

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



**DISTRIBUCIÓN Y EVALUACIÓN DE As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se
Y Zn, EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA CENTRAL
DE CHILE.**

OSCAR EDGARDO BURGOS ORTIZ

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

Profesor Guía:

Dr. Pedro Tume Zapata

Profesor Informante:

Matilde Basso Aránguiz

Concepción, Marzo 2017

Resumen ejecutivo

Para el presente trabajo se realizó el estudio de la distribución y una evaluación de contaminación por As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se y Zn para suelos de uso agrícola del estrato arable de la zona central de Chile, en el cual se utilizó la base de datos del informe **Estudio Ambiental sobre Contaminación de Suelos** del Servicio Agrícola Ganadero (SAG), adjudicado y realizado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) entre los años 2006 y 2008. Una de las principales actividades económicas de la zona en estudio corresponde a la agricultura, por lo que la entrada de elementos traza metálicos (ETM) representa gran interés debido a los posibles riesgos para el medio ambiente y la salud humana.

Los objetivos que se plantearon en este trabajo fueron, en primer lugar analizar las concentraciones de ETM, por medio de análisis exploratorio de datos, análisis univariado y multivariado (Correlación Spearman, Análisis de Componentes Principales y Análisis Clúster). Luego se procedió a identificar muestras contaminadas mediante diferentes métodos, además de comparar los contenidos de ETM con otros trabajos publicados de suelos agrícolas de diferentes lugares del mundo y de Chile. El tercer objetivo guarda relación con la confección de mapas de distribución espacial (Kriging o IDW), los que proporcionan una mejor perspectiva visual de la distribución de las concentraciones de los ETM. Por último, se realizó una evaluación del riesgo potencial ecológico por concepto de contaminación por elementos pesados.

De la metodología utilizada, destacan los resultados obtenidos en la Región de Valparaíso y del Libertador General Bernardo O'Higgins, en los cuales se muestran concentraciones altas de cobre, específicamente en determinados sitios cercanos a las ciudades de Los Andes, Rancagua y de la comuna de Catemu; los cuales fueron afectados principalmente por la presencia de industrias del cobre y agroindustrias frutícolas. Respecto a la Región Metropolitana de Santiago, se considera que en las localidades de El Monte y Naltagua, existe una evidente causalidad entre actividad antropogénica y las concentraciones de ETM (en especial cobre y selenio). Para el caso de la Comuna El Monte, las fuentes de contaminación se podrían explicar debido a la presencia de agroindustrias; mientras que para la Localidad de Naltagua la influencia del historial minero de la zona, habrían aumentado los niveles de cobre.

Finalmente, se establece que existen sitios ubicados en las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins, donde los niveles de contaminación por ETM alcanzan niveles altos, en especial por Cu y Se, este último sólo presente en la Región

Metropolitana de Santiago; estas zonas estarían siendo afectadas principalmente por la presencia de industrias mineras y agroindustrias. De todo el estudio que se realizó, es posible concluir que la mayor parte de los suelos agrícolas de la zona central, presentan un bajo o escaso grado de contaminación por ETM.

Abstract

This research carries out a study of the distribution and an evaluation of the contamination by As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se and Zn in the arable stratus of agricultural soils in the central zone of Chile, using the database contained in the **Environmental Study of Soil Contamination** presented by the Agricultural and Livestock Service (SAG), which was done by the Institute of Agricultural and Livestock Research (INIA) between 2006 and 2008. One of the main economic activities of the geographical area under study corresponds to agriculture, and therefore, the accumulation of trace elements (ETM) is of great interest due to the grave risks to the environment and to human health.

The objectives of this study were, firstly, to analyze the concentrations of ETM, through exploratory data analysis, univariate and multivariate analysis (Spearman Correlation, Principal Components Analysis and Cluster Analysis). We then proceeded to identify contaminated samples using different methods, in addition to comparing ETM contents with other published studies of agricultural soils from different parts of the world and Chile. The third objective is related to the mapping of spatial distribution (Kriging or IDW), which provides a better visual perspective of the distribution of ETM concentrations. Finally, an ecological risk assessment for heavy metal pollution was carried out.

Of the methodology used, the results obtained in the Valparaíso and the General Libertador Bernardo O'Higgins regions stand out, showing high concentrations of copper, specifically in certain sites near the cities of Los Andes, Rancagua and the community of Catemu, which were mainly affected by the presence of copper industries and fruit agro-industries. Regarding the Santiago Metropolitan region, it is considered that in the localities of El Monte and Naltagua, there is an evident causality between anthropogenic activity and the concentrations of ETM (especially copper and selenium). In the case of the El Monte area, the sources of contamination could be explained by the presence of agro-industries, while in the locality of Naltagua the influence of its mining background could have increased the copper soil levels.

Finally, we established that there are locations in the Valparaíso, Santiago Metropolitan and Libertador General Bernardo O'Higgins regions, where ETM contamination levels reach high levels, especially by Cu and Se, the latter being present only in the Santiago Metropolitan region. These areas are affected mainly by the presence of mining industries and agro-industries. From this study, it is possible to conclude that most of the agricultural soils of the central zone present a low or scarce degree of contamination by ETM.

Agradecimientos

Al terminar este proceso, con lo cual presento este trabajo, expresar mis agradecimientos a todos quienes me apoyaron en toda la etapas de mis estudios en la Universidad. Fue fundamental, sentir ese estímulo que simbolizaba trabajo, dedicación, perseverancia, pero por sobre todo que aquello que mi responsabilidad tenga un sello de calidad, y es y fue gratificante lo que representa para mi Antonia, mi hija. Ella con su amor, ternura, y la complicidad que hemos construido, me permitió ver los estudios como un desafío permanente, y asumir que es una etapa importante en mi vida.

Pero también contribuyeron y fueron importantes, mi familia, mis amigos, los profesores, en particular mi profesor Guía Pedro Tume, que fueron estímulos para que se fueron dando todas las instancias para el logro de objetivos trascendentes. Se unen y confluyen en el devenir de las personas momentos, y etapas de la vida, que entran en uno para permanecer en el tiempo, marcan y dejan huellas profundas, imborrables, en la búsqueda de la perfección y trascendencia.

Agradecer a Dios, por los momentos importantes de mi vida y que perdurarán en el tiempo.

A todos, muchas gracias!!!!!!!!!!

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivos específicos.....	3
1.4. Justificación del proyecto.....	3
1.5. Alcance.....	4
1.6. Área de estudio.....	5
1.6.1. Antecedentes generales de la zona central de Chile.....	5
1.6.2. Geomorfología.....	6
1.6.3. Geología.....	7
1.6.4. Climatología de las regiones.....	9
1.6.5. Demografía.....	9
1.6.6. Actividad agrícola de la zona central de Chile.....	10
1.7. Descripción del análisis de muestras.....	13
1.7.1. Localización de sitios muestrales.....	13
1.7.2. Equipamiento necesario y colecta de muestras.....	14
1.7.3. Análisis de laboratorio de muestras.....	15
1.7.4. Ubicación geográfica de muestras.....	15
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Elementos traza metálicos (ETM) en estudio.....	21
2.1.1. Arsénico (As).....	21
2.1.2. Cadmio (Cd).....	22
2.1.3. Cobre (Cu).....	23
2.1.4. Níquel (Ni).....	23
2.1.5. Plomo (Pb).....	24
2.1.6. Selenio (Se).....	25
2.1.7. Zinc (Zn).....	26

2.2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos	26
2.2.1. pH.	27
2.2.2. Conductividad Eléctrica (CE).....	27
2.2.3. Materia Orgánica (MO).....	28
2.2.4. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).....	29
2.2.5. Distribución granulométrica.	29
2.3. Estadística	30
2.3.1. Estadística no paramétrica.	30
2.3.2. Gráficos estadísticos.....	31
2.3.3. Estadística descriptiva.	31
2.3.3.1. <i>Medidas de tendencia central.</i>	31
2.3.3.2. <i>Medidas de posición.</i>	31
2.3.3.3. <i>Medidas de dispersión.</i>	32
2.3.3.4. <i>Medidas de forma.</i>	32
2.3.4. Estadística multivariada.....	32
2.3.4.1. <i>Correlación de Spearman.</i>	32
2.3.4.2. <i>Análisis de componentes principales (ACP).</i>	33
2.3.4.3. <i>Análisis Cluster.</i>	33
2.4. Geoestadística.....	33
2.4.1. Método de interpolación IDW.	34
2.4.2. Método de interpolación Kriging.....	34
2.4.3. Pasos de una modelación geoestadística.	34
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	36
3.1. Procedimiento de análisis	36
3.2. Obtención datos de granulometría faltantes	36
3.3. Análisis exploratorio de datos de ETM y propiedades fisicoquímicas	37
3.4. Análisis estadístico univariado de ETM y propiedades fisicoquímicas	38
3.5. Análisis multivariado de ETM y propiedades fisicoquímicas	38
3.6. Estimación de los niveles de contaminación de los ETM.....	39
3.7. Línea base de comparación	40

