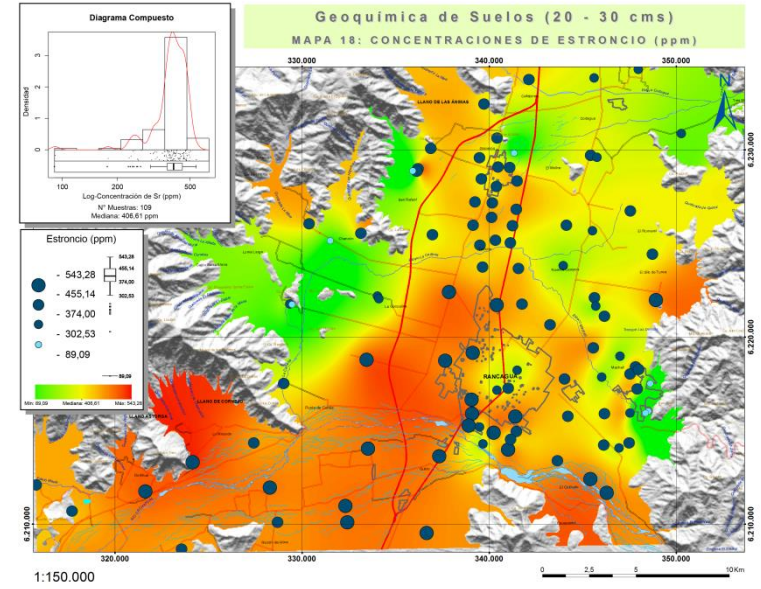
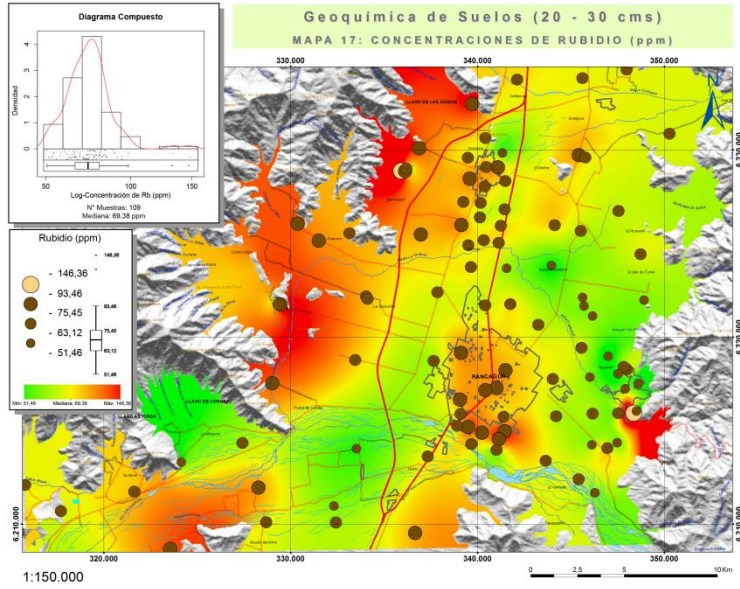
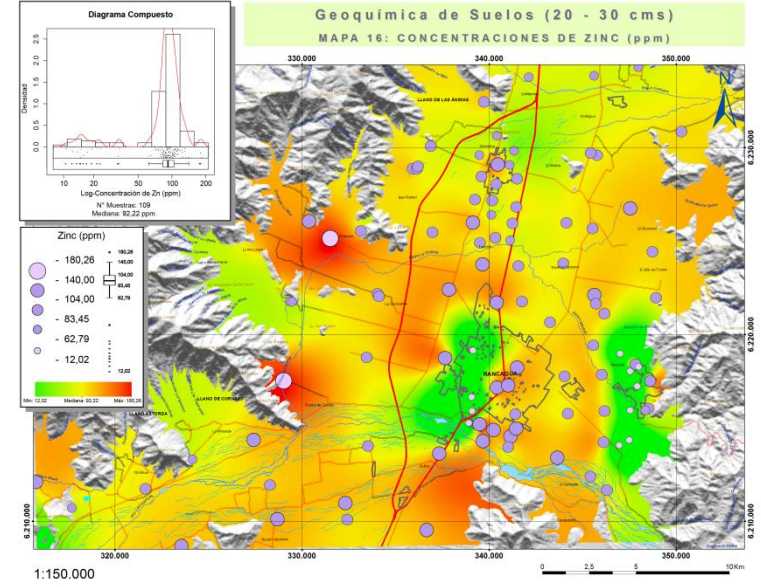
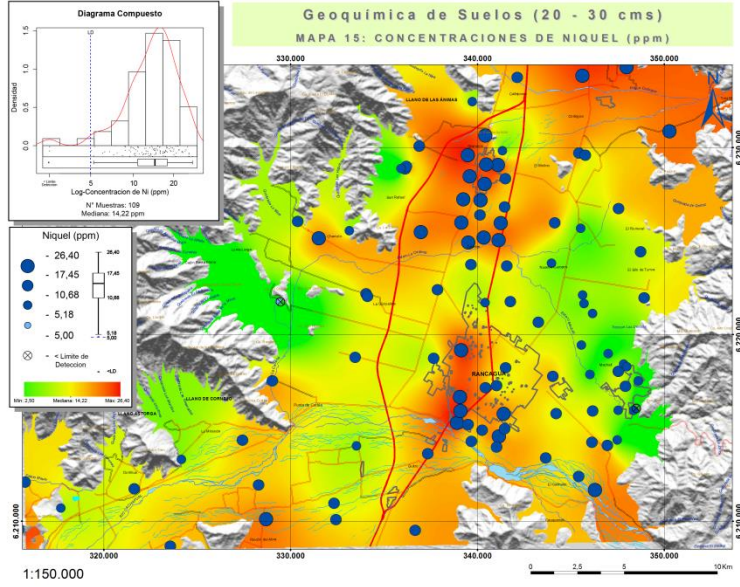
4.1.2.2 Distribución Espacial

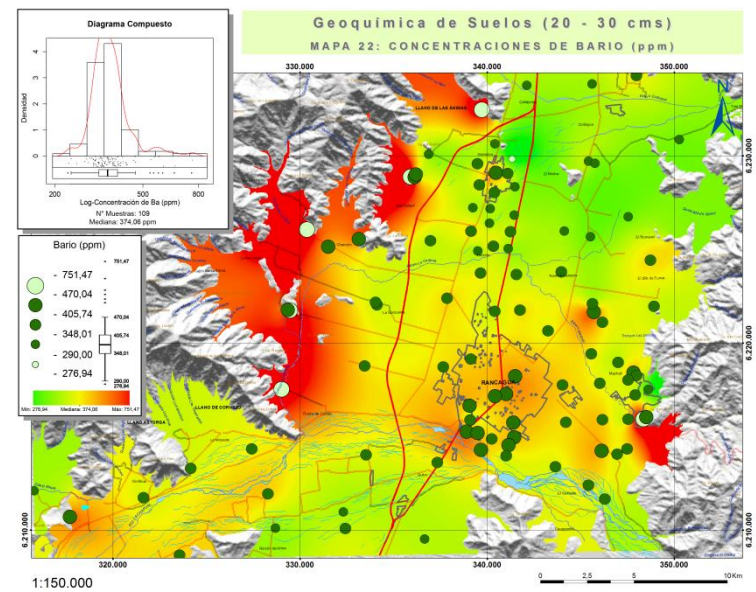
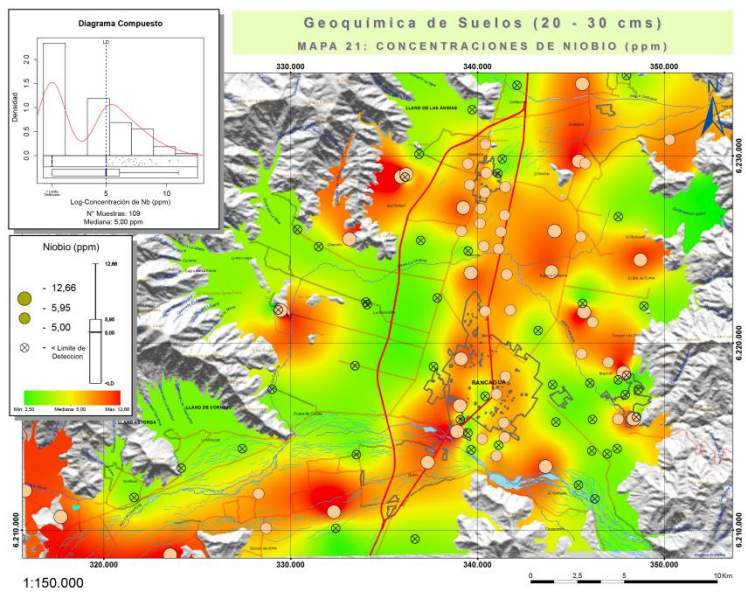
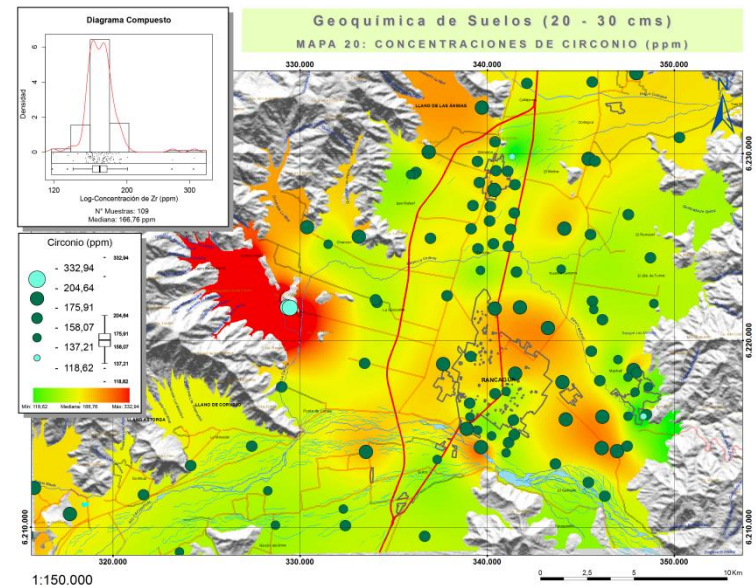
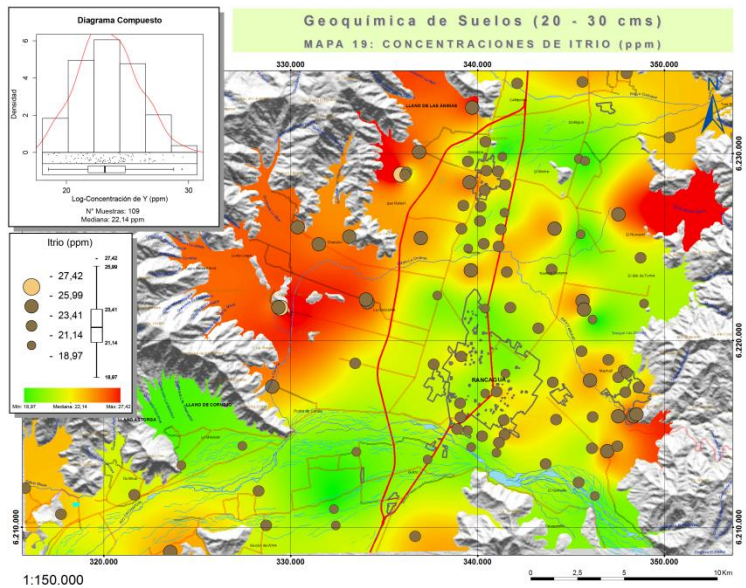
En la tabla 4.4, y en mayor detalle en el anexo III, se presenta la distribución espacial de los elementos traza. En términos generales existen elementos traza que presentan una distribución bastante similar entre sí, ya sea a nivel de toda el área o en zonas específicas. El *Cu*, el *Mo*, el *Sr* (Mapas 11, 29 y 18), en menor medida el *Zn* (Mapa 16), presentan una anomalía positiva en el sector sur. El *Co*, el *W* y el *Bi* (Mapas 14, 33 y 32), presentan una anomalía positiva al norte del río Cachapoal. Al contrario de los casos previamente enunciados, existen otros elementos que no presentan una relación distinguible con otros elementos estudiados a simple vista, como por ejemplo el *As* (Mapa 27), el cual presenta una particular distribución al norte del área de estudio, entre otros.

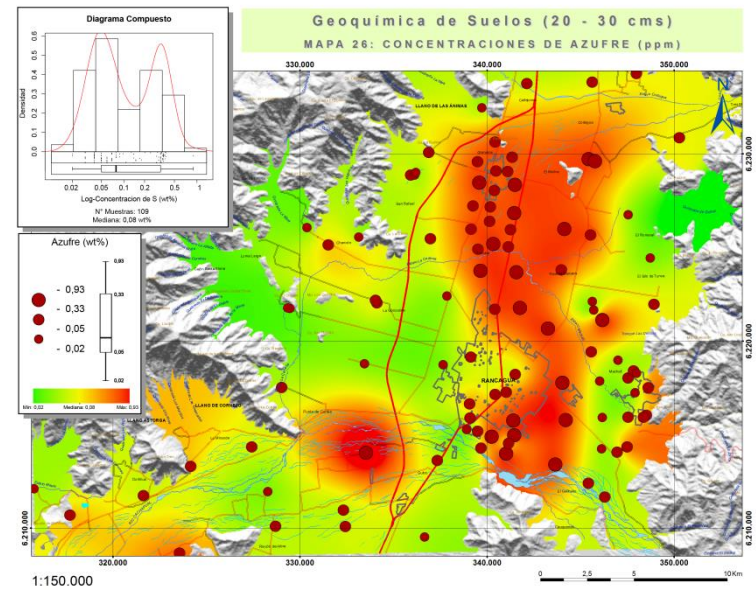
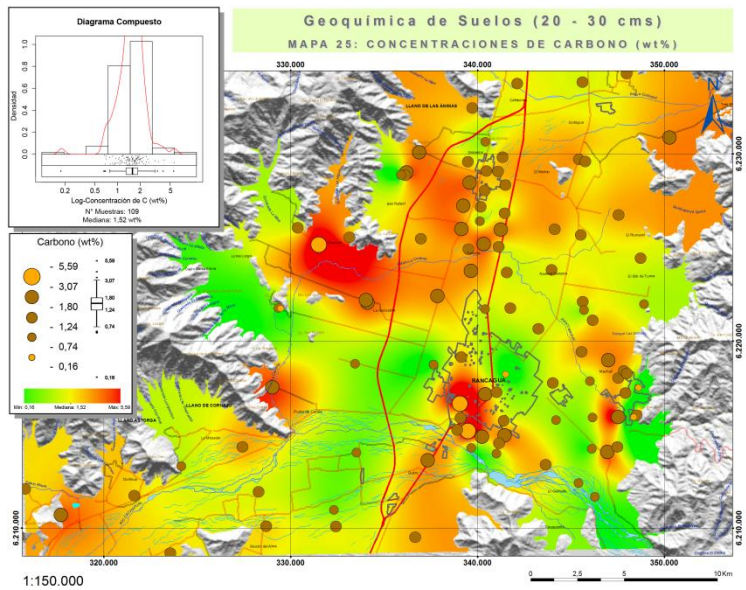
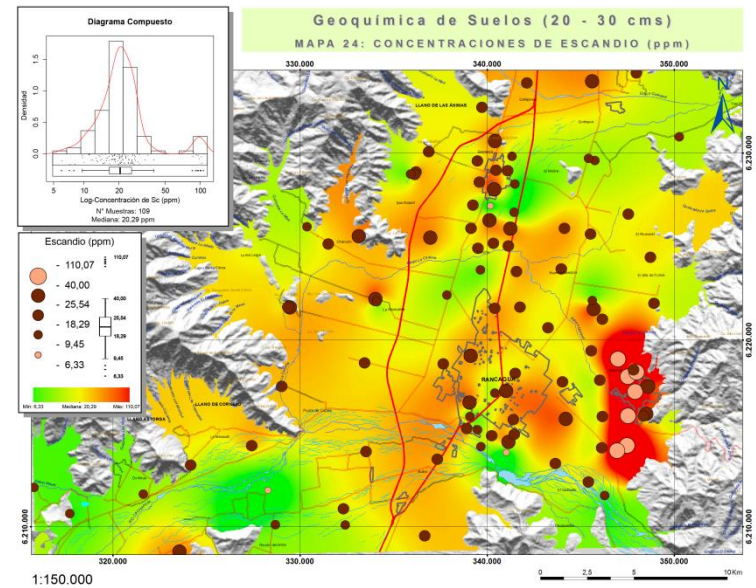
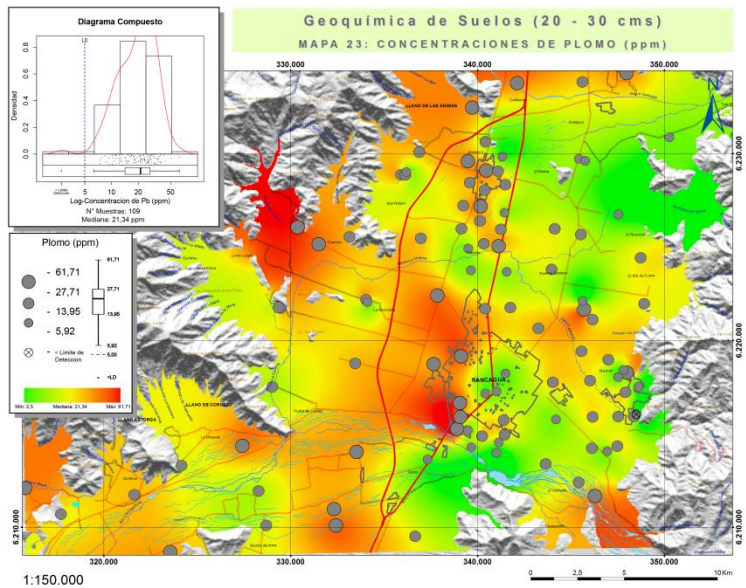
Una de las finalidades del análisis multivariable es encontrar estructuras comunes en los datos, a fin de detectar procesos comunes, determinados por el comportamiento de los elementos.

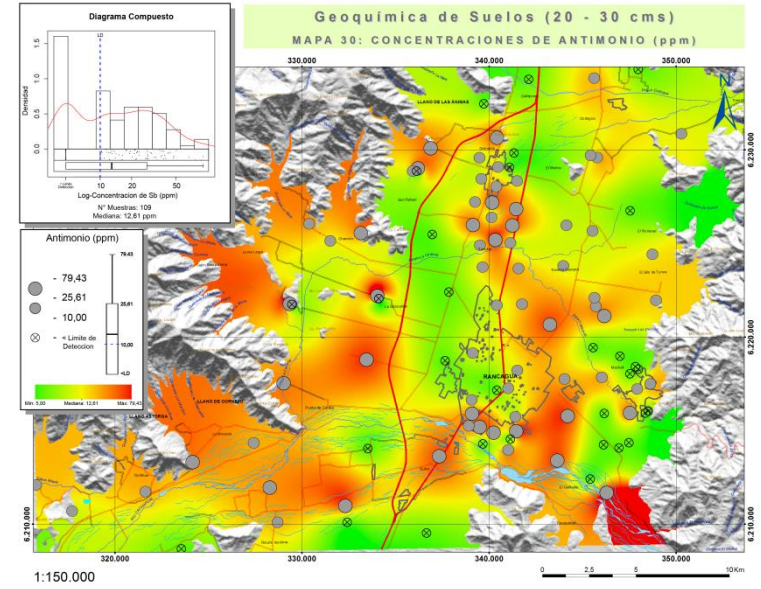
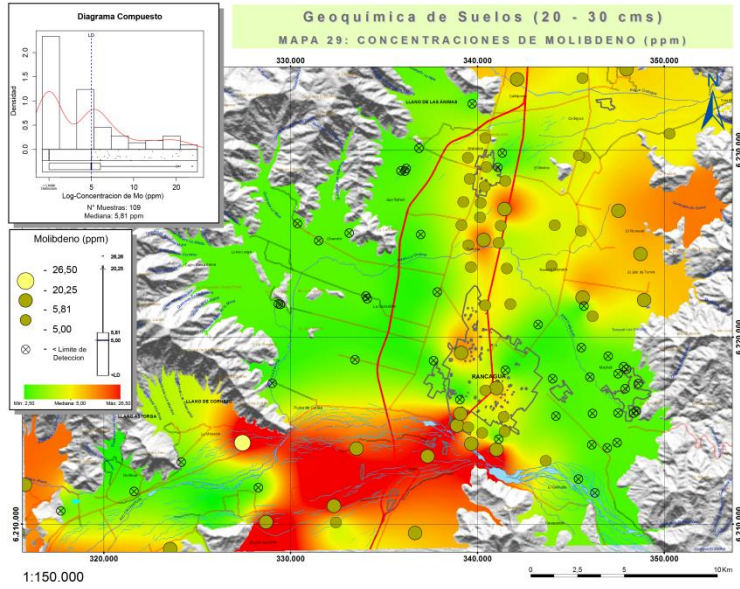
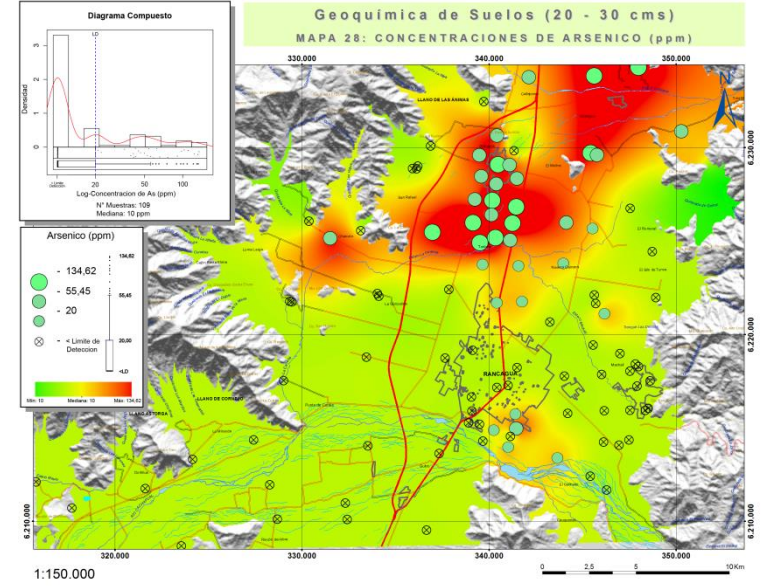
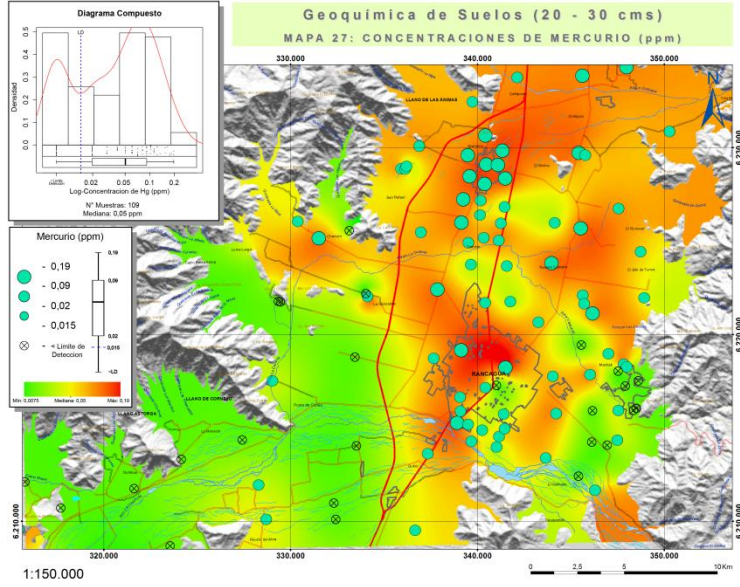
Tabla 4.4. Distribución Elementos Traza

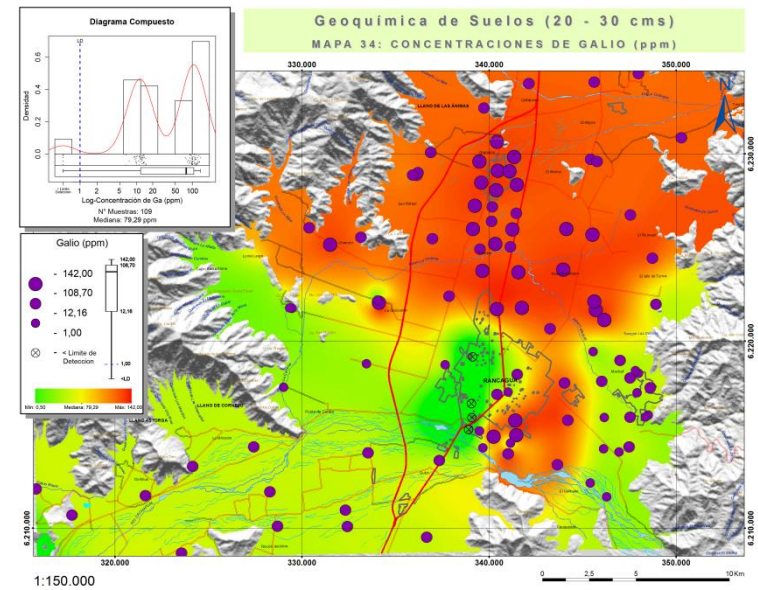
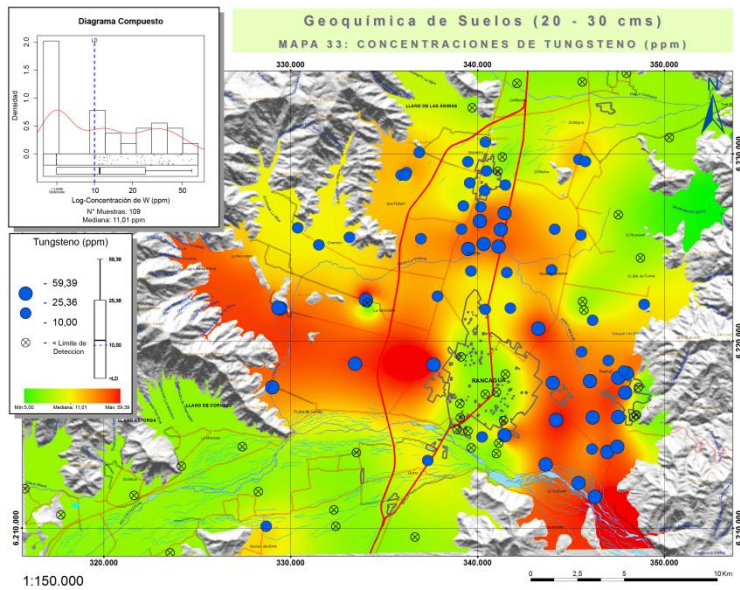
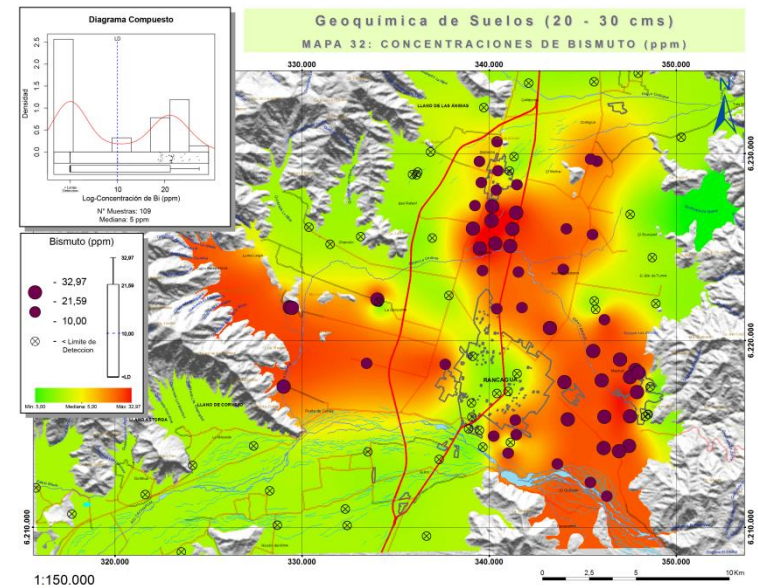
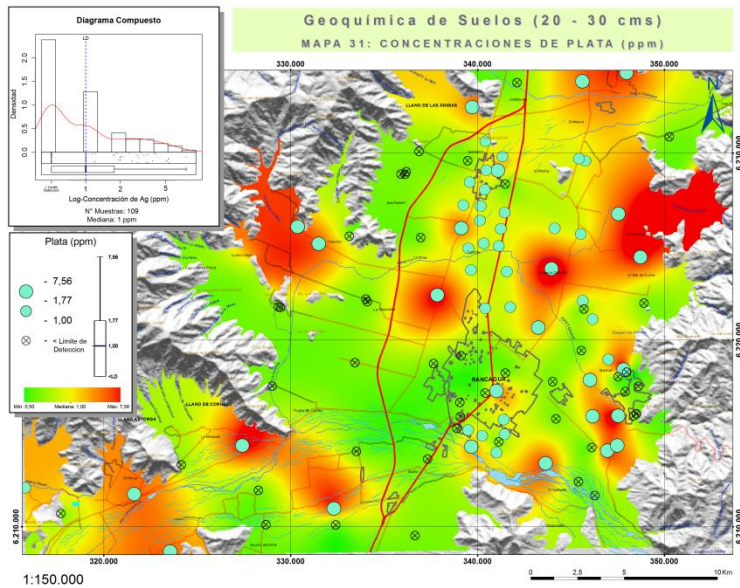












4.2 Identificación de Fuentes de Proveniencia

4.2.1 Factor de Enriquecimiento

El Factor de Enriquecimiento obtenido para los elementos muestreados se presenta en la siguiente figura (Fig. 4.1).

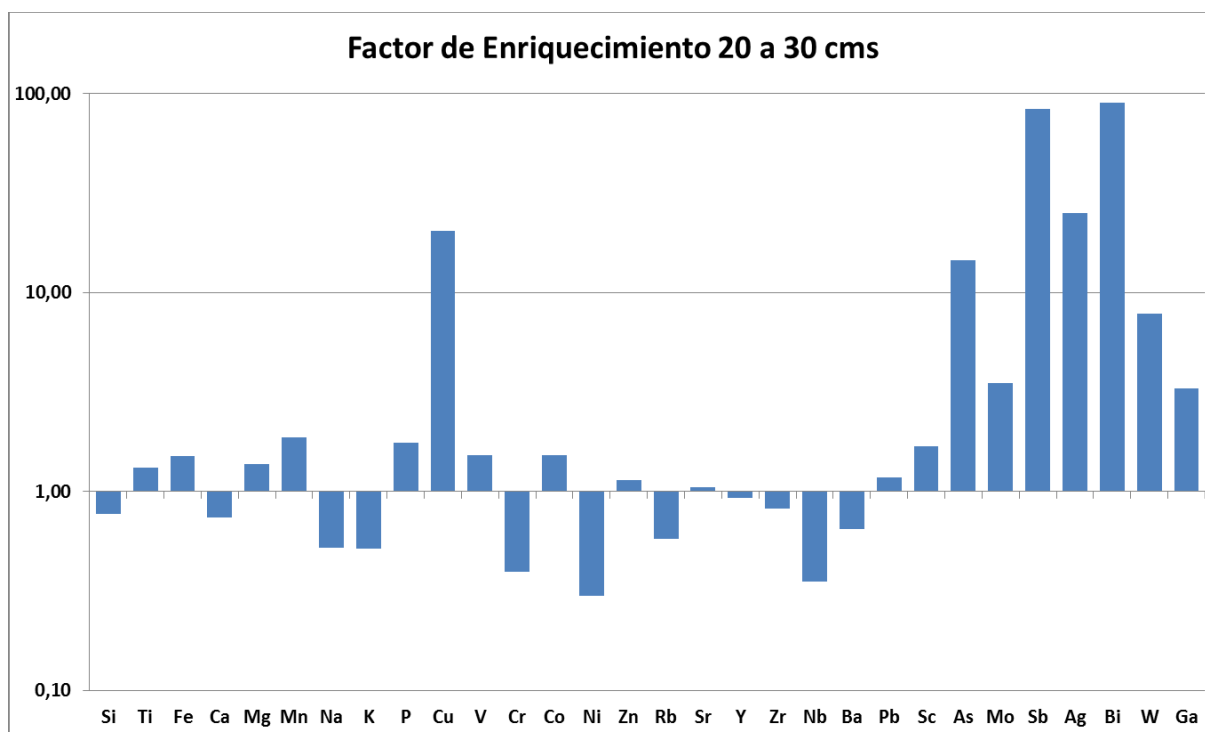


Figura 4.1. Resultados Factor de Enriquecimiento. Se considera el elemento Aluminio como referencia.

Cabe mencionar que la compilación química de la corteza utilizada para comparar (Taylor & Mc Lennan, 2009) no presenta valores para los elementos Carbono (C), Azufre (S) y Mercurio (Hg), es por esta razón que aquellos elementos no presentan resultado en este análisis. A esto se suma el hecho de que se utilizó el Aluminio (Al) como elemento conservativo de referencia, por lo cual tampoco presenta resultado alguno.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, la tabla 4.5 a continuación, presenta un resumen, categorizando los elementos según el nivel de influencia de la fuente, ya sea natural o antropogénica, para cada uno.

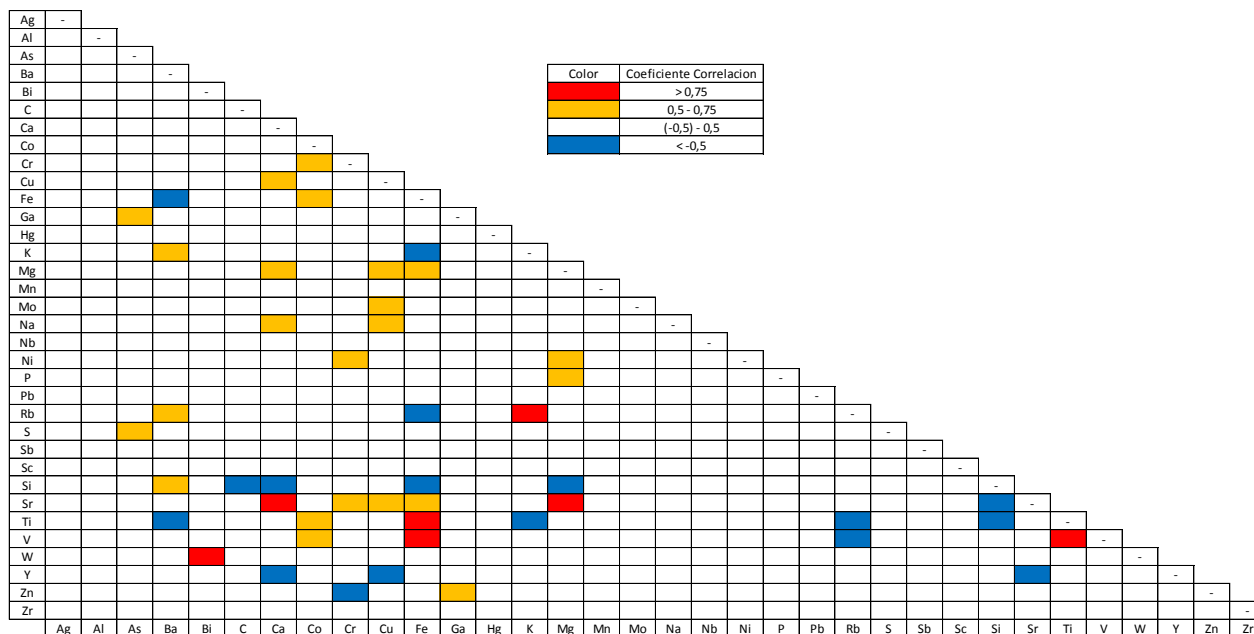
Tabla 4.5. Resumen Resultados Factor de Enriquecimiento.

Rango	Origen	Elementos
$FE < 1$	Natural, litogénico.	Si, Ca, Na, K, Cr, Ni, Rb, Y, Zr, Nb, Ba.
$1 < FE < 10$	Fuentes naturales como antropicas	Ti, Fe, Mg, Mn, P, V, Co, Zn, Sr, Pb, Sc, Mo, W, Ga
$FE > 10$	Posible contribución antropogénica importante.	Cu, As, Sb, Ag, Bi

4.2.2 Análisis de Correlación Múltiple

La matriz de correlación de Pearson, obtenida para las variables muestreadas se presenta en la tabla a continuación.

Tabla 4.6. Matriz de Correlación.



Para los elementos químicos, se tiene que los principales pares de variables con altas correlaciones positivas (coeficiente >0.75) se pueden agrupar en las siguientes asociaciones geoquímicas: *Fe-Ti-V*; *Ca-Mg-Sr*; *Rb-K* y *Bi-W*.

Entre los elementos que presentan una correlación positiva ($0,5 - 0,75$) se cuenta un total de 23 pares y entre los elementos que presentan una correlación negativa ($<0,5$) se cuenta un total de 17 pares.

Los resultados obtenidos por medio de este análisis serán complementados con el análisis multivariable y serán discutidos en su conjunto más adelante.

4.2.3 Análisis Multivariable

La metodología utilizada para levantar los datos geoquímicos de los suelos estudiados, considera las concentraciones totales para todos los elementos muestreados, de tal forma que una multiplicidad de fuentes, ya sean naturales (geológicas o pedogénicas) o antropogénicas, caracterizan cada compuesto extraído. Es por esto que las relaciones geoquímicas entre los elementos en este tipo de ambientes de deposición son complejas ya que existe una superposición de las mismas .

El Análisis de Componentes Principales realizado, comprende un total de 34 componentes principales, número igual al total de variables muestreadas. A partir del resultado obtenido en este análisis, se definió un total de 11 Componentes Principales como representativo. Esto debido a que esta cantidad de Componentes Principales explica la mayor parte (>80%) de la variabilidad original de la base de datos, tal cual como se observa en la figura 4.2. Este análisis determina una cantidad fija de factores a utilizar durante el desarrollo del Análisis Factorial.

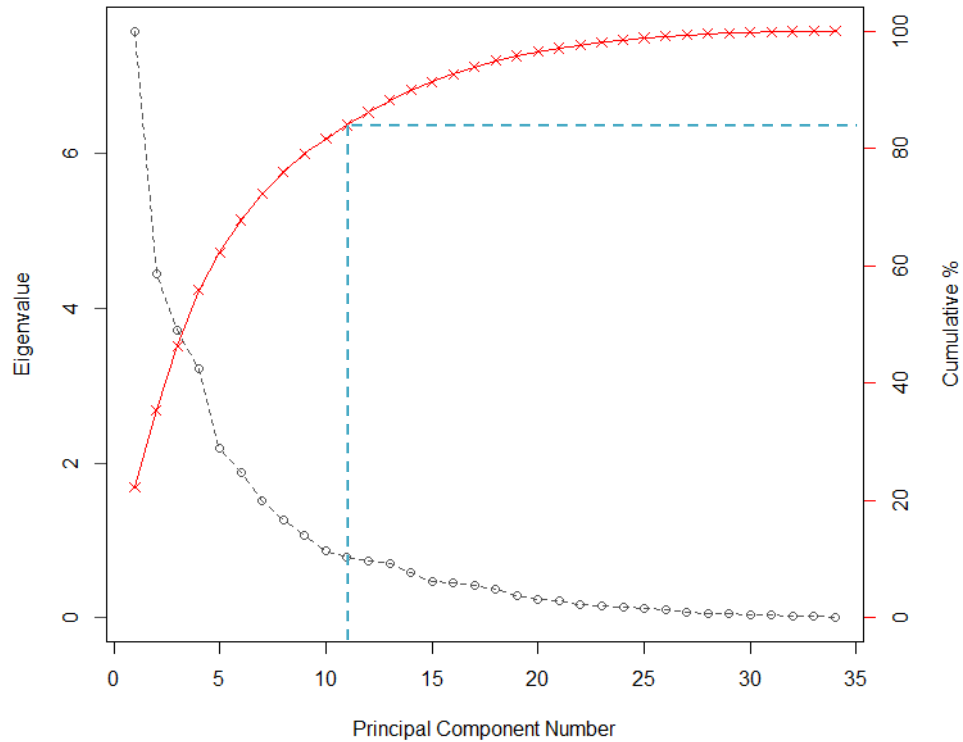


Figura 4.2. Resultado Análisis de Componentes Principales.

A partir del número de factores definidos (11 en total), se desarrolló el Análisis Factorial. Este cantidad de factores permite explicar al menos un 80% de la variabilidad presente en la base de datos. En la tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos en este análisis.

Tabla 4.7. Resultados Análisis Factorial

	0%	23%	36%	48%	57%	63%	68%	72%	75%	78%	81%	84%
+1						Bi W	Zn		Al	Zr		
+0.5	Ti Fe V	Ca Na Cu	Sr Mo	As S Ga	C P		Ga	Cr Ni Pb			Ag	
0	Mn Co	Mg P Cl Ni	Ni Hg	Mn Fe Ca Co	Co Sc		Mg Ni Sr			V Ga		
-0.5	Si	Ba	Ba Na	Si			Co Sc		Si	Cu		
-1	K Rb	Y	Mn				Cr					Nb
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	

De acuerdo a la tabla 4.7 se definieron 11 asociaciones geoquímicas, las cuales se detallan a continuación. Los elementos entre paréntesis () son considerados señales secundarias.

Los cuatro últimos factores (F8, F9, F10 y F11), representan cada uno el 3% de la variabilidad total de la base de datos original. Para efectos de este estudio, sólo se analizaran aquellas asociaciones que presenten más de un elemento con un factor de carga entre |0.5| y |1|, lo cual excluye a los últimos cuatro factores obtenidos (F8, F9, F10 y F11).

- Factor 1: **Ti, Fe, V, (Mn), (Co); -K, -Rb, -Ba, (-Si).**

Este factor representa el 23% de la variabilidad total de la base de datos original y se encuentra compuesta de una señal principal de Titanio (*Ti*), Hierro (*Fe*) y Vanadio (*V*), con una señal secundaria de Manganeso (*Mn*) y Cobalto (*Co*). También es posible apreciar una señal principal inversa compuesta por Potasio (*K*), Rubidio (*Rb*) y Bario (*Ba*), acompañados por el Silicio (*Si*) que presenta una señal inversa secundaria.

- Factor 2: **Cu, Na, Ca, Sr, Mo, Mg, (P), (Cr), (Ni); -Y, (-Ba).**

Este factor representa el 13% de la variabilidad total de la base de datos original y presenta una señal principal compuesta de Cobre (*Cu*), Sodio (*Na*), Calcio (*Ca*), Estroncio (*Sr*), Molibdeno (*Mo*) y Magnesio (*Mg*), acompañada de una señal secundaria de Fósforo (*P*), Cromo (*Cr*) y Níquel (*Ni*). También se presenta una señal inversa principal de Itrio (*Y*) y una señal inversa secundaria de Bario (*Ba*).

- Factor 3: **As, S, Ga, Hg, (Ni); -Mn, (-Na), (-Ba).**

Este factor representa el 12% de la variabilidad total de la base de datos original y presenta una señal principal compuesta por Arsénico (*As*), Azufre (*S*), Galio (*Ga*) y Mercurio (*Hg*) y una señal secundaria de Níquel (*Ni*). También se presenta una señal inversa principal de Manganeso (*Mn*) y una señal inversa secundaria de Sodio (*Na*) y Bario (*Ba*).

- Factor 4: **C, P, (Mn), (Fe), (Ca), (Co); -Si.**

Este factor representa el 9% de la variabilidad total de la base de datos original y presenta una señal principal compuesta de Carbono (*C*) y Fósforo (*P*) con una señal secundaria de Manganeso (*Mn*), Hierro (*Fe*), Calcio (*Ca*) y Cobalto (*Co*). También se aprecia una señal principal inversa de Silicio (*Si*).

- Factor 5: **Bi, W, (Co), (Sc).**

Este factor representa el 6% de la variabilidad total de la base de datos original y presenta una señal principal compuesta de Bismuto (*Bi*) y Tungsteno (*W*) con una señal secundaria de Cobalto (*Co*) y Escandio (*Sc*)

- Factor 6: ***Zn, Ga; -Cr, (-Co), (-Sc).***

Este factor representa el 5% de la variabilidad total de la base de datos original y presenta una señal principal compuesta de Zinc (*Zn*), *Galio (Ga)*. También se aprecia una señal principal inversa de Cromo (*Cr*) con una señal secundaria inversa de Cobalto (*Co*) y Escandio (*Sc*).

- Factor 7: ***Pb, Cr, Ni, (Mg), (Sr).***

Este factor representa el 4% de la variabilidad total de la base de datos original y presenta una señal principal compuesta de Plomo (*Pb*), Cromo (*Cr*) y Níquel (*Ni*) con una señal secundaria de Magnesio (*Mg*) y Estroncio (*Sr*).

- Factor 8: ***Al; (-Si).***
- Factor 9: ***Zr; (-Cu).***
- Factor 10: ***(Ag), (V), (Ga).***
- Factor 11: ***(-Nb).***

Capítulo 5 Discusiones

5.1 Concentraciones Elementales y Distribución Espacial (Línea Base)

El análisis box-plot, nos permite visualizar como se caracterizan las concentraciones elementales tomando en cuenta los principales valores estadísticos, como lo son los valores máximo y mínimo, la mediana (Q2), y los cuartiles 1 (Q1) y 3 (Q3), que representan el 25% y el 75% de los datos, respectivamente. A partir de estos datos, que evidencian el contenido actual de cada elemento, es decir el rango de concentraciones en el área de estudio muestreado, junto a la distribución natural, definen la línea base geoquímica. Esta indica el contenido actual de un elemento en un punto dado del tiempo, por lo tanto permite cuantificar cualquier cambio en el futuro y considera la concentración geogénica natural (background natural) y la difusa contribución antropogénica.

La línea base define como *background geoquímico* al rango definido por el Rango Intercuartílico, es decir entre el Q1 y el Q3, y equivale aproximadamente al 50% de las concentraciones medias del área de estudio. Este rango representa una buena caracterización de los valores normales que ocurren en el área. Esta forma de presentar la información (*concentraciones medias*), en vez de hablar de un valor puntual (*mediana*), permite reflejar la heterogeneidad presente en el medio ambiente.

En determinados casos ocurren concentraciones elementales anómalamente altas. Estos valores considerados anómalos son importantes debido a la información que reportan, la cual a priori no se puede saber si se encuentra determinada por la variación natural de las concentraciones relacionadas a la geología del área de estudio o a algún tipo de contribución antropogénica difusa. Estos valores generalmente son considerados como valores anómalos u *outliers* acorde al análisis Box-Plot. Es por esta razón que para tener una visión completa de la línea base geoquímica desarrollada en el área de estudio, no sólo hay que considerar la distribución estadística de las concentraciones elementales medidas, sino que también hay que tener en cuenta la distribución espacial de los datos en el área de interés.

Si bien, la línea base se compone de las concentraciones elementales y de la distribución espacial, no hay que olvidar que la dinámica de los elementos químicos es bastante compleja y por lo tanto, no es un punto de vista que debe ser omitido. Por consiguiente, por medio de herramientas estadísticas más sofisticadas como el ACM, ACP, y el AF, se realizó un análisis integrado que busca entender la dinámica de los elementos químicos en su conjunto, a partir de las distribuciones estadístico-espaciales que definen la línea base.

5.1.1 Elementos Mayores

El material parental es uno de los factores que más predomina a la hora de caracterizar la composición de la fase sólida de los suelos. El origen de los suelos generalmente concuerda con una fuente primaria de origen natural, la cual puede ser litogénica (heredado de la roca parental) o pedogénica (de fuente litogénica, pero modificada por procesos propios del sistema edáfico) (Kabata-Pendias, 2011). Es por esto que a primera vista hay que considerar que todas las formaciones geológicas que circundan el área de estudio influyen en la composición de los suelos del área de estudio, siendo la Fm. Las Chilcas (**Kile**), la Fm. Abanico (**EMA**) e Ignimbrita Pudahuel (**Plip**) las más importantes.

Gran parte del relleno sedimentario que forma parte de la Depresión Central en el área de estudio corresponde a depósitos aluviales conformados por sedimentos que incluyen gravas clasto soportadas, arenas, limos y arcillas mal consolidadas, los cuales forman abanicos habitualmente coalescentes a la salida de los cursos fluviales mayores (Godoy *et al.*, 2009). En el mapa correspondiente a la base geológica, es posible apreciar que los depósitos aluviales se encuentran diferenciados dependiendo si el abanico se observa a la salida del río Cachapoal (**PLHa1(a)**) o del estero Codegua y estero La Cadena (**PLHa2**) a los pies de la cordillera Principal, compuesta principalmente por rocas de la Fm. Abanico (**Ema**) y con presencia local de afloramientos Ignimbrita Pudahuel (**Plip**) (Fig. 2.5).

Tabla 5.1. Comparación Química Elementos Mayores v/s Química Roca Total Fm. Abanico.

Elementos Mayores						
		Mínimo	Q1 (25 %)	Q3 (75%)	Máximo	Fm. Abanico Vergara (2004)
SiO₂	wt%	48.13	54.57	56.02	68.43	49.94 – 58.54
Al₂O₃	wt%	14.44	16.24	17.01	21.43	15.53 – 16.97
TiO₂	wt%	0.42	0.93	1.04	1.55	0.73 – 1.55
Fe₂O₃	wt%	3.09	7.96	8.67	10.75	8.25 – 13
CaO	wt%	1.05	2.88	3.91	6.83	2.91 – 3.92
MgO	wt%	0.50	2.99	3.74	5.21	3.59 – 3.80
MnO	wt%	0.09	0.14	0.17	0.30	0.13 – 0.19
Na₂O	wt%	1.25	1.93	2.57	2.85	3.07 – 3.55
K₂O	wt%	0.57	1.78	2.00	3.01	0.54 – 2.04
P₅O₂	wt%	0.07	0.26	0.34	0.75	0.27 – 0.36

En la tabla 5.1 se comparan los principales valores de las concentraciones elementales de los elementos mayores con los rangos propuestos por Vergara *et al.* (2004) para la geoquímica de roca total de la Fm. Abanico (**Ema**). Es posible observar, para algunos elementos, similitud entre los valores de la línea base y la geoquímica de roca total. Esto permite comprobar en parte, que el *background* definido es una buena aproximación de las concentraciones que naturalmente ocurren en el área. Cabe señalar que la comparación realizada presenta sesgo debido a la falta de valores geoquímicos de rocas de las otras formaciones geológicas de extensión considerable, cercanas al área de estudio (Fm. Las Chilcas (**Kile**) e Ignimbrita Pudahuel (**Plip**)).

De todos los elementos mayores, el Fósforo (*P*) reviste particular interés debido a que presenta una fuerte componente antropogénica relacionada al uso intensivo de fertilizantes fosforados (*P*). Estos son ocupados comúnmente para preparar la tierra para las próximas siembras, compensando el consumo de este macronutriente por parte de los cultivos anteriores. Un estudio desarrollado por Molina (2009), el cual analizó la composición de elementos traza presentes en algunos fertilizantes utilizados en Chile, encontró que en general el fertilizante fosforado (*P*) presenta las más altas concentraciones de elementos traza, lo cual podría generar problemas en el largo plazo debido a que su uso podría aumentar los niveles de *As*, *Cd*, *Cr* o *Zn* entre otros.

5.1.2 Elementos Traza

Cuantitativamente, los elementos traza son una parte despreciable del suelo. Cabe destacar que se ha reconocido que el comportamiento de los elementos traza puede diferir bastante según la interacción que tenga con las distintas componentes del sistema edáfico, siendo estas diferencias importantes a la hora de entender de mejor manera el estado de estos elementos en el suelo (Kabata-Pendias, 2011). Al igual que los elementos mayores, gran parte del total de los elementos traza presentes en los suelos, es heredado de la roca parental, sin embargo su distribución espacial en el suelo y su relación con los distintos componentes de este, refleja una serie de procesos pedogénicos, así como el impacto de factores externos, en especial lo de tipo antropogénico (polución industrial, actividad agrícola, urbanización, etc.) (Galán & Romero, 2008).

Del total de los elementos muestreados, existe un grupo de elementos traza que en altas concentraciones representan potencialmente un serio riesgo para la calidad medio ambiental. Entre los cuales se cuenta el *Arsénico (As)*, *Berilio (Be)*, *Cadmio (Cd)*, *Cromo (Cr)*, *Cobre (Cu)*, *Mercurio (Hg)*, *Níquel (Ni)*, *Plomo (Pb)*, *Selenio (Se)*, *Talio (Tl)*, *Vanadio (V)*, *Zinc (Zn)*, y algunos *lantánidos y actínidos* (Alloway et al., 2013). Se debe tomar en cuenta además que existe una relación directa entre la actividad humana (agrícola, industrial o urbana) y los lugares en donde se encuentran suelos enriquecidos en estos u otros elementos.

Los párrafos a continuación, presentan un resumen de los antecedentes generados en este trabajo para aquellos elementos que revisten el mayor interés medio ambiental. Dentro de la discusión de cada elemento se incluye antecedentes de interés recopilados a partir de otros estudios.

5.1.2.1 Cobre (Cu)

Las altísimas concentraciones que presenta el Cobre (*Cu*) en el área de estudio, hacen que este elemento destaque por sobre el resto. Las concentraciones medias varían entre 225 – 677 ppm, llegando a un máximo cercano a los 2500 ppm. La mediana registrada en este estudio (419 ppm), es ligeramente menor que el promedio registrado (427 ppm) en el estudio de metales pesados en suelos agrícolas cultivados en el valle del río Cachapoal realizado por el INIA (1990). Se presenta una marcada diferencia espacial entre las concentraciones registradas para el sector de Graneros, respecto de las concentraciones en la ribera sur del río Cachapoal. En este último sector se presentan las más altas concentraciones (>1000 ppm).

Al comparar los resultados obtenidos con el set de datos muestreado a nivel superficial, entre los 0-5 cms (Sernageomin, 2013), es posible apreciar un enriquecimiento mayor en el perfil superficial en los suelos del área de estudio, el cual presenta su mayor diferencia con un peak de 3500 ppm (0-5 cms) y de 2500 ppm en el perfil más profundo (20-30 cms) en el mismo punto de muestra. Este tipo de comportamiento se repite en gran medida entre los elementos removilizados producto de la actividad antropógena (Galán & Romero, 2008).

Diversos estudios con foco medio ambiental, en las diversas matrices ambientales, han sido desarrollados en la zona de estudio. Sudzuki en 1960, realizó un estudio en ambas riberas del río Cachapoal e indicó que la ribera sur del mismo presentaba suelos con altas concentraciones de Cu, debido al uso de aguas de regadío provenientes del mismo río, así también declaró que el “Cu medido en los suelos agrícolas del área es más que suficiente para el desarrollo agrícola y que cualquier agregación del elemento generará acumulación del mismo, pudiendo traducirse en un perjuicio en la calidad agrícola cada vez más notorio en el tiempo”. Ahumada *et al.* (2004), presenta datos de Cu soluble al sur del río Cachapoal (Km 97-99, Ruta 5 Sur) que varían entre 125-220 ppm y en las cercanías de Graneros, los cuales varían entre 63-70 ppm. Lacassie (2008), reconoció altas concentraciones de Cu, Sb, Mo, As y Co en el río Cachapoal entre las confluencias del río Coya y estero Los Leones, las cuales atribuye en parte a la removilización de material proveniente de los depósitos de relave ubicados aguas arriba.

Otros estudios sugieren que el enriquecimiento estaría también relacionado a procesos de deposición atmosférica. Romo-Kroger (1994), realizó un estudio en el sector de La Leonera, comuna de Codegua, ubicado a 13 kilómetros al noroeste de la planta de fundición Caletones, sobre el material particulado emitido por la misma fundición. Este detectó emisiones de Cu, en conjunto con S, As y Zn.

La intensa actividad agrícola que se desarrolla en la Depresión Central, también se considera como una fuente difusa de Cu hacia los suelos agrícolas del área de estudio. Esto se debe al uso de enmiendas orgánicas, las cuales pueden contener un alto contenido de metales traza (SAG, 2005), además de la utilización del Cobre (Cu) como ingrediente activo (oxicloruro de cobre, óxido cuproso, hidróxido de cobre, sulfato de cobre pentahidratado, etc.) de una serie de productos agrícolas como plaguicidas, bactericidas u otros (SAG, 2015). Salminen *et al.* (2005), declara que el uso extenso de compuestos en base a Cu en la agricultura, es una potencial fuente de concentraciones anómalas de dicho elemento.

Este elemento también se encuentra enriquecido en forma natural en el distrito minero de Chancón, en el límite occidental del área. Allí se han desarrollado una cantidad considerable de faenas de pequeña minería metálica acorde al Atlas de Faenas Mineras de la VI Región (Sernageomin, 2012), esencialmente de cobre y oro. Cabe destacar, que estas faenas se encuentran emplazadas muy cerca de plantaciones de carácter agrícola, pudiendo generar impacto local.

El Cu es un elemento esencial para todos los organismos vivos. El potencial riesgo que representa este elemento depende en gran medida de la biodisponibilidad del mismo así como de la sensibilidad de las especies. Bowen (1980), calculó que el tiempo de residencia del Cu en suelos de clima templado, varía entre 1000-1500 años, indicando

que la remoción completa de este elemento es algo impensable, de tal forma que los procesos antropógenos por muy poco intensivos que sean, como en el caso del uso de productos agrícolas, pueden agregar más *Cu* a los suelos sin que el *Cu* ya presente haya sido removido, generando mayor acumulación del mismo en el mediano y largo plazo, pudiendo traducirse en un perjuicio en la calidad agrícola cada vez más notorio en el tiempo.

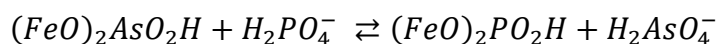
5.1.2.2 Arsénico (As)

Los valores medios de Arsénico están caracterizados por el alto porcentaje (>60%) de muestras bajo el límite de detección (<20 ppm) ubicados principalmente en la zona centro y sur del área estudiada. Los más altos valores se presentan en la zona norte del área de estudio a lo largo del eje Graneros-Codegua, con valores que varían entre los 40 y los 134 ppm. Llama la atención que todas las muestras de *As* mayores que 95 ppm se presentan al sur de la ciudad de Graneros en las cercanías del sector de Tuniche.

Un estudio realizado por Ahumada *et al.* (2004), muestra mayores concentraciones en las muestras tomadas en Graneros (67-75 ppm) en contraste con las concentraciones medidas (33-34 ppm) en el Km 97, ruta 5 Sur. Esto es consistente con la notoria diferencia espacial que presentan las concentraciones de *As* en este estudio

Estudios sugieren que el enriquecimiento en *As* en el área de estudio estaría relacionado a procesos de deposición atmosférica de material emitido por la fundición Caletones. El estudio de Romo-Kroger (1994), en el sector de La Leonera, detectó altas concentraciones de *As* en el material particulado fino emitido por la fundición Caletones, relacionado también a emisiones de Zinc (*Zn*) y Azufre (*S*). Richter *et al.* (2004), describe altas concentraciones (316 ppm) en muestras de suelos tomadas entre los 10-50 cms en el sector de Graneros, las cuales asocia al transporte, favorecido por la dirección del viento, a través del aire y posterior deposición en suelos agrícolas de partículas provenientes de la misma fundición.

El suelo es un sistema complejo que actúa como un sistema de amortiguación natural que controla el transporte de sustancias removilizadas por la actividad antropogénica. Es por esta razón que la degradación de los suelos es un tema de preocupación, debido a la limitada capacidad para actuar como filtro de contaminantes, pudiéndose degradar la funcionalidad del suelo (Bowen, 1980). Particularmente en el caso del Arsénico ocurre que junto con el Fósforo presentan ambos configuración electrónica y propiedades químicas similares. El anión fosfato (PO_4^-) es la especie química más frecuente del Fósforo (*P*) en suelos. Este presenta un comportamiento químico similar al arseniato (AsO_4^-). La aplicación de fertilizantes fosforados puede producir una liberación no deseada del arsénico adsorbido (Ec. 5.1) por competencia en la retención de ambos aniones (Peryea & Kammereck, 1997).



Ecuación 5.1 Relación entre los aniones Arseniato y Fosfato.

Cuando en un suelo enriquecido en As ocurre una excesiva aplicación de fertilizantes fosforados, podría ocurrir un desplazamiento del arseniato desde las posiciones de adsorción, quedando biodisponible para un potencial consumo de las plantas, pudiendo llegar a la cadena alimentaria tanto de animales como de humanos (Peryea & Kammereck, 1997).

Estudios de especiación de As, realizados por Ascar (2008a, 2008b) en los suelos de Graneros, exhibieron una alta capacidad de adsorber $As(V)$, que corresponde a la especie inorgánica de As que presenta una menor toxicidad y movilidad, lo cual se relaciona con los altos contenidos de arcilla y óxidos de hierro, manganeso y aluminio en los suelos tipo *Mollisol*, confirmando que la presencia de estos componentes es esencial en la adsorción del As ya que forman complejos fuertemente retenidos al suelo. El estudio de Ahumada *et al.* (2004), el cual también se desarrolló en suelos agrícolas del sector de Graneros, indica que sólo una pequeña parte del As (<2 ppm) medido se presenta en las fracciones soluble, adsorbida e intercambiable. Estas fracciones corresponden a iones del elemento en cuestión que pueden ser fácilmente liberados por pequeños cambios en las condiciones ambientales.

El As es considerado una de los elementos químicos más preocupantes para la salud pública debido a que en su forma natural se encuentra ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra (Salminen *et al.*, 2008). La toxicidad del As disminuye en función de la especiación química, siendo las formas inorgánicas (Arsenito [$As(III)$] y Arseniato [$As(V)$]) más tóxicas que las orgánicas. La exposición al As inorgánico puede causar varios efectos sobre la salud, como es irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones. Es sugerido que la toma de significantes cantidades de As inorgánico puede intensificar las posibilidades de desarrollar cáncer, especialmente las posibilidades de desarrollo de cáncer de piel, pulmón, hígado y linfa (Alloway *et al.*, 2013).

5.1.2.3 Antimonio (Sb)

Este elemento presenta concentraciones medias entre <10 ppm y 25 ppm con un peak de 80 ppm. Presenta valor alto en las cercanías del Tranque Cauquenes. Los valores medios de Sb están caracterizados por un porcentaje considerable (>30%) de muestras bajo el límite de detección (<10 ppm)

Existen antecedentes que relacionan al Sb con los pares elementales Cu-Mo y Cu-As. Lacassie (2008), reconoció altas concentraciones de Cu, Sb y Mo en el río Cachapoal entre las confluencias del río Coya y estero Los Leones. De Gregori (2003), identificó una importante correlación entre Cu-Sb en todos los sitios analizados que presentan impacto asociado a la gran minería del Cobre (I, II y V Región), y además una correlación menor entre As-Sb.

Este elemento también se asocia a la combustión de combustibles fósiles (carbón-petróleo), a su uso en el sistema de frenos y en neumáticos en los automóviles, en la elaboración de baterías, pinturas y otros insumos utilizados en el ámbito urbano (Reimann *et al.*, 2010).

El *Sb* reviste un particular interés para los estudios medio ambientales debido a que es comúnmente utilizado como indicador de contaminación industrial. Esto se debe a su baja abundancia natural. Los oxi-hidroxidos de *Fe* presentan fuerte absorción y adsorción de este elemento, permitiendo que el suelo se enriquezca en *Sb* antropogénico (Alloway *et al.*, 2013).

Desde el punto de vista toxicológico, reviste interés debido a que pertenece junto al *As* al mismo grupo en la tabla periódica, e incluso se asume que su comportamiento geoquímico y toxicidad son similares, pero a diferencia del *As* que se encuentra ampliamente estudiado a nivel mundial, las investigaciones con respecto al real riesgo medio ambiental del *Sb* están faltos de mayores evaluaciones y pruebas. Incluso se cree que tal vez podría comportarse de una manera mucho menos tóxica que el *As* (Alloway *et al.*, 2013). De todas maneras se sabe que al igual que el *As*, los compuestos con *Sb* trivalente (*Sb(III)*) presentan mayor toxicidad que el *Sb* pentavalente (*Sb(V)*).

5.1.2.4 Molibdeno (Mo)

Las concentraciones medias de *Mo* varían entre <5 y 5.81 ppm, con un máximo de 26 ppm. La distribución de este elemento en ambas profundidades se ve marcada por la alta cantidad de puntos muestreados (>40%) que presentan concentraciones menores que el límite de detección (< 5 ppm). El máximo y el promedio medidos por el INIA (1990) para el *Mo* en suelos agrícolas cultivados en el valle del Cachapoal es <10 ppm. Presenta valores altos (>20 ppm) en la ribera sur del río Cachapoal.

El *Mo* se encuentra de forma natural como sub-producto de las menas de sulfuros de *Cu*, especialmente en los pórfidos cupríferos. Lacassie (2008), reconoció altas concentraciones de *Cu*, *Sb*, *Mo*, *As* y *Co* en el río Cachapoal entre las confluencias del río Coya y estero Los Leones.

El *Mo* es un elemento esencial para animales y plantas. Tanto la deficiencia como el exceso de *Mo* pueden causar problemas, es por esto que existe un interés particular en el control de los niveles de *Mo*. Si bien los casos de deficiencia de *Mo* son raros, estos pueden causar coma en los seres humanos. Al contrario, el exceso de *Mo* reduce la absorción de *Cu* en los seres humanos pudiendo generar deformidades a nivel del esqueleto. En plantas, el *Mo* ayuda en la fijación del Nitrógeno (*N*), pero valores demasiado altos de *Mo* pueden inducir deficiencias de *Cu* en los animales (*Molibdenosis*) (Alloway *et al.*, 2013).

5.1.2.5 Azufre (S)

Las concentraciones medias de *S* varían entre 0.05 y 0.33 wt%, con un máximo de 0.93 wt%. Altas concentraciones de *S* (0.58 – 0.64 wt%) se presentan a lo largo del eje Graneros-Rancagua. También se registraron altos valores de *S* (>0.33 wt%) en sectores cercanos al tranque Cauquenes.

Romo-Kroger (1994), detectó altas concentraciones de *S* en el material particulado fino emitido por la fundición Caletones, relacionado también a emisiones de Zinc (*Zn*) y Arsénico (*As*). En 1994 Caletones fue declarada zona saturada por anhídrido sulfuroso (*SO*₂) y material particulado (D.S. N° 179/94 MINSEGPRES).

5.1.2.6 Zinc (Zn)

La media de las concentraciones para el *Zn* varía entre 83 y 104 ppm, con un máximo que alcanza los 180 ppm. La mediana y el máximo (92 y 180 ppm) registrados en este estudio son menores que el promedio y el máximo (136 y 250 ppm) detectados por el INIA (1990). Altas concentraciones de *Zn* se presentan en el sector poniente del área de estudio, en las cercanías del distrito minero de Chancón y también en el sector de Punta de Cortes, cercanos al cauce del estero La Cadena.

Existen estudios que relacionan el enriquecimiento de este elemento con las emisiones producto de la actividad minera. Romo-Kroger (1994), detectó concentraciones de *Zn*, entre otros, en el material particulado (MP) emitido por la fundición Caletones.

Lacassie (2008), reconoció altas concentraciones de *Zn* en los sedimentos fluviales, las cuales relaciona a los efluentes industriales provenientes de la planta de aguas servidas adyacente al curso del estero.

Este elemento se presenta de forma natural en todos los tipos de suelo y su concentración depende en gran medida de la composición química del material parental. (Alloway *et al.*, 2013).

5.1.2.7 Plomo (Pb)

Las concentraciones medias de *Pb* varían entre los 14 y los 27 ppm, con un máximo de 61 ppm. La mediana (20 ppm) registrada en este estudio es similar al promedio (26 ppm) medido por el INIA (1990). Este elemento muestra valores altos en las cercanías del límite occidental de la Depresión Central, asociado a los afloramientos de la Fm. Las Chilcas (**Kilc**). También existe una particular concentración alta de *Pb* en el sector sur-poniente del radio urbano de la ciudad de Rancagua

Antecedentes indican que este elemento presenta un origen principalmente natural, relacionado a la composición de la roca parental (Alloway *et al.*, 2013). Otros estudios muestran que el *Pb* es uno de los elementos que más extensamente ha sido utilizado por el ser humano. El enriquecimiento antropogénico de *Pb* comúnmente ha sido relacionado a actividad industrial (Salminen *et al.*, 2005). Cabe recordar hasta el 2001 en Chile se permitió el uso de gasolinas enriquecidas con *Pb* (MMA, 2011)

Desde el punto de vista medio ambiental, la contaminación por plomo es un tema de interés global (Salminen *et al.*, 2008) ya que este elemento no presenta rol biológico en plantas ni animales y es altamente tóxico para mamíferos. Puede causar discapacidad mental en jóvenes y neuropatías e hipertensión en adultos, llegando a ser letal en niveles muy altos (exposición aguda) y/o durante una larga exposición (exposición crónica). El plomo es particularmente peligroso, ya que puede acumularse en el organismo, pero además puede transmitirse a través de la cadena trófica.

5.1.2.8 Mercurio (Hg)

Las concentraciones medias de *Hg* varían en el área entre 0.02 - 0.09 ppm, con un máximo de 0.19 ppm. Presenta una distribución marcada con mayores concentraciones en el sector central de la zona de estudio y hacia el este de la misma. La acumulación de *Hg* se encuentra relacionada con el perfil que presenta mayores niveles de *C* orgánico (Kabata-Pendias, 2011).

Acorde a Alloway *et al.* (2013), las altas concentraciones de *Hg* en los suelos se han visto incrementadas en la era industrial como resultado de la actividad humana, siendo algunas de las principales fuentes la combustión de combustibles fósiles, en especial del carbón, y de la presencia de fundiciones de *Cu*.

Cabe destacar que al igual que el *Pb*, desde el punto de vista medio ambiental la contaminación por *Hg* es un tema de interés global ya que no se reconoce función biológica esencial. En especial las formas metiladas del elemento son altamente tóxicas para los humanos y los animales de gran tamaño. La toxicidad de *Hg* se manifiesta en daños a los órganos internos y en daños irreversibles al sistema nervioso (Alloway *et al.*, 2013).

5.1.2.9 Cromo (Cr)

Los valores medios medidos para el *Cr* varían entre los 25 y 35 ppm. Altas concentraciones fueron detectadas en suelos urbanos de Rancagua y Machalí (>60 ppm). Particularmente el 5% de las muestras con concentraciones más altas presentan valores que varían entre los 100 y 206 ppm como máximo.

Diversos estudios reconocen al *Cr*, entre otros elementos, como producto de la combustión de combustibles fósiles. Salma (2005), reconoció que el *Cr* presente en el material particulado se asocia al tráfico vehicular. Valdés (2013), reconoció al *Cr* como parte de la traza química asociada a la combustión de petróleo.

Desde el punto de vista medio ambiental cabe destacar que existe un interés por el *Cr* debido a la alta fitotoxicidad del *Cr* hexavalente (*Cr(VI)*) ya que es muy tóxico en concentraciones 10 a 100 veces menores que *Cr* trivalente (*Cr(III)*), siendo un agente altamente carcinógeno si es absorbido en grandes dosis (Alloway *et al.*, 2013).

5.1.2.10 Vanadio (V)

Las concentraciones medias de este elemento varían entre 163-195 ppm, con un máximo cercano a los 227 ppm. Este elemento se presenta de forma natural y su concentración depende en gran medida de la composición química del material parental. (Alloway *et al.*, 2013).

Los estudios de Artaxo *et al.* (1996) y Moreno (2010), plantean que el *V* se puede utilizar como trazador químico de la combustión asociada al petróleo.

Desde el punto de vista medio ambiental, este elemento se considera como potencialmente peligroso para la calidad medio ambiental, sin embargo también existen voces disidentes que sugieren que el *V* no es un elemento que requiera urgente atención

debido a la falta de evidencia de riesgo hacia los seres vivos en general ya sea por deficiencia o por sobreexposición del mismo (Alloway *et al.*, 2013).

5.1.2.11 Níquel (Ni)

Las concentraciones medias de Ni se encuentran entre los 10 y los 17 ppm, con un máximo de 26 ppm. El origen natural del Ni se encuentra relacionada en gran medida a la composición de la roca parental (Alloway *et al.*, 2013)

Estudios reconocen que las fundiciones de Cu y la combustión de combustibles fósiles son una importante fuente de emisiones antropogénicas de este elemento (Kabata-Pendias, 2011). Valdés *et al.* (2013), caracterizó la combustión de petróleo con una traza química compuesta principalmente por Co, Cr, Ni y Sb. Moreno (2010), concluyó que la industria y el tráfico vehicular son capaces de emitir ciertos elementos traza como el Ni en cantidades suficientes como para generar enriquecimiento.

Desde el punto de vista toxicológico cabe destacar que su potencial cancerígeno en alta dosis está bien documentado, el cual depende principalmente en el potencial que tiene de dañar las proteínas (Alloway *et al.*, 2013).

5.1.2.12 Cobalto (Co)

Los valores medios de Co se encuentran entre los 20 y los 35 ppm, con un máximo es cercano a los 46 ppm. El origen natural del Co se encuentra relacionada en gran medida a la composición de la roca madre (Alloway *et al.*, 2013).

Valdés *et al.* (2013), caracterizó la combustión de petróleo con una traza química compuesta principalmente por Co, Cr, Ni y Sb

Si bien existen concentraciones de Co que superan las normativas contrastadas, tal como se enunció en el punto 5.3, la ocurrencia de casos de contaminación con Cobalto en suelos es rara, e incluso la toxicidad con Co es aún más improbable (Alloway *et al.*, 2013).

5.2 Identificación de Fuentes de Proveniencia

5.2.1 Factor de Enriquecimiento

Para el análisis de Factor de Enriquecimiento (FE) se utilizaron los valores promedio de la composición química de la corteza superior definida por Taylor & McLennan (2009) como referencia. Este valor promedio define la composición química de la corteza como un valor puntual constante para cada elemento. Esta simplificación utilizada por el FE es cuestionable debido a que la corteza terrestre es heterogénea, de tal forma que un valor específico no es capaz de reflejar aquella característica. Hawkes & Webb (1962) plantea que la corteza debiera definirse como un rango de valores. Además hay que tomar en cuenta que los valores planteados por Taylor & McLennan (2009), no reflejan totalmente la geoquímica del área de estudio ya que la composición química del suelo se encuentra principalmente heredada del material parental. Por lo tanto, lo más correcto sería utilizar valores definidos en base a las distintas formaciones geológicas presentes, las cuales son la Fm. Abanico (**EMa**), Fm Las Chilcas (**Kilc**) e Ignimbrita Pudahuel (**Plip**), principalmente. Sin embargo, ante la inexistencia de valores geoquímicos representativos del background natural en la zona de interés, se prefirió utilizar la compilación de Taylor & McLennan (2009).

Existen algunos elementos que presentan una fuerte asimetría positiva en su distribución estadística debido a que presentan un porcentaje considerable de muestras bajo el límite de detección. Aquellos valores se definen como un valor constante, equivalente a la mitad del límite de detección del elemento en cuestión (Reimann *et al.*, 2008). Esto podría impactar en el análisis de FE, debido a que potencialmente se generaría sesgo sobre los resultados obtenidos si es que la cantidad de valores modificados es considerable.

Reimann & De Caritat (2005, 2000), no recomiendan el uso indiscriminado de análisis de FE locales para asumir que altos valores obtenidos implican contaminación antropogénica. Esto debido a que los valores del FE pueden ser altos o bajos debido a varias razones, de las cuales, la contaminación es sólo una. Por lo tanto, acorde a lo anterior, los resultados obtenidos mediante este método son utilizados como una forma de explorar la gran cantidad de información recogida, basados en el criterio de cual o cuales elementos presentarán anomalías con respecto a la concentración promedio de la corteza superior planteada por Taylor & McLennan (2009). El uso del FE es utilizado como una herramienta más de un análisis integrado que considera un análisis espacial (distribución) y de proveniencia de la información levantada, que busca diferenciar fuentes antropogénicas de fuentes naturales.

5.2.2 Asociaciones Geoquímicas

En primer lugar, es importante señalar que el Análisis Factorial es un técnica estadística, de tal forma que la interpretación de los resultados obtenidos no es absoluta ni concluyente respecto a los fenómenos geológicos/antropógenos que se puedan identificar. Al igual que las otras herramientas utilizadas, el AF es un método exploratorio.

Tomando en cuenta la información que nos proporciona la distribución espacial univariable de cada elemento, sumado a los pares generados en el análisis de correlación múltiple (ACM) (ver 4.3.2) y complementando los factores generados por medio del análisis multivariable (AF), es posible reconocer una serie de asociaciones de elementos químicos. El análisis de cada asociación se basa en los factores generados por el Análisis Factorial (ver 4.3.3).

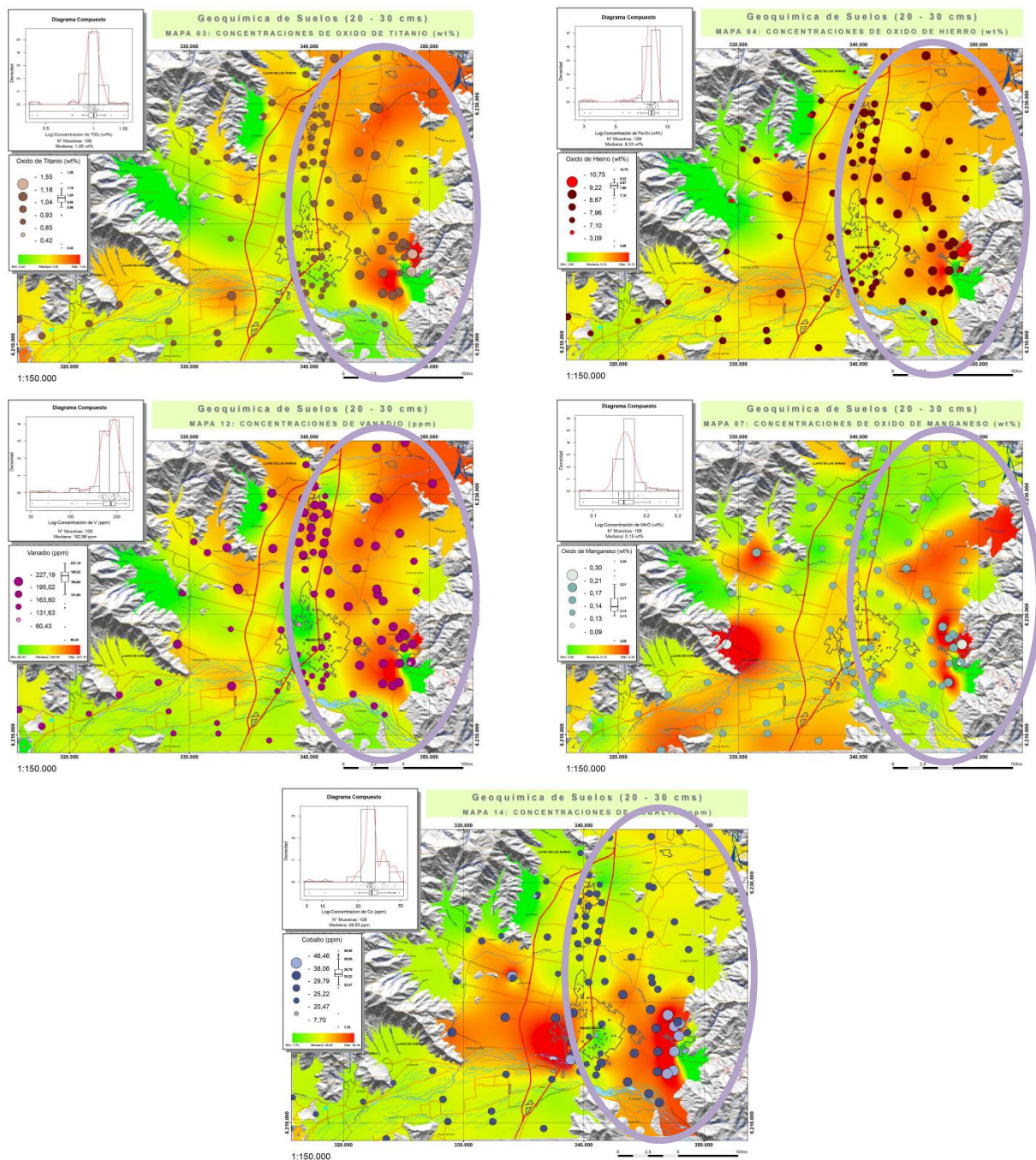
5.2.2.1 Asociaciones *Ti, Fe, V, (Mn), (Co)* y *K, Rb, Ba, (Si)*.

El primer factor definido por el Análisis Factorial presenta dos asociaciones geoquímicas. La primera asociación corresponde a los elementos *Ti, Fe, V* junto con *(Mn)* y *(Co)*. La segunda asociación considera los elementos *K, Rb, Ba* junto con el *(Si)*. Los resultados del ACM muestran que entre los elementos de la primera asociación geoquímica existen 6 pares correlacionados y que entre los elementos de la segunda asociación existen 4 pares correlacionados que presentan una relación lineal significativa. Además existen 9 pares compuestos por un elemento de cada asociación en los cuales se observa una correlación inversa.

La asociación conformada por los elementos *Ti, Fe, V, (Mn) y (Co)* propone una interpretación geoquímica de elementos de origen primario, correspondiente a material parental proveniente de minerales máficos. Además, la presencia natural de *Ti y Fe* en los suelos controla la proporción natural de elementos traza como el *V* y el *Co* (Reimann & de Caritat, 1998).

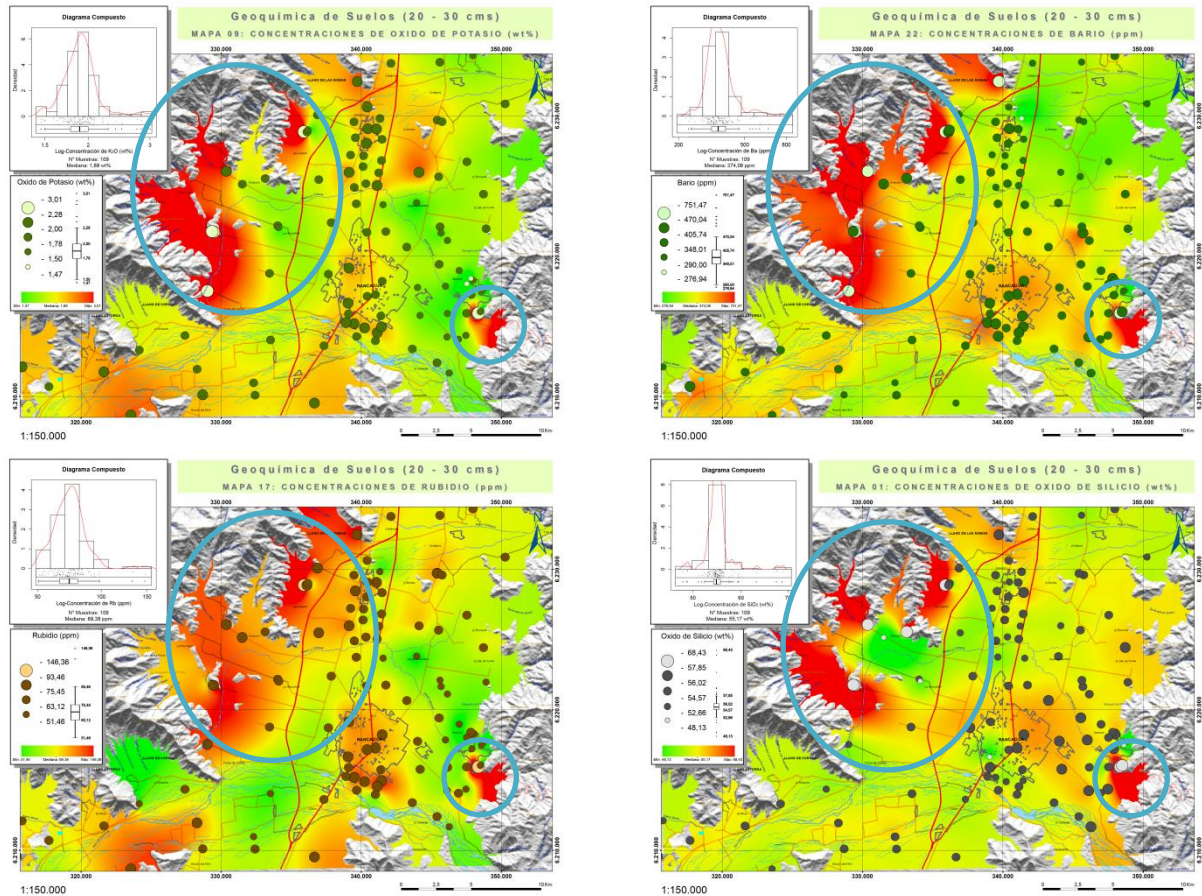
Se observa en los mapas de distribución univariable (Tabla 5.2) que los elementos con mayor loading de la asociación (*Fe y Ti*) presentan valores altos a lo largo del margen oriental de la Depresión Central (*elipse violeta*). Esta distribución mantiene una relación espacial que concuerda con la extensión de la Fm. Abanico (***Ema***), la cual presenta una composición andesítico-basáltica que explicaría la mayor presencia de estos elementos constituyentes de mineralogía máfica.

Tabla 5.2. Distribución Espacial Asociación Geoquímica Ti, Fe, V, (Mn) y (Co).



La asociación de elementos *K*, *Rb*, *Ba* y (*Si*) propone una interpretación geoquímica de elementos de origen primario, formadores de rocas intermedias a ácidas. El *Ba* y el *Rb* reemplazan al *K* en minerales como feldespatos potásicos y probablemente biotitas (Reimann & de Caritat, 1998).