3.8. Identificación de muestras contaminadas en suelos agrícolas.....	41
3.9. Análisis de variogramas.....	42
3.10. Análisis geoestadístico de ETM.....	43
3.11. Evaluación de contaminación por ETM.....	44
3.11.1. Índice de Geoacumulación (<i>Igeo</i>).....	44
3.11.2. Factor de Contaminación (<i>Cf</i>), Grado de Contaminación (<i>Cdeg</i>) e Índice Integrado de Contaminación (<i>IPI</i>).	45
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
4.1. Región de Valparaíso.....	47
4.1.1. Análisis exploratorio de datos de la Región de Valparaíso.	47
4.1.2. Análisis univariado de la Región de Valparaíso.	56
4.1.2.1. <i>Propiedades de los suelos.</i>	56
4.1.2.2. <i>Concentraciones totales de ETM.</i>	58
4.1.3. Análisis multivariado de la Región de Valparaíso.	61
4.1.3.1. <i>Correlación de Spearman entre ETM de la Región de Valparaíso.</i>	61
4.1.3.2. <i>Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.</i>	63
4.1.3.3. <i>Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.</i>	66
4.1.3.4. <i>Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.</i>	69
4.1.4. Background Values de los ETM de la Región de Valparaíso.....	70
4.1.5. Interpolación de Kriging de la Región de Valparaíso.	73
4.1.4.1. <i>Distribución del Arsénico.</i>	74
4.1.4.2. <i>Distribución del Cadmio.</i>	76
4.1.4.3. <i>Distribución del Cobre.</i>	78
4.1.4.4. <i>Distribución del Níquel.</i>	80
4.1.4.5. <i>Distribución del Plomo.</i>	83
4.1.4.6. <i>Distribución del Zinc.</i>	85

4.1.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región de Valparaíso.	87
4.1.6.1. Índice de Geoacumulación (<i>Igeo</i>).	87
4.1.6.2. Factor de Contaminación (<i>Cf</i>), Grado de Contaminación (<i>Cdeg</i>) e Índice Integrado de Polución (<i>IPI</i>).	88
4.2. Región Metropolitana de Santiago	93
4.2.1. Análisis exploratorio de datos de la Región Metropolitana de Santiago.	93
4.2.2. Análisis univariado de la Región Metropolitana de Santiago.	102
4.2.2.1. Propiedades de los suelos.	102
4.2.2.2. Concentraciones totales de ETM.	104
4.2.3. Análisis multivariado de la Región Metropolitana de Santiago.	106
4.2.3.1. Correlación de Spearman entre ETM de la Región Metropolitana de Santiago.	107
4.2.3.2. Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.	109
4.2.3.3. Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.	111
4.2.3.4. Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.	114
4.2.4. Background Values de los ETM de la Región Metropolitana de Santiago.	116
4.2.5. Interpolación IDW de la Región Metropolitana de Santiago.	118
4.2.4.1. Distribución del Arsénico.	118
4.2.4.2. Distribución del Cobre.	120
4.2.4.3. Distribución del Níquel.	122
4.2.4.4. Distribución del Plomo.	124
4.2.4.5. Distribución del Selenio.	126
4.2.4.6. Distribución del Zinc.	128
4.2.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región Metropolitana de Santiago.	130
4.2.6.1. Índice de Geoacumulación (<i>Igeo</i>).	130

4.2.6.2. <i>Factor de Contaminación (Cf), Grado de Contaminación (Cdeg) e Índice Integrado de Polución (IPI)</i>	132
4.3. Región del Libertador General Bernardo O'Higgins	136
4.3.1. Análisis exploratorio de datos de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	136
4.3.2. Análisis univariado de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	144
4.3.2.1. <i>Propiedades de los suelos</i>	144
4.3.2.2. <i>Concentraciones totales de ETM</i>	146
4.3.3. Análisis multivariado de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	149
4.3.3.1. <i>Correlación de Spearman entre ETM de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins</i>	149
4.3.3.2. <i>Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins</i>	151
4.3.3.3. <i>Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins</i>	153
4.3.3.4. <i>Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins</i>	156
4.3.4. Background Values de los ETM de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	157
4.3.5. Interpolación de Kriging de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	160
4.3.4.1. <i>Distribución del Arsénico</i>	161
4.3.4.2. <i>Distribución del Cobre</i>	163
4.3.4.3. <i>Distribución del Níquel</i>	165
4.3.4.4. <i>Distribución del Plomo</i>	167
4.3.4.5. <i>Distribución del Zinc</i>	168
4.3.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	170
4.3.6.1. <i>Índice de Geoacumulación (Igeo)</i>	170

4.3.6.2. <i>Factor de Contaminación (Cf), Grado de Contaminación (Cdeg) e Índice Integrado de Polución (IPI)</i>	171
4.4. Región del Maule	175
4.4.1. Análisis exploratorio de datos de la Región del Maule.....	175
4.4.2. Análisis univariado de la Región del Maule.	183
4.4.2.1. <i>Propiedades de los suelos</i>	183
4.4.2.2. <i>Concentraciones totales de ETM</i>	185
4.4.3. Análisis multivariado de la Región del Maule.....	187
4.4.3.1. <i>Correlación de Spearman entre ETM de la Región del Maule</i>	187
4.4.3.2. <i>Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región del Maule</i>	189
4.4.3.3. <i>Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región del Maule</i>	192
4.4.3.4. <i>Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región del Maule</i>	194
4.4.4. Background Values de los ETM de la Región del Maule.	196
4.4.5. Interpolación IDW de la Región del Maule.	197
4.4.4.1. <i>Distribución del Arsénico</i>	198
4.4.4.2. <i>Distribución del Cobre</i>	199
4.4.4.3. <i>Distribución del Níquel</i>	201
4.4.4.4. <i>Distribución del Plomo</i>	203
4.4.4.5. <i>Distribución del Zinc</i>	204
4.4.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región del Maule.	206
4.4.6.1. <i>Índice de Geoacumulación (Igeo)</i>	206
4.4.6.2. <i>Factor de Contaminación (Cf), Grado de Contaminación (Cdeg) e Índice Integrado de Polución (IPI)</i>	207
4.5. Región del Bío Bío.....	211
4.5.1. Análisis exploratorio de datos de la Región del Bío Bío.....	211
4.5.2. Análisis univariado de la Región del Bío Bío.	220

4.5.2.1. <i>Propiedades de los suelos.</i>	220
4.5.2.2. <i>Concentraciones totales de ETM.</i>	222
4.5.3. <i>Análisis multivariado de la Región del Bío Bío.</i>	224
4.5.3.1. <i>Correlación de Spearman entre ETM de la Región del Bío Bío.</i>	224
4.5.3.2. <i>Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.</i>	226
4.5.3.3. <i>Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.</i>	228
4.5.3.4. <i>Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.</i>	231
4.5.4. <i>Background Values de los ETM de la Región del Bío Bío.</i>	233
4.5.5. <i>Interpolación IDW de la Región del Bío Bío.</i>	234
4.5.4.1. <i>Distribución del Arsénico.</i>	235
4.5.4.2. <i>Distribución del Cobre.</i>	236
4.5.4.3. <i>Distribución del Níquel.</i>	238
4.5.4.4. <i>Distribución del Plomo.</i>	240
4.5.4.5. <i>Distribución del Zinc.</i>	242
4.5.6. <i>Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región del Bío Bío.</i>	244
4.5.6.1. <i>Índice de Geoacumulación (Igeo).</i>	244
4.5.6.2. <i>Factor de Contaminación (Cf), Grado de Contaminación (Cdeg) e Índice Integrado de Polución (IPI).</i>	245
4.6. Comparación con datos publicados de suelos agrícolas.	249
CAPITULO V. CONCLUSIÓN	253
5.1. Conclusión	253
BIBLIOGRAFÍA	256
ANEXOS	264
Anexo I.....	264
Anexo II.....	266
Región de Valparaíso	267