Tabla 5.3. Distribución Espacial Asociación Geoquímica K, Rb, Ba y (Si).



Los elementos de mayor loading (*K, Rb y Ba*) tienen concentraciones altas en los depósitos aluviales y coluviales (**PUHac**) presentes en un segmento del margen occidental de la Depresión Central (*elipse celeste*), cercanos a afloramientos de la Fm. Las Chilcas (**Kile**), de composición intermedia a ácida y en un segmento del margen oriental (*elipse azul*), en depósitos cercanos a la Ignimbrita Pudahuel (**Plip**) en el sector de Machalí, la cual es de composición riolítica (Tabla 5.3).

También se observa que la distribución espacial de los valores altos y bajos de los elementos de ambas asociaciones geoquímicas (Tablas 5.1 y 5.2) presentan una relación inversa entre ellas, es decir, que la asociación *K, Rb, Ba y (Si)* presenta valores altos en aquellos sectores donde la asociación *Ti, Fe, V, (Mn) y (Co)* presentan valores bajos y viceversa. Cabe destacar que con respecto a la relación inversa, que aquellos elementos que componen minerales formadores de rocas básicas (*Fe, Ti, Mn y Ca principalmente*) tienden a disminuir a medida que aumenta el contenido de *Si*, además el *K* aumenta a medida que aumenta el contenido de *Si*. Este comportamiento, en los elementos mayores, ha sido descrito ampliamente en los diagramas de variación de Harker (1909).

5.2.2.2 Asociación *Cu, Na, Ca, Sr, Mo, Mg, (P)*.

El segundo factor definido por el Análisis Factorial, presenta una asociación geoquímica compuesta por los elementos *Cu, Na, Ca, Sr, Mo, Mg, (P), (Cr)* y *(Ni)*. Estos además presentan una relación inversa con el *Y*. Es posible apreciar que entre los elementos de la asociación existen 10 pares correlacionados que presentan correlación lineal ($>0,5$) y el trio *Ca-Mg-Sr* presenta alta correlación positiva ($>0,75$). Además existen 3 pares, *Y-Ca, Y-Cu* e *Y-Sr* en los cuales se observa correlación inversa.

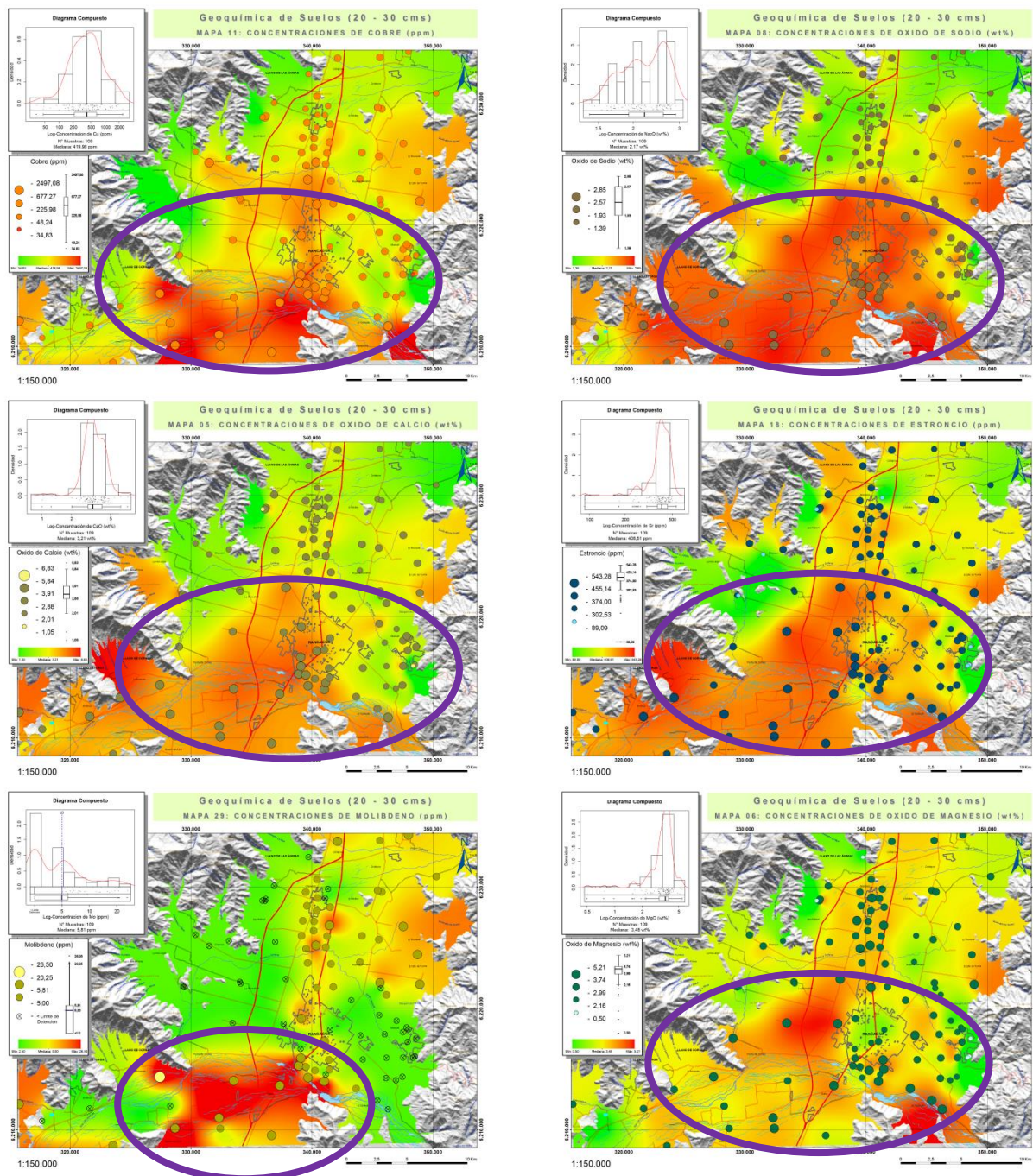
Espacialmente las distribuciones del *Cu, Ca, Mg, Sr, Na* y *P* (Tabla 5.4), se encuentran íntimamente relacionadas a los depósitos aluviales (**PIHa1(a)**), ubicados al sur de Rancagua (*elipse morada*). Estos depósitos aluviales se relacionan con antiguos cursos del río Cachapoal. Los elementos *Ca-Mg-Sr* tienen tendencia a sustituirse en la estructura de los minerales carbonáticos como calcita [CaCO_3] o dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]. (Reimann & de Caritat, 1998). El origen de la presencia de estos elementos podría relacionarse con los procesos químicos de meteorización que ocurren en la interacción de las aguas del río Cachapoal y sus tributarios, ubicados en la alta cordillera del área de estudio, y rocas, de preferencia sedimentarias, con presencia de minerales de tipo carbonáticos y/o evaporíticos altamente solubles en agua. Fuera del área de estudio, hacia el oeste, se presenta el contacto de la Fm. Abanico (**EMa**) con la Formación Farellones (Klohn, 1960), de edad Mioceno Superior. Esta última ha sido descrita como una secuencia de al menos 2.400 m, de lavas intermedias a ácidas y rocas piroclásticas intercaladas con areniscas, lutitas, tufitas y capas finas de caliza. La presencia de rocas sedimentarias tanto en la Fm. Abanico (**EMa**) como en la Fm. Farellones representaría un origen para la presencia de estos elementos. La relación inversa con el *Y* se debe a que este último se presenta relacionado a litologías intermedias a ácidas como las que presenta la Fm. Las Chilcas (**Kilc**).

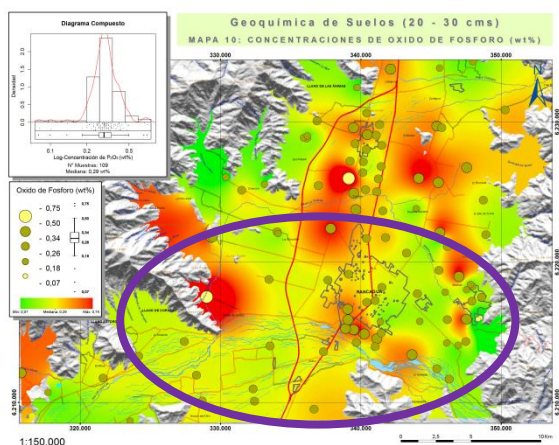
El *Mo* presenta altas concentraciones (>20 ppm) distribuidas preferentemente en la ribera sur del río Cachapoal. En este sector también se presentan altas concentraciones de *Cu* (>1000 ppm). El par elemental *Cu-Mo* tiene un origen natural asociado a la mineralogía existente en pórfido cuprífero de alta ley (Yacimiento El Teniente), emplazado en la alta cordillera. Sin embargo existen antecedentes (ver 5.1.2.1) que indican que la presencia en altas concentraciones de estos elementos se debe a la acción antropogénica. Lacassie (2008), detectó una relación entre el *Cu* y el *Mo* en los sedimentos activos del río Cachapoal y atribuyó el alto contenido de metales en parte a la removilización de material proveniente de los depósitos de relave, uno ubicado en la naciente del río Coya (Tranque Barahona [1919 – a la fecha]) y el otro ubicado en la parte media del curso del río Cachapoal (Tranque Cauquenes [1936 – a la fecha]) (ver Fig. 2.3). Sudzuki en 1960, concluyó en un estudio realizado en ambas riberas del río Cachapoal, que la ribera sur del río presentaba suelos con altas concentraciones de *Cu* debido al uso de aguas de regadío provenientes del mismo río.

Tomando en cuenta los valores anómalos de *Cu* y *Mo*, la particular distribución de este último con respecto a los otros elementos de la asociación geoquímica y los antecedentes expuestos previamente, podemos relacionar la presencia de altas concentraciones de estos elementos con el uso histórico de aguas de riego provenientes del río Cachapoal.

Considerando lo previamente enunciado es posible reconocer, a partir de la señal compleja obtenida, un origen mixto para esta asociación geoquímica, la cual considera un factor cortical importante con un aporte antropogénico, localizado espacialmente en la ribera sur del río Cachapoal.

Tabla 5.4. Distribución Espacial Asociación Geoquímica Cu, Na, Ca, Sr, Mo, Mg, (P), (Cr) y (Ni).





5.2.2.3 Asociación As, S, Ga, Hg, (Ni).

El tercer factor obtenido mediante el Análisis Factorial presenta una asociación geoquímica compuesta por los elementos As, S, Ga, Hg y (Ni). Los pares As-S y Ga-S presentan una correlación lineal positiva (>0,5).

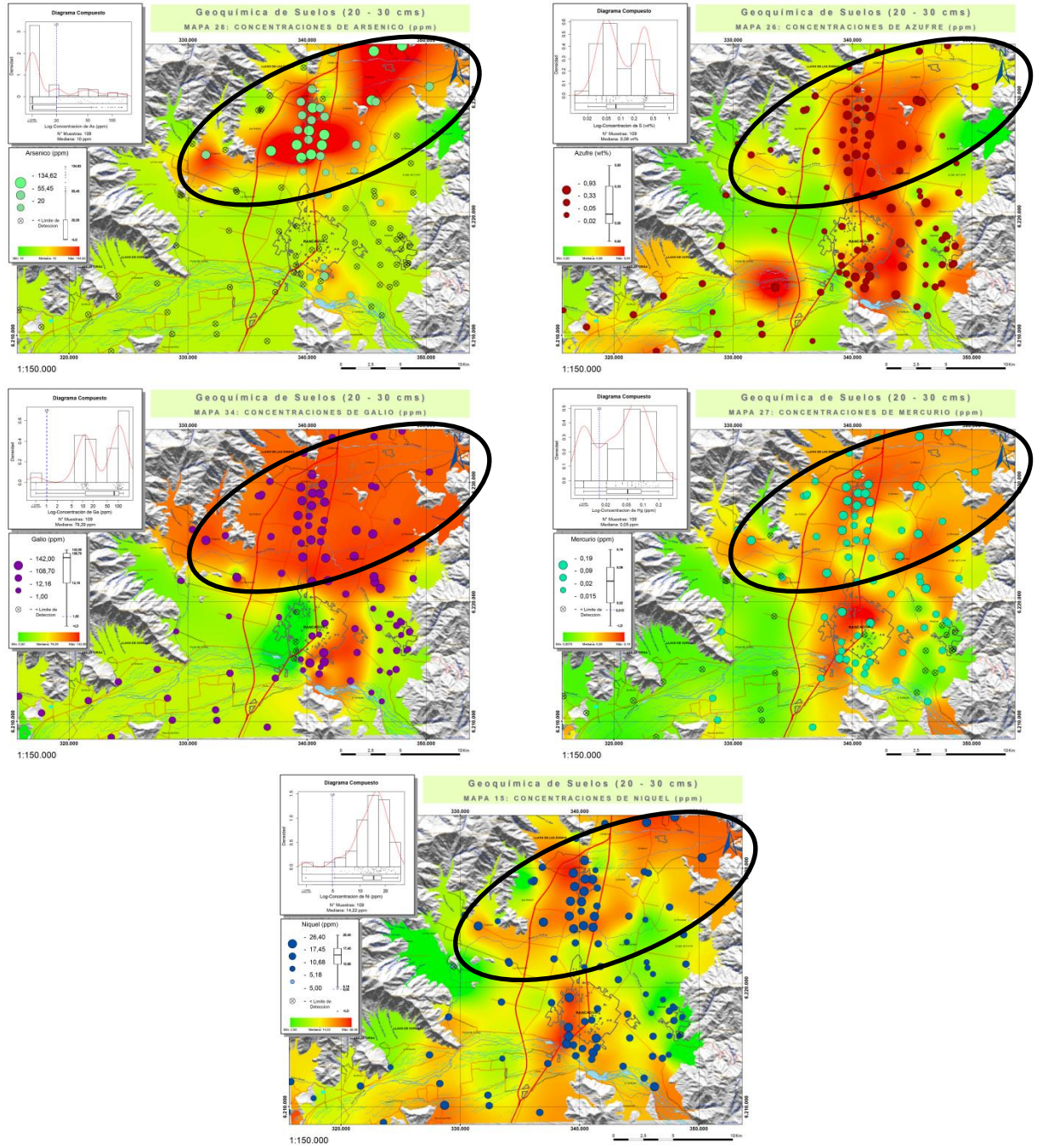
Al observar los mapas de distribución espacial de cada elemento (Tabla 5.5), llama particularmente la atención la distribución que presenta el As (*elipse negra*), la cual presentan sus más altas concentraciones en la zona norte del área de estudio a lo largo del eje Graneros-Codegua, hasta el sector de Tuniche, al sur de la ciudad de Graneros. En este último sector se encuentran concentración de As (>95 ppm), al igual que altos valores de S (0.58 – 0.64 wt%), Ga (>75 ppm), Hg (>0.10 ppm) y Ni (>20 ppm). El As, el Ga y el Hg tienen una tendencia geoquímica de tipo calcófila, es decir tienden a combinarse con el S, además el Ni presenta tendencia calcófila en la corteza terrestre (Kabata-Pendias, 2011). Esto es consistente con las correlaciones lineales obtenidas.

El origen de estos elementos presentes en los suelos no está del todo claro, sin embargo hay que tomar en cuenta que la relación de As y S en la zona ya ha sido estudiada para las emisiones de material particulado fino y grueso por parte de la fundición Caletones (Romo-Kroger, 1994), siendo estos elementos (As y S) los que presentan mayor factor de carga para esta asociación. Si sumamos a esto el hecho de que altas concentraciones se registran en sitios alejados a una fuente emisora importante como lo es la Fundición Caletones (ver Fig. 2.3), es posible sugerir que el enriquecimiento estaría también relacionado a procesos de deposición atmosférica. En efecto, en 1994 Caletones fue declarada zona saturada por anhídrido sulfuroso (SO₂) y material particulado (D.S. N° 179/94 MINSEGPRES). Actualmente la normativa para emisiones de fundiciones de Cu (DS N°28, MMA, 2013) considera límites máximos de emisiones de dióxido de azufre (SO₂), arsénico (As) y mercurio (Hg), tomando en cuenta que las fundiciones de cobre se caracterizan por generar emisiones, tanto en forma fugitiva como por chimeneas. Estas emisiones no sólo contienen SO₂, Hg y As, sino que también pueden contener trazas de otras sustancias tóxicas, tales como Plomo (Pb) entre otros (Ecometales, 2012). Si bien no existen datos públicos por parte de Codelco acerca de las emisiones de Hg y Ni, una asesoría técnica realizada por el MMA (2012) indica que en la fundición Caletones “no existen antecedentes a futuro de procesamiento de concentrados con contenidos de Hg en esta instalación, aunque existen registros en los

concentrados del 2010...”, lo cual asegura que en determinados casos existe procesamiento de concentrados con contenido de Hg. En 1998 se estableció el Plan de Descontaminación Atmosférica (D.S. N° 081/98 MINSEGPRES) lo cual ha llevado a que la fundición Caletones disminuya sus emisiones. La deposición y acumulación de material particulado emitido por la planta a través del tiempo [1922 – a la fecha] debe ser considerada al momento de relacionar el impacto generado con las emisiones.

Los modelamientos 3D de los campos de vientos presentes en el punto 2.4 del presente texto entregan indicios de que la circulación de vientos permite en determinadas situaciones que masas de aire con alta carga de material particulado, provenientes de Caletones, bajen hacia el valle pudiendo impactar el sector de la comuna de Codegua (Fig. 2.8). La Fig. 2.10 sugiere que la recirculación de las masas de aire en el valle también podría generar un impacto en el sector de Graneros, debido a los aportes de masas de aire provenientes desde Rancagua y en especial desde Codegua. Esto es consistente con los altos valores registrados y la particular distribución para los elementos presentes en esta asociación geoquímica.

Tabla 5.5. Distribución Espacial Asociación Geoquímica As, S, Ga, Hg y (Ni).



5.2.2.4 Asociación C, P, (Mn), (Fe), (Ca), (Co); -Si.

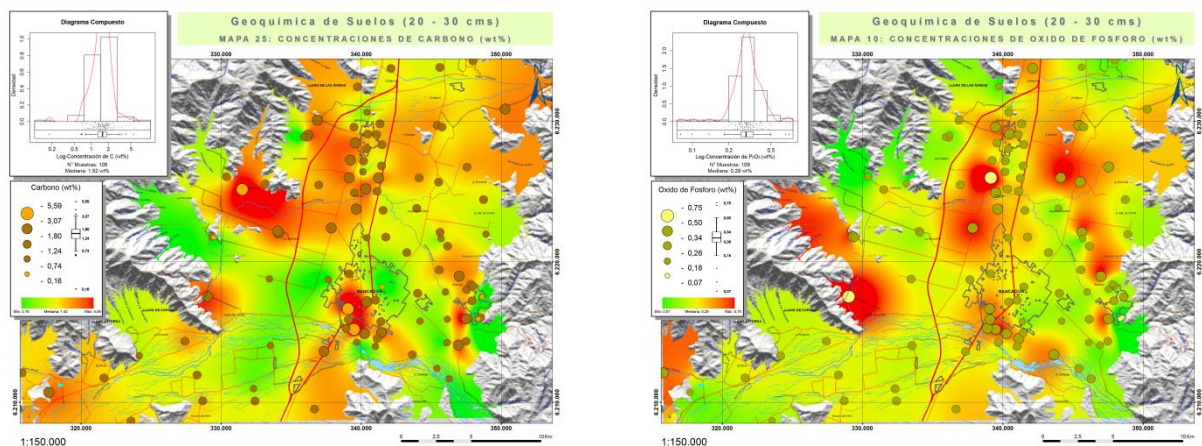
El cuarto factor definido por el Análisis Factorial presenta una asociación geoquímica compuesta por los elementos C, P, (Mn), (Fe), (Ca) y (Co), además se presenta una relación inversa con el Si. El análisis de correlación múltiple muestra que los pares Ca-Si, C-Si y Fe-Si presentan correlación lineal inversa importante ($<-0,5$).

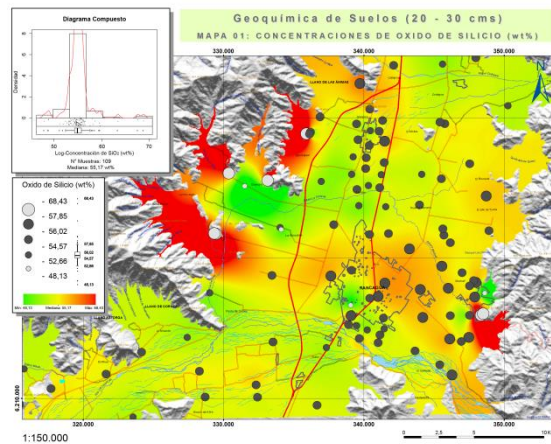
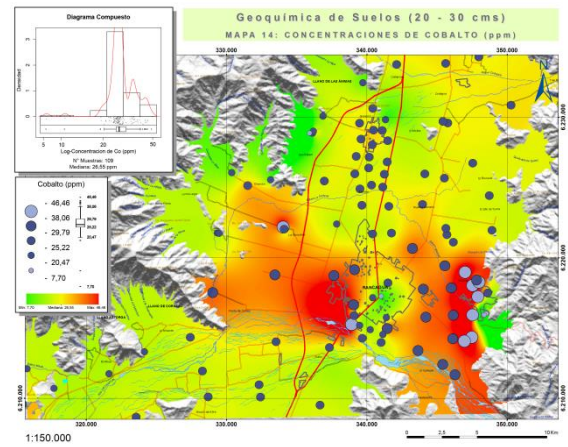
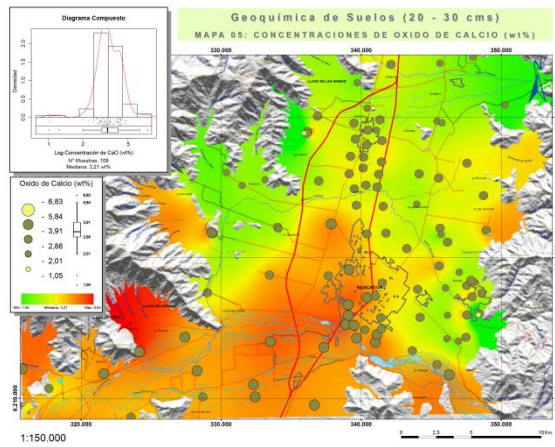
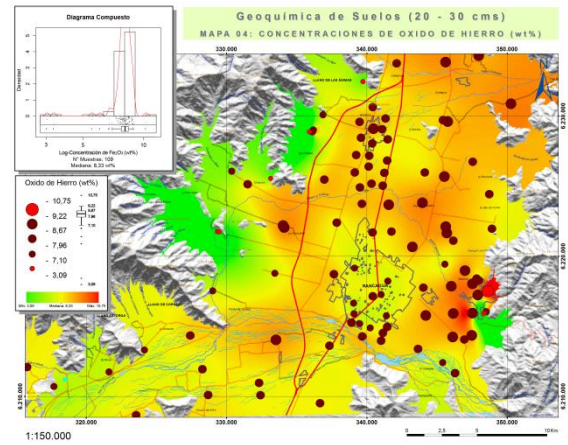
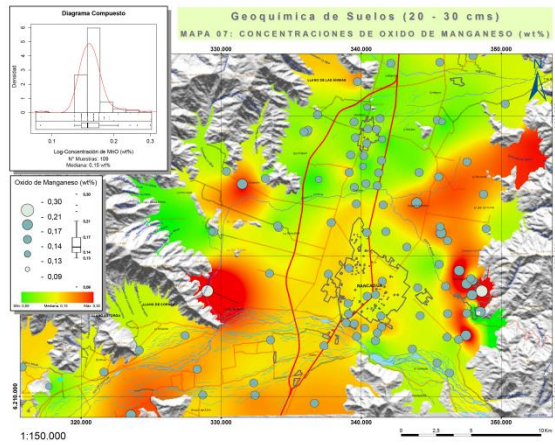
La biósfera terrestre y el suelo representan una gran reserva de C ya que gran parte del C presente se encuentra en los suelos agrícolas ya sea en forma viviente o en descomposición (Kabata-Pendias, 2011). Los suelos presentes en el valle interior de la zona de estudio tienen contenidos de materia orgánica $<4\%$ (Bonilla, 2012). Este valor concuerda con el rango obtenido para el C en este estudio.

Tomando en cuenta lo anterior y además sumado al hecho que la adición de P por medio de la utilización de fertilizantes fosforados a los suelos destinados a uso agrícola es común debido a que es uno de los macronutrientes de mayor importancia para cualquier tipo de cultivo, no es de extrañar que la relación espacial (Tabla 5.6) entre estos elementos no se encuentre restringida a una zona en específico del área de estudio, sino que más bien se encuentre dispersa por toda el área. En especial el valor más alto ocurre en suelos con viñedos, caracterizados por ser muy húmedos y ricos en materia orgánica.

Kabata-Pendias (2011), afirma que formas cristalinas de minerales fosfáticos tienen baja ocurrencia en los suelos, sin embargo, sugiere que variadas formas de fosfatos metaestables son importantes en los procesos pedogénicos. El P se encuentra en los suelos tanto en forma orgánica como inorgánica y por lo general, sus formas inorgánicas están relacionadas con Fe y Mn en suelos de pH ácido y con Ca en suelos alcalinos. También la descomposición de la materia orgánica (C) y los residuos de cultivos contribuyen al P disponible.

Tabla 5.6. Distribución Espacial Asociación Geoquímica C, P, (Mn), (Fe), (Ca) y (Co); -Si.



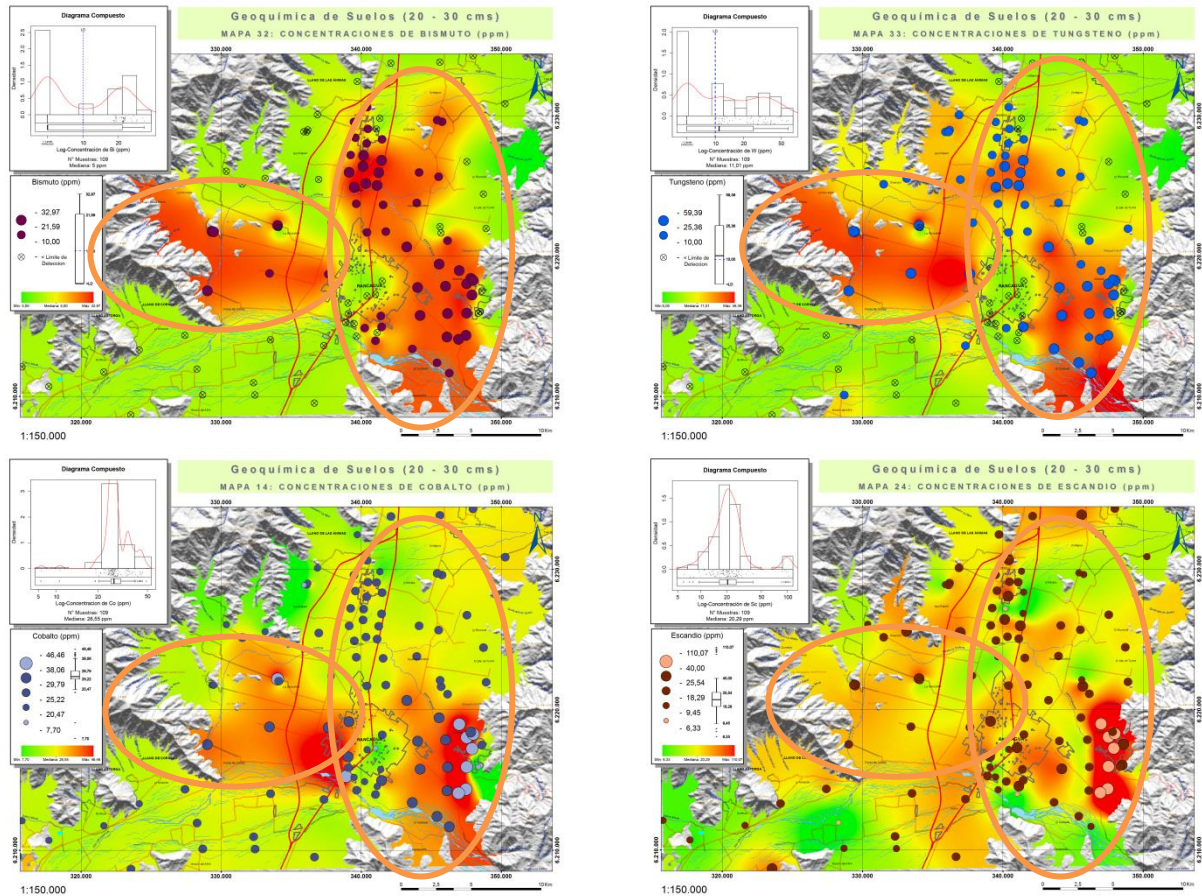


Con respecto a la relación inversa con el Si, no es de extrañar que ocurra aquello considerando que el Si es el elemento con mayor concentración y el C presenta concentraciones >1 wt%. Debido al problema de cierre de los datos composicionales es bastante probable que un aumento en la concentración de C implique una disminución en la proporción de Si.

5.2.2.5 Asociación *Bi*, *W*, (*Co*), (*Sc*).

El quinto factor definido por el Análisis Factorial presenta una asociación geoquímica compuesta por los elementos *Bi*, *W*, (*Co*) y (*Sc*). El análisis de correlación múltiple muestra que el par *Bi*-*W* presenta una alta correlación positiva (>0,75).

Tabla 5.7. Distribución Espacial Asociación Geoquímica *Bi*, *W*, (*Co*) y (*Sc*).



La relación entre el *Bi* y el *W* (*elipse naranja*) que se aprecia en este estudio (Tabla 5.7) no se encuentra del todo clara. De acuerdo a la clasificación geoquímica de Goldschmidt (1937, 1954), el *Bi* presenta afinidad calcófila, es decir tendencia a unirse al *S*, como litófila, es decir afinidad por los silicatos, en cambio el *W* sólo presenta afinidad litófila. El *Bi* se encuentra relacionado a menas de *Cu*, *Ag*, *Au* o *W* y se extrae como sub-producto de algunas de ellas. Existen antecedentes de que ambos elementos se usan para la elaboración de aleaciones metálicas. El *Bi* se usa para aleaciones con bajo punto de fusión y el *W* se usa para aleaciones de alta dureza, alta resistencia al desgaste y alta resistencia a la corrosión (Kabata-Pendias, 2011). Cabe destacar que una de las principales aleaciones en las que se usa el *W* se denomina carburo cementado de tungsteno o “metal duro”, el cual está compuesto de carburo de Tungsteno (*WC*) con un contenido de *Co* entre 5-10%. El cobalto se usa como aglomerante de las partículas de *WC* (ITIA, 2011). Al parecer, en cierta medida, la relación entre estos tres elementos se encontraría relacionada al uso de estos, en piezas mecánicas y equipamientos utilizados tanto en la actividad minera como en la actividad agrícola, aunque no se puede descartar un origen natural.

Acorde a Kabata-Pendias (2011), el *Sc* presentaría afinidad para formar complejos con el *Co* en el suelo. Cabe recordar que la proporción natural de *Co* en los suelos se encuentra controlada por la presencia de óxidos de *Ti* y *Fe* (ver 5.2.2.1). En los puntos donde se aprecian los máximos de *Co* y *Sc*, también hay valores altos de *Ti* y *Fe*. Esta posible mezcla de señales químicas da cuenta de lo compleja que es la geoquímica estudiada.

5.2.2.6 Asociación *Zn, Ga; -Cr*.

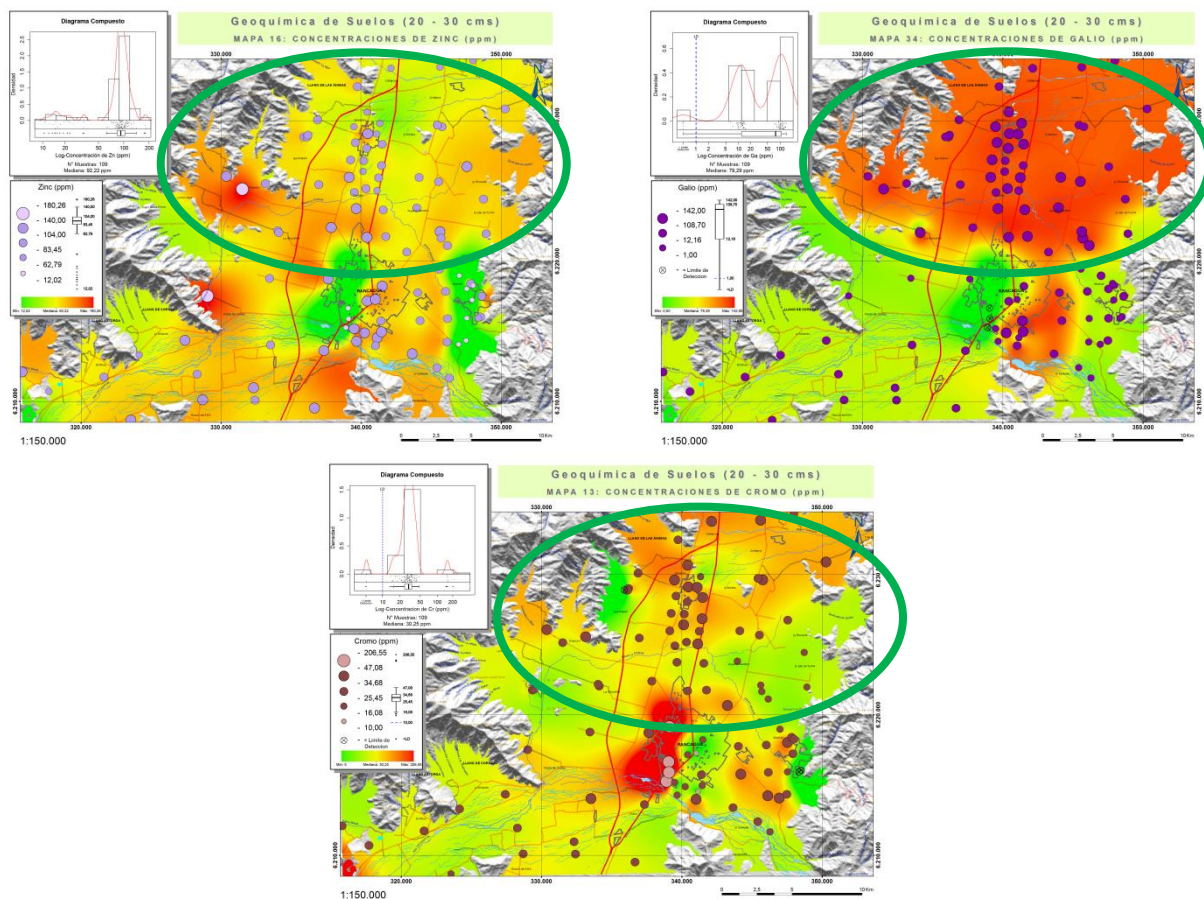
El sexto factor definido por el Análisis Factorial, presenta una asociación geoquímica compuesta por los elementos *Zn* y *Ga*, además se presenta una relación inversa con el *Cr*. El análisis de correlación múltiple muestra que el par *Zn-Ga* presenta una correlación lineal positiva ($>0,5$) y el par *Zn-Cr* presenta una correlación lineal inversa ($<-0,5$).

El origen del *Zn* en el área de estudio se relaciona con la roca parental así también ha sido reconocido como producto de la removilización por la actividad antrópica (ver 5.1.2.5).

La relación entre el par elemental *Zn-Ga*, según Reimann & de Caritat (1998), se debe a que el *Ga* se encuentra fuertemente asociado a la presencia de *Zn*. Esto es consistente con lo reflejado en ACM y el AF. Espacialmente (Tabla 5.8), los valores altos de *Ga* se encuentran preferentemente ubicados en la parte norte del área de estudio (*elipse verde*), asociado a depósitos aluviales (***PIHa2***). Esto concuerda con el hecho que el *Ga* se correlaciona positivamente con la fracción arcilla (Kabata-Pendias, 2011) ya que los depósitos aluviales (***PIHa2***) presentarían una mayor proporción de arcillas con respecto a los depósitos aluviales (***PIHa1(a)***) ubicados al sur.

Con respecto a la relación inversa con el *Cr*, se debe principalmente a la diferencia en concentraciones para estos elementos en los puntos de muestra localizados en la zona urbana de Rancagua. Se presentan los valores más bajos de *Ga* y *Zn* en contraste con los valores más altos de *Cr*. Las zonas urbanas pueden estar afectadas por procesos antrópicos de escala local, por esta razón no se puede descartar un origen antropogénico para aquellas concentraciones (señal compleja).

Tabla 5.8. Distribución Espacial Asociación Geoquímica Zn y Ga; -Cr.

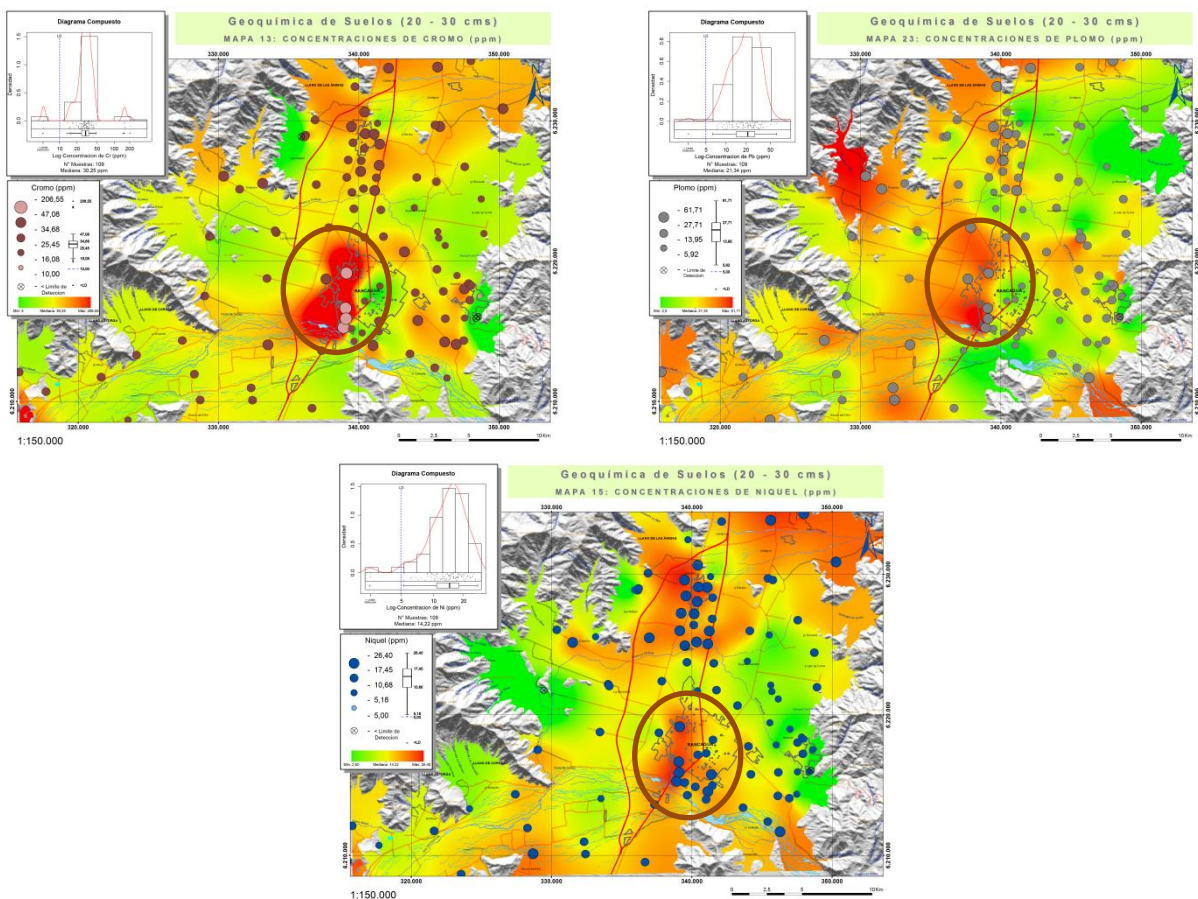


5.2.2.7 Asociación Pb, Cr y Ni.

El séptimo factor definido por el Análisis Factorial, presenta una asociación geoquímica compuesta por los elementos *Pb*, *Cr* y *Ni*. Espacialmente (Fig. 28) se puede observar que el *Pb*, el *Cr* y el *Ni* presentan altos valores en los puntos de muestreo de tipo urbano ubicados en el segmento oeste de la ciudad de Rancagua (*elipse café*). Particularmente el *Cr* presenta valores muy por sobre la mediana (>100 ppm) en aquellos puntos.

Diversos estudios apuntan a reconocer que esta asociación elemental permite trazar la actividad humana, ya sea de tipo industrial o urbana, asociada al uso de combustibles fósiles.

Tabla 5.9. Distribución Espacial Asociación Geoquímica *Pb*, *Cr* y *Ni*.



El *Pb*, elemento que presenta el mayor factor de carga de esta asociación, es uno de los elementos que más extensamente ha sido utilizado por el ser humano. El enriquecimiento antropogénico de este elemento comúnmente ha sido relacionado a actividad industrial (Salminen *et al.*, 2005). Cabe recordar que hasta el 2001 en Chile se usaban gasolinas con *Pb* (MMA, 2011). Además Salma (2005), afirma que el *Cr* presente en el material particulado se asocia al tráfico vehicular. Moreno (2010), concluye que la industria y el tráfico vehicular son capaces de emitir ciertos elementos traza como el *Ni* en cantidades suficientes como para generar enriquecimiento. Valdés (2013), reconoció al *Cr* y al *Ni* como parte de la traza química asociada a la combustión de petróleo.

5.3 Comparación con Normas Internacionales

Del total de los elementos que componen el suelo, existe un grupo de elementos traza (incluye metales y metaloides) que en altas concentraciones representan potencialmente un serio riesgo para la calidad medio ambiental. Dentro de este grupo se encuentran los siguientes elementos: *Arsénico (As)*, *Berilio (Be)*, *Cadmio (Cd)*, *Cromo (Cr)*, *Cobre (Cu)*, *Mercurio (Hg)*, *Níquel (Ni)*, *Plomo (Pb)*, *Selenio (Se)*, *Talio (Tl)*, *Vanadio (V)*, *Zinc (Zn)*, y algunos lantánidos y actínidos (Alloway et al., 2013). Además hay que tomar en cuenta que generalmente existe una relación directa entre la actividad humana (agrícola, industrial o urbana) y los lugares en donde se encuentran suelos enriquecidos en estos elementos (Kabata-Pendias, 2011).

De acuerdo a lo anterior, y tomando en cuenta los elementos muestreados en este estudio, se adjunta en la tabla 5.10 un resumen de los valores críticos que han sido definidos según diferentes legislaciones internacionales estudiadas (ver 3.3.4), los cuales serán utilizados para ser comparados con las concentraciones medidas en este estudio a fin de realizar una evaluación de primer orden acerca de la calidad medio ambiental de los suelos presentes en el área de estudio.

Tabla 5.10. Resumen criterios establecidos para la calidad de suelos.

	Canadá	Holanda	¹ Alemania	Brasil (Sao Paulo)
----- mg/kg suelo seco -----				
	Uso Agrícola	² VI		² VI / Uso Agrícola
As	12	55	20	35
Co	35	240	-	35
Cr^{total}	64	380	100	150
Cu	63	190	100	200
Hg	6.6	10	1	12
Mo	15	200	-	50
Ni	50	210	70	70
Pb	70	530	100	180
Sb	20	15	-	-
V	130	250	-	-
Zn	200	720	200	450

¹ Se utilizaron valores más altos para cada elemento, independiente del tipo de suelo.

² Valor de Intervención: Nivel sobre el cual las propiedades funcionales del suelo para humanos, plantas y animales se encontrarían seriamente deterioradas.

- **Cobre:** Gran parte (>75 %) de las concentraciones totales más altas de *Cu* se encuentran por sobre todas las normativas. Esto no es de extrañar considerando que la mediana registrada en este estudio se perfila sobre los 400 ppm. Si bien en este estudio se midieron las concentraciones totales de *Cu* en el suelo, por lo cual estos valores no cuantifican el potencial riesgo real de la presencia de estas altas concentraciones, existe un antecedente en el estudio de Ahumada *et al.* (2004), el cual registró valores >200 ppm de *Cu* en la fracción soluble e intercambiable al sur del río Cachapoal (Km 97-99, Ruta 5 Sur). Cabe destacar que ambas fracciones son las primeras fases en ser extraídas durante el proceso de extracción

secuencial (Fig. 5.9) y por lo general, son las fracciones más biodisponibles para las plantas y otros organismos vivos. Esta información es consistente con los resultados obtenidos en este estudio. Ambas representan un indicio sobre un potencial problema en la calidad de los suelos, asociada a las altas concentraciones de *Cu* reconocidas en ambas riberas del río Cachapoal.

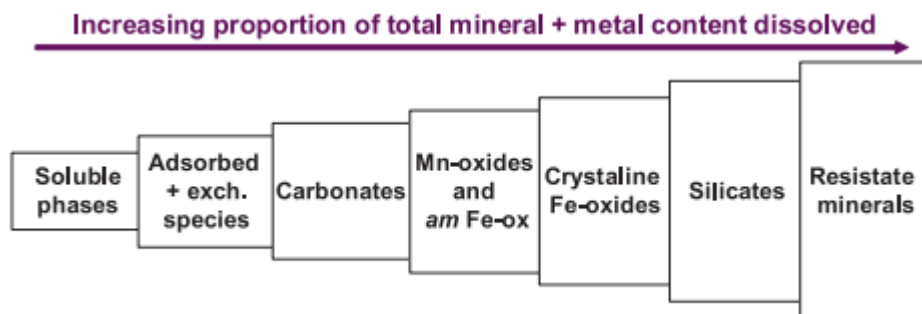


Figura 5.1. Relación entre la proporción total elemental y la fase extraída. Modificado de Cohen *et al.* (2010).

- **Arsénico:** Al menos el 21% de las concentraciones más altas de *As* superan las normas de Alemania, Brasil y Canadá, y el 10% superior de los valores de *As* supera todas las normativas contrastadas. Este estudio midió concentraciones totales y además no consideró análisis para generar información acerca de la especiación de *As*, por consiguiente no se puede hacer una evaluación adecuada con respecto a si dichas concentraciones representan un potencial problema. Sin embargo, información levantada por Ascar (2006), indica que en aquel estudio, gran parte del *As* medido en el sector de Graneros se encontraba en su forma pentavalente [*As(V)*], la especie inorgánica de *As* que presenta una menor toxicidad y movilidad. Además, el estudio de Ahumada *et al.* (2004), el cual también se desarrolló en suelos agrícolas del sector de Graneros, indica que sólo una pequeña parte del *As* (<2 ppm) medido se presenta en la fracción soluble e intercambiable.
- **Antimonio:** Aproximadamente el 35% de las concentraciones más altas de *Sb* superan la normativa holandesa y canadiense, que son las únicas que presentan valores definidos para este elemento. El Antimonio reviste un particular interés para los estudios medio ambientales debido a que pertenecen junto al *As* al mismo grupo en la tabla periódica, e incluso se asume que su comportamiento geoquímico y toxicidad son similares, pero a diferencia del *As* que se encuentra ampliamente estudiado a nivel mundial, las investigaciones con respecto al real riesgo medio ambiental del *Sb* están faltos de mayores evaluaciones y pruebas. Incluso se cree que tal vez podría comportarse de una manera mucho menos tóxica que el *As* (Alloway *et al.*, 2013).

- **Cobalto:** Aproximadamente el 12% de las concentraciones más altas de este elemento superan ligeramente las normas canadiense y brasileña. Sin embargo, se encuentran muy por debajo del valor de intervención de la norma holandesa. Además hay que tomar en cuenta que acorde a Alloway *et al.* (2013), la ocurrencia de casos de contaminación con Cobalto en suelos es rara, e incluso la toxicidad con Co es aún más improbable.
- **Molibdeno:** Aproximadamente el 8% de las concentraciones más altas de Mo superan la normativa canadiense, la cual presenta el criterio más bajo para este elemento. Frente a las otras tres normativas observadas, todos los puntos presentan concentraciones bajo el valor de intervención.
- **Cromo:** Los valores más altos de Cr (3% del total), registrados en suelos urbanos de Rancagua y Machalí, superan la norma canadiense, la norma alemana y ligeramente la norma brasileña. Sin embargo, frente a la normativa holandesa, los valores máximos medidos se encuentran muy por debajo del valor de intervención.
- **Vanadio:** Casi la totalidad (>90%) de las concentraciones muestreadas supera la norma canadiense. Sin embargo, ningún punto de muestreo supera el valor de intervención definido para este elemento según la norma holandesa.
- **Plomo, Mercurio, Níquel y Zinc:** Todas las concentraciones obtenidas para estos elementos no superan los valores críticos definidos en las normas contrastadas.

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

La aplicación de la metodología estudiada, en conjunto a la aplicación de diversas técnicas estadísticas han permitido el análisis, en orden secuencial, de la base de datos (BD) geoquímica del área de estudio. Durante la realización del análisis se desarrollaron los siguientes pasos:

- Orden de la BD (Análisis exploratorio).
- Depuración de la BD (Control de calidad).
- Tratamiento Matemático de la BD (Isometric Log-Ratio Transformation (**ilr**)).
- Caracterización de los Datos (Análisis estadísticos básicos y diagramas compuestos).
- Desarrollo de Línea Base Geoquímica (Concentración y distribución espacial elemental).
- Asociación de las variables en pos de disminuir la dimensionalidad de los datos, caracterizar asociaciones geoquímicas e identificar posibles fuentes de proveniencia (Factor de enriquecimiento, análisis de correlación múltiple, análisis de componentes principales y análisis factorial).
- Evaluación de primer orden acerca de la calidad medio ambiental de los suelos presentes en el área de estudio (Comparación con normas internacionales).

La aplicación de la Isometric Log-Ratio Transformation (*ilr*) permite dar solución al problema estadístico que presentan los datos de tipo composicional. Esta transformación, en relación a la aplicación de técnicas estadísticas más robustas y sofisticadas sobre una base de datos geoquímica, representa un avance hacia una mayor y mejor comprensión del medio estudiado.

El desarrollo de la línea base geoquímica de los suelos agrícolas y urbanos del área de estudio permite conocer las concentraciones y distribución elementales actuales en el área de interés. Esto da la posibilidad de poder cuantificar cambios en el futuro, ya sean debido a procesos de origen natural o antropogénico.

La aplicación de diversos métodos estadístico-matemáticos como lo son el Factor de Enriquecimiento, el Análisis de Correlación Múltiple, el Análisis de Componentes Principales y el Análisis Factorial sobre la base de datos geoquímica levantada permitió interpretar la información contenida, logrando caracterizar asociaciones geoquímicas e identificando posibles fuentes de proveniencia, en pos de obtener un mejor entendimiento de la compleja dinámica que moldea la química de los suelos agrícolas y urbanos en la zona de interés.

Los principales resultados del estudio muestran que gran parte de los elementos mayores y los elementos traza presentan concentraciones y distribución elementales influenciadas preferentemente por procesos naturales de tipo geológico o pedogénico en los suelos de la zona de estudio. Una de las principales fuentes es la geología del área de estudio, la cual está constituida por todas las unidades presentes en la zona de interés, siendo la Fm. Las Chilcas (**Kilc**), la Fm. Abanico (**EMa**) e Ignimbrita Pudahuel (**Plip**) las que proporcionalmente influyen de mayor manera.

La mayoría de las actividades relacionadas con el quehacer humano generan un impacto en los suelos. Entre las fuentes (procesos) identificados en la zona de estudio se encuentran la actividad minera, la actividad agrícola intensiva y la presencia de zonas densamente urbanizadas principalmente. Estas actividades de carácter antropogénico remobilizan elementos químicos generando variaciones en las concentraciones en forma localizada o en forma más amplia, dependiendo de la naturaleza de la fuente. Elementos como el *K, V, Co, Zn, Ni, Hg, Bi, W y Ga* presentan una fuente mixta de origen, asociada a procesos geogénicos/pedogénicos naturales como a aportes de carácter antrópico. Elementos como el *Cu, As, Mo, P* presentan una marcada removilización asociada a fuentes antropógenas, esto se caracteriza por la presencia de concentraciones muy por sobre los valores considerados habituales.

Se reconocieron 7 asociaciones geoquímicas mediante los análisis multivariable. Las primeras dos asociaciones (*[Ti, Fe, V, (Mn), (Co)]*; *[K, Rb, Ba, (Si)]* y *[Cu, Na, Ca, Sr, Mo, Mg, (P), (Cr), (Ni)]*), cada una por separado, se encuentran relacionadas íntimamente a los procesos naturales de tipo geológico o pedogénico que han dado origen a los suelos de la zona de estudio. En relación a procesos antropogénicos destacan las asociaciones *Cu-Mo* y *As-S-Ga-Hg-Ni*. Ambas presentan un origen asociado a la removilización de material producto de la actividad minera de metales base desarrollada en la alta cordillera del área de estudio (Mina El Teniente, CODELCO). En especial, las altas concentraciones y distribución que presenta el par elemental *Cu-Mo* se relacionan al uso de aguas de regadío provenientes del río Cachapoal. El alto contenido de metales en las aguas del río se debe en parte a la removilización de material proveniente de los depósitos de relave, Tranque Barahona y Tranque Cauquenes, ubicados aguas arriba. La asociación *As-G-Ga-Hg-Ni*, tiene su origen en las emisiones de material particulado por parte de la fundición Caletones. Destaca también la asociación *C-P-Mn-Fe-Ca-Co*, relacionada con la intensa actividad agrícola desarrollada en la zona y la asociación *Pb-Cr-Ni*, relacionada con la combustión de combustibles fósiles en el ámbito urbano e industrial.

Desde el punto de vista medio ambiental, la determinación de determinación del contenido total y la posterior comparación con normativas de suelos internacionales representa solo un acercamiento de primer orden sobre la calidad y el potencial impacto ambiental de los suelos presentes en el área de estudio. El *Cu*, el *As* y el *Sb* revisten el mayor interés ya que presentan, en determinados casos, concentraciones que se encuentran por sobre los valores definidos como aceptables en las diferentes normativas internacionales consultadas. Se reconoce en aquellos elementos la capacidad de ser potencialmente peligrosos para la calidad medio ambiental y para la salud humana.

Debido a la importancia económico-social de la actividad minera como de la actividad agrícola, tomando en cuenta también la cercanía de ambas con zonas densamente pobladas, es imprescindible complementar la información levantada en el área de interés, con estudios multi-disciplinarios más acabados, en especial respecto de las altas concentraciones registradas en determinados elementos considerados potencialmente peligrosos. Es por esto que se recomienda contar a futuro no tan sólo con la línea base geoquímica, sino que también con información relacionada con otros parámetros, como es la especiación (operacional, funcional o química) de los elementos, para generar información más detallada sobre su movilidad y fito-bio-disponibilidad. Un conocimiento más acabado de los procesos de interacción que afectan a estos elementos

es necesario para poder prevenir cualquier problema asociado a ellos en el mediano y largo plazo.

Se recomienda también el desarrollo de estudios similares en suelos agrícolas y/o urbanos emplazados cerca de faenas de minería de metales base, u otras industrias reconocidas por su capacidad de removilizar elementos traza potencialmente perjudiciales.

Bibliografía

Aguirre, L. 1960. Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín No. 9, 70 p. Santiago.

Ahumada, I., Escudero, P., Ascar, L., Mendoza, J., Richter, P., 2004. Extractability of arsenic, copper, and lead in soils of a mining and agricultural zone in central Chile. *Commun Soil Plant Anal* 35:1615–1634

Aitchinson, J. 1986. The Statistical Analysis of Compositional Data. London: Chapman and Hall.

Allen, H. E. (Editor). 2002. Bioavailability of Metals in Terrestrial Ecosystems: Importance of Partitioning for Bioavailability to Invertebrates, Microbes, and Plants. Pensacola, FL, USA: SETAC.

Alloway, B. (Editor). 2013. Heavy Metals in Soils. 3rd edition. Environmental Pollution Series, Springer, 615 p.

Artaxo, P., Oyola, P., Martinez, R., 1999. Aerosol composition and source apportionment in Santiago de Chile. *Nucl Instrum Methods Phys Re Sect B-Beam Interact Mater Atoms* 150:409–416

Ascar, L., Ahumada, I., Richter, P., 2008a. Effect of biosolid incorporation on arsenic distribution in Mollisol soils in central Chile. *Chemosphere* 70:1211-7. 2008

Ascar, L., Ahumada, I., Richter, P., 2008b. Influence of redox potential (Eh) on the availability of arsenic species in soils and soils amended with biosolid. *Chemosphere* 72:1548-52. 2008

Ascar, L. 2006. Distribución de Especies Inorgánicas y Orgánicas de Arsénico en Suelos Tratados con Biosólidos. Tesis para optar al grado académico de Doctor en Química. Universidad de Chile. 144 p.

Astudillo, F., Lacassie, J. P., Baeza, L., Barrera, J., Carrasco, F., Castillo, P., Espinoza, F., Figueroa, M., Miralles, C., Muñoz, N., Ramírez, C., Salinas, P. 2014. Geoquímica de sedimentos de la Hoja Pisagua, Regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geoquímica 2: 131 p., 1 mapa interactivo escala 1:250.000, 2 anexos. Santiago.

Baeza, L., Lacassie, J. P., Astudillo, F., Barrera, J., Carrasco, F., Castillo, P., Espinoza, F., Figueroa, M., Miralles, C., Muñoz, N., Ramírez, C., Salinas, P. 2014. Geoquímica de sedimentos de la Hoja Arica, Región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geoquímica 3: 142 p., 1 mapa interactivo escala 1:250.000, 2 anexos. Santiago.

BBoSchG (Bundes-Bodenschutzgesetz). 1998. Act on Protection against harmful changes to Soil and on Rehabilitation of Contaminated Sites. (Federal Soil Protection Law) 17.3.1998, Bundes-Gesetz-Blatt (Federal Law Gazette), I, 502, 1998.

Bonilla, C., Johnson, O. 2012. Soil erodability mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, 189-190, 116-123.

Bowen, H. 1980. Environmental chemistry of the elements. Academic Press. New York. 333

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 2007. Canadian soil quality guidelines for the protection of the environmental and human health. Summary tables. Updated Sept, 2007. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). 2005. Decisão de Diretoria Nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Sólidos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências.

Chester. R. & Stoner J. H. 1973. Pb in particulates from the lower atmosphere of the eastern Atlantic. *Nature* 1973; 245:27– 8.

CIREN-CORFO, 2002. Estudio agrologico Sexta Region. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Publicación CIREN - Centro de Información de Recursos Naturales nº 114. Santiago, 1996, 2 v. 474 p.

Cohen, D.R., Kelley, D.L., Anand, R., Coker, W.B. 2010. Major advances in exploration geochemistry, 1998–2007. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10, pp. 3–16

Darnley, A.G. 1997. A global geochemical reference network: the foundation for geochemical baselines. *Journal of Geochemical Exploration*, 60 (1), 1–6.

Darnley. A. G., Bjirklund, A., Bolviken, B., Gustavaon, N., Koval, P., Plant, J. A., Steenfelt, A., Tauchid, M., Xie, X., Garrett, R. G. & Hall, G. E. M. 1995. A global geochemical database for environmental and resource management. Recommendations for international geochemical mapping. Final report of IGCP-project 259. UNESCO, Paris.

De Gregori, I., Rojas, M., Pinochet, H., Fuentes Pérez, E., Potin-Gautier, M., 2003. Monitoring of copper, arsenic and antimony levels in agricultural soils impacted and non-impacted by mining activities, from three regions in Chile. *Journal of Environmental Monitoring* 5(2):287-295.

Duce, R. A., Hoffmann, G. L., Zoller, W. H. 1975. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural? *Science*, 187, 59-61.

Ecometales, 2012. Reporte de Sustentabilidad. En: http://www.ecometales.cl/wp-content/uploads/2013/07/EcoMetales_Espanol2012.pdf.

Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., Barceló-Vidal, C. 2003. Isometric log-ratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology* 35(3), 279–300.

ESRI, 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C., 2010. Bivariate statistical analysis of environmental (compositional) data. *Sci Total Environ*; 408: 4230–8.

Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C. 2009. **Univariate** statistical analysis of environmental (compositional) data. *Sci Total Environ*; 407:6100–8.

Filzmoser, P., Croux, C. 2003. Dimension reduction of the explanatory variables in multiple linear regression. *Pliska Stud. Math. Bulgar.*, Vol. 14, pp. 59-70.

Galán, E. & Romero, A. 2008. Conferencia: Contaminación de suelos por metales pesados. En: http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf.

Garrett, R. G. 1991. The management, analysis and display of exploration geochemical data. Exploration geochemistry workshop. Ottawa: Geological Survey of Canada; 1991. Open File 2390.

Godoy, E., Schilling, M., Solari, M., Fock, A. 2009. Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 118: 50 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Goldschmidt, V. M. 1937. The principles of chemicals in minerals and rocks. *Journal of the Chemical Society*, 655–673.

Goldschmidt, V. M. 1954. *Geochemistry*. Clarendon Press, Oxford.

Harker, A. 1909. *The natural history of igneous rocks*. Macmillan, New York

Hawkes, H. E. & Webb, J. S. 1962. *Geochemistry in Mineral Exploration*. New York: Harper.

IGM. 2008. *Atlas Mundial*. Instituto Geográfico Militar, 156 p. Santiago.

INIA, 1990. Fuentes de Contaminación con residuos de plaguicidas, organoclorados y metales pesados en sectores agrícolas, regiones IV a XI. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Informe Final. Proyecto FIA 1/86.

IUGS/IAGC Task Group on Global Geochemical Baselines Annual Report. 2014. En: <http://www.globalgeochemicalbaselines.eu/>

Iriarte, A. 2007. Evaluación espacial de la lixiviación potencial de nitratos en suelos de la subcuenca del río Cachapoal bajo. Memoria para optar al título de Geógrafo, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 124 p

ITIA (International Tungsten Industry Association), 2011. Information on tungsten: sources, properties and uses. En: <http://www.itia.info/wc-and-co.html>

Janssen, C. R., De Schamphelaere, K., Heijerick, D., Muysen, B., Lock, K., Bossuyt, B., Vangheluwe, M., Van Sprang, P. 2000. Uncertainties in the environmental risk assessment of metals. *Human and Ecological Risk Assessment*, 6, 1003-1018.

Kabata-Pendias, A., 2011. *Trace elements in soils*. 4rd Ed. Boca Raton, London, New York, CRC Press. 467 pp.

Kelm, U., Sanhueza, V., Guzmán, C. 2003. Filtration and retention of mineral processing slurries with pumice and common clay: low-cost materials for environmental applications in the small-scale mining industry. *Applied Clay Science*, v.24, pp.35-42

Klöhn, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Boletín N°8, 95 p. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.

Lacassie, J. P., Astudillo, F., Baeza, L., Castillo, P., Figueroa, M., Muñoz, N., Ramírez, C. 2012. Geoquímica de sedimentos de la Hoja Iquique, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geoquímica 1: 41 p., 1 mapa interactivo escala 1:250.000, 2 anexos (1 DVD versión 1.0). Santiago.

Lacassie, J. P. 2008. Estudio Mineralógico y Geoquímico del Sistema Fluvial del Río Rapel, VI Región, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). Informe Registrado IR-08-37. 66 p. Santiago.

Loska, K., Cebula, J., Pelczar, J., Wiechula, D., Kwapilinski, J. 1997. Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution* 1997; 93:347– 65.

Luzio, W., Alcayaga, S. 1992. Associations map of big soil groups in Chile. *Agric Technica (Chile)* 347–353.

MINSEGPRES, 1998. D.S. N°81 de 1998. Establece plan de descontaminación para el área circundante a la Fundición de Caletones de la División El Teniente de Codelco Chile. Ministerio Secretaria General de la Presidencia de la República, Santiago de Chile, 12 de Mayo de 1998.

MINSEGPRES, 1994. D.S. N°179 de 1994. Zona saturada por anhídrido sulfuroso y material particulado Fundición Caletones. 06 de Octubre de 1994

MINSEGPRES. 1994. Ley 19300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Ministerio Secretaria General de la Presidencia de la República, Santiago de Chile, 1 de marzo de 1994.

MMA, 2013. D.S. N°28 de 2013. Norma de emisión para fundiciones de Cobre y fuentes emisoras de Arsénico. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago de Chile, 12 de Diciembre de 2013.

MMA. 2012. D.S N° 40 del 2012 Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago de Chile, 30 de noviembre de 2012.

MMA, 2012. Asesoría Técnica. Evaluación de costos de escenarios regulatorios para una norma de emisión de fundiciones de Cobre. Informe Final CO51-IN-GE-03_Ro. En: http://www.sinia.cl/1292/articles-52008_EstudioCosto.pdf

MMA, 2011. Informe del Estado del Medio Ambiente 2011.

Molina, M., Aburto, F., Calderón, R., Cazanga, M., Escudey, M. 2009. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilisers as a source of long-term soil contamination. *Soil Sediment Contam* 18:497–511

Moreno, T. 2010. Variations in vanadium, nickel and lanthanoid element concentrations in urban air. *Science of The Total Environment*. Vol 408, Issue 20, Pages 4569–4579.

Peryea, F.J., Kammereck, R. 1997. Phosphate-enhanced movement of arsenic out of lead arsenate-contaminated topsoil and through uncontaminated subsoil. *Water, Air, and Soil Pollution*, Volume 93, Issue 1-4, pp 243-254

R Development Core Team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, <http://www.R-project.org>.

Reimann, C., Birke, M., Demetriades, A., Filzmoser, P., O'Connor, P. (Editors). 2014. Chemistry of Europe's agricultural soils – *Geologisches Jahrbuch (Reihe B 102)*, Schweizerbarth, Hannover.

Reimann, C., Matschuillat, J., Birke, M., Salminen, R. 2010. Antimony in the environment: Lessons from geochemical mapping. *Applied Geochemistry* 25: 175-198.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., Dutter, R. 2008. Statistical data analysis explained. *Applied Environmental Statistics*. R. Wiley, Chichester.

Reimann, C. & de Caritat, P. 2005. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, 337, 91-107.

Reimann, C. & Garrett, R. G. 2005. Geochemical background-concept and reality. *Science of the Total Environment*, 350, 12-27.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G. 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, Vol. 346, pp 1 -16.

Reimann, C., Siewers, U., Tarvainen, T. 2003. Agricultural Soils in Northern Europe: A Geochemical Atlas. *Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte, Reihe D, Heft SD 5*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. 2002. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, Vol 17, pp 185-206.

Reimann, C. & de Caritat, P. 2000. Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry. *Environmental Science & Technology*, 34, 5084-5091.

Reimann, C., Äyräs, M., Chekushin, V. 1998. Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region. Special Publication, NGU-GTK-CKE. Geological Survey of Norway, Trondheim.

Reimann, C. & de Caritat, P., 1998. Chemical Elements in the Environment. Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist. Springer, Berlin

Richter, P., Seguel, R., Ahumada, I., Verdugo, R., Narvaez, J., Shibata, Y. 2004. Arsenic speciation in environmental samples of a mining impacted sector of central Chile. *Journal of The Chilean Chemical Society*, 333-339.

Romo-Kroger, C., Morales, J., Dinator, M. and Llona, F. 1994. Heavy Metals in the atmosphere coming from a copper smelter in Chile. *Atmospheric Environmental*. 1994; 28(4):705-711.

SAG, 2015. Evaluación y autorización de plaguicidas. En: <http://www.sag.cl/ambitos-de-accion/plaguicidas-y-fertilizantes>.

SAG, 2005. Criterios de Calidad de Suelos y Aguas de Riego. En: http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/inicio.htm

Salma, I., Maenhaut, W. 2005. Changes in elemental composition and mass of atmospheric aerosol pollution between 1996 and 2002 in a Central European city. *Environ Pollut*;143:479-488.

Salminen, R. (Chief-Ed.), Batista, M. J., Bidovec, M. Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., 2005. *Geochemical Atlas of Europe*. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland

Salminen, R., Chekushin, V., Tenhola, M. 2004. *Geochemical Atlas of Eastern Barents Region*. Elsevier, Amsterdam.

Salminen, R. & Gregorauskiene, V. 2000. Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the superficial materials in areas differing in basic geology. *Applied Geochemistry*, 15, 647-653.

Salminen, R. & Tarvainen, T. 1997. The problem of defining geochemical baselines. A case study of selected elements and geological materials in Finland. *Journal of Geochemical Exploration*, 60, 91-98

Sanhueza, P. 2006. Análisis Efectos en Salud por Material Particulado Respirable (PM₁₀) y Ozono (O₃) en la VI Región. CONAMA.

Servicio Geológico y Minero de Uganda. 1973. *Geochemical Atlas of Uganda*.

Servicio Geológico de Zambia. 1964. *Regional Geochemical Maps of the Namwala Concession Area Zambia based on a Reconnaissance Stream Sediment Survey*.

Servicio Nacional de Geología y Minería. 2013. *Geología para el Ordenamiento Territorial y la Gestión Ambiental en el área de Rancagua, Región del Libertador Bernardo O'Higgins*. SERNAGEOMIN, Informe Registrado IR-13, 98 p., 18 mapas escala 1:100.000. Santiago.

Servicio Nacional de Geología y Minería, 2012. *Anuario de la Minería de Chile*. SERNAGEOMIN, 205 p. Santiago

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) e Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 2010. Informe Final. Desarrollo del Plan Nacional de Geología. Acuerdo entre el SERNAGEOMIN e IGME.

Shacklette, H. T., Hamilton, J. C., Boerngen, J. G., Bowles, J. M. 1971. Element composition of surficial materials of the conterminous United States. US Geological Survey Professional Paper, 574–D

Smith, D. B., Cannon, W. F., Woodruff, L. G., Solano, F., Kilburn, J. E., Fey, D.L. 2013. Geochemical and Mineralogical data for soils of the conterminous United States: U.S. Geological Survey Data Series 801, 19 p.

Sudzuki, F. 1960. Relaves de Cobre y Aguas de Riego del río Cachapoal. En: <http://www.inia.cl/medios/biblioteca/agritec/NR36832.pdf>.

Tapia, J. 2011. Sources, mobility and bioavailability of trace metals and metalloids in the historically mining and smelter impacted Altiplanean city of Oruro, Bolivia. Ph.D Thesis, Universidad de Chile/Université Paul Sabatier: 270 p.

Taylor S. R. & McLennan S. M. 2009. Planetary Crusts: Their Composition and Evolution. Cambridge University Press, Cambridge. 378 pp.

Tarvainen, T. & Kallio, E. 2002. Baselines of certain bioavailable and total heavy metal concentrations in Finland. Applied Geochemistry, 17, 975-980.

Thomas, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de la Ligua y la Cuesta de Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín No.2, 86 p. Santiago.

Tukey, J. W. 1977. Exploratory data analysis, Addison-Wesley: Reading, Mass

Valdés, A. 2013. Geochemical features of aerosols in Santiago de Chile from time series analysis. Environmental Earth Sciences, 69, 2073–2090.

Vergara, M., López-Escobar, L., Palma, J.L., Hickey-Vargas, R., Roeschmann, C. 2004. Late tertiary volcanic episodes in the area of the city of Santiago de Chile: new geochronological and geochemical data. Journal of South American Earth Sciences. 227-238.

VROM (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment). 2000. Streefwaarden en interventiewaarden bodemsanering (Target values and intervention values for soil remediation). Government Gazette No. 39, 24 February 2000.

Wall, R., Gana, P., Gutiérrez, A. 1996. Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla, regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos, No. 2, 20 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Webb, J. S., Thornton, I., Thompson, M., Howarth, R. J., Lowenstein, P. L. 1978. The Wolfson Geochemical Atlas of England and Wales. Oxford University Press, Oxford

Zagal, E., Sadzawka, M. A. 2007. Protocolo de Métodos de Análisis para Suelos y Lodos. Universidad de Concepción – Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). 103pp.

Zoller, W. H., Gladney, E. S., Duce, R. A. 1974. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole. *Science* 1974; 183:199– 201.

Anexos

I. Composición Química Corteza Continental

Elemento	Concentración	Unidad
Si	30,8	wt. %
Al	8,04	wt. %
Ti	0,41	wt. %
Fe	3,5	wt. %
Ca	3	wt. %
Mg	1,33	wt. %
Mn	600	ppm
Na	2,89	wt. %
K	2,8	wt. %
P	700	ppm
Cu	25	ppm
V	107	ppm
Cr	83	ppm
Co	17	ppm
Ni	44	ppm
Zn	71	ppm
Rb	112	ppm
Sr	350	ppm
Y	22	ppm
Zr	190	ppm
Nb	12	ppm
Ba	550	ppm
Pb	17	ppm
Sc	13.6	ppm
C	-	-
S	-	-
Hg	-	-
As	1,5	ppm
Mo	1,5	ppm
Sb	0,2	ppm
Ag	50	ppb
Bi	127	ppb
W	2.0	ppm
Ga	17	ppm

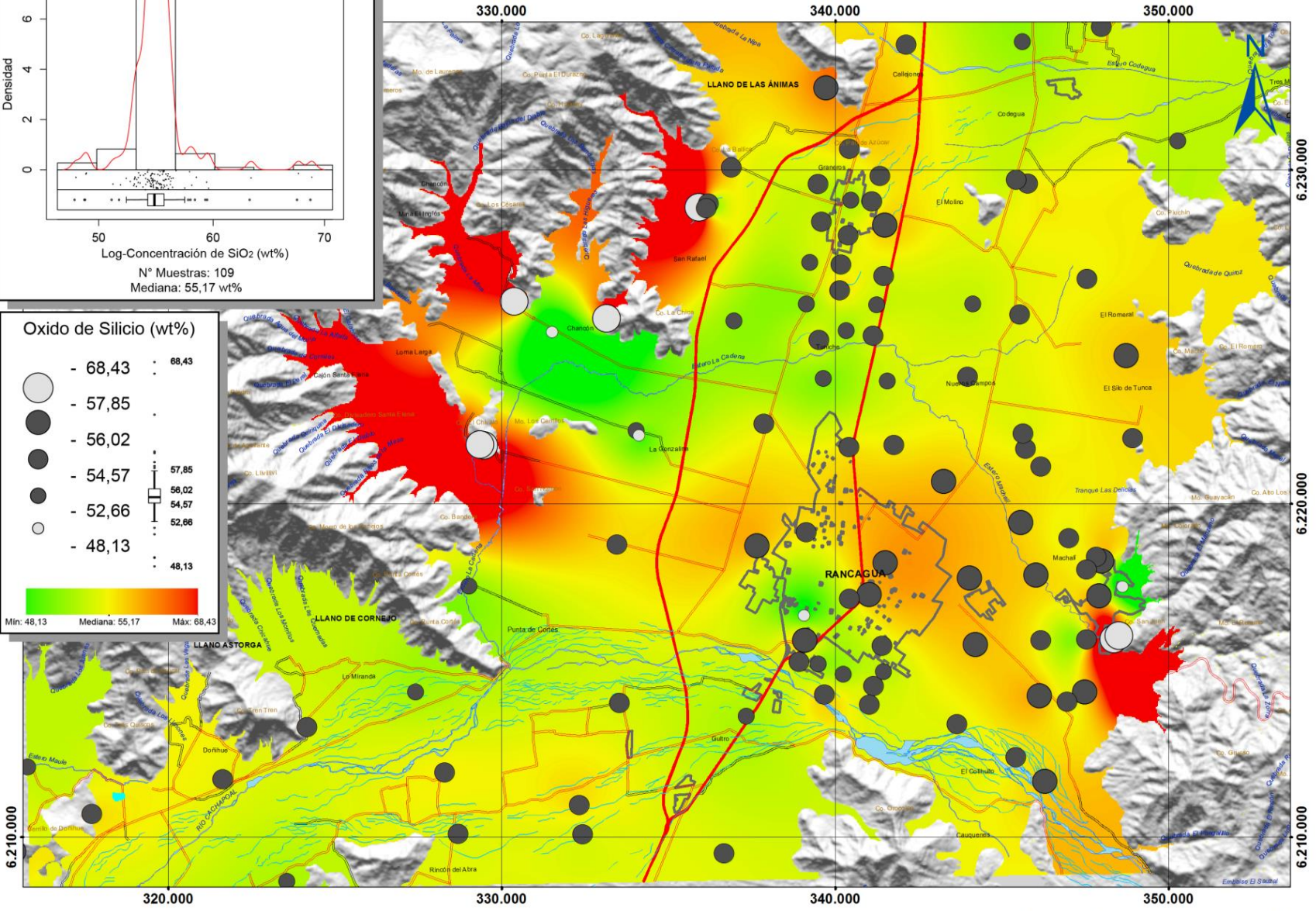
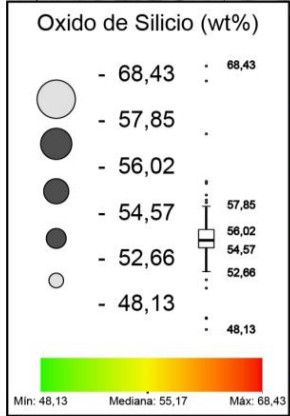
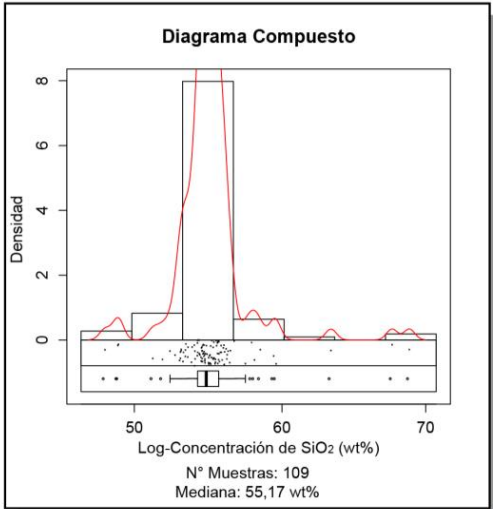
Modificado de Taylor-McLennan (2009)

II. Base de Datos

III. Mapas Línea Base Geoquímica

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 01: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE SILICIO (wt%)

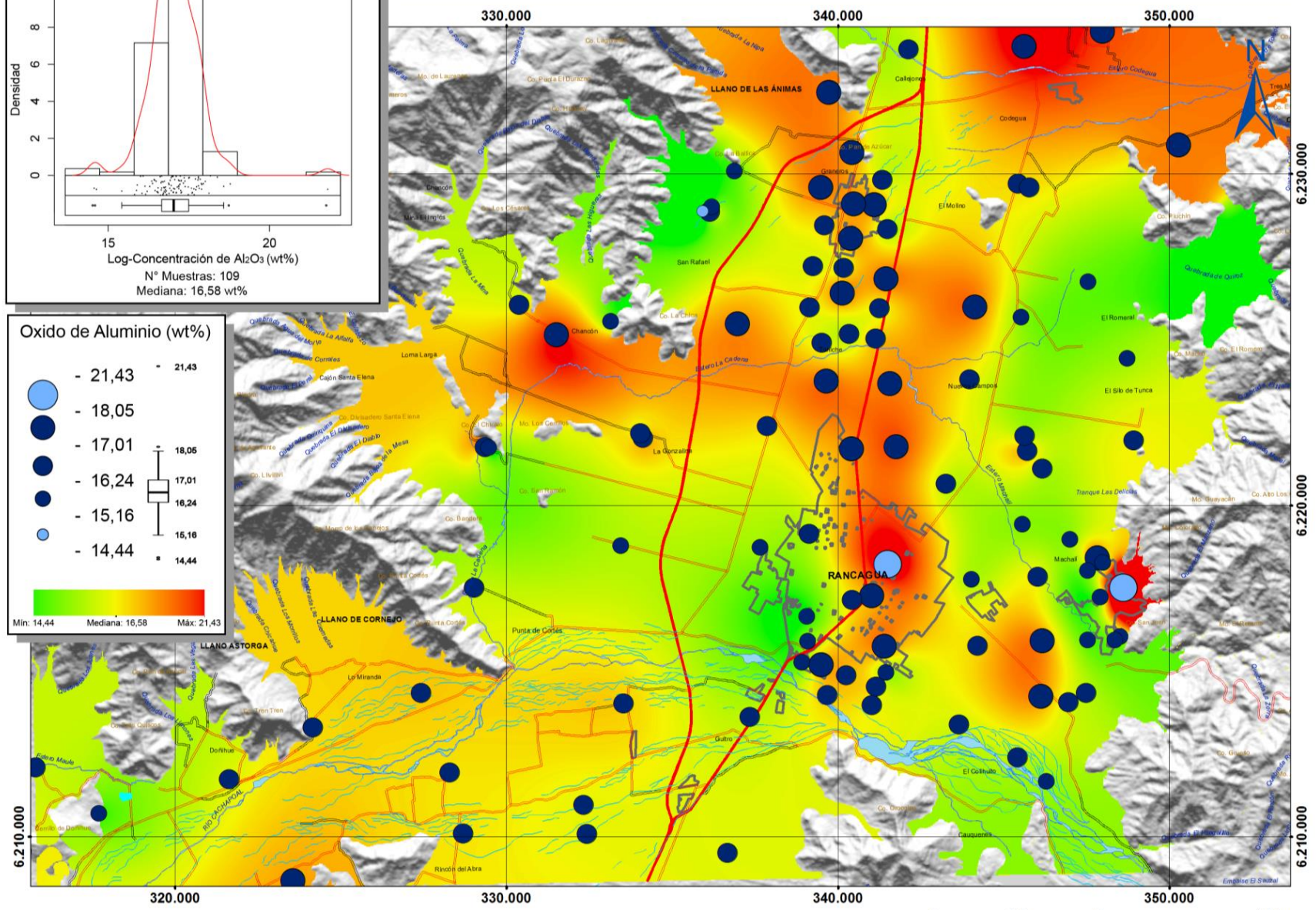
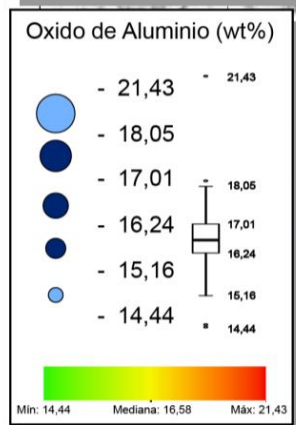
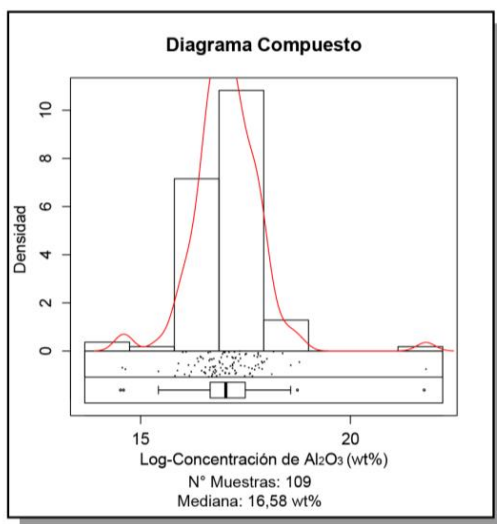


1:150.000

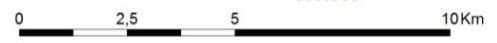


Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 02: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE ALUMINIO (wt%)

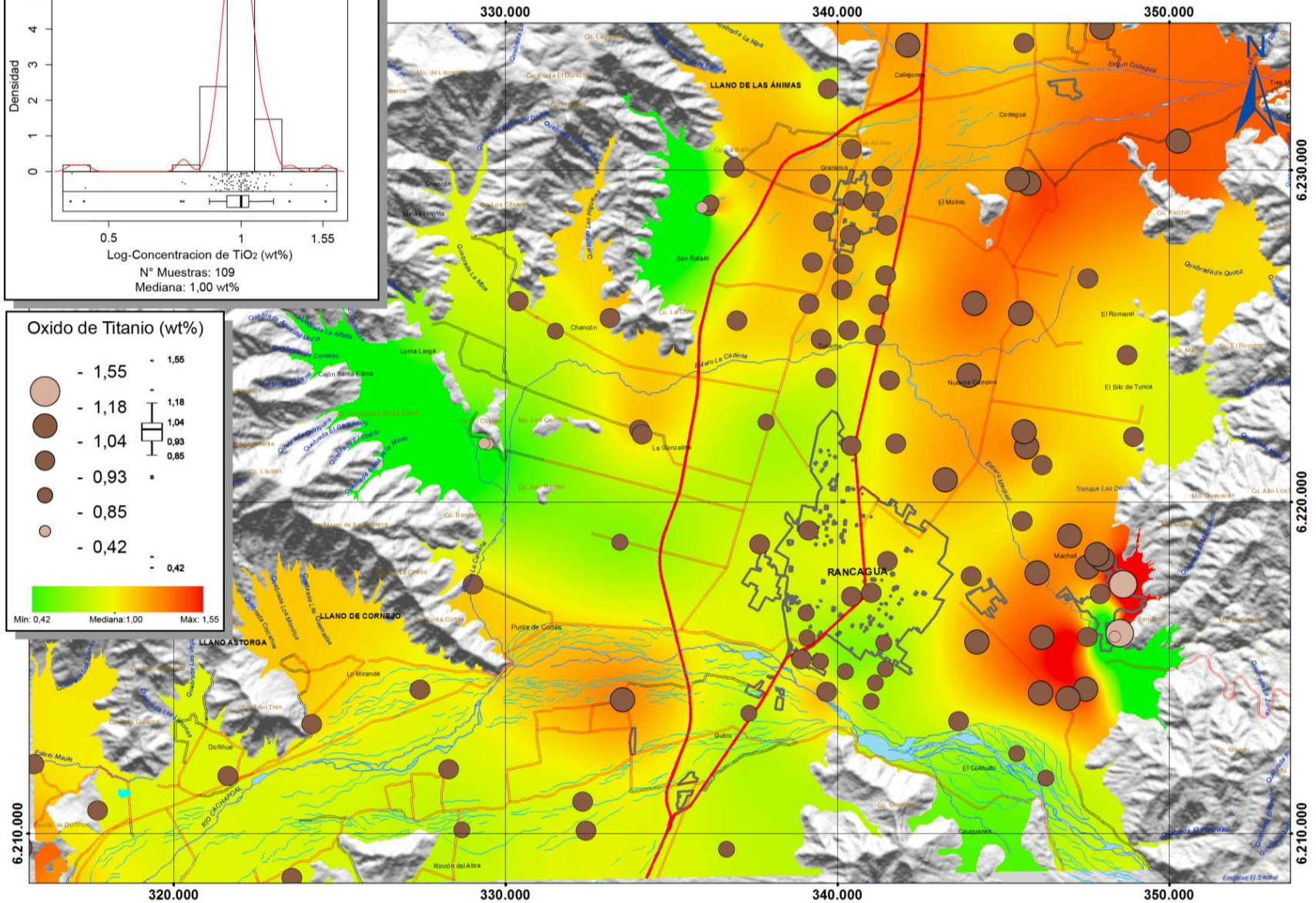
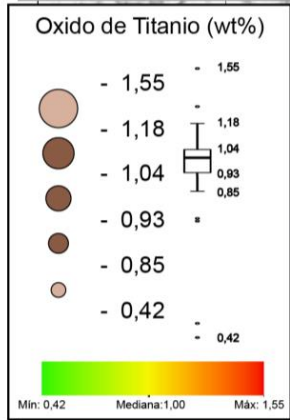
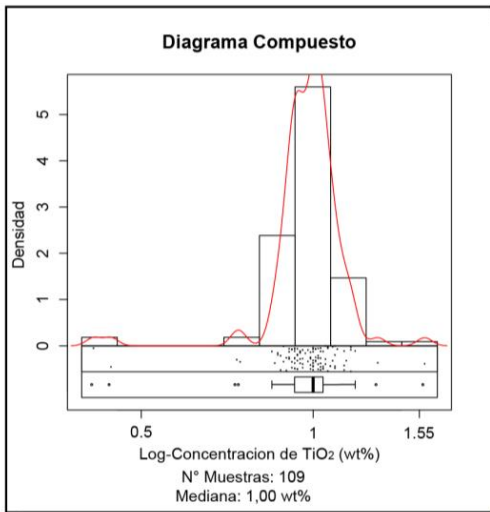