Región Metropolitana de Santiago	269
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins	271
Región del Maule	273
Región del Bío Bío.....	275
Anexo III	277
Región de Valparaíso	278
Región Metropolitana de Santiago	279
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins	280
Región del Maule	281
Región del Bío Bío.....	282
Anexo IV	283
Región de Valparaíso	284
Región Metropolitana de Santiago	288
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins	292
Región del Maule	296
Región del Bío Bío.....	298

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Ubicación geográfica de las regiones que componen el área de estudio.....	6
2. Mapa geológico de la zona central de Chile, escala 1: 10, 000, 000 . Modificado de SERNAGEOMIN (2002).	8
3. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región de Valparaíso.	16
4. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región Metropolitana de Santiago.....	17
5. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	18
6. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región del Maule.	19
7. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región del Bío Bío.....	20
8. Diagrama triangular de textura del suelo según sistema de clasificación USDA.....	30
9. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	48
10. Representaciones gráficas del AED del elemento Cd, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	48
11. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	49
12. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	50
13. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	50
14. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	51
15. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.....	52
16. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida mS gr^{-1}	52
17. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.	53
18. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$	54
19. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).	54
20. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).	55
21. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).	56

22. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región de Valparaíso.	68
23. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región de Valparaíso.	70
24. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.....	75
25. Distribución de contenidos de Cd en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.....	77
26. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.....	79
27. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.....	81
28. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.....	83
29. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.....	86
30. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región de Valparaíso.	88
31. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región de Valparaíso.	90
32. Distribución espacial de los factores de contaminación (<i>Cf</i>) de los elementos Cd, Cu y Pb de la Región de Valparaíso.....	91
33. Distribución espacial de los grados de contaminación (<i>Cdeg</i>) de la Región de Valparaíso.....	92
34. Ubicación geográfica de los índices integrados de polución (<i>IPI</i>) de la Región de Valparaíso.....	93
35. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	94
36. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	94
37. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	95
38. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	96
39. Representaciones gráficas del AED del elemento Se, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	96
40. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	97
41. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.....	98

42. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida $mS\ gr^{-1}$	98
43. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.	99
44. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $Cmol(+)\ kg^{-1}$	100
45. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).	100
46. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).	101
47. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).	102
48. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región Metropolitana de Santiago.	113
49. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.	115
50. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.	119
51. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.	121
52. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.	123
53. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.	125
54. Distribución de contenidos de Se en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.	127
55. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.	129
56. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.	131
57. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.	133
58. Distribución espacial de los factores de contaminación (Cf) de los elementos Cu, Se y Zn de la Región Metropolitana de Santiago.	134
59. Distribución espacial de los grados de contaminación (Cdeg) de la Región Metropolitana de Santiago.	135
60. Ubicación geográfica de los índices integrados de polución (IPI) de la Región Metropolitana de Santiago.	135

61. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	136
62. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	137
63. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	138
64. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	138
65. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	139
66. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.....	140
67. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida mS gr^{-1}	140
68. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.	141
69. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$	142
70. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).	142
71. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).	143
72. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).	144
73. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	155
74. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	157
75. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	162
76. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	164
77. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	166
78. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	168
79. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	169

80. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	171
81. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	172
82. Distribución espacial de los factores de contaminación (Cf) de los elementos As, Cu y Pb en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	173
83. Distribución espacial de los grados de contaminación (Cdeg) de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	174
84. Ubicación geográfica de los índices integrados de polución (IPI) de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	175
85. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	176
86. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	176
87. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	177
88. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	178
89. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).	178
90. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.	179
91. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida mS gr^{-1}	180
92. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.	180
93. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$	181
94. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).	182
95. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).	182
96. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).	183
97. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región del Maule.	193
98. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región del Maule.	195
99. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región del Maule. ...	199
100. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región del Maule. ...	200
101. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región del Maule....	202

102. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región del Maule....	204
103. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región del Maule. ...	205
104. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Maule.....	207
105. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Maule.....	208
106. Distribución espacial de los factores de contaminación (<i>Cf</i>) de los elementos Cu, Ni y Pb de la Región del Maule.	209
107. Distribución espacial de los grados de contaminación (<i>Cdeg</i>) de la Región del Maule.....	210
108. Ubicación geográfica de los índices integrados de polución (<i>IPI</i>) de la Región del Maule.	211
109. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).....	212
110. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).....	213
111. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).....	213
112. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).....	214
113. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).....	215
114. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.....	215
115. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida mS gr^{-1}	216
116. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.....	217
117. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$	217
118. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).	218
119. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).	219
120. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).	219
121. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región del Bío Bío.....	230
122. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región del Bío Bío.	232
123. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.	236

124. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.	238
125. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.	239
126. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.	241
127. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.	243
128. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Bío Bío.	245
129. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Bío Bío.	246
130. Distribución espacial de los factores de contaminación (Cf) de los elementos Cu, Ni y Pb de la Región del Bío Bío.	247
131. Distribución espacial de los grados de contaminación (Cdeg) de la Región del Bío Bío.	248
132. Ubicación geográfica de los índices integrados de polución (IPI) de la Región del Bío Bío.	249
133. Gráfico de sedimentación.	269
134. Gráfico varianza acumulada.	269
135. Gráfico de sedimentación.	271
136. Gráfico varianza acumulada.	271
137. Gráfico de sedimentación.	273
138. Gráfico varianza acumulada.	273
139. Gráfico de sedimentación.	275
140. Gráfico varianza acumulada.	275
141. Gráfico de sedimentación.	277
142. Gráfico varianza acumulada.	277

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Aspectos demográficos para regiones del área de estudio (Fuente: INE, 2014).	9
2. Superficie regional (hectárea) y porcentaje de zona en superficie nacional por actividad agrícola (Fuente: ODEPA - INE, 2007).....	11
3. Superficie sembrada (hectárea) y producción de cultivos anuales esenciales de la zona central (Fuente: INE, 2016).....	12
4. Clasificación de rangos de pH del suelo según la USDA (Fuente: Soil Survey Division Staff, 1993).	27
5. Escala de salinidad de suelos según la USDA (Fuente: Soil Survey Division Staff, 1993).	28
6. Categorías del contenido de materia orgánica en el suelo (Fuente: Fernández et al., 2006).	28
7. Clasificación de la fertilidad del suelo según valor de CIC (Fuente: Fernández et al., 2006).	29
8. Concentración máxima permitida (mgkg^{-1}) de ETM en suelos, previo a una aplicación de lodos (Fuente: INN, 2004).	42
9. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región de Valparaíso.	58
10. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg^{-1}) de las variables As, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, obtenidos de las muestras de la Región de Valparaíso.....	60
11. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn de la Región de Valparaíso.	61
12. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región de Valparaíso.	62
13. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.....	63
14. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región de Valparaíso. .	64
15. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región de Valparaíso. (Continuación)	65
16. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.....	67
17. Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región de Valparaíso.....	71
18. Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región de Valparaíso.	72

19. Variogramas teóricos utilizados en interpolación Kriging de ETM en muestras de la Región de Valparaíso.....	73
20. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región de Valparaíso.....	89
21. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región Metropolitana de Santiago.....	104
22. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg^{-1}) de las variables As, Cu, Ni, Pb, Se y Zn, obtenidos de las muestras de la Región Metropolitana de Santiago.....	105
23. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cu, Ni, Pb, Se y Zn de la Región Metropolitana de Santiago.....	107
24. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región Metropolitana de Santiago.	108
25. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.....	109
26. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.....	110
27. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago. (Continuación).....	111
28. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parametros de la Región Metropolitana de Santiago.....	112
29. Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región Metropolitana de Santiago.....	116
30. Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región Metropolitana de Santiago.....	117
31. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región Metropolitana de Santiago.....	132
32. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	146
33. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg^{-1}) de las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn, obtenidos de las muestras de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	148
34. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	149
35. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	150
36. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	151

37. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	152
38. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parametros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	154
39. Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	158
40. Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	159
41. Variogramas teóricos utilizados en interpolación Kriging de ETM en muestras de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	160
42. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	172
43. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región del Maule.....	185
44. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg⁻¹) de las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn, obtenidos de las muestras de la Región del Maule.	186
45. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn de la Región del Maule.	188
46. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región del Maule.	188
47. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región del Maule.....	189
48. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Maule.	190
49. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Maule. (Continuación)	191
50. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parametros de la Región del Maule.....	192
51. Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región del Maule.....	196
52. Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región del Maule.....	197
53. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región del Maule.....	207
54. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región del Bío Bío.	221
55. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg⁻¹) de las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn, obtenidos de las muestras de la Región del Bío Bío.....	223
56. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn de la Región del Bío Bío.....	224

57. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región del Bío Bío.....	225
58. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.....	226
59. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Bío Bío....	226
60. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Bío Bío. (Continuación).....	227
61. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parámetros de la Región del Bío Bío	229
62. Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región del Bío Bío.....	233
63. Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región del Bío Bío.....	234
64. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región del Bío Bío.....	245
65. Comparación concentraciones promedio (mgkg^{-1}) de suelos agrícolas de diferentes ciudades de Chile y del mundo.	250
66. Datos faltantes de parámetros fisicoquímicos de las regiones en estudio.	266
67. Autovalores y varianza explicada de la Región de Valparaíso.	268
68. Autovalores y varianza explicada de la Región Metropolitana de Santiago.	270
69. Autovalores y varianza explicada de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	272
70. Autovalores y varianza explicada de la Región del Maule.	274
71. Autovalores y varianza explicada de la Región del Bío Bío.....	276
72. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región de Valparaíso.....	279
73. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método [Median \pm 2 MAD] para la Región de Valparaíso.....	279
74. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región de Valparaíso.....	279
75. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región Metropolitana de Santiago.....	280
76. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método [Median \pm 2 MAD] para la Región Metropolitana de Santiago.....	280
77. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región Metropolitana de Santiago.....	280
78. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	281
79. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método [Median \pm 2 MAD] para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	281

80. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	281
81. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región del Maule.....	282
82. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método [Median \pm 2 MAD] para la Región del Maule.....	282
83. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región del Maule.....	282
84. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región del Bío Bío.	283
85. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método [Median \pm 2 MAD] para la Región del Bío Bío.	283
86. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región del Bío Bío.	283
87. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región de Valparaíso.	285
88. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región de Valparaíso. (Continuación).....	286
89. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región de Valparaíso.	287
90. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región de Valparaíso. (Continuación).....	288
91. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.....	289
92. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. (Continuación)	290
93. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.	291
94. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. (Continuación).....	292
95. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	293
96. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. (Continuación).....	294
97. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	295
98. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. (Continuación).....	296
99. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región del Maule.	297
100. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región del Maule.....	298
101. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región del Bío Bío.....	299

102. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región del Bío Bío. 300

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El presente trabajo, distribución y evaluación de contaminación de **elementos traza metálicos (ETM)** en suelos agrícolas de la zona central de Chile, consideró como factor esencial, en la proposición, la protección y conservación del medio ambiente. Debemos tener presente que el recurso suelo es una capa superficial no consolidada de la superficie terrestre, este corresponde a un sistema heterogéneo complejo formado por líquidos, componentes gaseosos, microorganismos y partículas sólidas orgánicas y mayoritariamente sólidos inorgánicos (Sposito, 2008). Este medio corresponde a la capa más externa de la corteza terrestre, permitiendo que en ella se desarrollen las formas de vida presentes en la superficie de la Tierra y este recurso natural, corresponde al pilar vital de los ecosistemas, tal como la existencia de los seres vivos en el planeta (Kabata-Pendias & Pendias, 2011).

La calidad de vida de las personas depende fundamentalmente de la composición química de los alimentos y del ambiente que los rodea (Kabata-Pendias & Pendias, 2011). La introducción de elementos traza metálicos (ETM) a los suelos y posterior transferencia a través de la cadena alimentaria ha sido parte del ciclo natural, sin embargo varios factores antropogénicos han cambiado este ciclo, cambiando los niveles de estos elementos en los suelos (Yaylalı-Abanuz, 2011). Por lo anterior, es tarea esencial proteger y conservar este patrimonio ambiental.

El uso del suelo para actividades agrícolas merece gran atención y preocupación en todo el mundo, ya que entradas de ETM a estos podrían ocasionar posibles riesgos para el medio ambiente y la salud humana, esto último, debido a la introducción de estos elementos en la cadena alimentaria (Yaylalı-Abanuz, 2011). Además, esta actividad es considerada como un agente importante de contaminación de los suelos (Singh, 1994). Niveles altos de estos elementos pueden ocasionar disminución del rendimiento y la calidad de los cultivos, y más importante, un aumento de la bioacumulación de ETM en las partes comestibles de los cultivos (Khan et al., 2008).

La contaminación de los suelos puede ser producto de 2 tipos de fuentes, geológica o antropogénica. Las fuentes geológicas o naturales se refieren a la presencia y distribución de los metales en minerales y rocas (Alloway, 1990). El segundo tipo de fuente corresponde a aquella que proviene directa o indirectamente de actividades humanas (antrópicas). Las principales fuentes antropogénicas de ETM en suelos agrícolas son el riego de aguas residuales, la producción industrial, los productos agroquímicos y la combustión de combustibles fósiles (Hani & Pazira, 2011).

Las técnicas geoestadísticas ayudan a visualizar la influencia de las actividades humanas sobre el contenido y posibles fuentes de ETM de los suelos en estudio, por lo tanto, en conjunto con otros análisis estadísticos se hace una herramienta poderosa de análisis de concentraciones para estos elementos. Se trabajó con la base de datos del informe **Estudio Ambiental sobre Contaminación de Suelos** (Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 2008) del Servicio Agrícola Ganadero (SAG), el cual fue adjudicado y realizado por el instituto anteriormente mencionado, para suelos de uso agrícola del estrato arable de la zona central de Chile. Analizando principalmente a los elementos traza metálicos arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se) y zinc (Zn) presentes en las muestras recolectadas del área de estudio. En el análisis que se realizó, se buscó poder determinar posibles fuentes antropogénicas, predecir concentraciones mediante mapas de interpolación y evaluar el riesgo de contaminación por los ETM en estudio.

1.2. Objetivo general

- Evaluar la contaminación y distribución de los elementos As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se y Zn, de los suelos agrícolas de la zona central de Chile, entre la Región de Valparaíso y la Región del Bío Bío.

1.3. Objetivos específicos

- Caracterizar los datos mediante técnicas estadísticas tales como análisis exploratorio de datos, univariado y multivariado, tanto para las concentraciones de ETM como para los parámetros fisicoquímicos.
- Identificar muestras contaminadas por ETM mediante los niveles de fondo de métodos estadísticos; considerando los valores de referencia calculados por metodología de Países Bajos ; y los valores de norma chilena citados por el SAG para suelos agrícolas previo a aplicación de biosólidos. Además, comparar los niveles de ETM con otros trabajos realizados a zonas de suelos agrícolas tanto de Chile como de otros países.
- Analizar la distribución espacial de los ETM, mediante técnicas de interpolación geoestadística, tales como Kriging e IDW.
- Evaluar el riesgo potencial de contaminación del suelo por ETM, mediante diferentes indicadores de evaluación.

1.4. Justificación del proyecto

Las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago, del Libertador General Bernardo O'Higgins, del Maule y del Bío Bío, se encuentran en la zona central de Chile. A lo largo de la historia, entre estas regiones se ha establecido como la principal zona del país y debido a esto se concentra el mayor número de habitantes, aproximadamente un 73% de la población de Chile (Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2014). Además, en esta zona se concentra el mayor porcentaje de productividad del país.

Las principales actividades económicas de esta zona están relacionadas con la extracción de recursos naturales, tales como la explotación forestal, la pesca, la industria y la agricultura (Sánchez & Morales, 1993). Con respecto a esta última, los suelos destinados para actividades agrícolas de esta zona, corresponden al 58% de la superficie nacional dedicada a la agricultura (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) - INE, 2007). En la zona central existe una gran cantidad de áreas de agricultura intensiva y por esto existe una mayor productividad agrícola. Asimismo, el sector agrícola proporciona una gran cantidad

de empleos permanentes, esta dispone del 12% de la fuerza de trabajo en Chile (ODEPA, 2005), agregando a esto la reducción del rendimiento productivo y deterioro de las capacidades biofísicas del suelo (INIA, 2008), como consecuencia la gran importancia de estudiar estos suelos ya que problemas de contaminación en estos podrían incluso afectar a la economía chilena debido a la significancia del sector agrícola en el país.

Asimismo, los suelos utilizados para esta actividad merecen una mayor atención y preocupación ante posibles entradas de ETM a estos. Teniendo en cuenta, que la acumulación de ETM en los suelos agrícolas pueden tener diferentes efectos, tales como el deterioro de las capacidades biofísicas del suelo, o poner en peligro la biosfera debido a la bioacumulación y la inclusión en la cadena alimentaria (Romic & Romic, 2003), esta última pudiendo ocasionar problemas a la salud de las personas.