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 03: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE TITANIO (wt%)

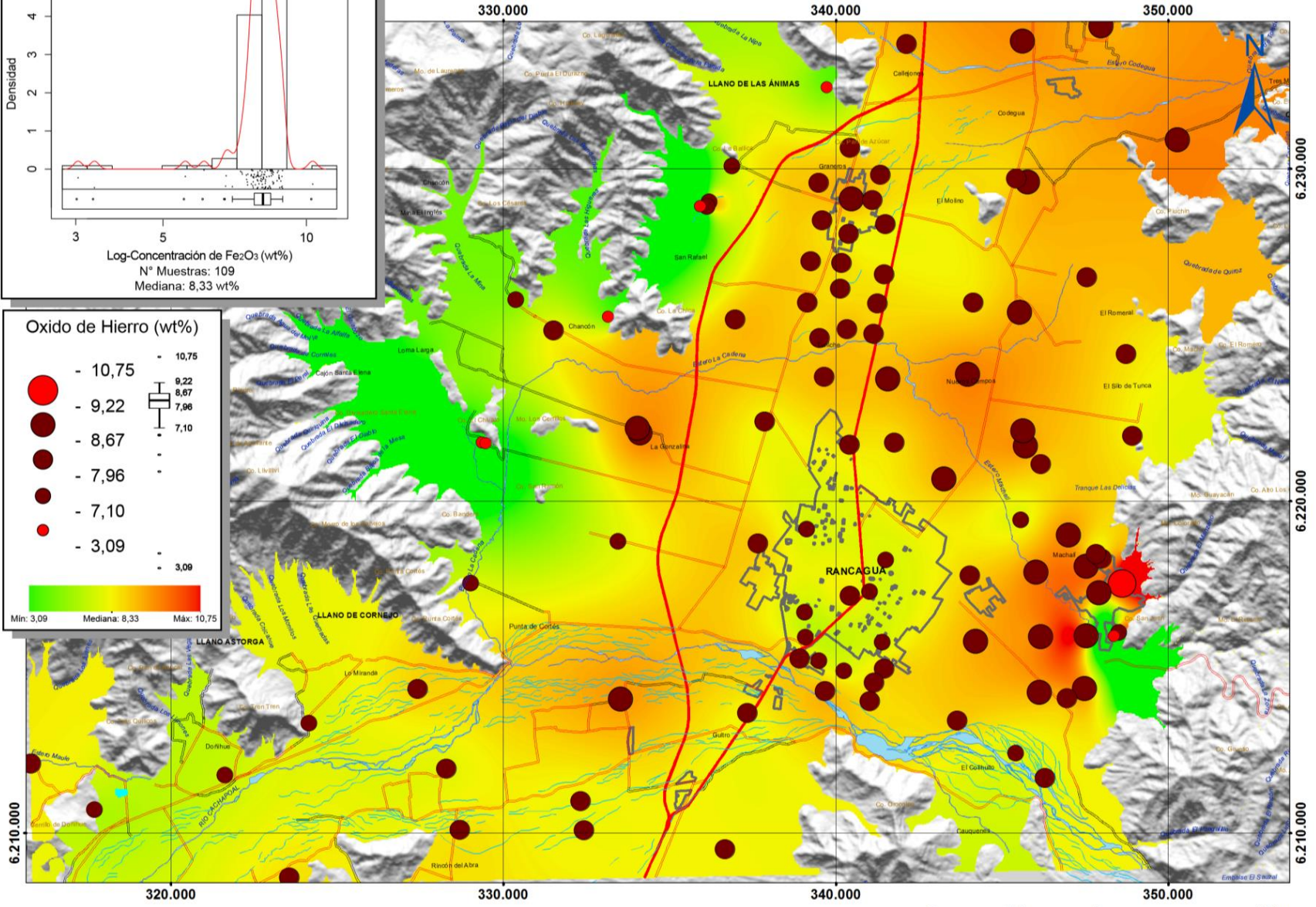
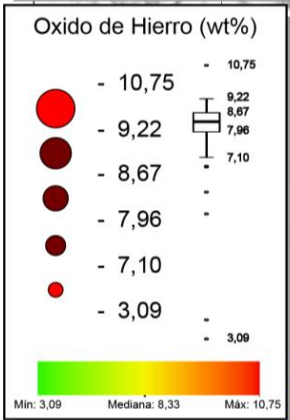
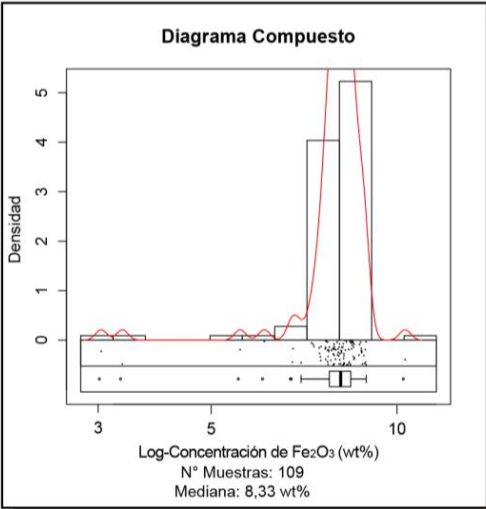


1:150.000

0 2.5 5 10Km

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 04: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE HIERRO (wt%)

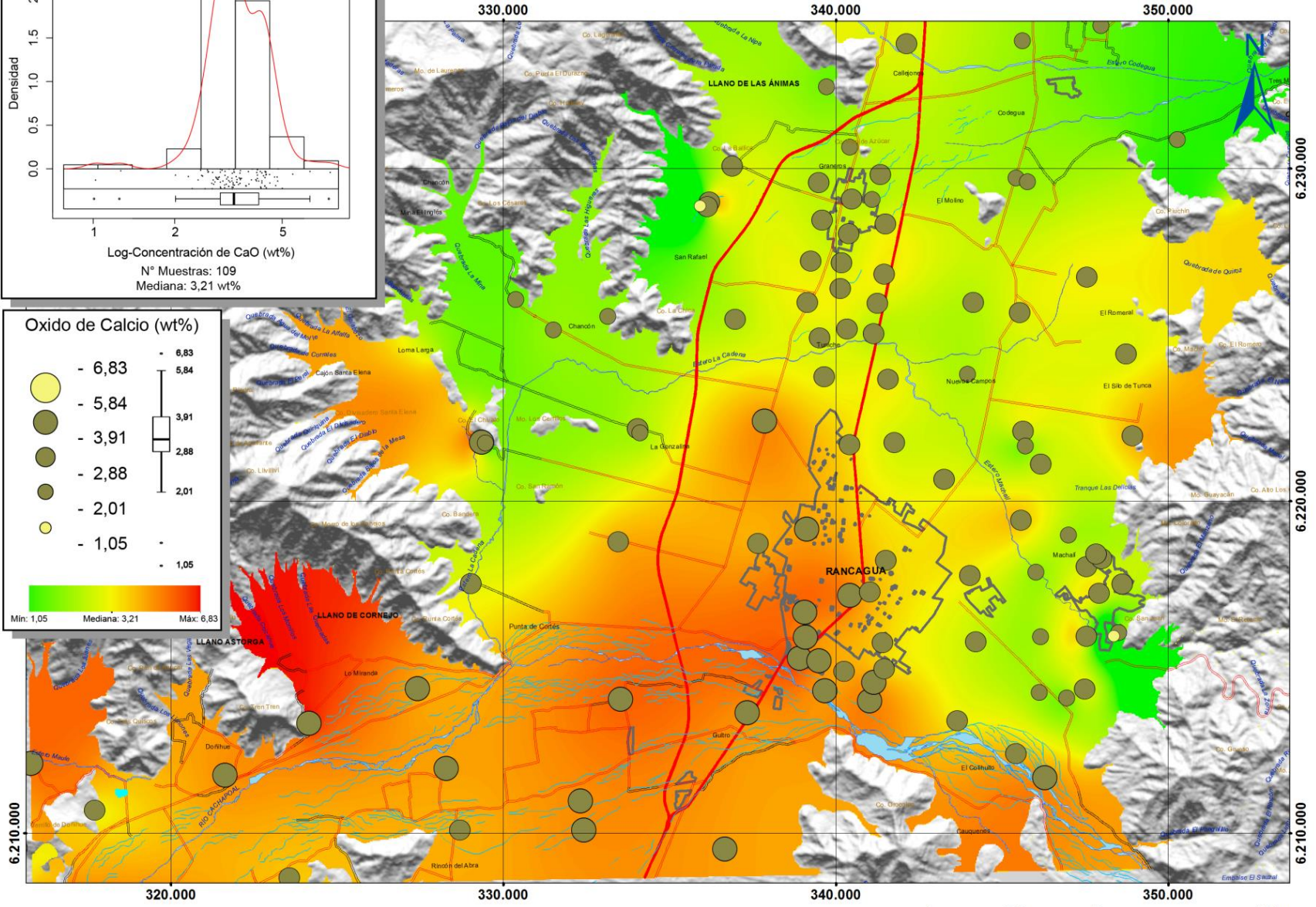
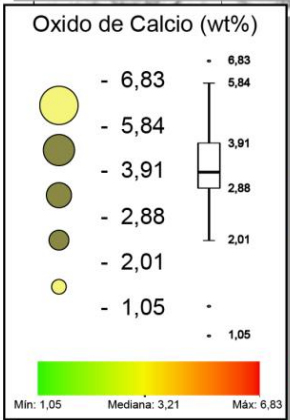
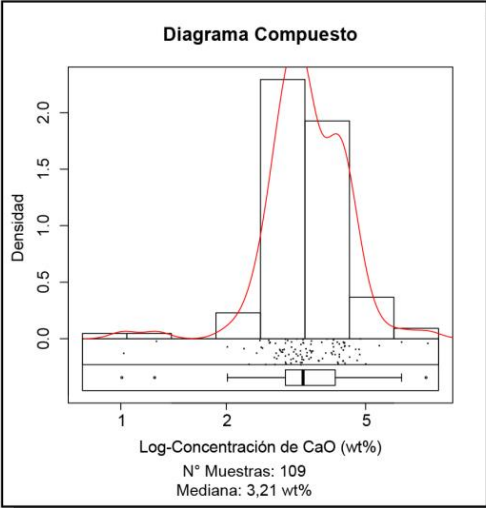


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

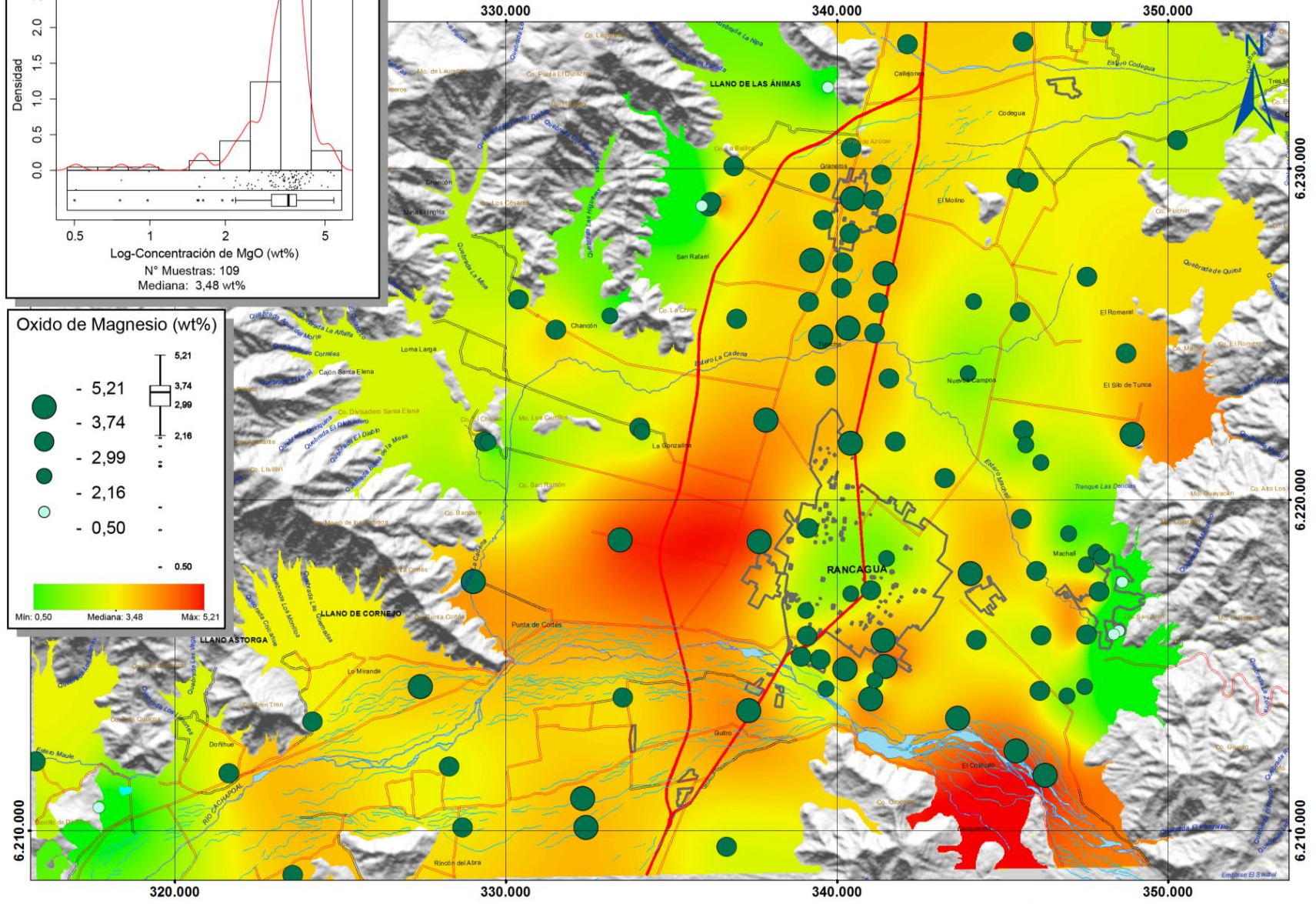
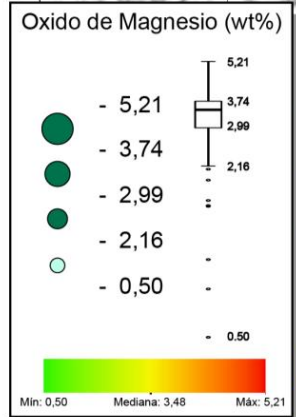
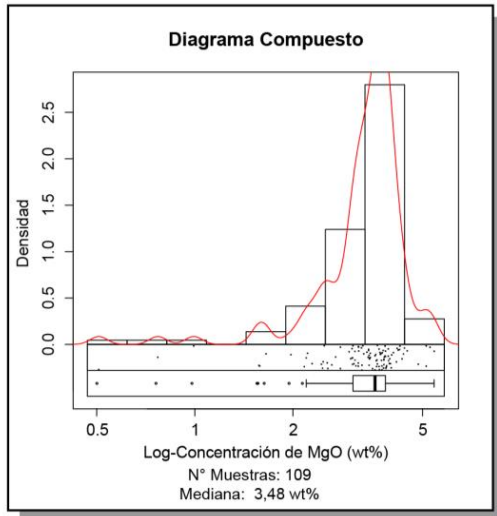
MAPA 05: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE CALCIO (wt%)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

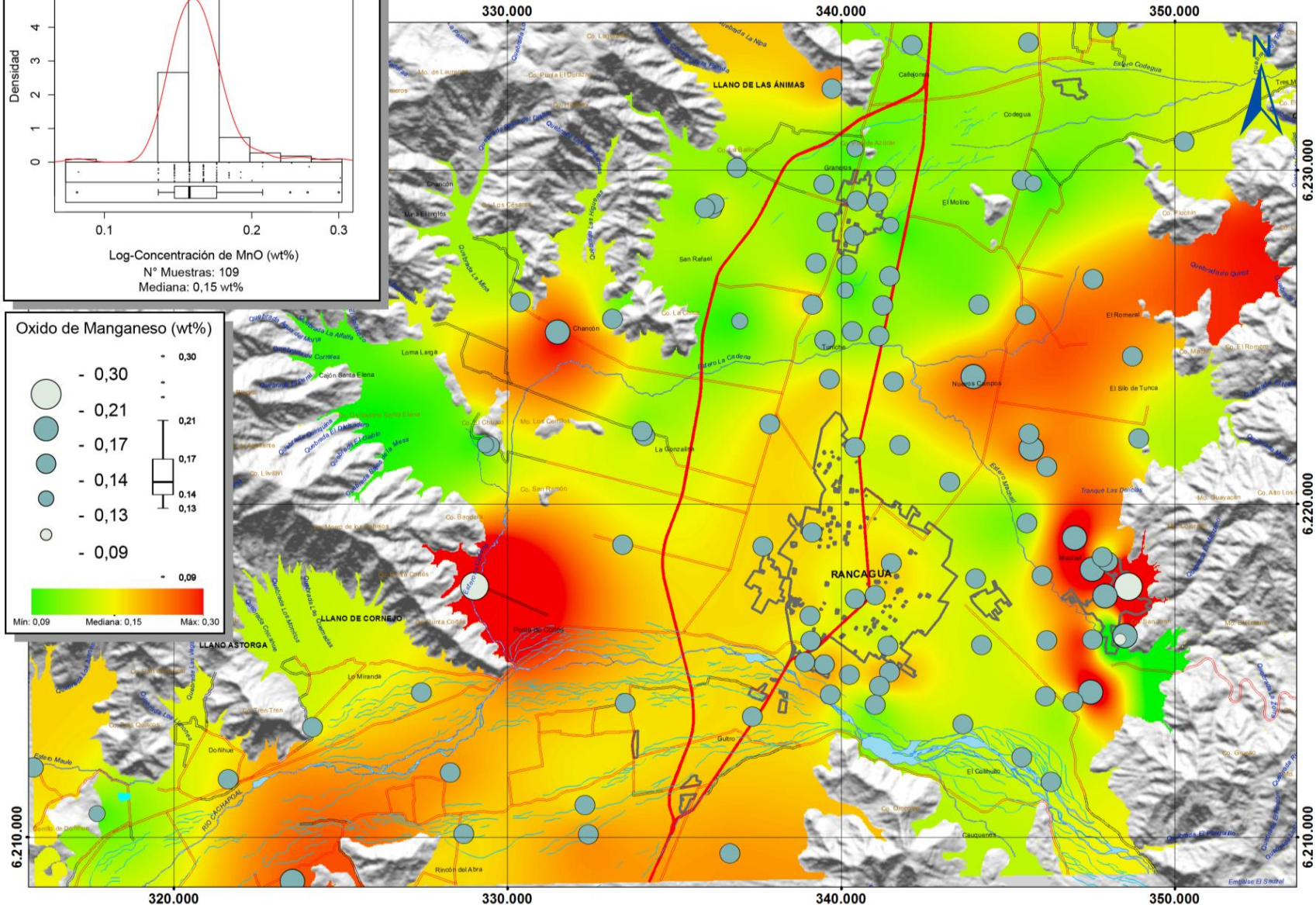
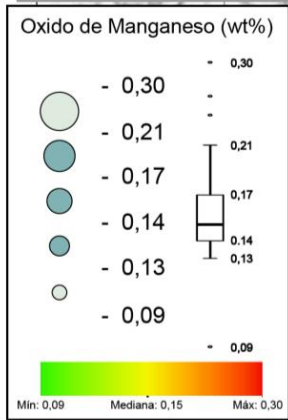
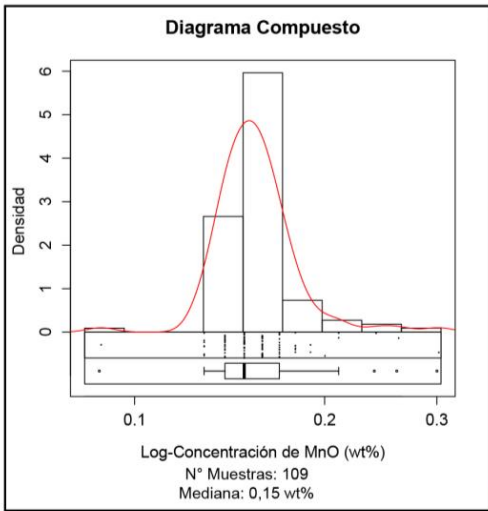
MAPA 06: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE MAGNESIO (wt%)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

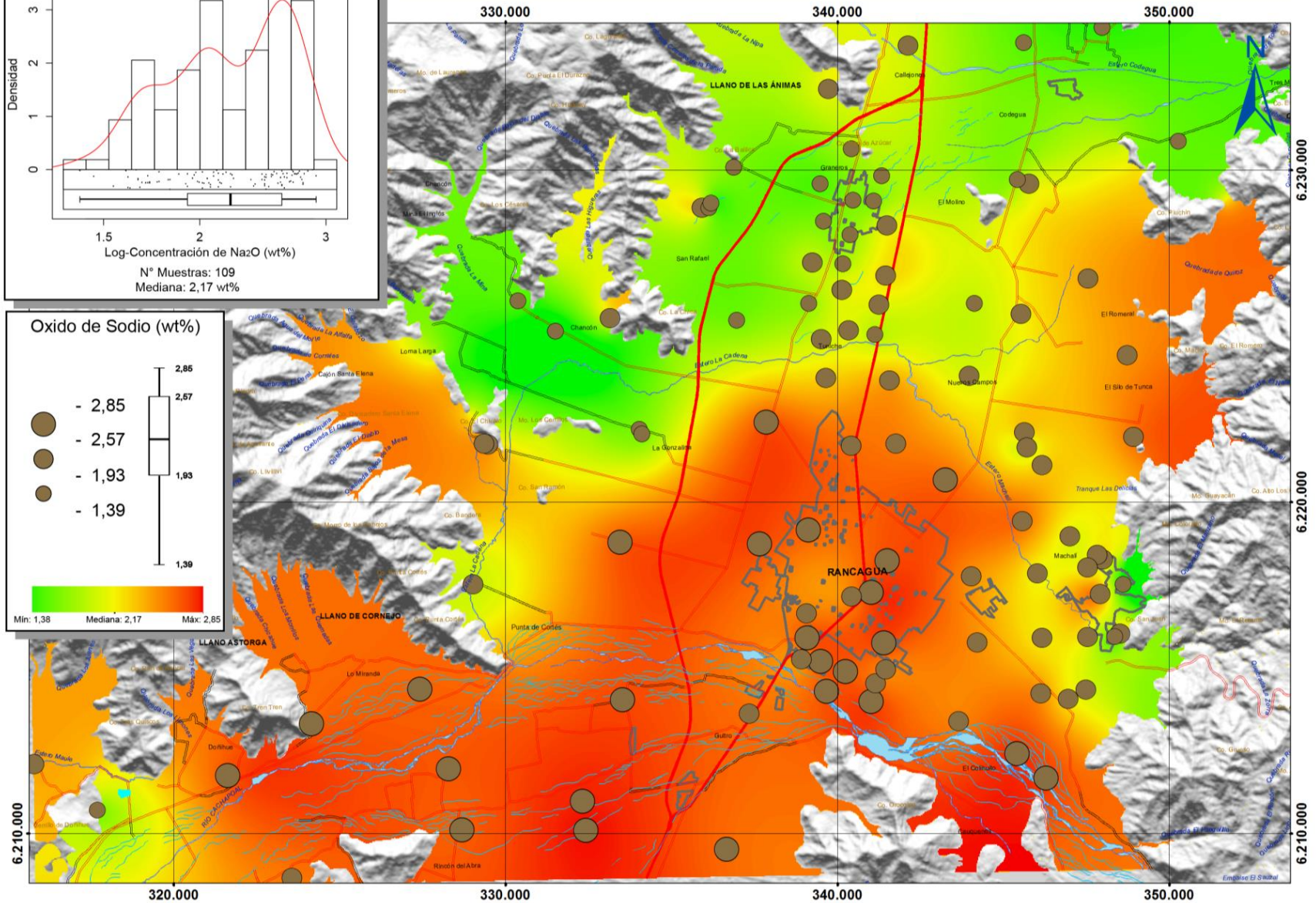
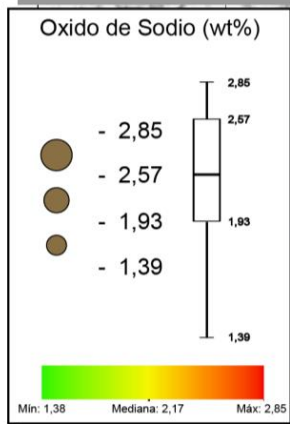
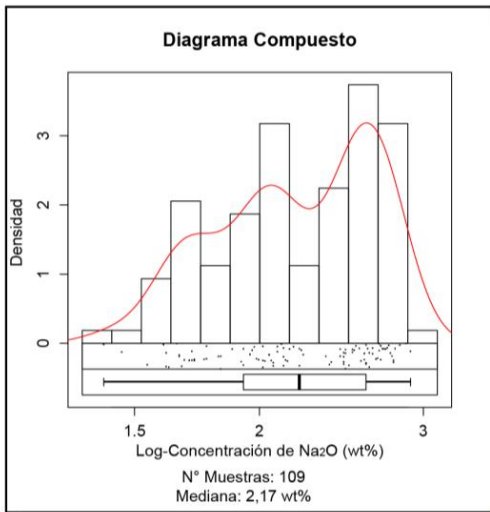
MAPA 07: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE MANGANESO (wt%)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

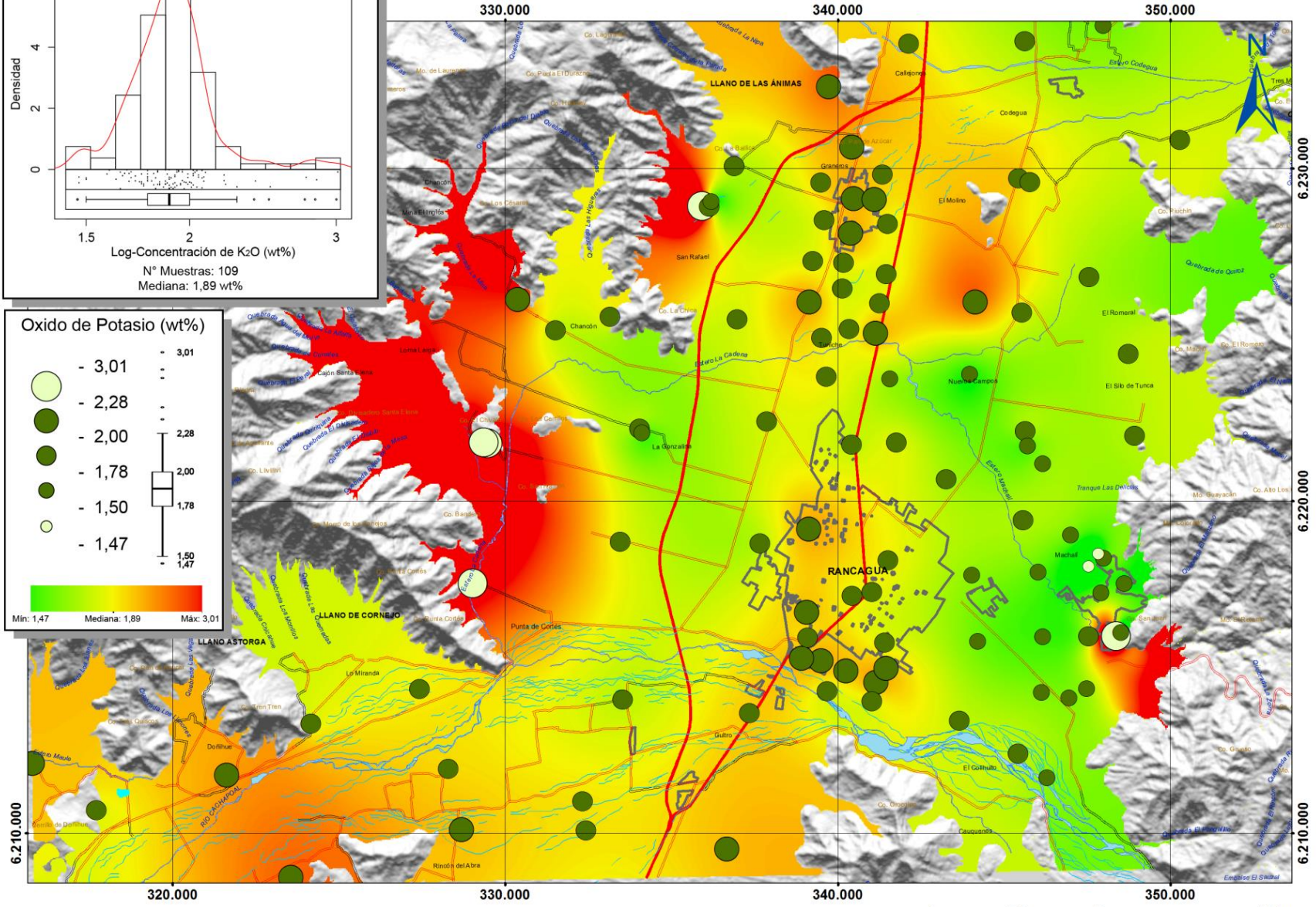
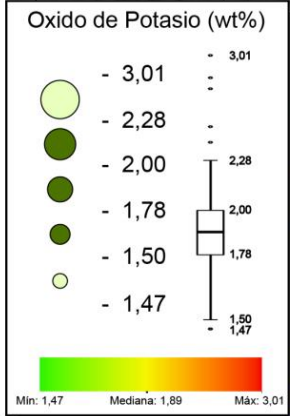
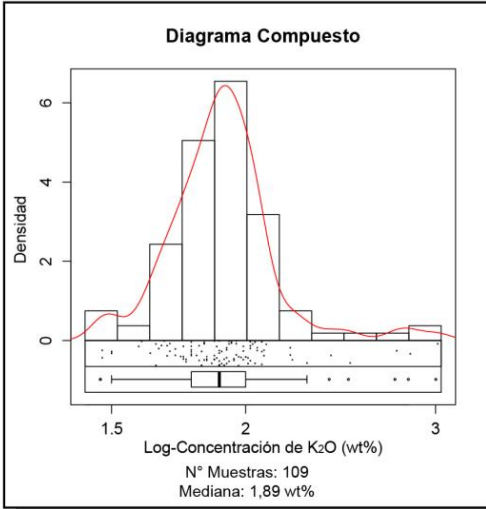
MAPA 08: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE SODIO (wt%)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

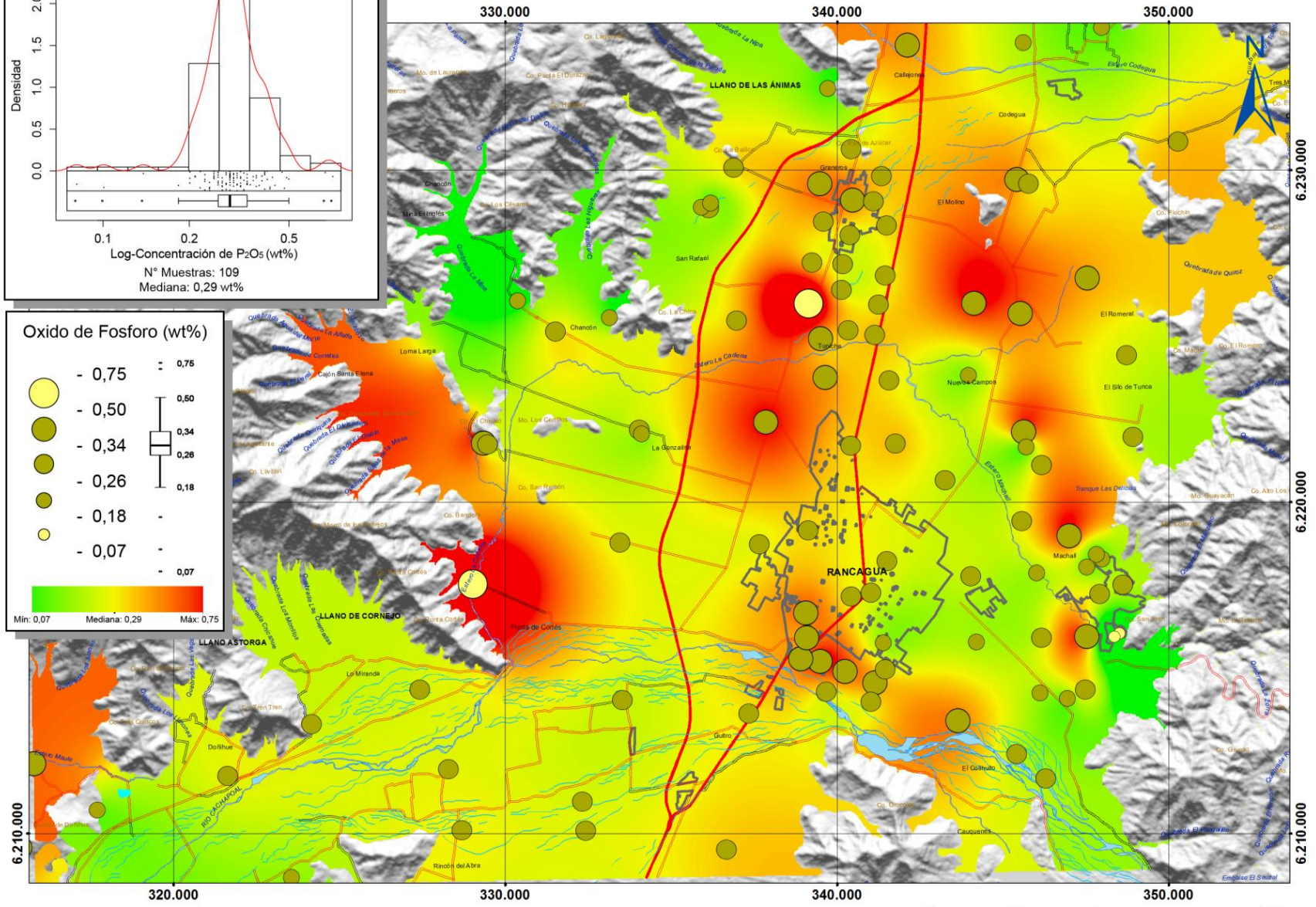
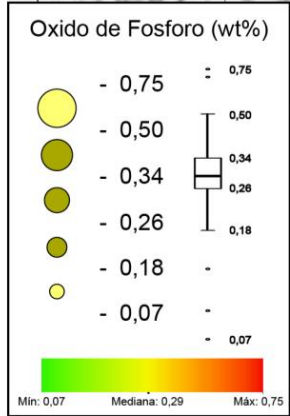
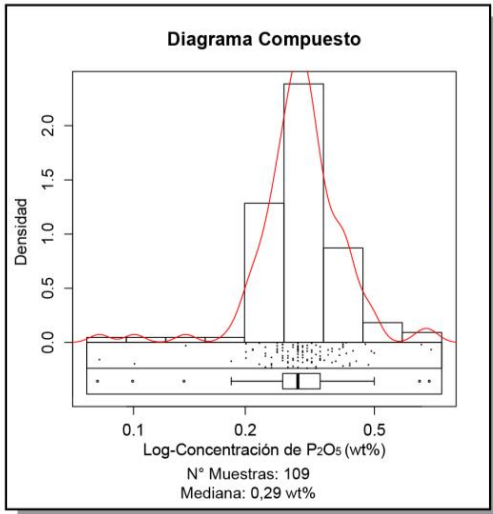
MAPA 09: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE POTASIO (wt%)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 10: CONCENTRACIONES DE OXIDO DE FOSFORO (wt%)

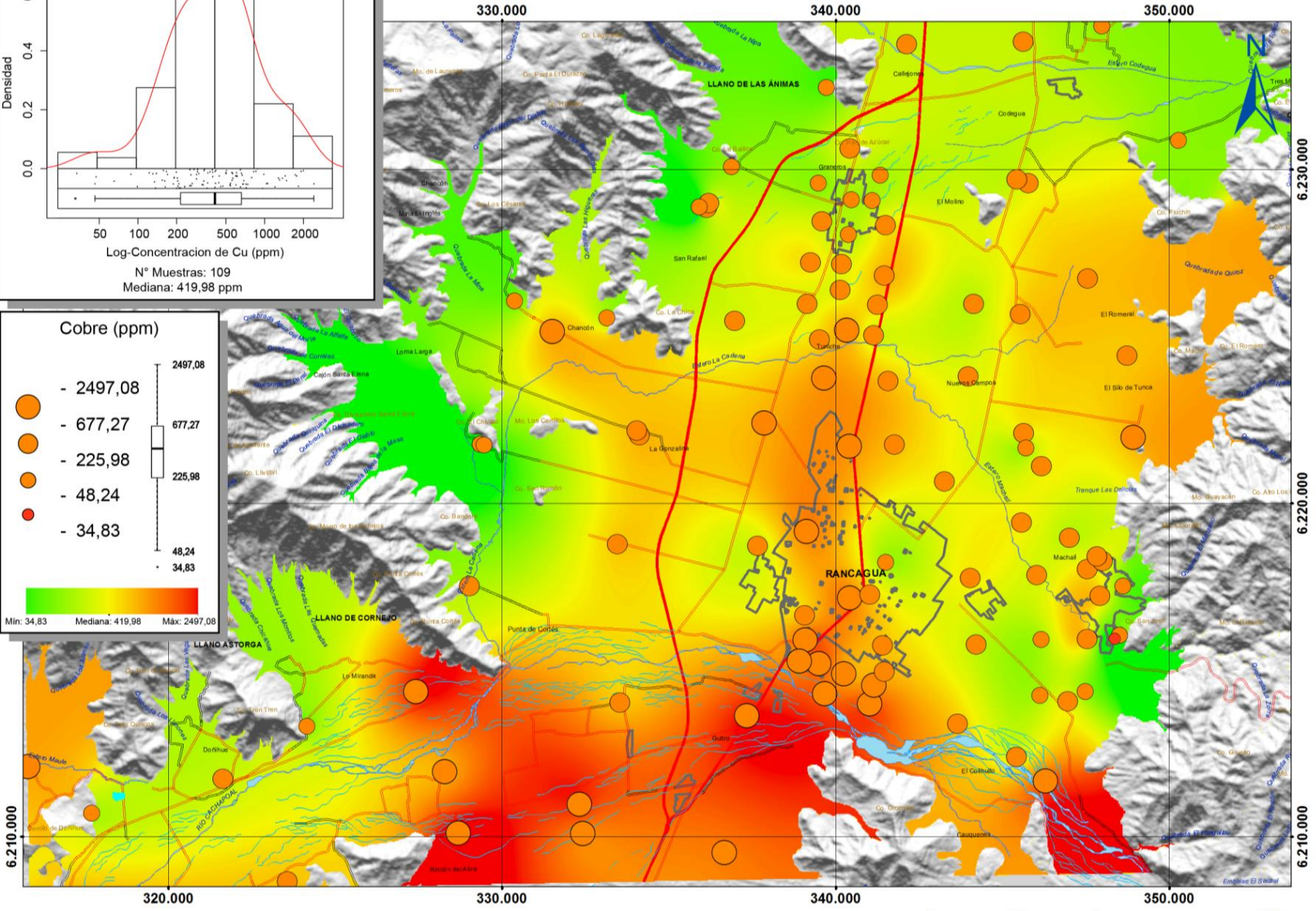
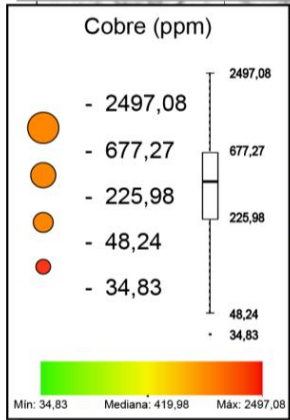
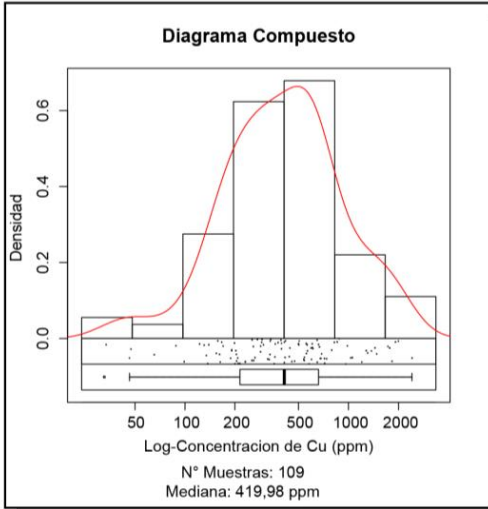


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 11: CONCENTRACIONES DE COBRE (ppm)