Por esto, se hace necesario y se justifica estimar las concentraciones y distribución de ETM en el estrato arable, de suelos agrícolas, de entre las regiones de Valparaíso y del Bío Bío, además de evaluar el riesgo potencial de contaminación por tales elementos en los suelos anteriormente mencionados. Agregando a esto, entregar información ambiental sobre esta zona para conocimiento y si es necesario, ser utilizado por las autoridades pertinentes para futuras evaluaciones de riesgos.

1.5. Alcance

En esta investigación se pretende identificar, aplicando diferentes instrumentos que objetivamente permitan comprobar la existencia de contaminación por ETM, en los suelos agrícolas de la zona central de Chile. Este trabajo debe contribuir con información importante sobre zonas del área de estudio que pueden estar siendo afectadas por actividades antropogénicas, además de identificar posibles fuentes que estén perjudicando dichos suelos. Asimismo, esta propuesta de investigación pretende de alguna forma clasificar el grado de contaminación por elementos metálicos en los suelos en referencia, lo cual se desarrollará empleando técnicas bastante utilizadas a nivel internacional en este tipo de estudios. Todo esto en conjunto, permite ayudar a representantes del sector agrícola o profesionales del sector estatal, poder tomar decisiones sobre donde existen problemas de

contaminación, el grado de este y que acciones realizar para el mejoramiento de la calidad de estos suelos, para así poder evitar posibles daños al ser humana y ecosistema, como también prevenir el perjuicio en el rendimiento productivo.

1.6. Área de estudio

1.6.1. Antecedentes generales de la zona central de Chile.

La zona central de Chile corresponde a una de las cinco grandes regiones geográficas en que se divide el país. Esta zona está ubicada entre el río Aconcagua (paralelo 32°S) y el río Bío Bío, aproximadamente el paralelo 38°S (INE, 2014). Además, limita al norte con el Norte Chico, al este con Argentina, al sur con la zona sur de Chile y por oeste con el Océano Pacífico. Está compuesta por la Región de Valparaíso, la Región Metropolitana de Santiago, la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, la Región del Maule y la Región del Bio-Bío (INE, 2014), ver **Figura 1**. La zona central cuenta con una superficie de 115,551 km^2 y esta representa a la principal zona del país, además la con mayor número de habitantes, reúne cerca del 73.4 % de la población total del país (INE, 2014). Agregando, concentra el mayor porcentaje de la productividad económica del país, debido a su favorable clima mediterráneo. Su economía mezcla la extracción de recursos naturales, a través de la explotación forestal, la agricultura y la pesca, y la industria (Sánchez & Morales, 1993). Sobre esta última, la principal actividad industrial es la minería, en la cual la mayor producción se concentra en el cobre. En la mina subterránea El Teniente ubicada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, es una de las más importantes del país

Su principal ciudad Santiago, corresponde a la capital de Chile, la que se levanta como una gran metrópoli generadora de grandes negocios del país, y sede de los poderes Ejecutivo, Legislativo y Judicial del Estado (Toledo & Zapater, 1991). Sin embargo, no solo involucra a Santiago sino que además, se ubican dentro de esta zona importantes núcleos urbanos, tales como Valparaíso-Viña del Mar y Concepción-Talcahuano. Sus principales ciudades son Santiago de Chile, San Antonio, Valparaíso, Viña del Mar, Rancagua, Curicó, Talca, Chillán, Concepción, y Los Ángeles (Zona central de Chile, s.f).



Figura 1. Ubicación geográfica de las regiones que componen el área de estudio.

1.6.2. Geomorfología.

En la zona central de Chile es posible encontrar cuatro formaciones geológicas de importancia (Börgel, 1983; INE, 2014; educarchile, 2007), en los cuales se indican lo siguiente. La primera formación geológica es la Cordillera de los Andes, en esta zona reaparecen los efectos del volcanismo, pero se produce una baja de la altura promedio (de 6,600 m s.n.m. en el norte a 3,200 m s.n.m. aproximadamente en esta zona). El cambio en el clima, y la acción erosiva de los glaciares que se deslizaron a la Depresión Intermedia, es una explicación a tal reducción de altura. A partir de esta zona aparece una formación montañosa conocida como precordillera. Una de las características de la cordillera de estos

territorios es que posee suelos semiáridos, en comparación con la zona norte, lo que permite el crecimiento de hierbas y pastos estepáricos bajo los 2,000 m s.n.m.

La segunda formación es la de Depresión Intermedia, aquí desaparecen los cordones montañosos en dirección este-oeste, y esta formación adquiere el nombre de valle longitudinal central. Posteriormente, en esta misma sección geográfica, se presentan las cuencas de Santiago y el Valle del Cachapoal, importantes zonas económicas donde se concentra casi un tercio de la población nacional.

La Cordillera de la Costa, en esta zona vuelve a ser elevada y maciza, altura promedio entre 1,500 y 2,000 m s.n.m. Tiene presencia de cordones de montañas paralelos a ella, que originan cuencas ricas en suelos fértiles, entre estas están Curacaví, Cauquenes y Quirihue. Más al sur de esta zona se presenta discontinua, permitiendo el contacto entre la Depresión Intermedia y las planicies litorales.

Por último, se encuentran las Planicies Litorales, las cuales se presentan en forma de terrazas escalonadas, con una superficie apta para el emplazamiento de ciudades, como es el caso de Valparaíso. Estas alcanzan su mayor amplitud en las zonas de las desembocaduras de los ríos Maipo y Rapel.

1.6.3. Geología.

Como base de la información geológica se ha utilizado el mapa geológico a escala 1:1,000,000 del SERNAGEOMIN (2002), en el cual se presentan las principales secuencias geológicas del área de estudio, identificadas según su edad geológica (**Figura 2**). Todo lo anterior, se realizó incluyendo una capa de información sobre la geología de Chile y la cual fue incorporada al ArcGIS, esta fue obtenida del geoportal geológico online del SERNAGEOMIN¹. Las principales unidades geológicas se organizan en forma de franjas longitudinales de norte a sur las cuales se distribuyen de oeste a este, en Basamento Metamórfico (Cordillera de la Costa); secuencias volcánicas del Paleógeno y sedimentarias del Paleógeno y Cuaternario (Depresión Central) y el volcanismo actual (Cordillera Principal) (SERNAGEOMIN, 2002).

¹ <http://www.geoportal.cl/Visor/>

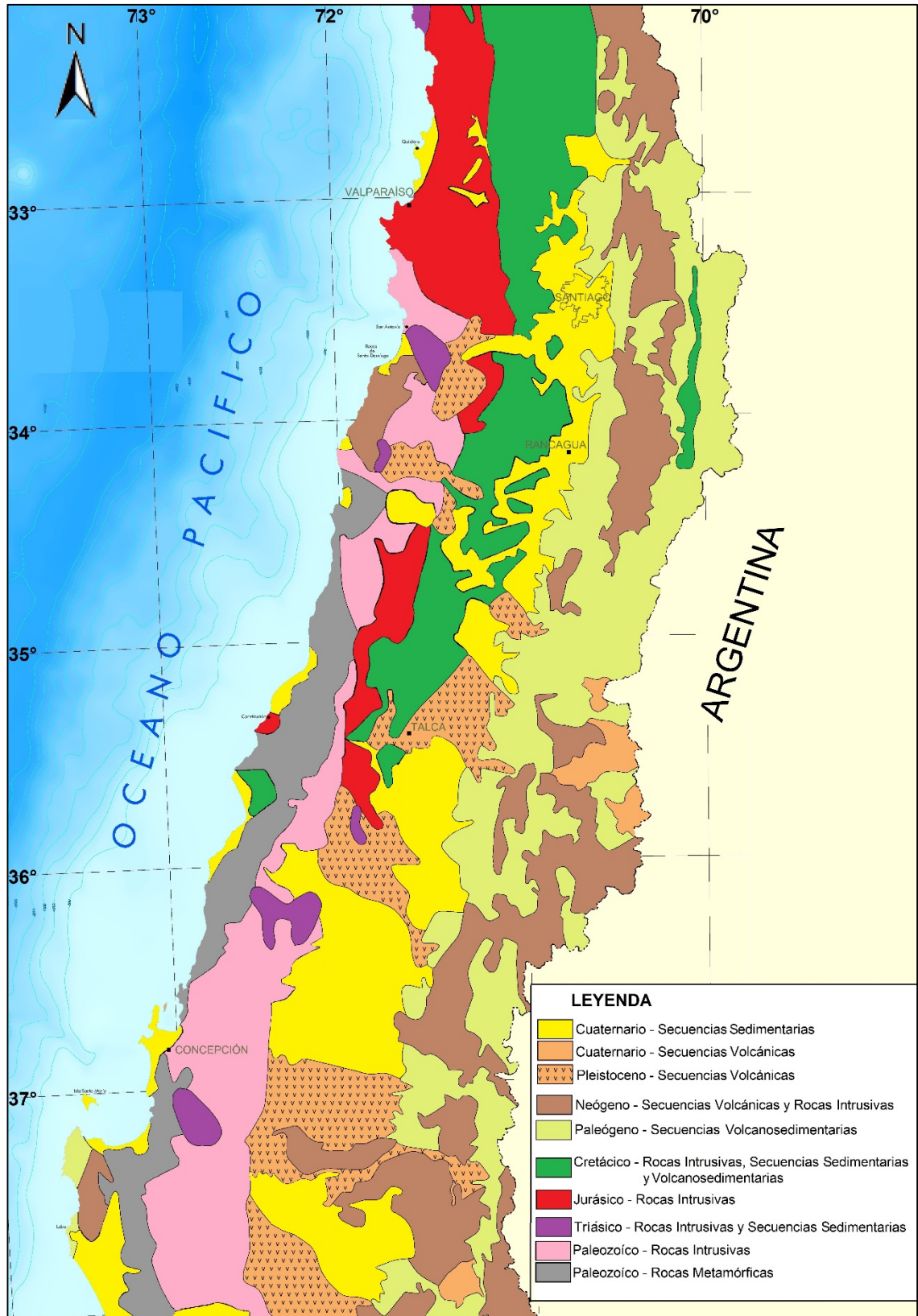


Figura 2. Mapa geológico de la zona central de Chile, escala 1:10,000,000. Modificado de SERNAGEOMIN (2002).

1.6.4. Climatología de las regiones.

Según INE (2014), donde señala que el clima de la zona central de Chile corresponde a uno templado de tipo mediterráneo, en el cual las principales características de este son que posee una estación seca, pero fresca en verano. La amplitud térmica anual es muy baja, con ligeras variaciones entre un punto y otro (promedio anual 14° C), como también es baja la oscilación térmica diaria. Las temperaturas varían de la costa al interior y las precipitaciones aumentan en esa dirección y de norte a sur (Valparaíso 444 mm, Santiago 360 mm, Talca 699 mm, Chillán 1,025 mm). Al ser una zona extensa, existen diferencias entre algunas regiones y esta principal semejanza corresponde a la de la estación seca prolongada. En donde las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins, poseen una duración de esta de entre 7 a 8 meses y las restantes regiones tienen una durabilidad de la estación seca prolongada de entre 4 a 5 meses (Dirección Meteorológica de Chile, 2001).

1.6.5. Demografía.

La zona central presenta el mayor porcentaje de habitantes de Chile (INE, 2014), representando la principal zona del país. En la **Tabla 1** se presentan las cifras demográficas para las 5 regiones del área de estudio. Es posible inferir, que el porcentaje de habitantes de la zona central corresponde al 73.4% de la población nacional, y con respecto a la superficie esta representa un 15.3% de la superficie total del país.

Tabla 1. Aspectos demográficos para regiones del área de estudio (Fuente: INE, 2014).

Región	Superficie (km ²)	% en la superficie nacional*	Población (hab.)	% en la población nacional	Densidad (hab/km ²)
Valparaíso	16,396	2.2	1,808,300	10.1	110
Metropolitana	15,403	2.0	7,228,581	40.6	469
O'Higgins	16,387	2.2	910,577	5.1	55.6
Maule	30,296	4.0	1,035,593	5.8	34.2
Biobío	37,069	4.9	2,100,494	11.8	56.7
Total Chile	756,102	100	17,858,457	100	849

* No se considera en el cálculo el Territorio Antártico Chileno.

1.6.6. Actividad agrícola de la zona central de Chile.

Cabe indicar, que se estudiarán los suelos de uso agrícola de la zona central de Chile, por lo tanto, resulta necesario y primordial conocer sobre esta actividad presente en dicha área de estudio. En la zona central del país, los cultivos principales corresponden a los cereales (tales como el trigo, el maíz y las legumbres), los frutales (predominantemente manzanas, uva de mesa, peras, almendras, ciruelas y duraznos), y las hortalizas (tales como lechugas, pepinos, zapallos, tomates, etc.) (INE, 2016; ODEPA - INE, 2007). Hacia el sur de esta zona, la agricultura produce arroz, trigo, leguminosas y papas, de igual forma remolacha y raps. Debido a las condiciones del suelo y clima de esta zona, la producción de manzanas, peras, uva de mesa y cerezas se ha visto favorecido por esto, permitiendo que estos productos sean exportados.

Por lo anterior, en la **Tabla 2** (ODEPA - INE, 2007) se presentan, las superficies de cada región para las diferentes actividades agrícolas. Es posible apreciar que la zona central representa un gran porcentaje de los suelos de uso agrícola a nivel nacional. Por lo tanto, un 57.5% de los suelos de uso agrícola en Chile se encuentran en la zona central de este.

En la **Tabla 3**, se presenta información relacionada con superficie sembrada estimada y producción de los cultivos anuales esenciales del año agrícola 2015-2016 (INE, 2016). De la tabla es posible inferir, que en la zona en estudio se produce un 67.6% de todos los cultivos a nivel nacional, por lo tanto, un gran porcentaje de la producción en Chile ocurre en suelos agrícolas de la zona central. Agregando a esto, en esta zona existe un porcentaje muy alto de producción en cultivos industriales en relación al país. Por todo lo anterior, se reafirma la gran importancia que tiene esta zona en el país, considerando la actividad agrícola que es el uso de suelo que interesa en este proyecto.

Tabla 2. Superficie regional (hectárea) y porcentaje de zona en superficie nacional por actividad agrícola (Fuente: ODEPA - INE, 2007).

Cultivo	Regiones (ha)					Total Zona Central (ha)	Total País (ha)	% zona central en la superficie nacional
	V	RM	VI	VII	VIII			
Frutales	52,839	53,552	78,276	54,784	10,692	250,142	310,047	80.7%
Forrajeras	16,473	21,491	17,232	46,148	75,414	176,758	513,191	34.4%
Hortalizas	10,225	25,417	13,134	11,784	9,443	70,003	95,954	73.0%
Viñas y parronales	7,259	12,326	35,876	46,110	15,828	117,399	130,441	90.0%
Cereales	4,224	16,018	56,627	74,107	113,273	264,249	480,603	55.0%
Leguminosas y tubérculos	2,866	5,721	3,637	10,185	14,012	36,421	71,390	51.0%
Cultivos industriales	815	397	5,295	11,544	19,773	37,824	69,998	54.0%
Semilleros y almacigos	451	4,650	11,935	13,043	2,248	32,327	42,511	76.0%
Viveros	355	835	420	446	579	2,634	3,103	84.9%
Total Actividad Agrícola (ha)	95,506	140,407	222,433	268,151	261,261	987,757	1,717,236	57.5%
% región en la superficie nacional	5.6%	8.2%	13.0%	15.6%	15.2%	57.5%	100%	

ha = hectárea

Tabla 3. Superficie sembrada (hectárea) y producción de cultivos anuales esenciales de la zona central (Fuente: INE, 2016).

Cultivo Anual	Regiones					Total Zona Central	Total País	% zona a nivel nacional
	V	RM	VI	VII	VIII			
Cereales								
Superficie (ha)	3,047	13,503	65,253	95,068	143,777	320,648	566,250	56.6%
Producción (qqm)	173,499	1,342,015	6,844,673	6,827,546	9,290,730	24,478,463	38,724,038	63.2%
Leguminosas y Tubérculos								
Superficie (ha)	874	4,559	3,228	10,747	14,394	33,802	67,610	50.0%
Producción (qqm)	139,017	765,525	316,726	970,611	1,423,134	3,615,013	11,868,722	30.5%
Cultivos Industriales								
Superficie (ha)	20	342	6,182	13,472	25,623	45,639	113,562	40.2%
Producción (qqm)	0	1,163	4,195,658	10,816,388	10,784,318	25,797,527	29,090,563	88.7%

ha = hectárea

qqm = quintal métrico

1.7. Descripción del análisis de muestras

Se utilizó la base de datos del informe **Estudio Ambiental sobre Contaminación de Suelos**, del Servicio Agrícola Ganadero (SAG), el cual fue adjudicado y realizado entre los años 2006 y 2008 por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA, 2008), para suelos de uso agrícola del estrato arable de la zona central de Chile. Cabe destacar, el INIA realizó toda la colecta y el posterior análisis de muestras para el informe anteriormente mencionado. La principal actividad de este estudio, fue la determinación del contenido de 7 elementos traza metálicos (ETM), en el estrato arable (0-20 cm) de suelos bajo riego o de uso agrícola, entre las regiones de Valparaíso y del Bío Bío, Los elementos del estudio base corresponden a arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se) y zinc (Zn), donde el Cd y Se fueron descartados en algunas regiones ya que presentaron un alto porcentaje de muestras en que los contenidos de estos elementos eran inferiores al límite de detección del instrumento de determinación de ETM. Además, en el estudio se determinan algunos parámetros fisicoquímicos de las muestras, de importancia para este tipo de estudios. De estos, solo algunos utilizados para este proyecto, estos corresponden a la medida de pH, conductividad eléctrica (CE), contenido de materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y distribución granulométrica (porcentaje de arena, limo y arcilla).