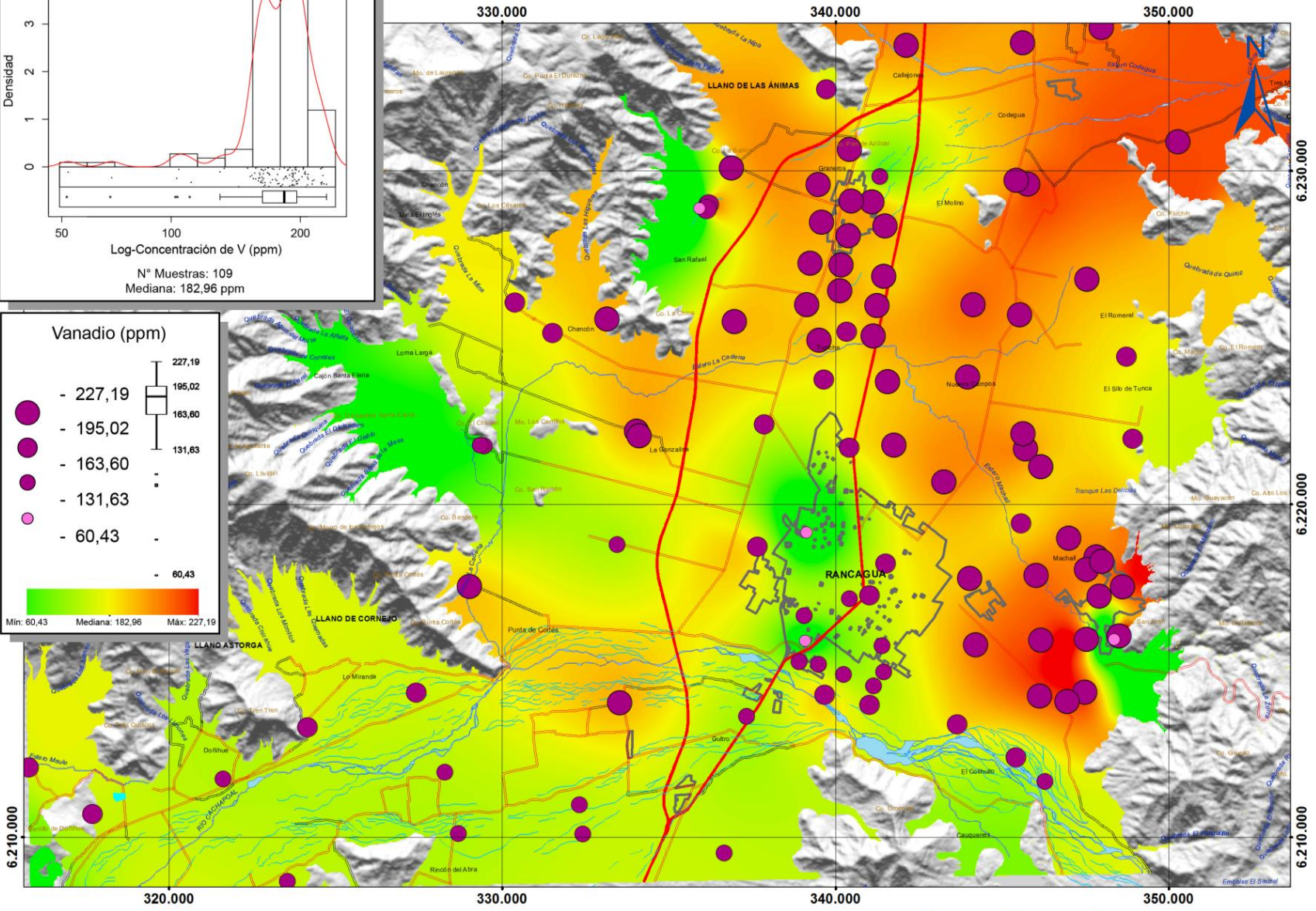
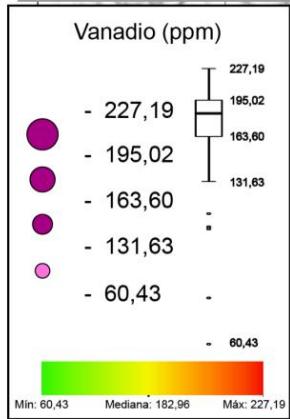
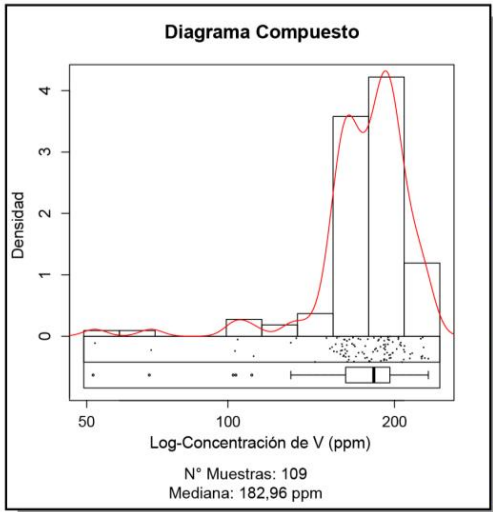


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 12: CONCENTRACIONES DE VANADIO (ppm)

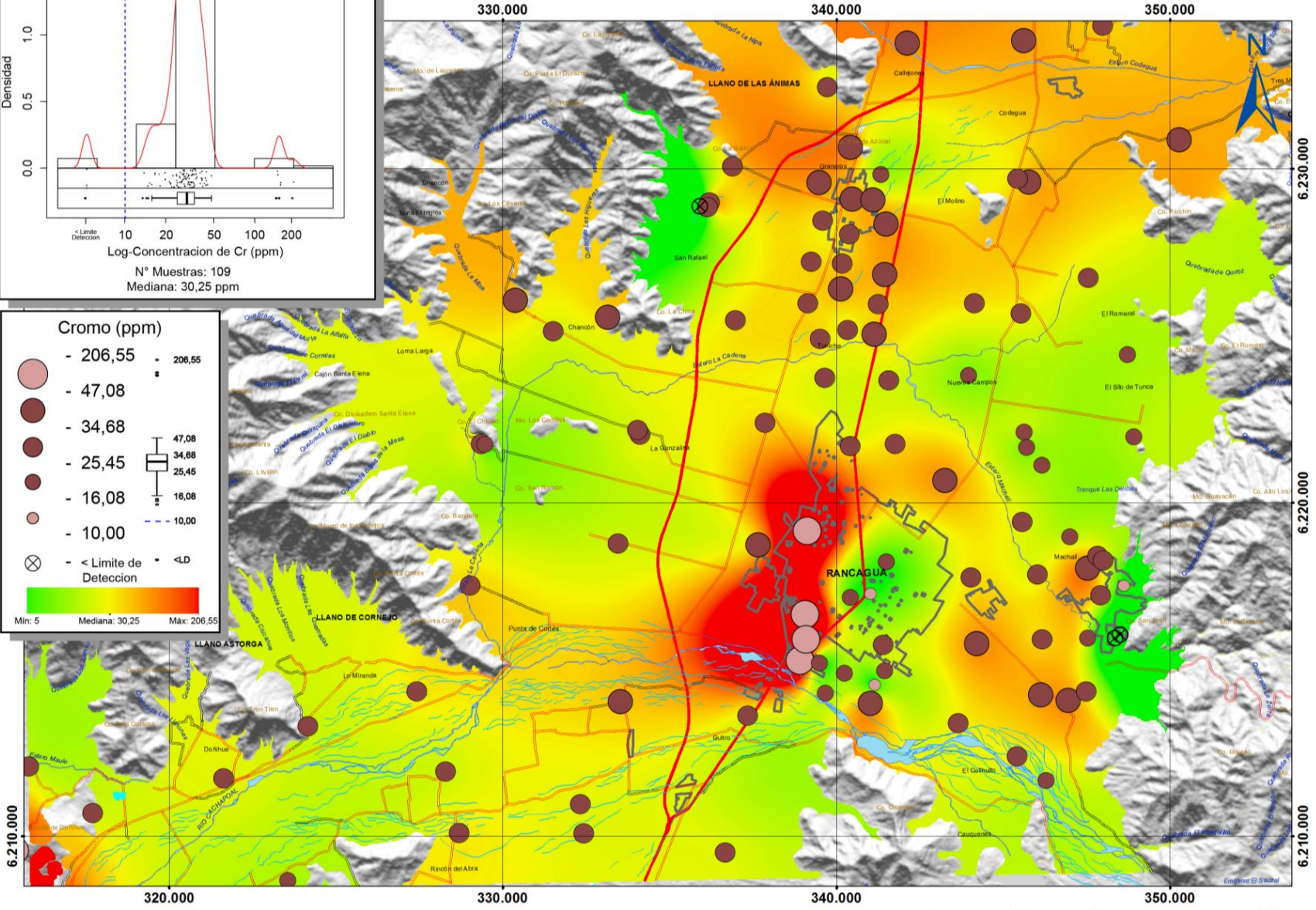
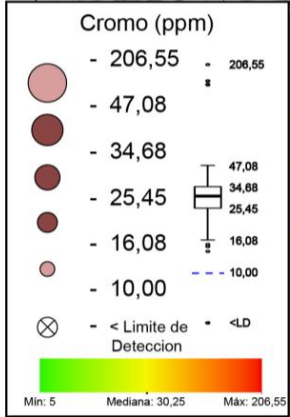
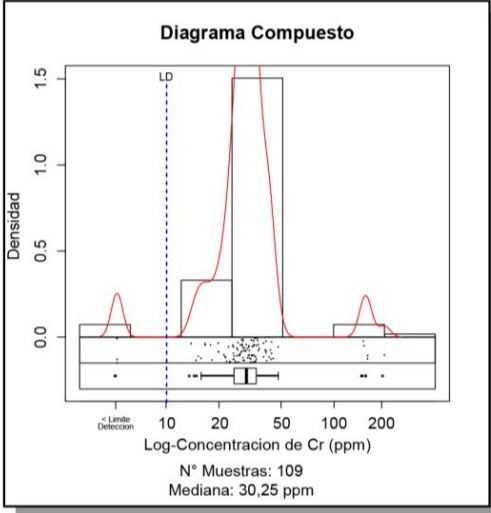


1:150.000

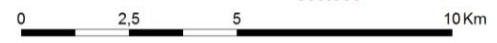
0 2.5 5 10Km

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 13: CONCENTRACIONES DE CROMO (ppm)

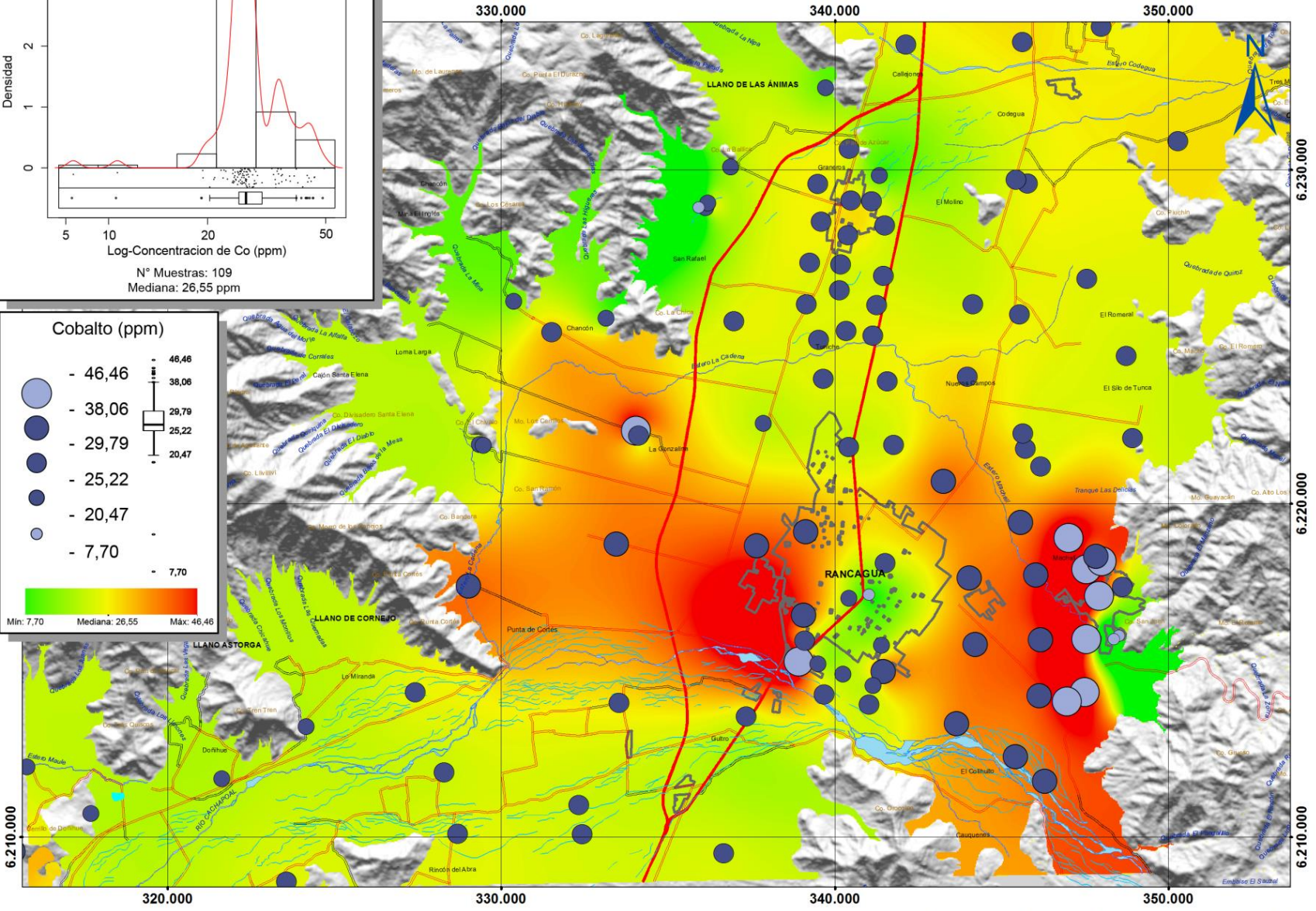
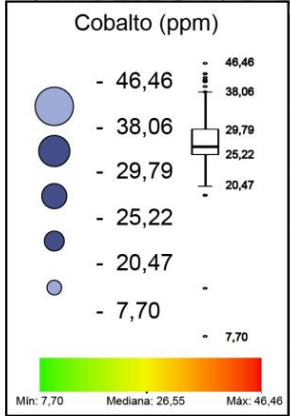
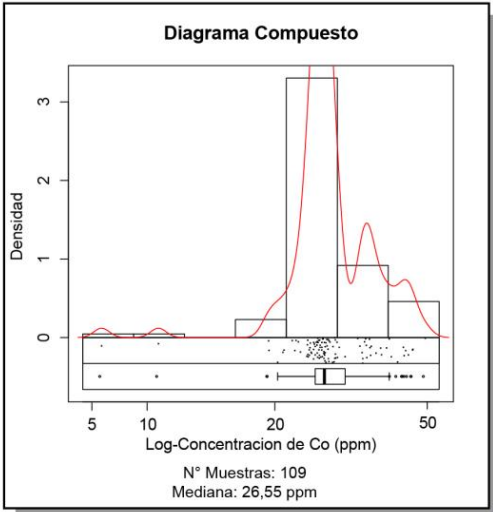


1:150.000

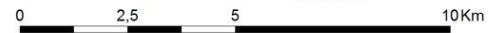


Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 14: CONCENTRACIONES DE COBALTO (ppm)

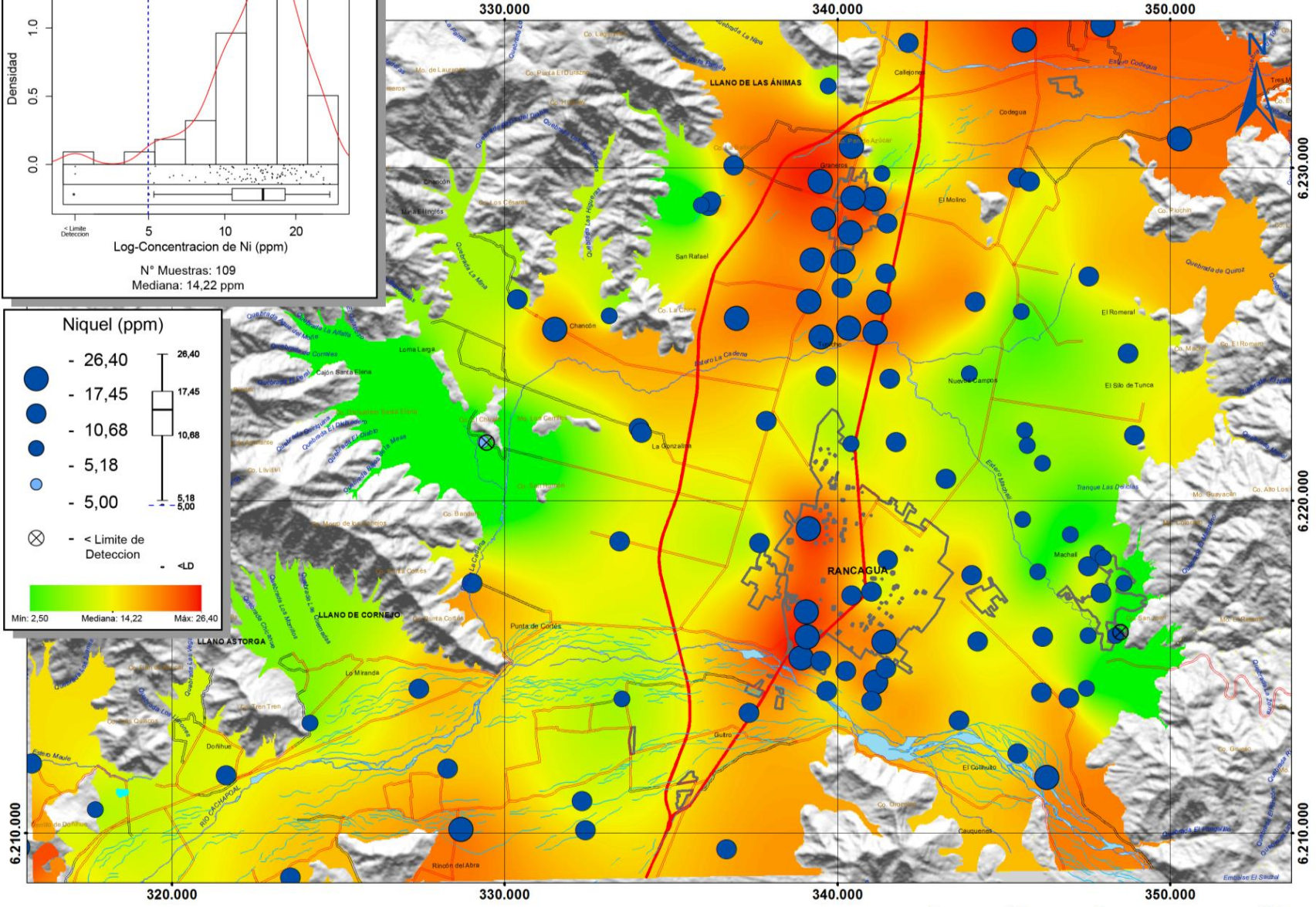
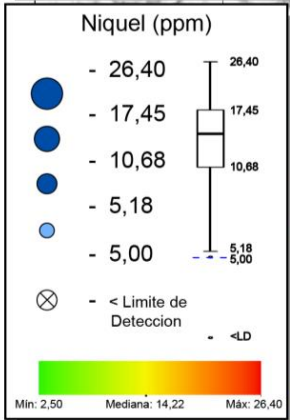
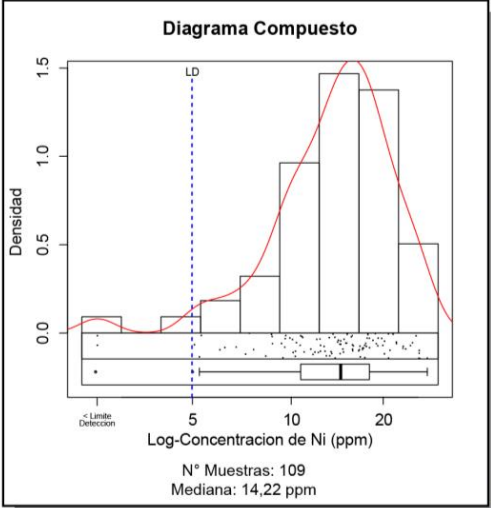


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 15: CONCENTRACIONES DE NIQUEL (ppm)

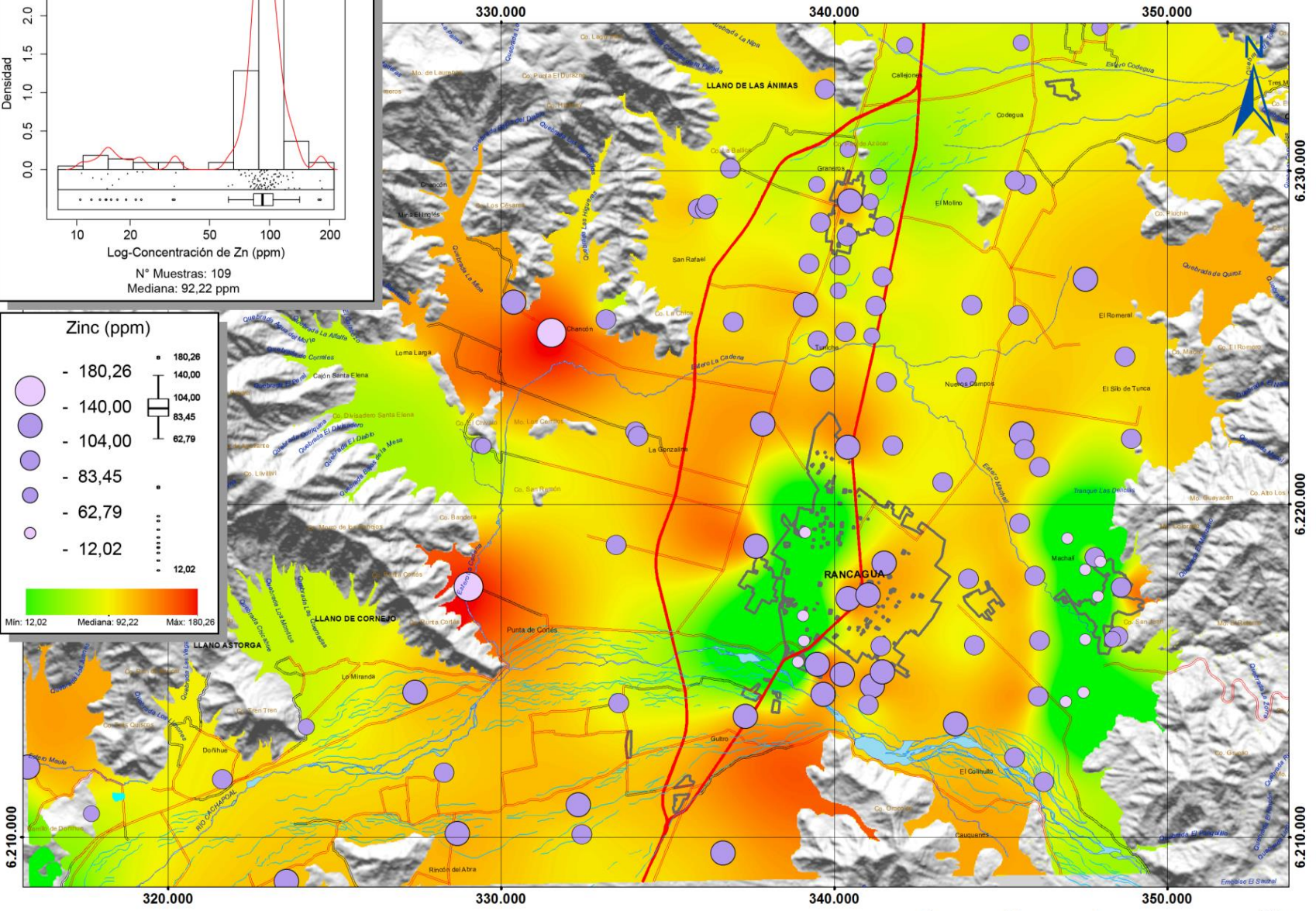
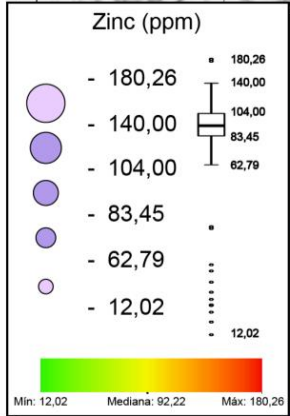
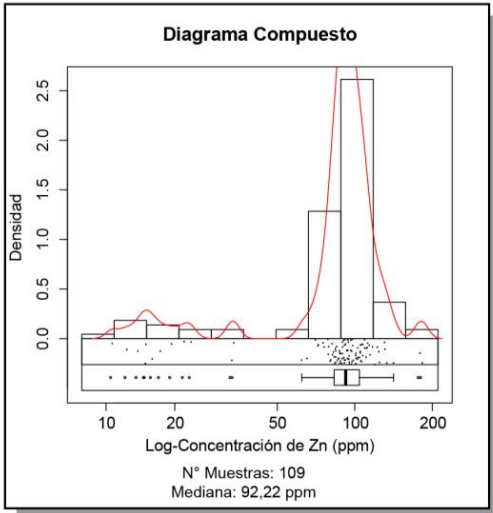


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 16: CONCENTRACIONES DE ZINC (ppm)

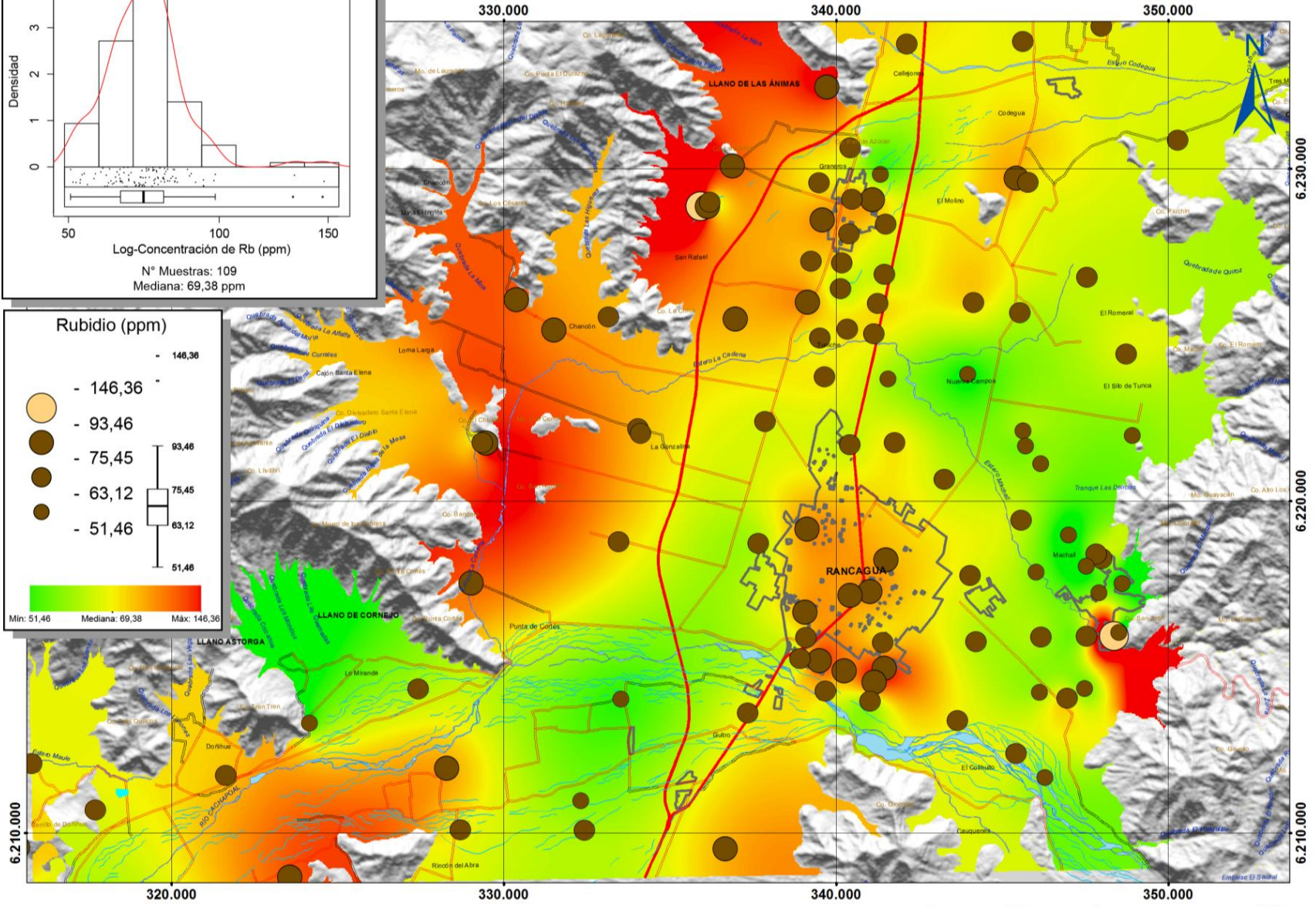
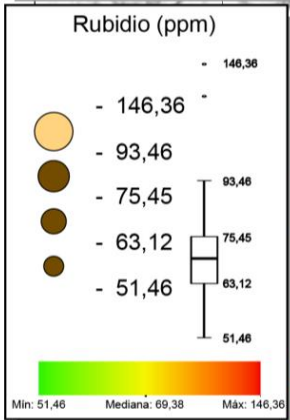
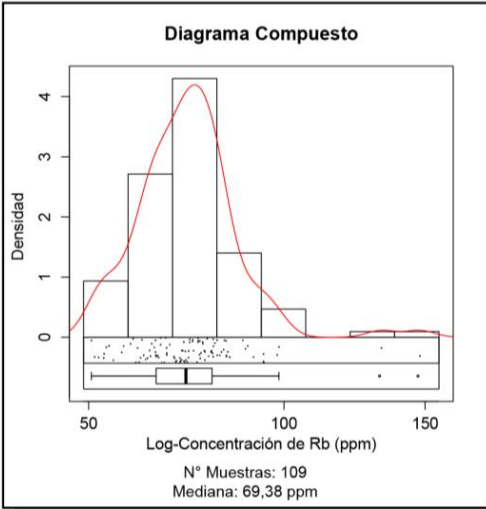


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

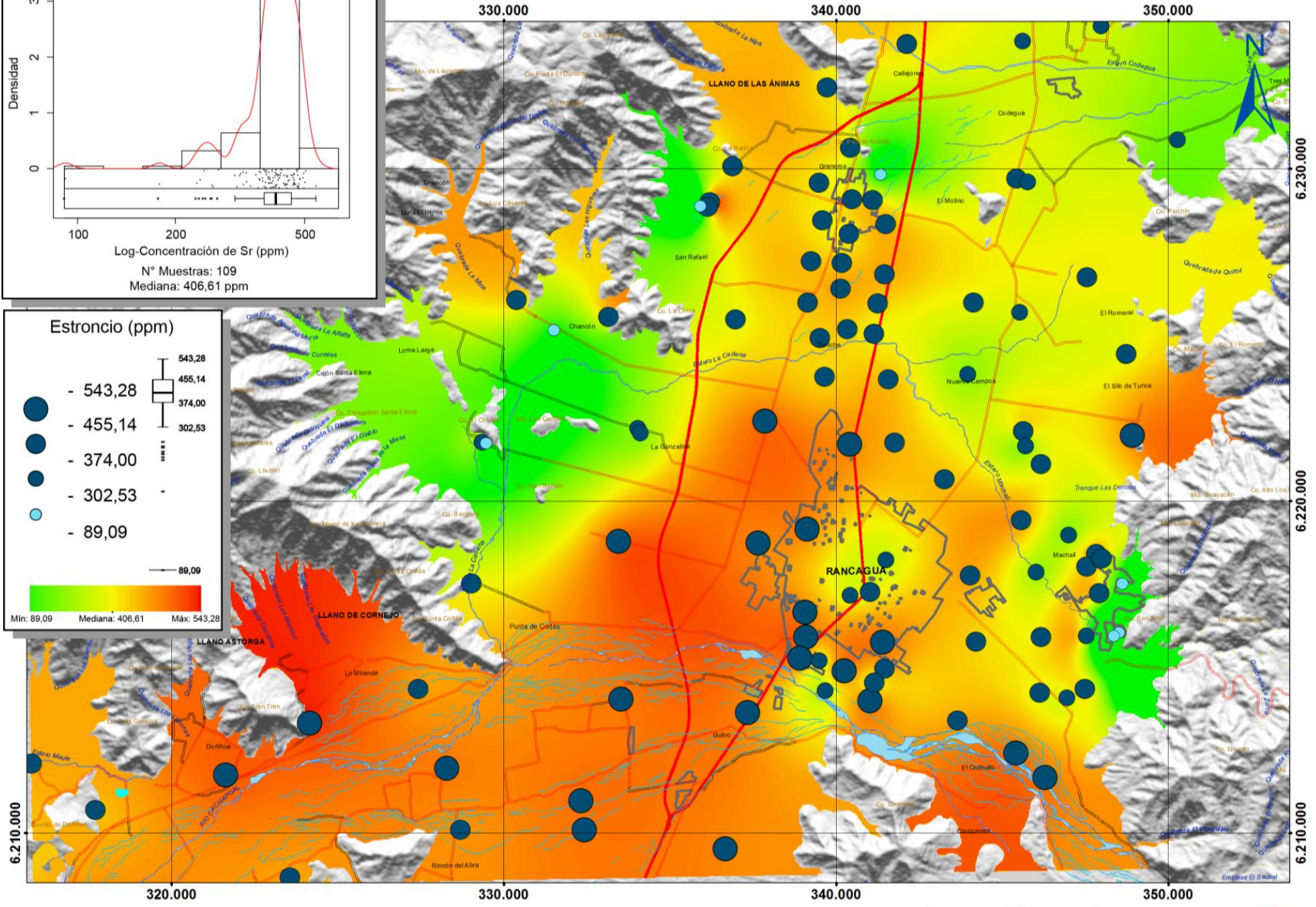
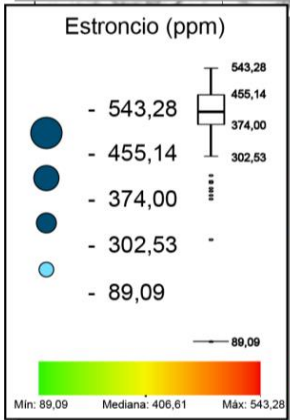
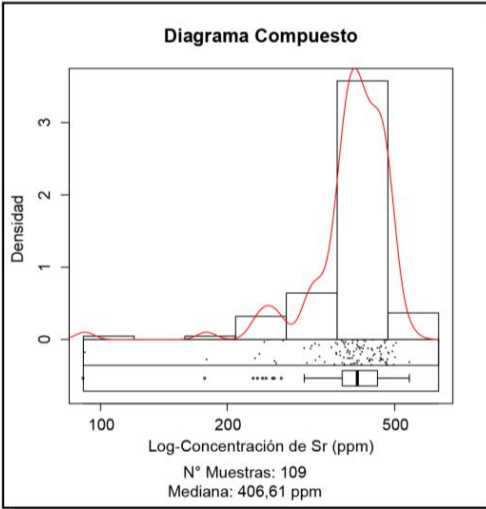
MAPA 17: CONCENTRACIONES DE RUBIDIO (ppm)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 18: CONCENTRACIONES DE ESTRONCIO (ppm)

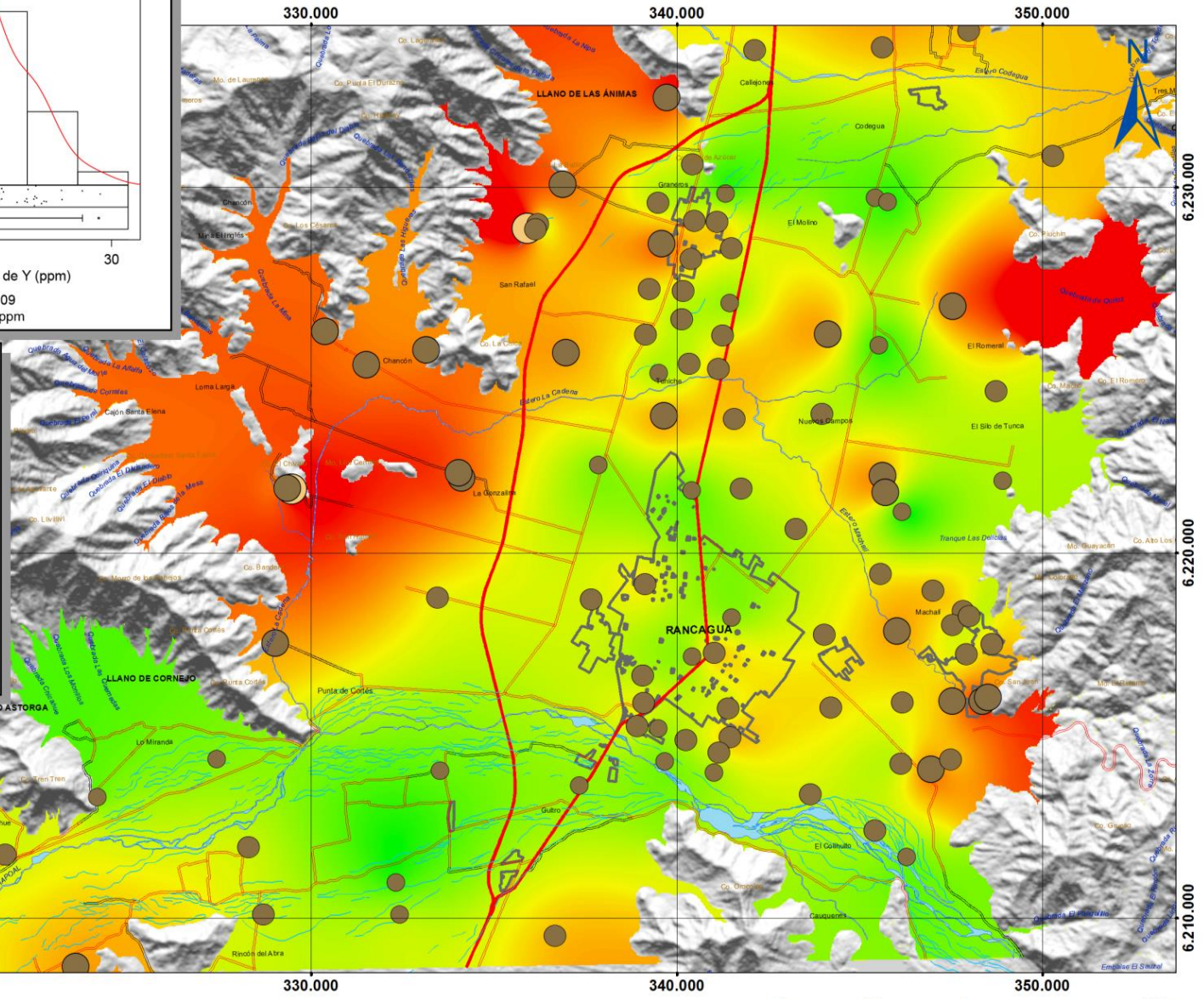
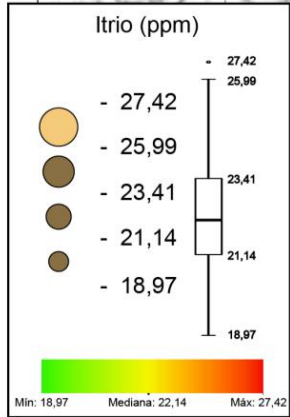
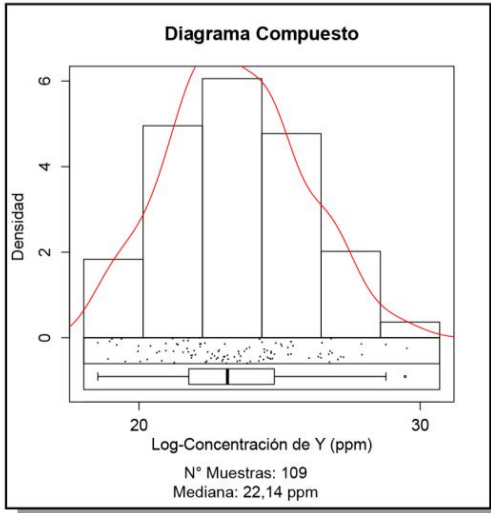


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 19: CONCENTRACIONES DE ITRIO (ppm)