1.7.1. Localización de sitios muestrales.

Los puntos de extracción de muestras fueron previamente definidos por INIA (2008) por ser representativos, y con la estrategia de considerar la localización de posibles puntos de emisión de ETM, centrando un mayor número de muestras en sus áreas de influencia. Estos sitios muestrales conformaban transectos (norte-sur, este-oeste o intermedios) o grillas regulares, de los cuales estuvieron regularmente espaciados y se contó con la georreferenciación en coordenadas geográficas UTM (Universal Transverse Mercator) para la posterior actividad de colecta. De antemano, el sitio de muestreo corresponde al centro de un cuadrado imaginario de 1 km^2 y el lugar de toma de muestra, debió ser ubicado en cualquier sector dentro de este cuadrado. Siempre que estos cumplieran con determinados

criterios de validez y por el contrario, cuando esto no sucedía (sitio no válido o alterado, o no estaba en condiciones de ser muestreado) se procedió a encontrar un sitio alternativo siguiendo algunas pautas generales, tanto estos últimos como los criterios fueron establecidos en INIA (2008).

Finalmente, como resultado de todo lo anterior, se recolectaron un total de 201 muestras entre las regiones de Valparaíso y del Bío Bío. Distribuidas de la siguiente manera: Región de Valparaíso con 50 muestras, Región Metropolitana de Santiago con 38 muestras, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins con 50 muestras, Región del Maule con 32 muestras y por último, en la Región del Bío Bío con 31 muestras. El mayor número de muestras en las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins, obedeció al hecho de tratarse de áreas donde se sabe la existencia de zonas contaminadas con elementos metálicos.

1.7.2. Equipamiento necesario y colecta de muestras.

Según como indica INIA (2008), la brigada de terreno encargada de realizar el muestreo para el estudio anteriormente mencionado, utilizó el equipo necesario para la toma de muestras (barreno agrológico o pala agrológica, bolsas plásticas, etc). En resumen, se debió coleccionar a lo menos una masa equivalente a 3 kg de suelo seca de cada lugar muestral de la franja de profundidad definida (primeros 20 cm), la cual corresponde a una mezcla compuesta de 5 muestras individuales desde cada uno de los vértices del cuadrado y del punto central de este. Cada brigada de terreno, antes de extraer las muestras, limpiaron la superficie de todo material vegetal (excepto tejidos radicales de plantas herbáceas) y evitando tomar muestras de puntos donde existían depósitos de guano u otros residuos animales. Luego cada una de estas fueron colocadas en una bolsa de polietileno doble, las cuales fueron identificadas mediante una etiqueta que contenía principalmente los siguientes datos: fecha, nombre del responsable del muestreo, identificación del sitio muestral (número, código), entre otros.

1.7.3. Análisis de laboratorio de muestras.

Las muestras recolectadas en el proceso anteriormente descrito fueron trasladadas al INIA-La Platina dentro de los diez días siguientes a la colecta, y procesadas en los laboratorios del departamento de agricultura sustentable ubicados en la comuna de La Pintana, Región Metropolitana de Santiago, y donde fue solicitado la siguiente carga analítica mencionando, solo lo considerado para este proyecto:

- Contenidos totales (digestión con ácido nítrico (HNO_3) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2), seguido de adición de ácido clorhídrico (HCl)) de As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se y Zn,
- Textura (distribución granulométrica mediante método Bouyoucos),
- pH (en suspensión acuosa 1:2.5),
- Contenido de materia orgánica,
- Conductividad eléctrica en el extracto de saturación y
- Capacidad de intercambio catiónico.

Con respecto a la determinación de contenidos de ETM, se utilizó el método de disolución de los elementos metálicos presentes en el suelo, mediante la digestión ácida para su posterior determinación por espectrofotometría de absorción atómica, UNICAM 929, con atomización por llama o generación de hidruros (INIA, 2008). Tal método aplicable para los ETM en estudio.

1.7.4. Ubicación geográfica de muestras.

En las Figuras 3 al 7, se presenta la ubicación geográfica de la muestras recolectadas por el INIA, para cada una de las regiones de la Zona Central de Chile, del proyecto **Estudio Ambiental sobre Contaminación de Suelos** (INIA, 2008). Donde se tienen los siguientes números de muestras: Región de Valparaíso con 50 muestras, Región Metropolitana de Santiago con 38, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins con 50, Región del Maule con 32 y por último, en la Región del Bío Bío con 31 muestras.

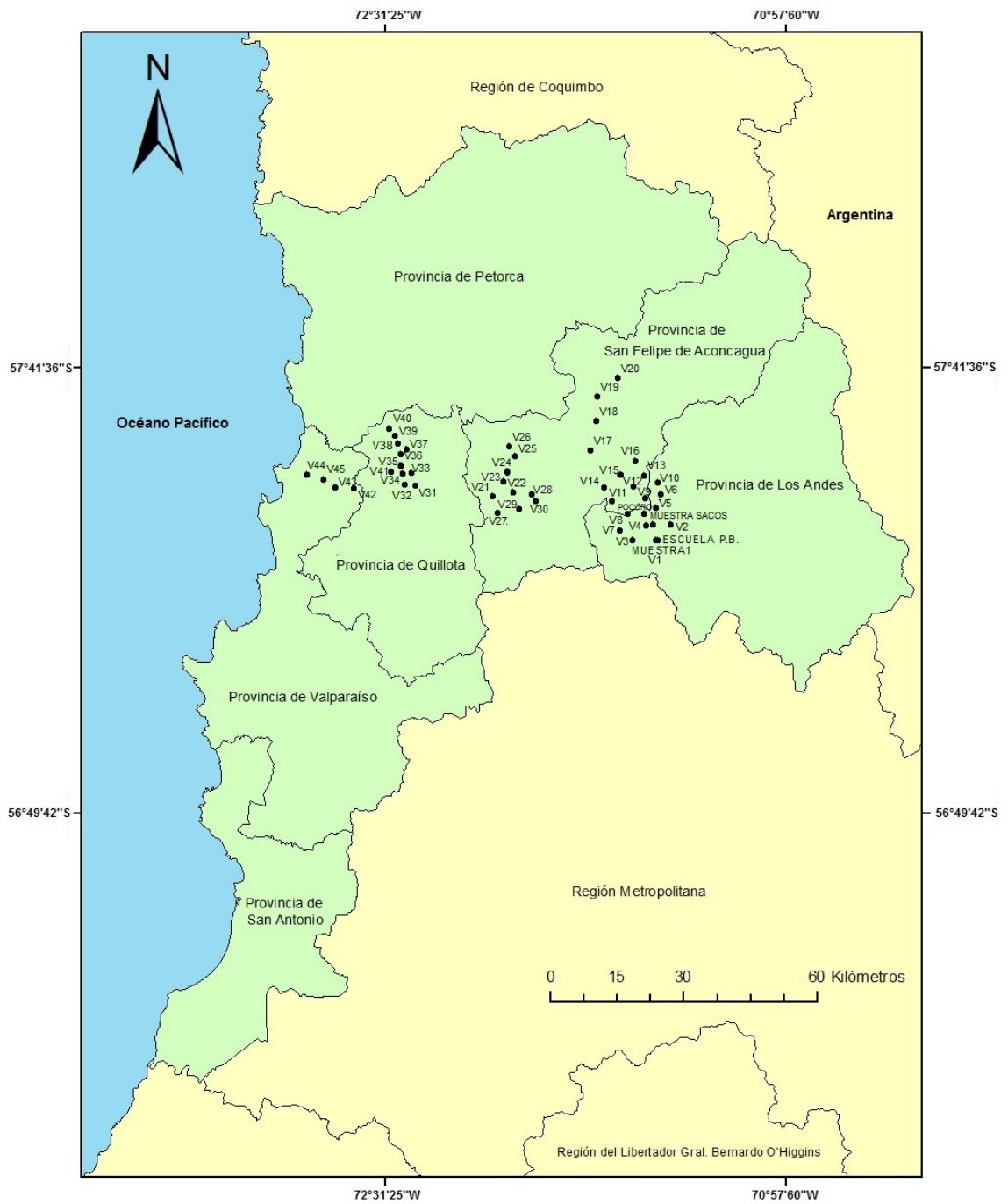


Figura 3. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región de Valparaíso.