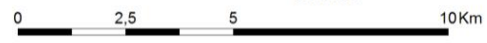
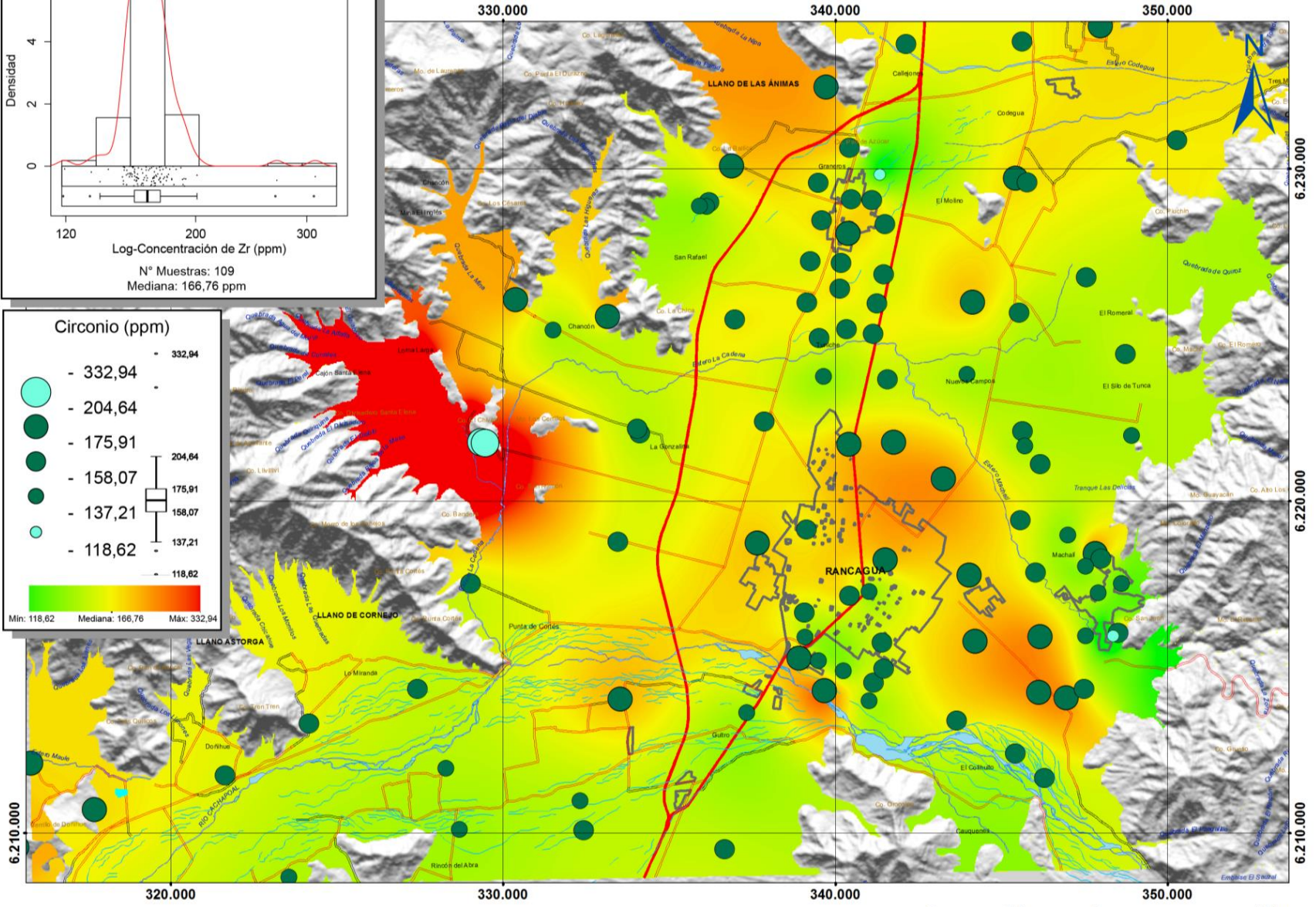
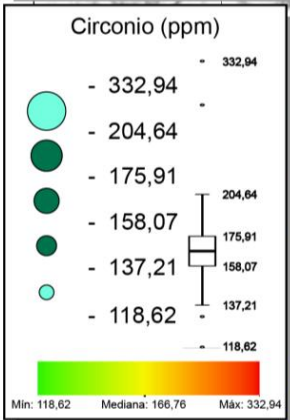
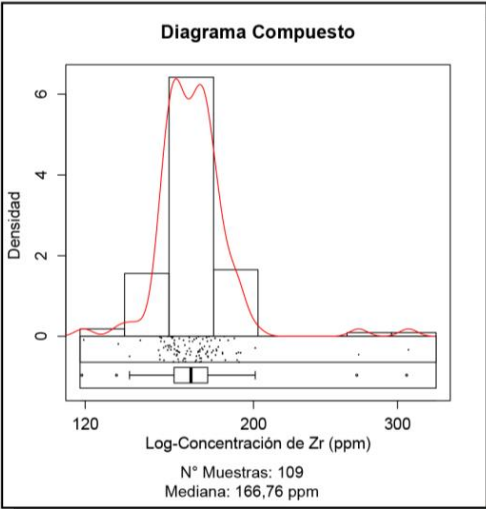


1:150.000



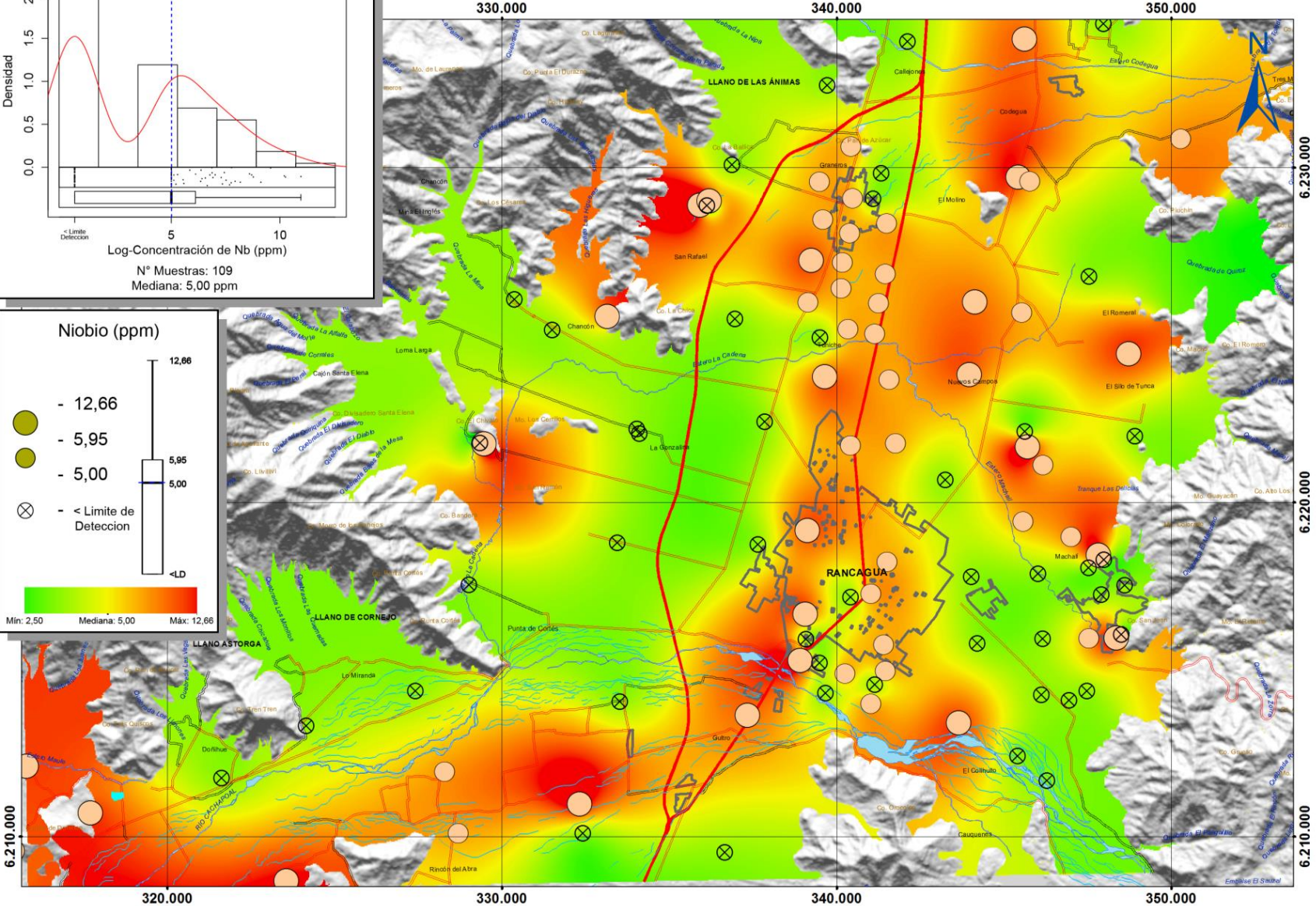
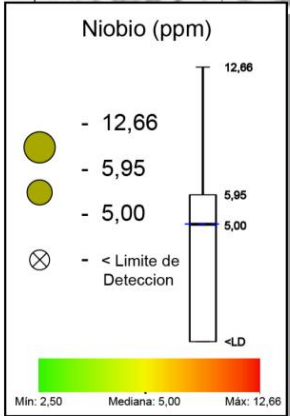
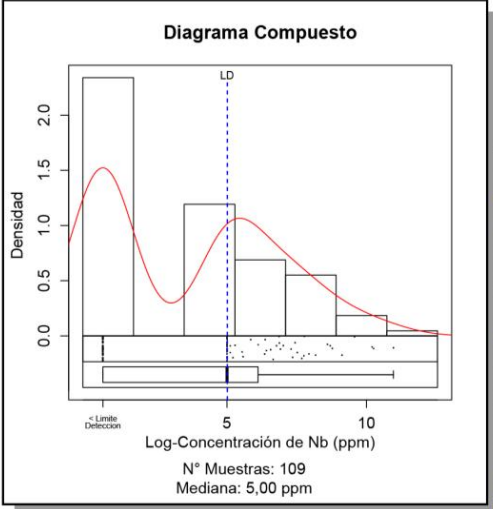
Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 20: CONCENTRACIONES DE CIRCONIO (ppm)

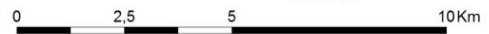


Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 21: CONCENTRACIONES DE NIOBIO (ppm)

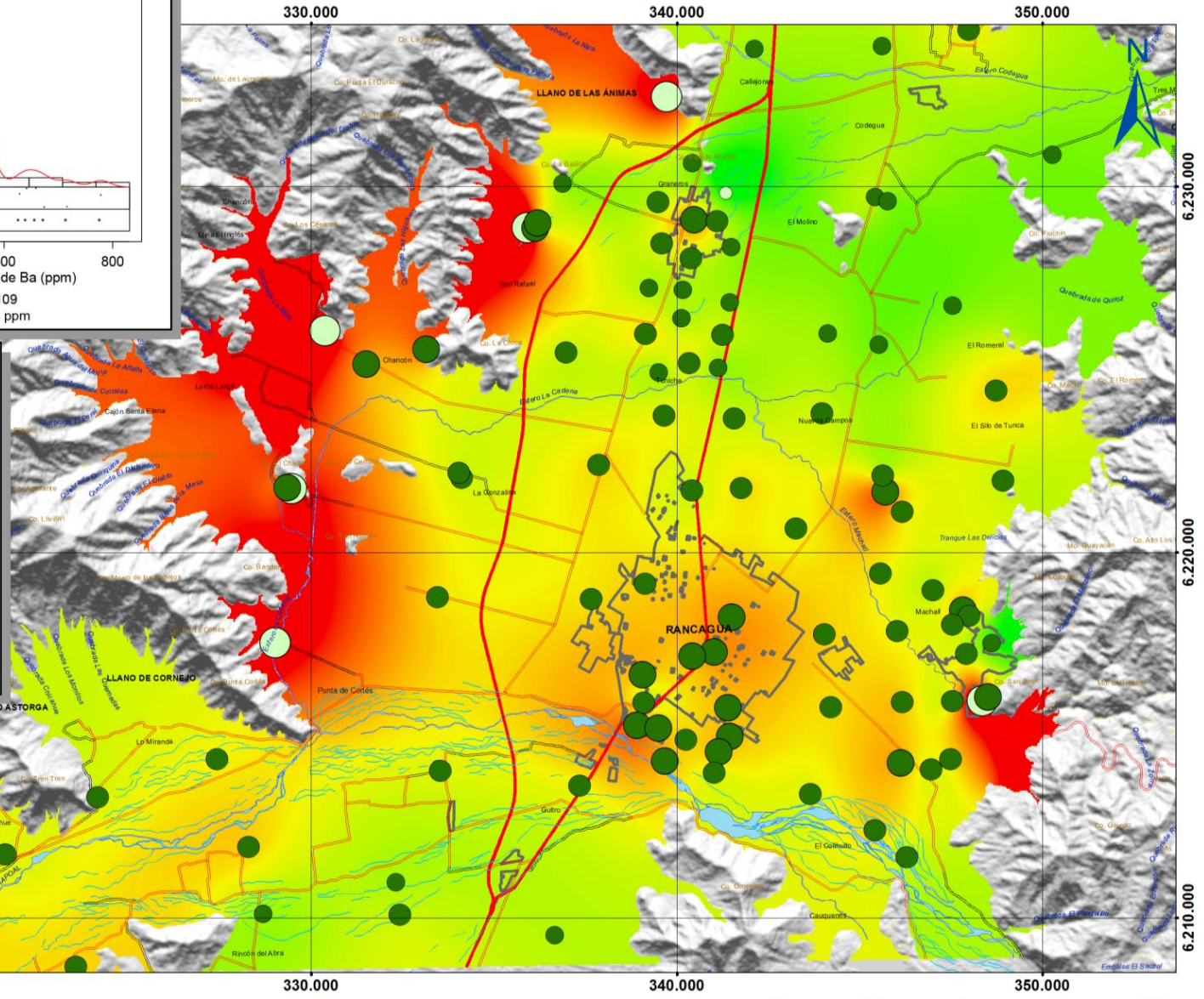
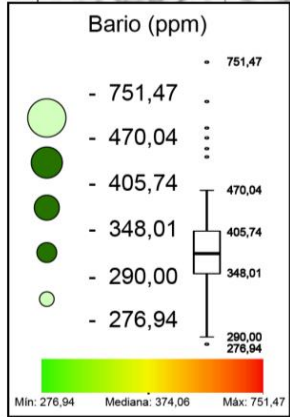
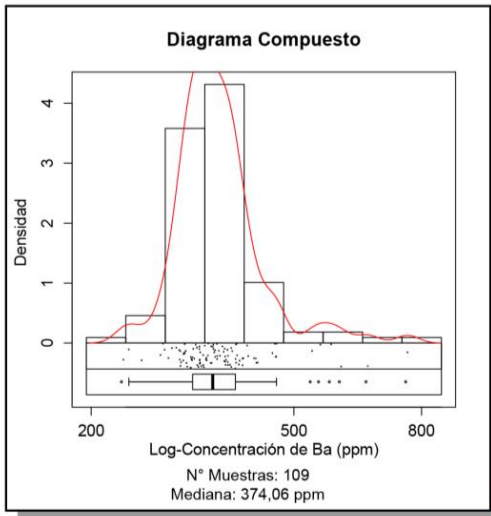


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 22: CONCENTRACIONES DE BARIO (ppm)

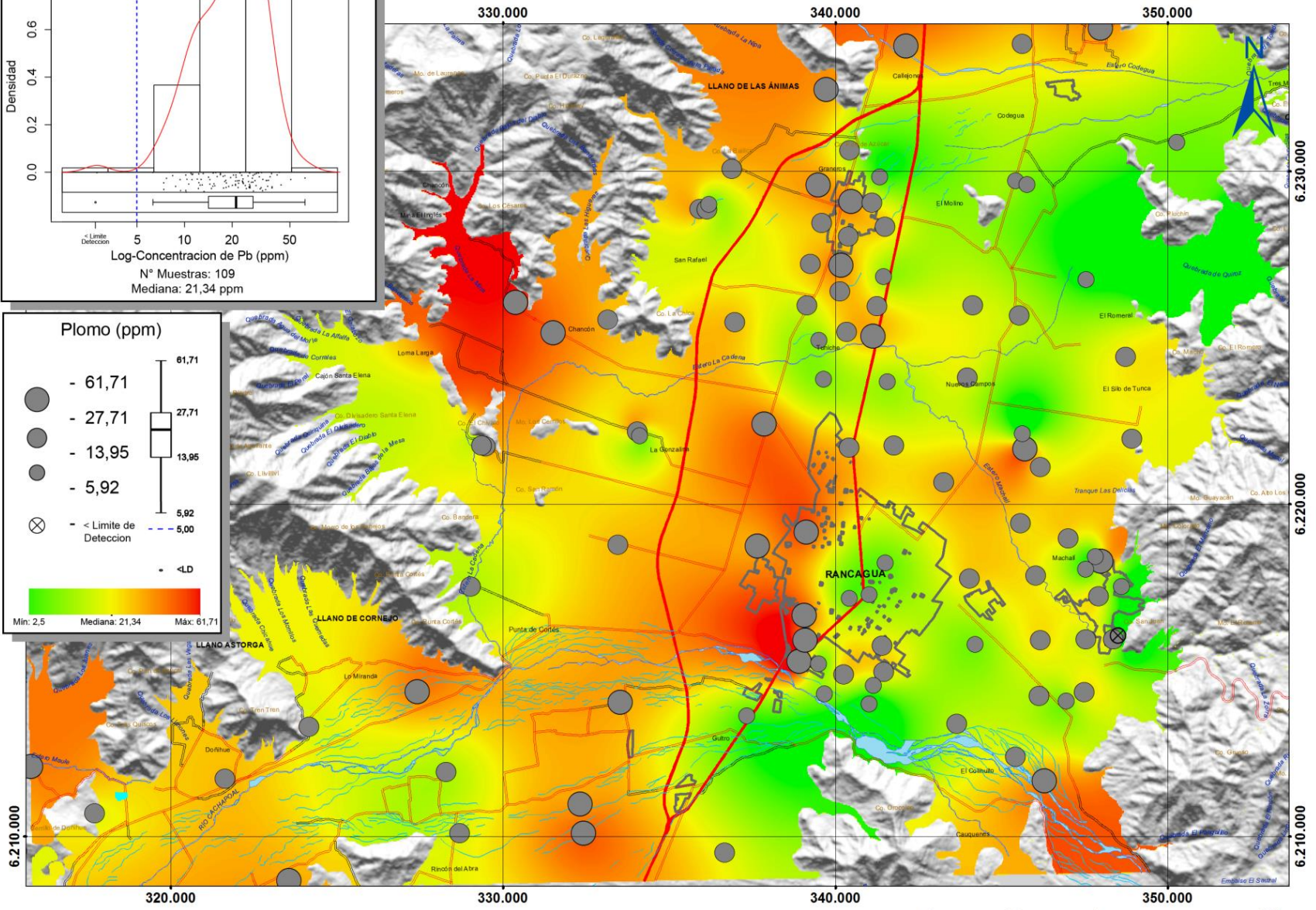
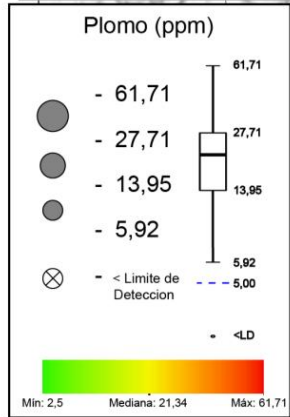
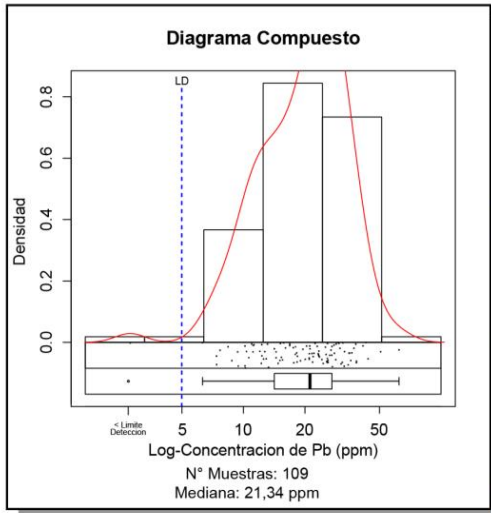


1:150.000

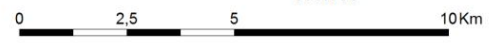


Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 23: CONCENTRACIONES DE PLOMO (ppm)

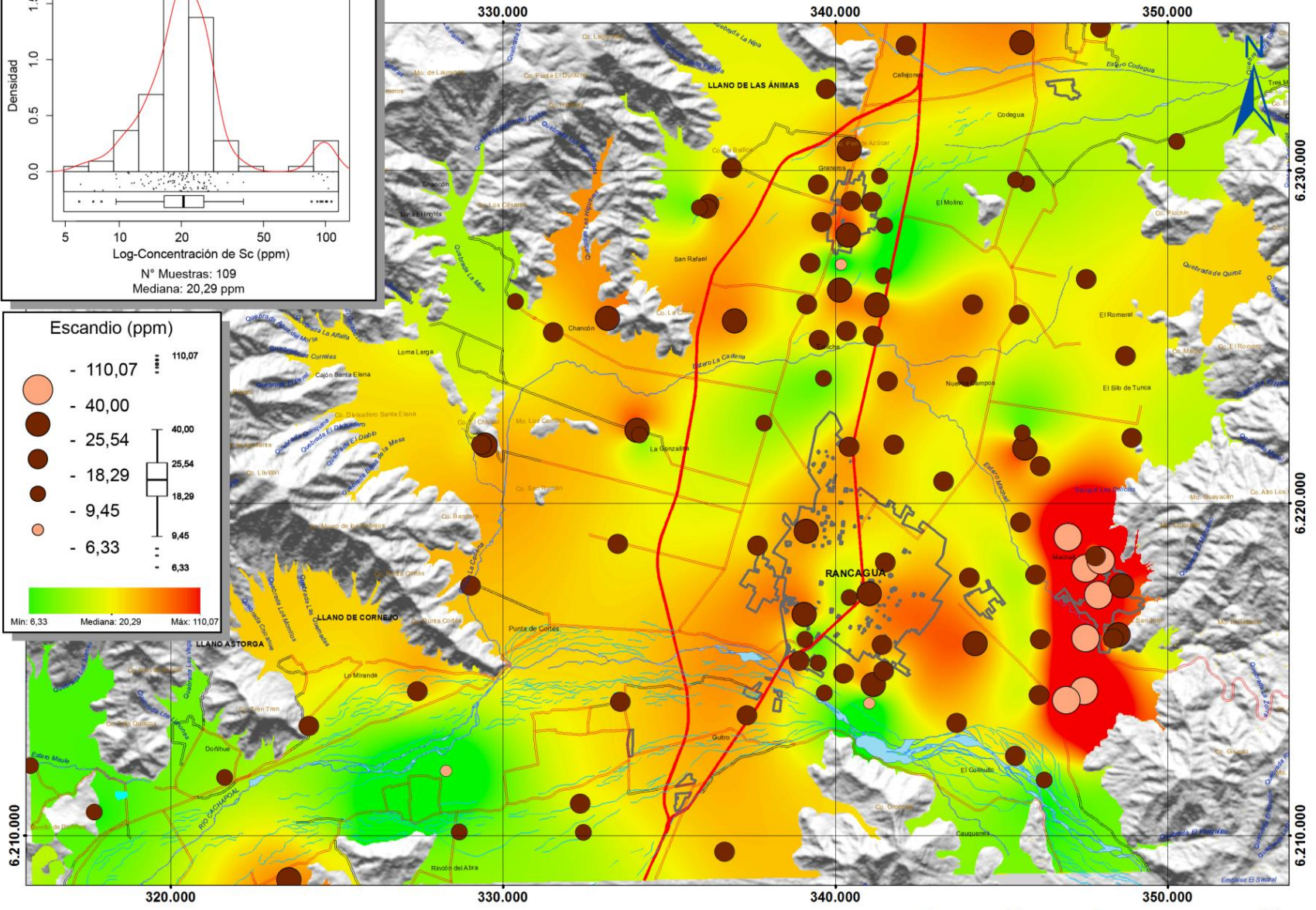
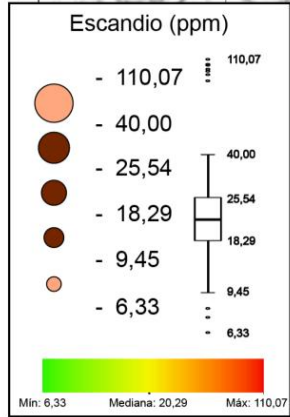
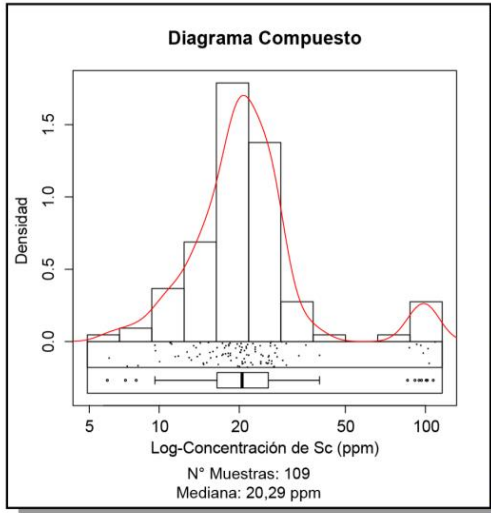


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 24: CONCENTRACIONES DE ESCANDIO (ppm)

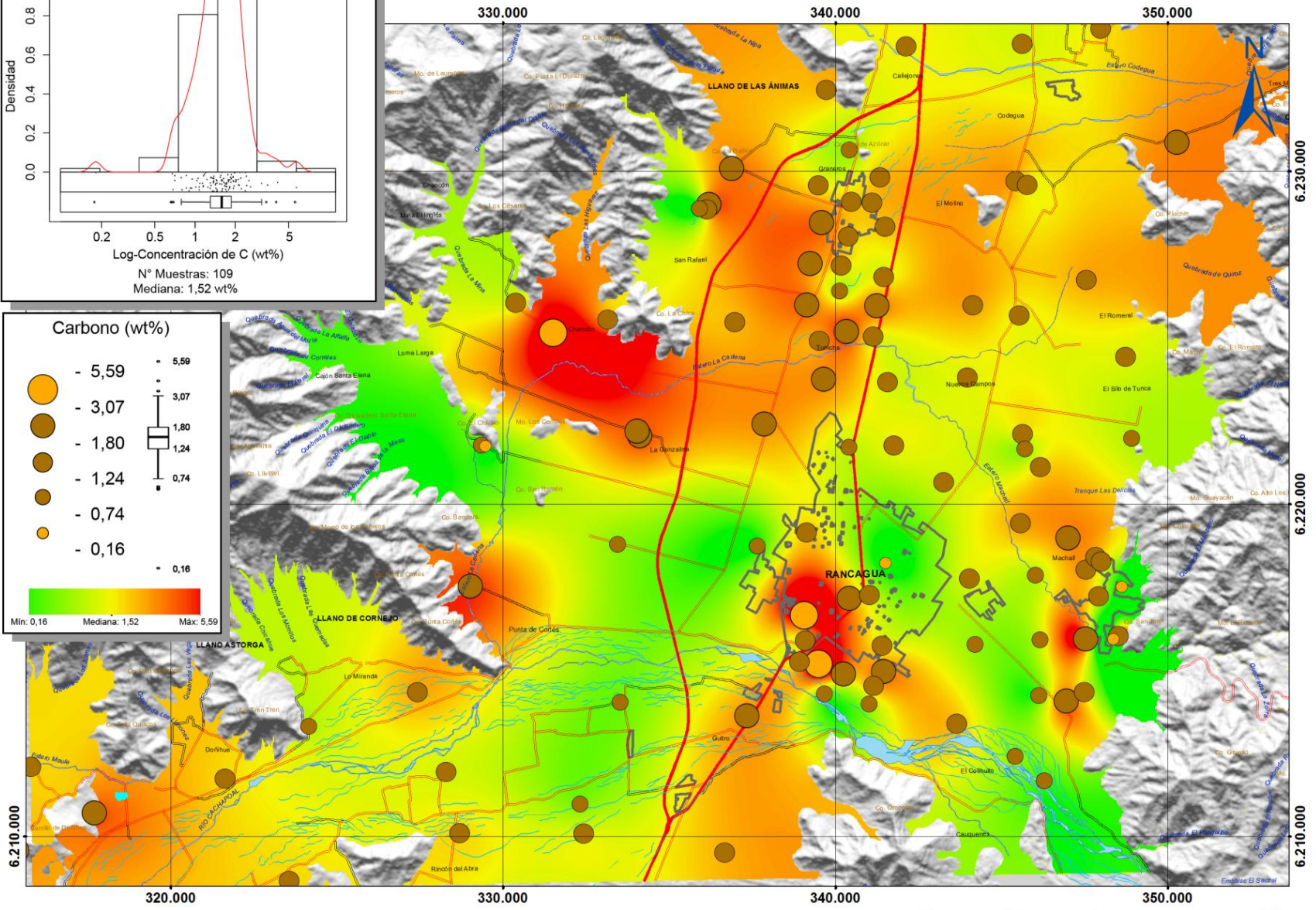
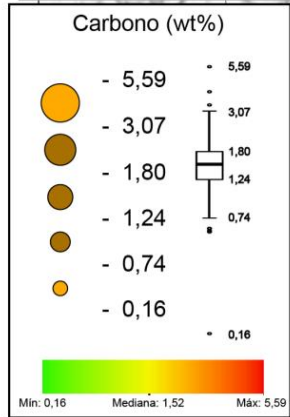
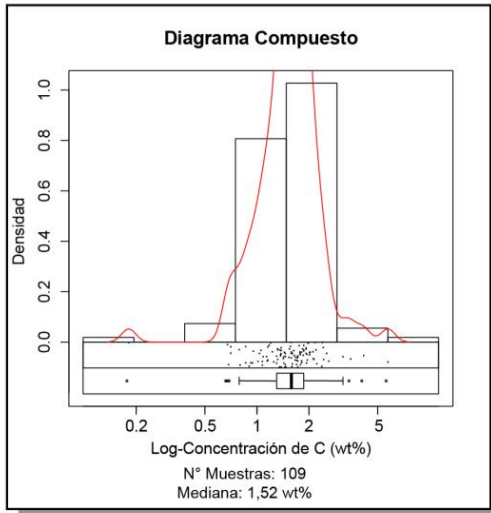


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

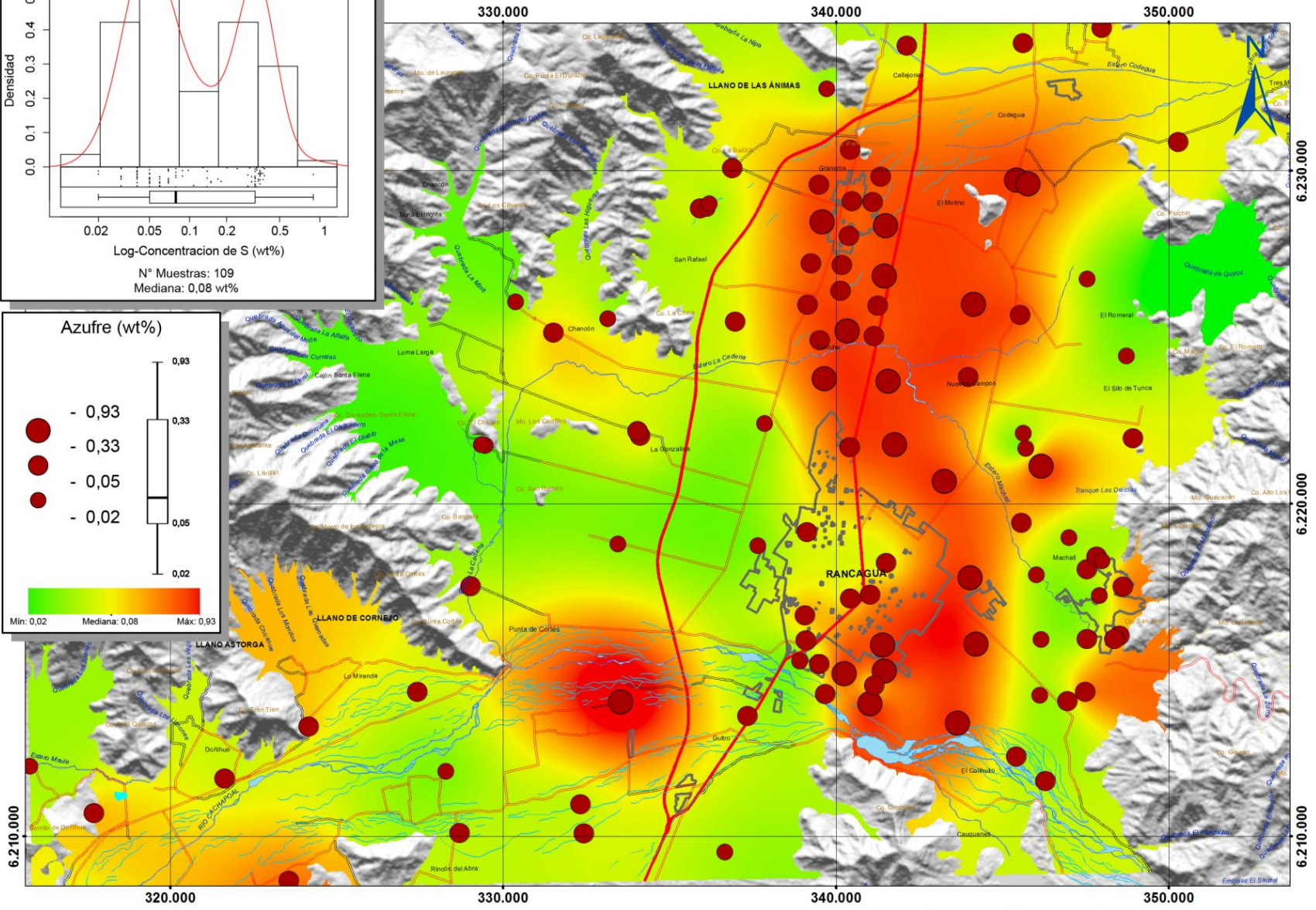
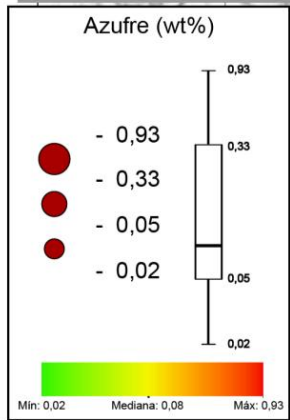
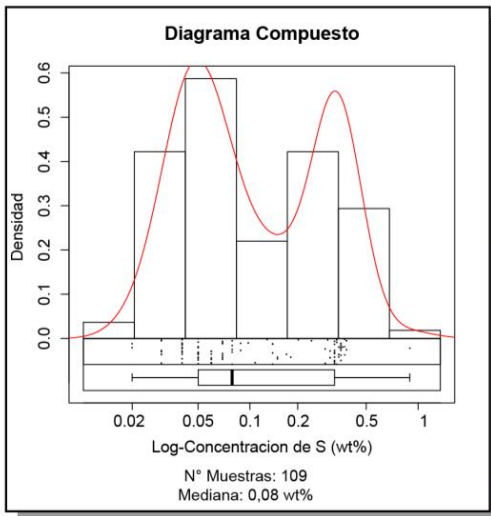
MAPA 25: CONCENTRACIONES DE CARBONO (wt%)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 26: CONCENTRACIONES DE AZUFRE (ppm)

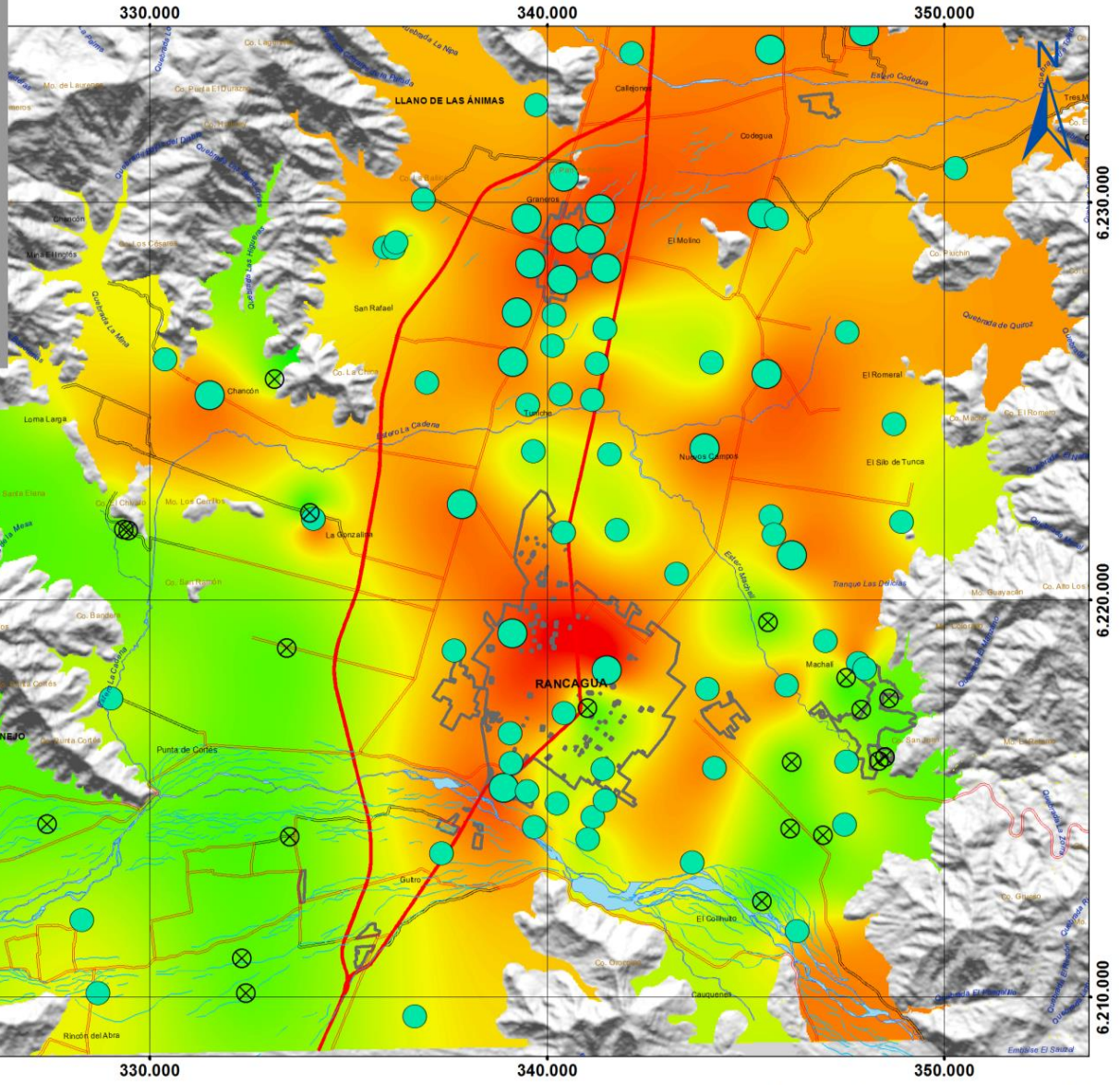
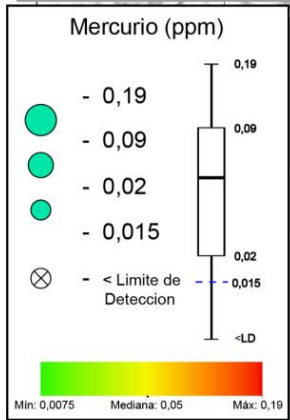
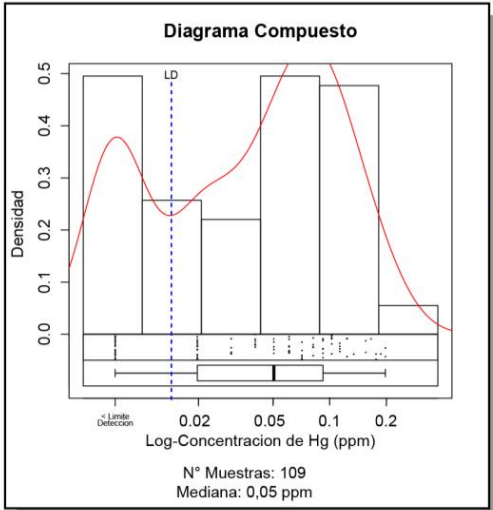


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

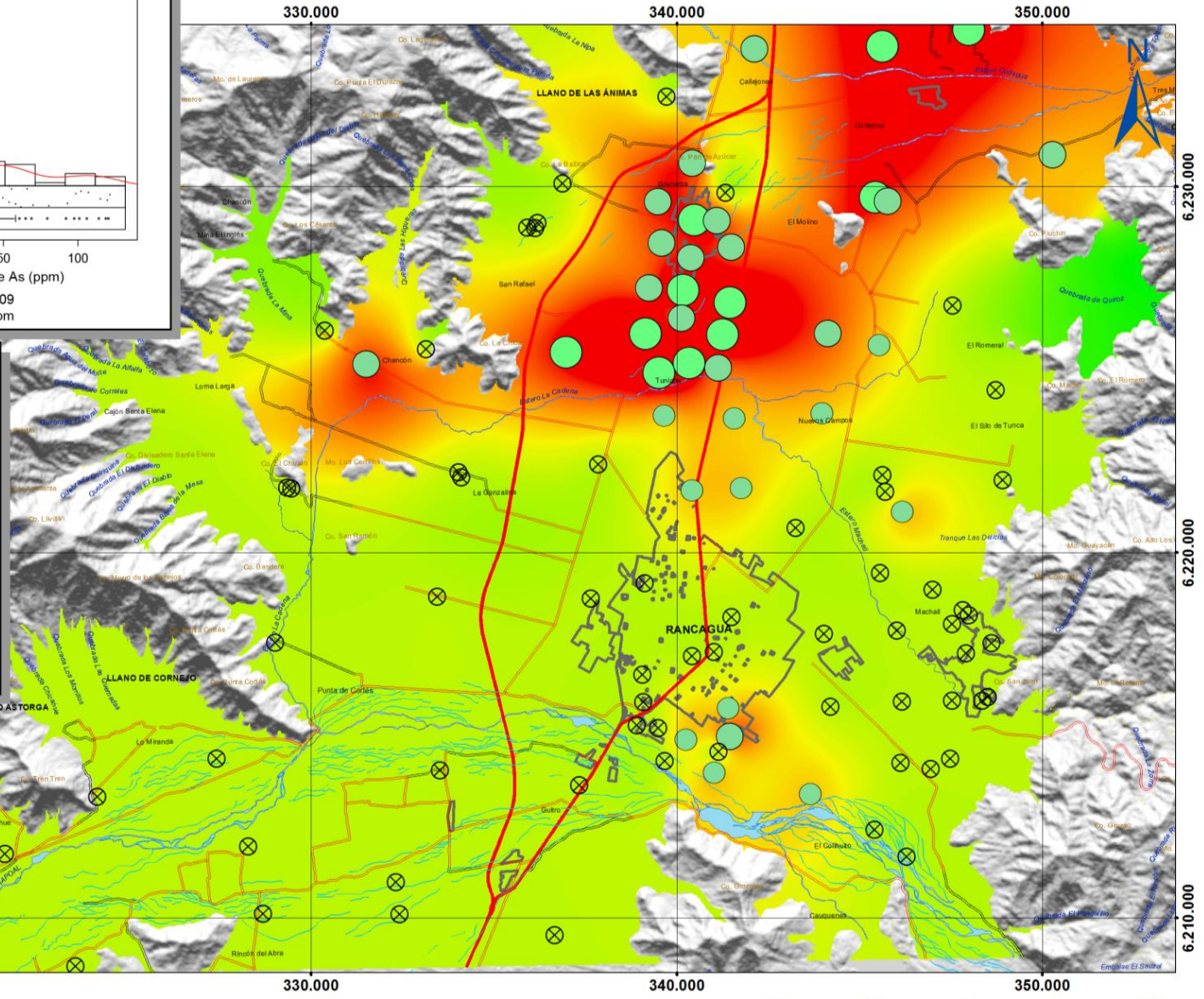
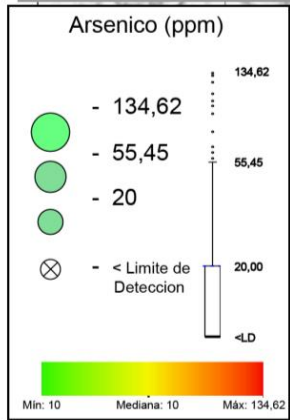
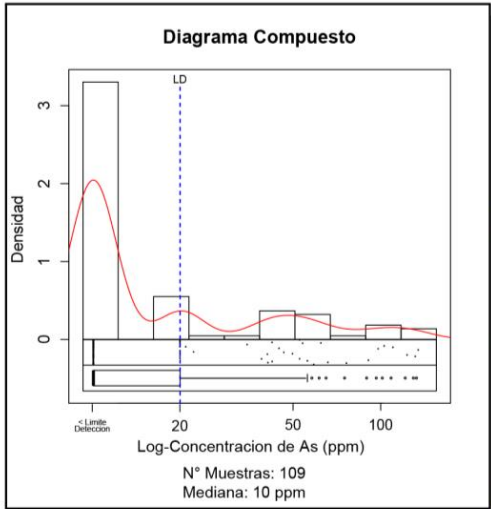
MAPA 27: CONCENTRACIONES DE MERCURIO (ppm)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 28: CONCENTRACIONES DE ARSENICO (ppm)

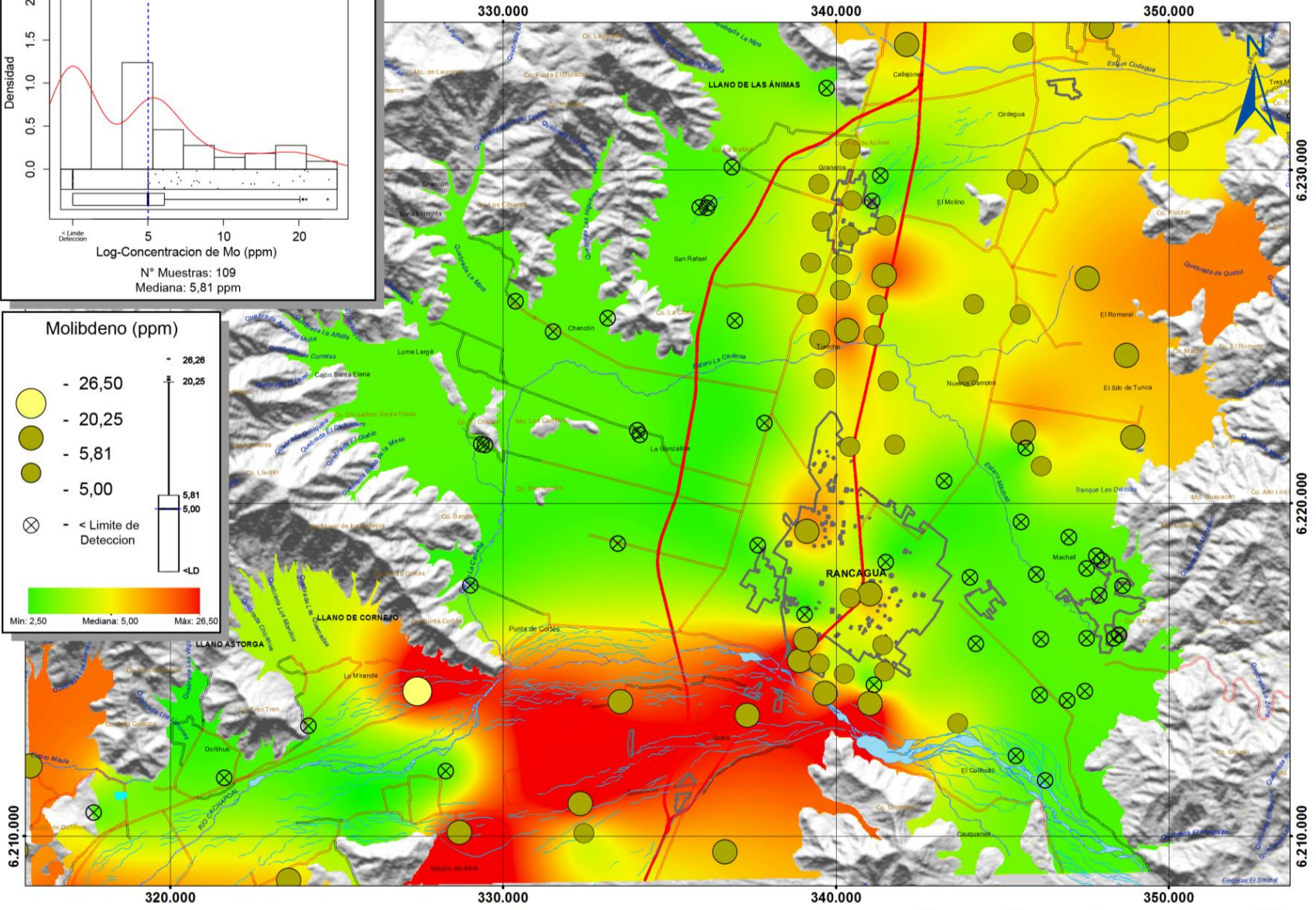
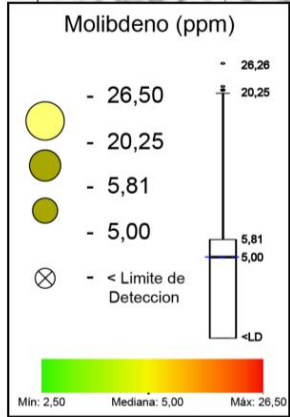
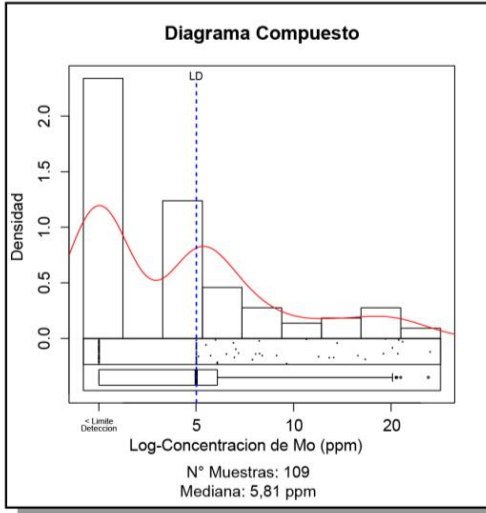


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 29: CONCENTRACIONES DE MOLIBDENO (ppm)

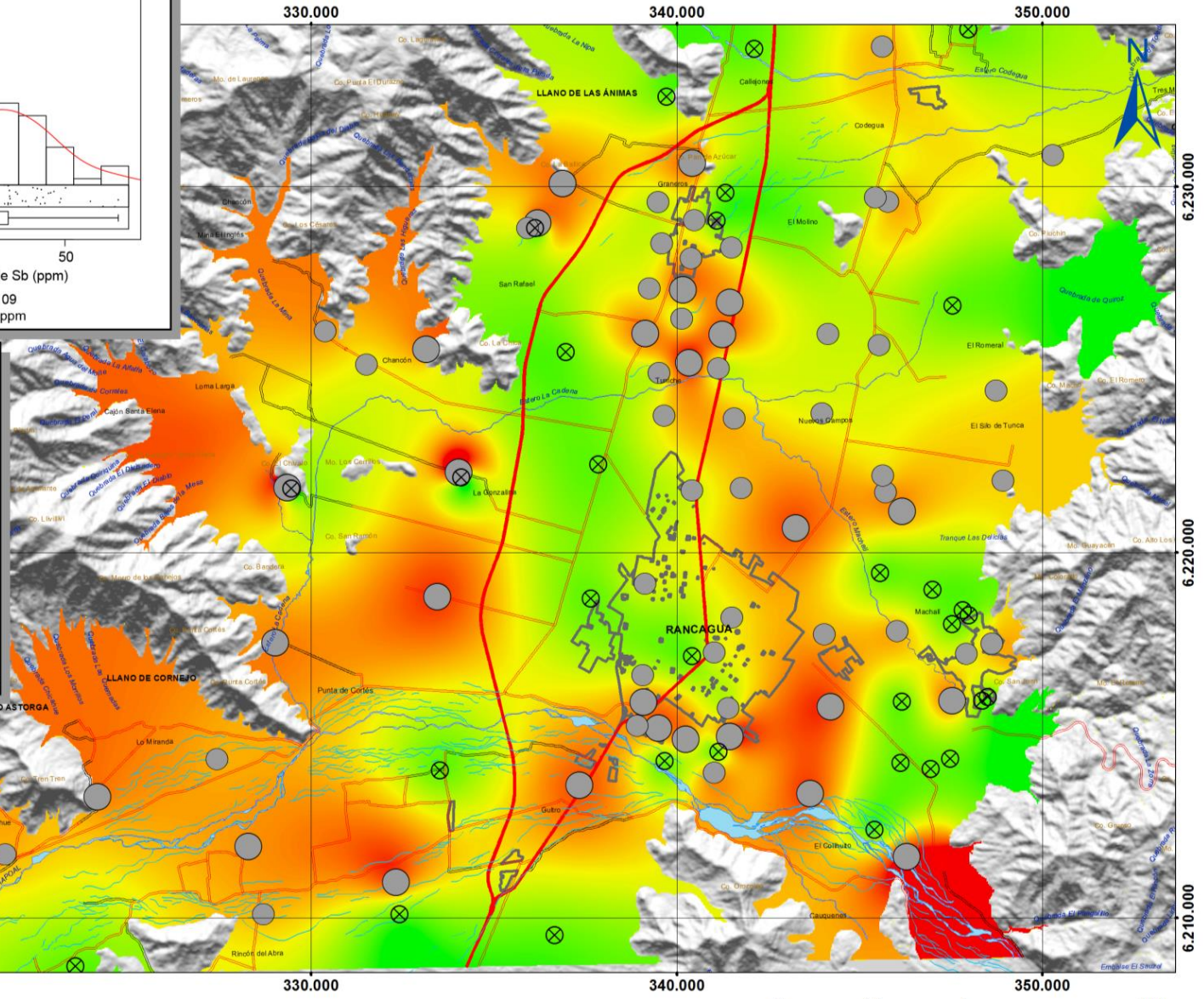
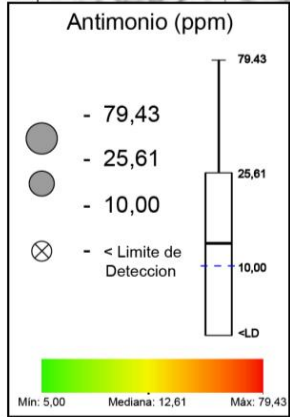
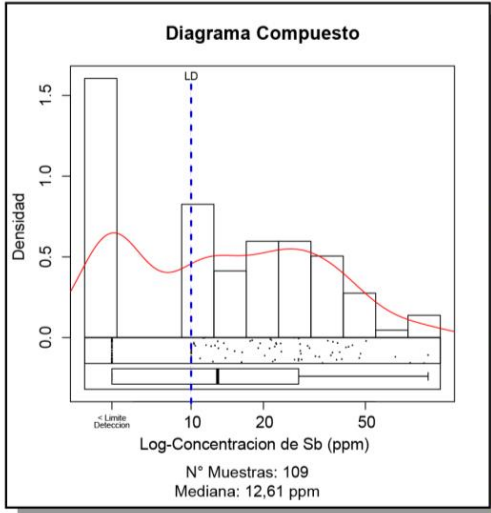


1:150.000

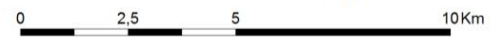


Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 30: CONCENTRACIONES DE ANTIMONIO (ppm)

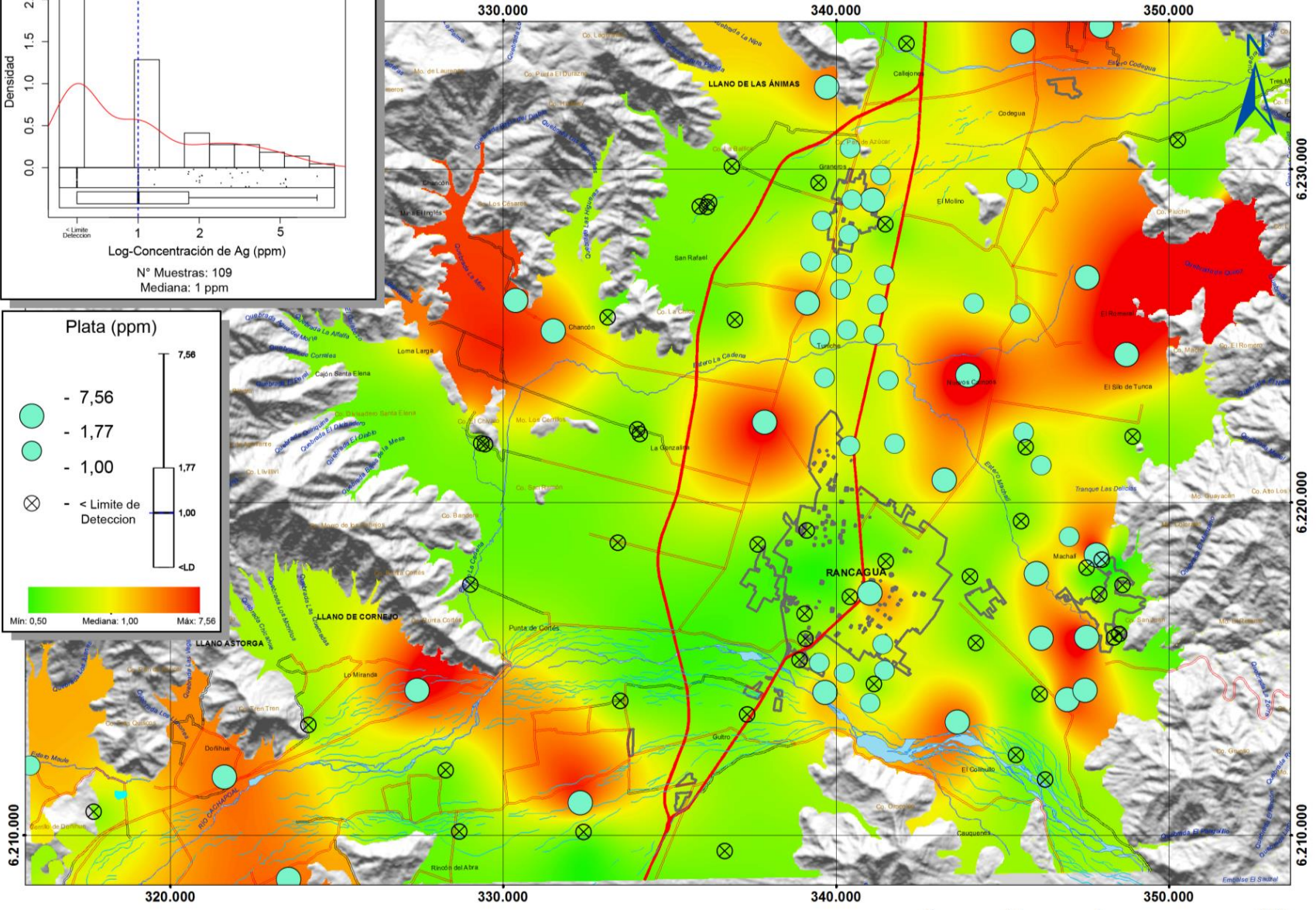
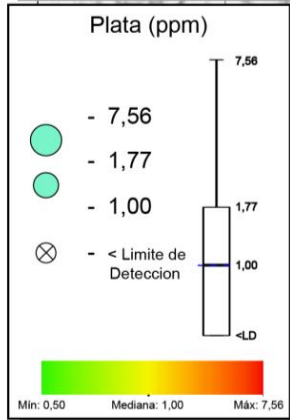
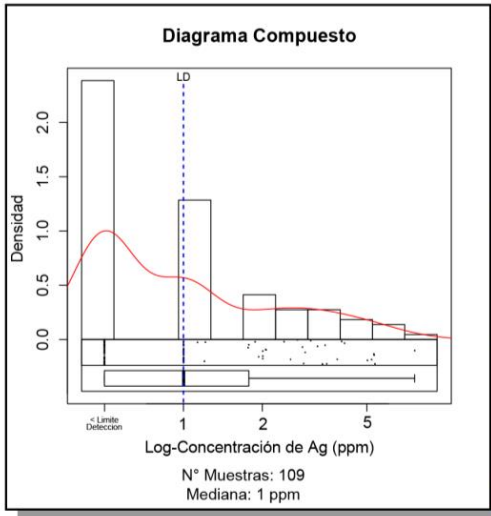


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 31: CONCENTRACIONES DE PLATA (ppm)

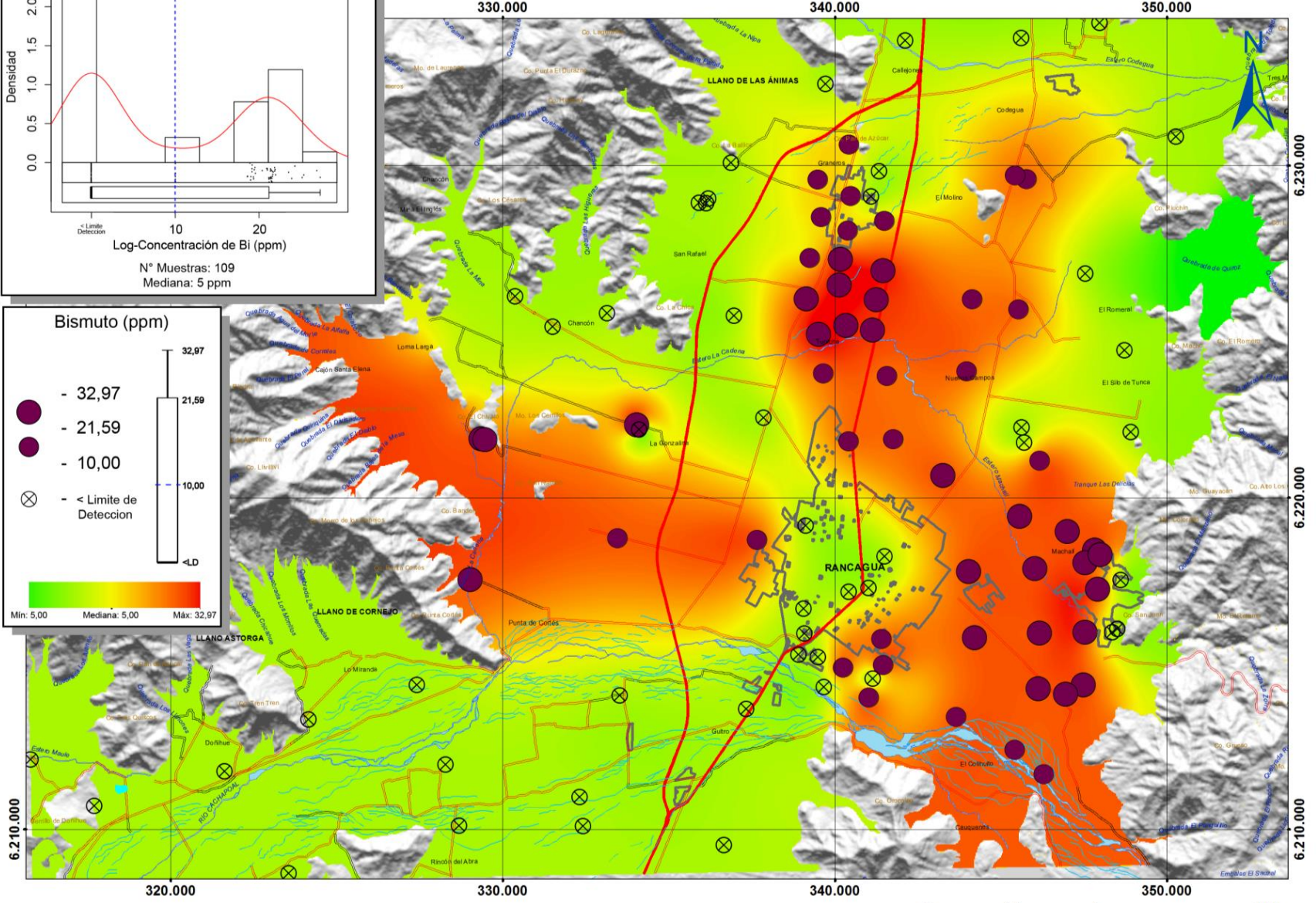
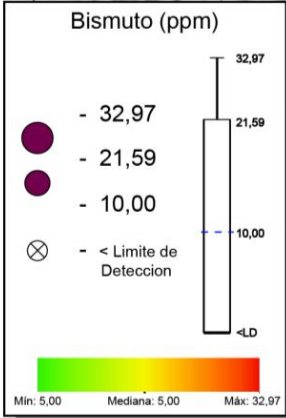
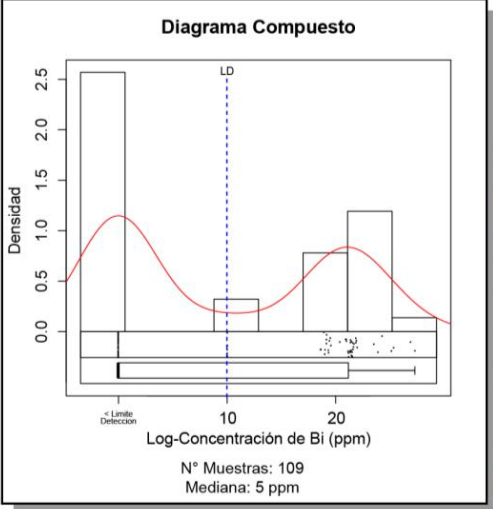


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

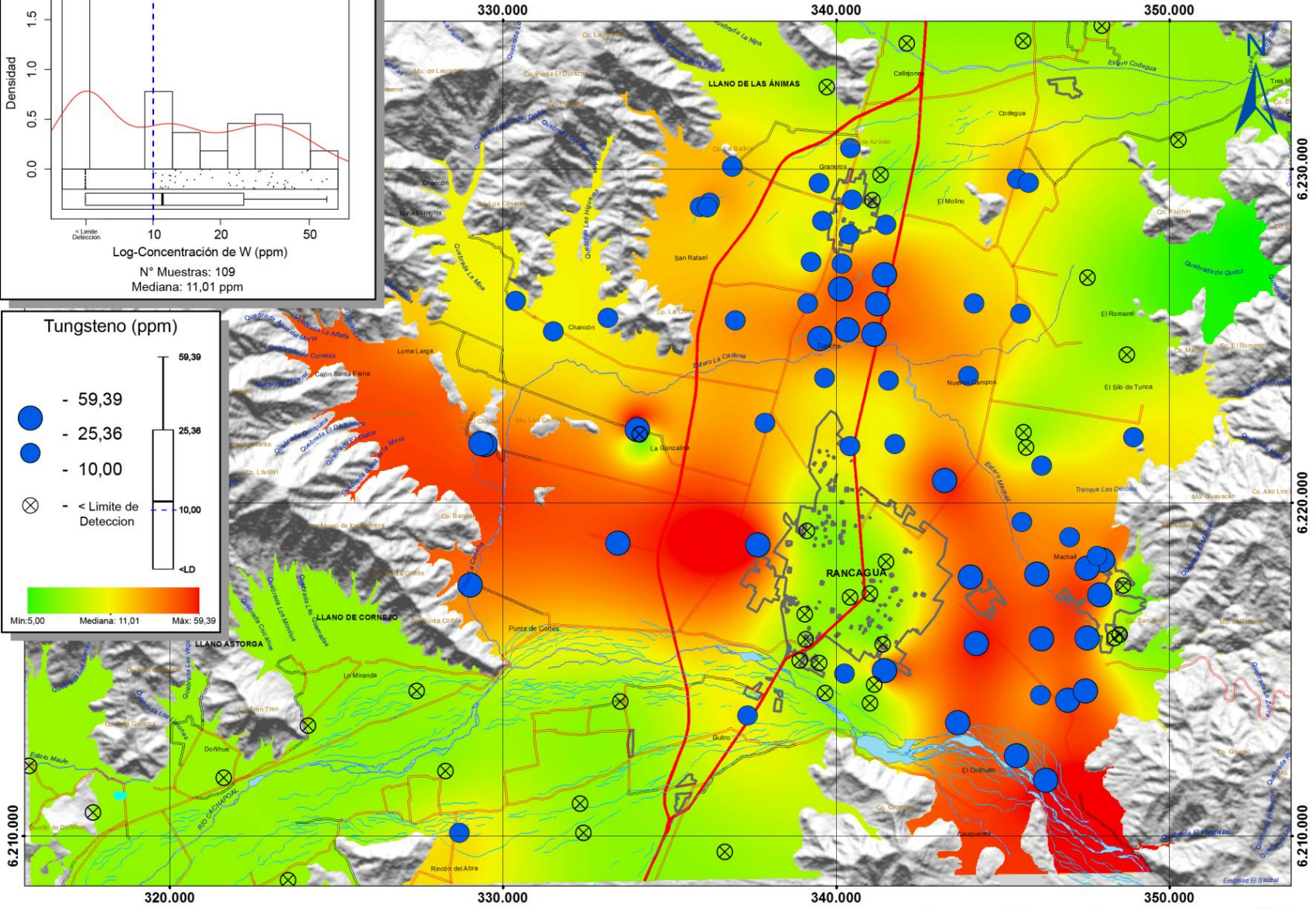
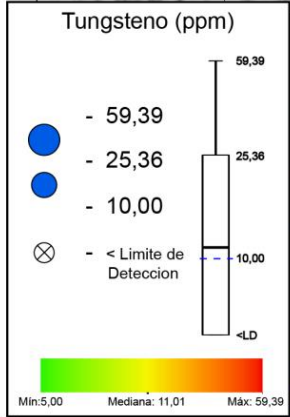
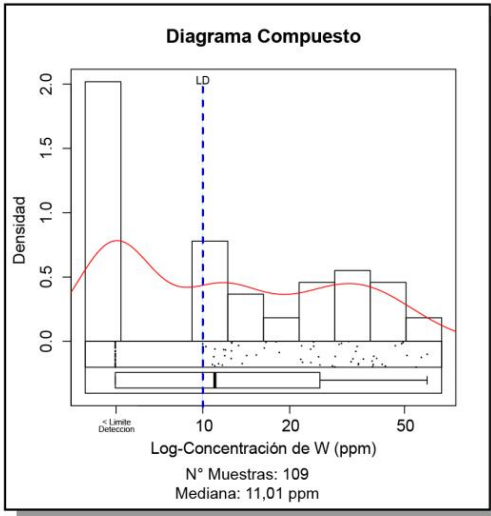
MAPA 32: CONCENTRACIONES DE BISMUTO (ppm)



1:150.000

Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 33: CONCENTRACIONES DE TUNGSTENO (ppm)

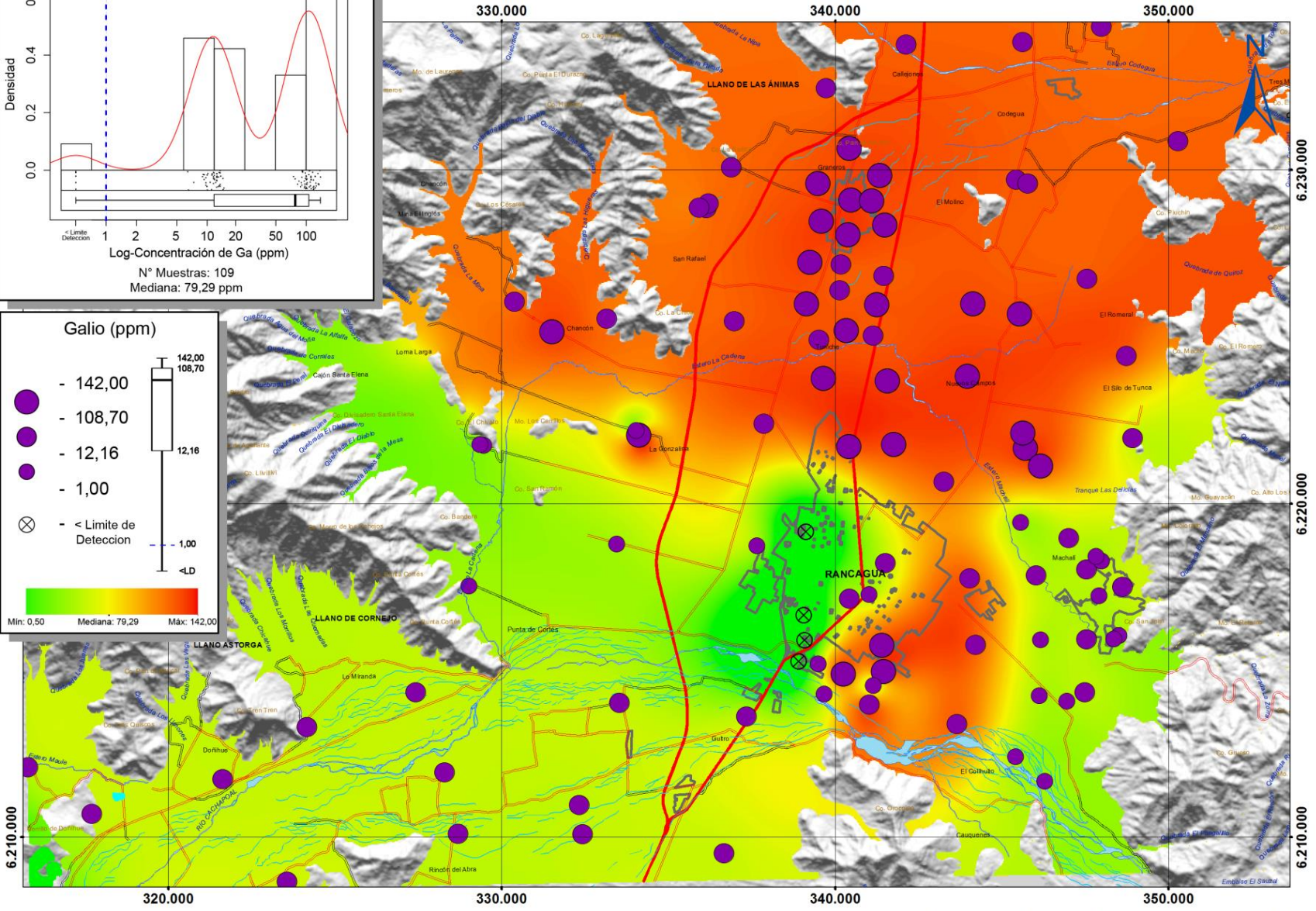
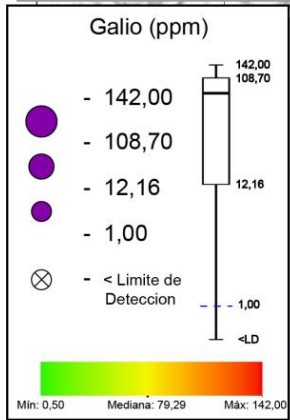
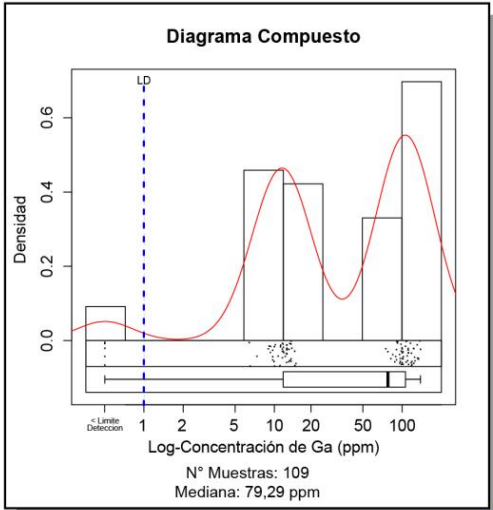


1:150.000



Geoquímica de Suelos (20 - 30 cms)

MAPA 34: CONCENTRACIONES DE GALIO (ppm)



1:150.000

0 2.5 5 10Km

IV. Duplicados Analíticos

Muestra	Punto	XCOO	YCOO	Z	Tipo	SiO2	Al2O3	TiO2	Fe2O3	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	P2O5	Cu	V	Cr	Co	Ni	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Sc	C	S	Hg	As	Mo	Sb	Ag	Bi	W	Ga		
64	25	344104	6224183	15	VF	55,11	16,16	1,04	9,12	2,84	2,54	0,18	2,00	1,63	0,25	405,27	194,20	21,07	28,60	8,66	94,64	53,92	319,29	20,13	150,01	5,00	366,46	13,18	20,71	1,50	0,34	0,08	20	5	10	1,92	19,18	15,36	136,20		
67	25	344104	6224183	20	VF	55,70	16,28	1,03	8,93	2,93	2,64	0,17	2,04	1,70	0,27	453,65	194,08	20,37	27,91	7,97	93,01	57,41	343,48	20,82	155,26	5,00	337,03	5,00	25,81	1,45	0,33	0,05	20	5	10	1,00	19,31	12,11	132,95		
						-1,06	-0,74	0,97	2,11	-3,12	-3,86	5,71	-1,98	-4,20	-7,69	-11,27	0,06	3,38	2,44	8,30	1,74	-6,27	-7,30	-3,37	-3,44	0,00	8,37	89,99	-21,93	3,39	2,99	46,15	0,00	0,00	0,00	63,01	-0,68	23,66	2,42		
65	25	344104	6224183	30	VF	55,06	16,68	1,05	9,19	2,83	2,51	0,18	1,98	1,60	0,23	343,69	197,10	20,43	28,82	8,71	89,55	53,59	321,25	21,20	154,82	6,85	357,67	18,38	21,13	1,31	0,33	0,13	20,00	5,00	12,31	7,56	19,33	21,93	140,50		
68	25	344104	6224183	30	VF	55,74	16,24	1,10	8,42	2,85	2,77	0,15	1,96	2,06	0,43	270,13	208,45	29,88	26,15	15,00	92,20	67,56	363,53	19,92	173,28	5,00	298,69	14,39	15,24	1,80	0,35	0,08	20,00	5,00	10,00	1,74	18,54	10,00	114,90		
						-1,23	2,67	-4,65	8,75	-0,70	-9,85	18,18	1,02	-25,14	-60,61	23,97	-5,60	-37,57	9,71	-53,06	-2,92	-23,06	-12,35	6,23	-11,25	31,22	17,97	24,35	32,39	-31,51	-5,88	47,62	0,00	0,00	20,71	125,16	4,17	74,73	20,05		
80	31	341891	6222140	20	PL	55,51	17,61	1,00	8,30	3,08	3,34	0,15	2,51	1,89	0,34	620,36	190,94	33,44	25,93	13,46	98,02	71,05	429,99	21,28	184,44	5,00	391,02	20,48	21,26	1,37	0,36	0,02	20,00	5,00	20,18	1,00	19,25	11,01	120,00		
82	31	341891	6222140	20	PL	55,45	17,45	1,00	8,24	3,11	3,35	0,15	2,55	1,90	0,33	584,06	188,98	32,97	25,55	10,92	95,53	69,47	433,99	21,81	182,12	9,87	387,16	9,49	20,32	1,31	0,34	0,02	20,00	5,00	9,70	1,00	19,07	15,09	122,00		
						0,11	0,91	0,00	0,73	-0,97	-0,30	0,00	-1,58	-0,53	2,99	6,03	1,03	1,42	1,48	20,84	2,57	2,25	-0,93	-2,46	1,27	-65,50	0,99	73,34	4,52	4,48	5,71	0,00	0,00	0,00	70,15	0,00	0,94	-31,26	-1,65		
84	32	341711	6224035	20	PL	54,55	17,30	0,99	8,70	3,37	3,74	0,16	2,37	1,76	0,31	626,50	186,11	27,08	26,90	13,91	93,97	61,93	424,90	23,11	160,84	5,00	355,20	12,86	23,78	1,26	0,36	0,03	20,00	5,00	20,77	1,00	19,05	14,18	129,00		
86	32	341711	6224035	20	PL	54,09	17,38	0,96	8,69	3,34	3,88	0,16	2,37	1,80	0,29	404,39	181,75	23,08	26,79	12,87	92,75	63,98	414,76	21,95	158,44	5,00	375,06	12,44	28,54	1,40	0,37	0,02	20,00	5,00	12,06	1,00	19,25	13,66	135,00		
						0,85	-0,46	3,08	0,12	0,89	-3,67	0,00	0,00	-2,25	6,67	43,09	2,37	15,95	0,41	7,77	1,31	-3,26	2,42	5,15	1,50	0,00	-5,44	3,32	-18,20	-10,53	-2,74	40	0,00	0,00	53,06	0,00	-1,04	3,74	-4,55		
90	35	339200	6217014	20	UR	51,46	15,50	0,91	7,68	4,47	2,91	0,16	2,49	2,02	0,42	556,44	151,63	155,41	35,36	24,36	16,12	77,88	464,06	21,14	163,60	7,21	410,69	41,63	27,58	4,05	0,14	0,09	<20	<5	10,81	<1	<10	<10	<1,0		
90(b)	35	339200	6217014	20	UR	54,47	15,90	0,93	8,39	4,01	3,61	0,17	2,42	2,03	0,32	466,41	127,86	162,24	28,52	25,22	12,71	80,10	472,11	22,63	168,80	<5	432,47	32,22	17,92	1,99	0,06	0,07	<20	5,32	<10	<1	<10	<10,8	<1,0		
						-5,68	-2,55	-2,17	-8,84	10,85	-21,47	-6,06	2,85	-0,49	27,03	17,60	17,01	-4,30	21,42	-3,47	23,66	-2,81	-1,72	-6,81	-3,13	-5,17	25,48	42,46	68,21	80,00	25,00										
96	38	339819	6214654	20	UR	55,97	16,88	1,02	8,67	4,01	2,98	0,16	2,65	1,89	0,30	1238,82	182,96	22,49	27,84	14,21	116,59	72,59	352,10	20,20	204,64	<5	416,18	11,94	14,45	0,87	0,08	0,08	<20	8,86	<10	1,87	<1	<10	12,00		
98	38	339819	6214654	20	UR	57,04	17,04	0,90	7,61	3,89	3,10	0,16	2,84	1,94	0,27	1533,15	<10	<10	<5	34,46	35,77	12,04	<5	7,81	29,88	<5	<20	8,72	8,77	0,97	0,07	0,06	<20	<5	55,26	<1	<1	<10	13,00		
						-1,89	-0,94	12,50	13,02	3,04	-3,95	0,00	-6,92	-2,61	10,53	-21,24				-83,21	106,09	143,09		88,47	149,04			31,17	48,92	-10,87	13,33	28,57								-8,00	
104	41	339641	6215549	30	UR	56,55	17,55	0,91	7,69	3,62	2,93	0,17	2,66	2,06	0,24	1539	<10	<10	<5	36	35	12	<5	8	31	<5	<20	5	7	0,21	0,07	0,06	<20	<5	25	<1	<1	<10	13		
107	41	339641	6215549	20	UR	53,32	17,03	0,92	7,90	4,14	3,11	0,17	2,66	2,07	0,50	1525	155	17	25	17	140	89	373	21	155	<5	416	10	13	5,59	0,07	0,06	<20	5	36	1	<1	<10	12		
						5,88	3,01	-1,09	-2,69	-13,40	-5,96	0,00	0,00	-0,48	-70,27	0,91				71,70	-120,00	-152,48		-89,66	-133,33		-66,67	-60,00	-185,52	0,00	0,00									8,00	
122	48	341157	6217643	30	UR	56,53	17,03	0,94	7,90	3,85	3,03	0,16	2,74	1,92	0,29	570,10	163,60	15,48	19,47	12,12	121,59	79,91	378,27	23,02	152,92	5,23	437,26	10,28	25,69	1,26	0,17		<20	7,83	12,10	2,41	<1	<10	10,08		
124	48	341157	6217643	30	UR	57,11	17,84	0,93	7,64	4,28	2,54	0,15	2,54	1,88	0,26	999,39	159,78	19,67	18,70	16,37	102,94	69,09	363,72	21,15	166,13	<5	384,56	9,39	22,12	0,74	0,17		<20	15,41	17,42	3,55	<1	<10	9,52		
						-1,02	-4,65	1,07	3,35	-10,58	17,59	6,45	7,58	2,11	10,91	-54,70	2,36	-23,84	4,03	-29,84	16,61	14,52	3,92	8,47	-8,28		12,83	9,05	14,93	52,00	0,00									5,71	
127	49	341542	6216119	20	PL	54,87	17,30	0,87	7,83	3,62	4,13	0,15	2,72	1,89	0,24	610,74	160,46	26,77	24,40	19,05	95,23	72,28	478,32	21,92	166,32	5,00	408,20	21,13	25,52	1,36	0,35	0,02	20,00	5,00	10,00	1,00	18,59	9,70	122		
129	49	341542	6216119	20	PL	56,67	16,71	0,96	8,14	3,24	3,76	0,15	2,53	2,08	0,25	277,44	179,17	38,11	31,68	15,13	89,59	79,45	434,50	22,82	180,24	6,19	386,76	25,11	28,18	1,01	0,35	0,17	20,00	5,00	57,85	1,36	21,86	44,16	104,55		
						-3,23	3,47	-9,84	-3,88	11,08	9,38	0,00	7,24	-9,57	-4,08	75,05	-11,02	-34,96	-25,96	22,94	6,10	-9,45	9,60	-4,02	-8,03	-21,27	5,39	-17,21	-9,91	29,54	0,00	-157,89	0,00	0,00	-141,05	-30,51	-16,17	-127,96	15,40		
133	51	343786	6213762	30	PL	55,07	16,45	0,95	8,48	3,38	4,03	0,15	2,49	1,83	0,39	571,07	182,40	30,74	32,86	14,75	104,86	69,52	439,71	21,71	172,38	7,68	367,69	14,99	21,30	1,65	0,38	0,05	20,00	5,00	43,50	3,50	21,31	38,68	98,60		
135	52	343786	6213762	20	PL	55,29	16,44	0,99	8,65	3,44	3,99	0,15	2,57	1,77	0,36	346,37	187,23	33,52	33,67	11,18	100,30	62,72	444,77	21,54	176,65	5,00	373,21	18,49	22,43	1,29	0,36	0,04	20,00	5,00	56,83	1,00	21,32	52,90	100,15		
						-0,40	0,06	-4,12	-1,98	-1,76	1,00	0,00	-3,16	3,33	8,00	48,98	-2,61	-8,65	-2,43	27,54	4,45	10,28	-1,14	0,79	-2,45	42,27	-1,49	-20,91	-5,17	24,49	5,41	22,22	0,00	0,00	-26,57	111,11	-0,05	-31,05	-1,56		
139	54	344347	6216140	20	PL	56,54	16,81	1,06	8,75	3,05	3,37	0,15	2,56	1,70	0,26	285,98	205,97	48,00	34,65	14,47	89,44	63,45	404,74	20,99	180,93	<5	391,69	32,54	31,16	1,06	0,36	0,06	<20	<5	<10	<1	21,84	40,44	105,60		
141	54	344347	6216140	20	PL	56,38	16,80	1,06	8,77	2,98	3,33	0,15	2,44	1,69	0,25	267,67	206,72	42,92	34,44	12,71	87,86	63,74	407,67	22,75	186,06	<5	391,09	10,81	29,85	1,02	0,36	0,09	<20	<5	44,00	<1	21,90	54,45	102,00		
						0,28	0,06	0,00	-0,23	2,32	1,19	0,00	4,80	0,59	3,92	6,61	-0,36	11,17	0,61	12,95	1,78	-0,46	-0,72	-8,05	-2,80		0,15	100,25	4,29	3,85	0,00	-40,00							-0,27	-29,53	3,47
147	57	345552	6212767	30	PL	55,47	16,32	0,88	7,92	3,82	4,94																														