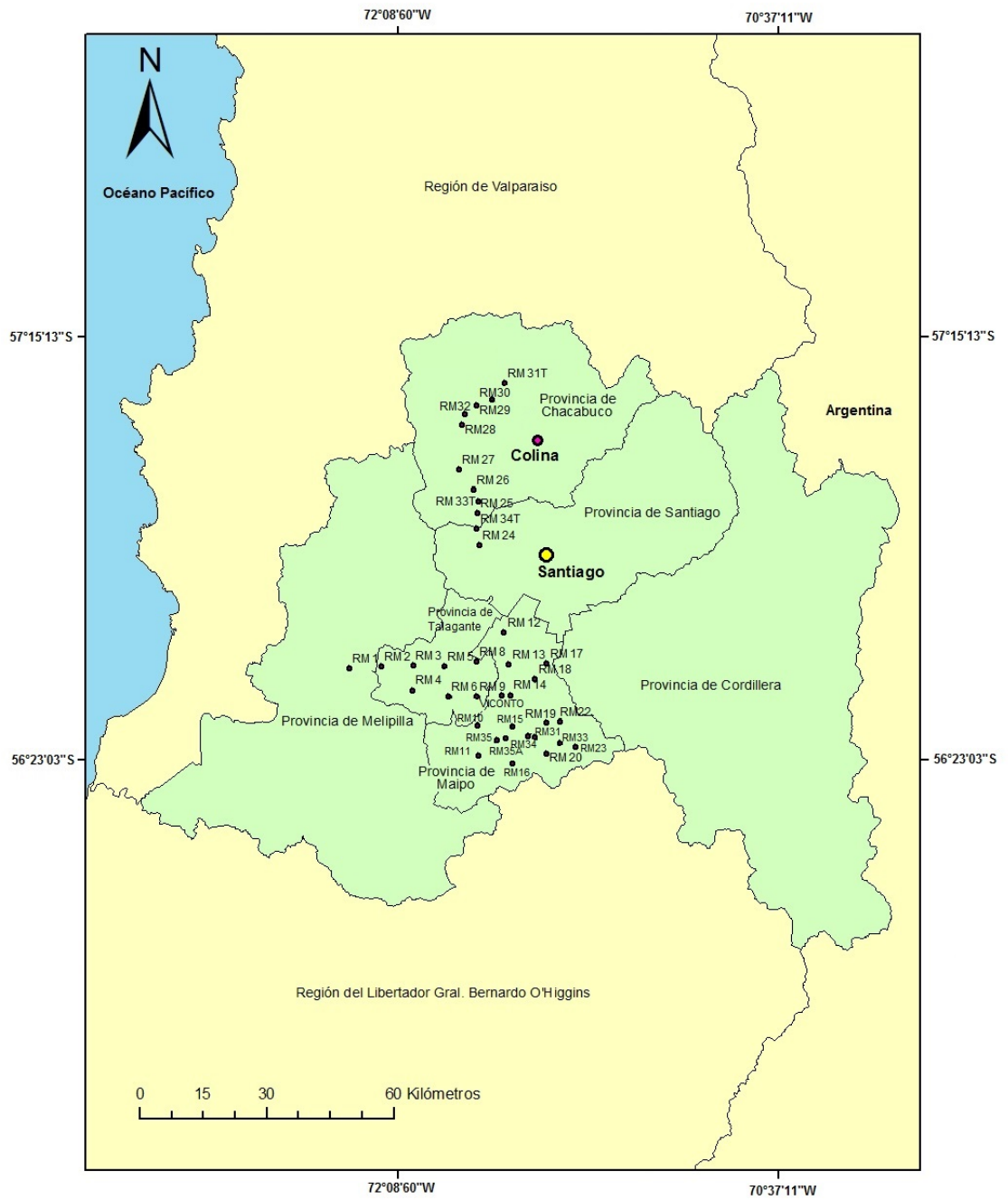


Figura 4. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región Metropolitana de Santiago.

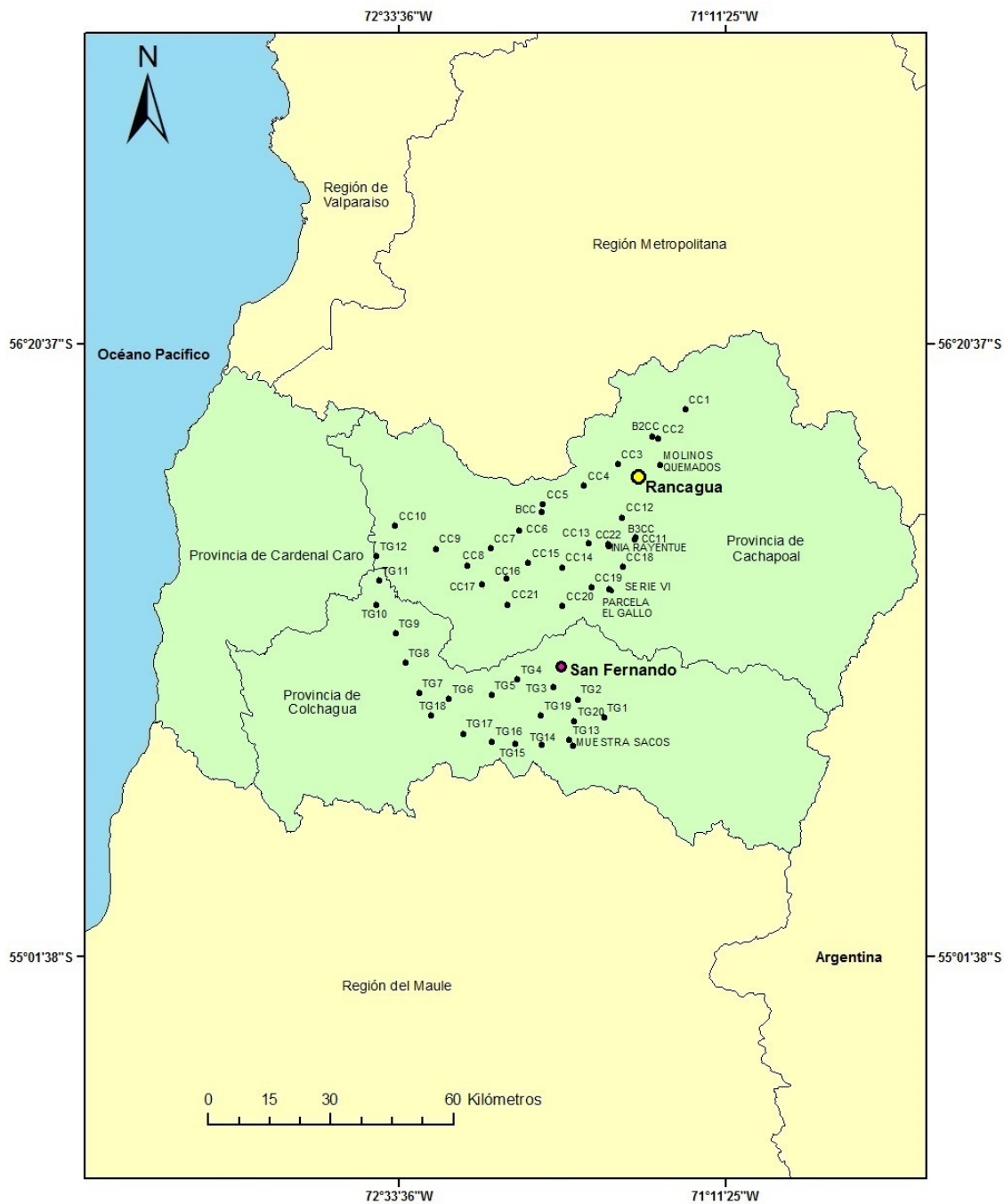


Figura 5. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

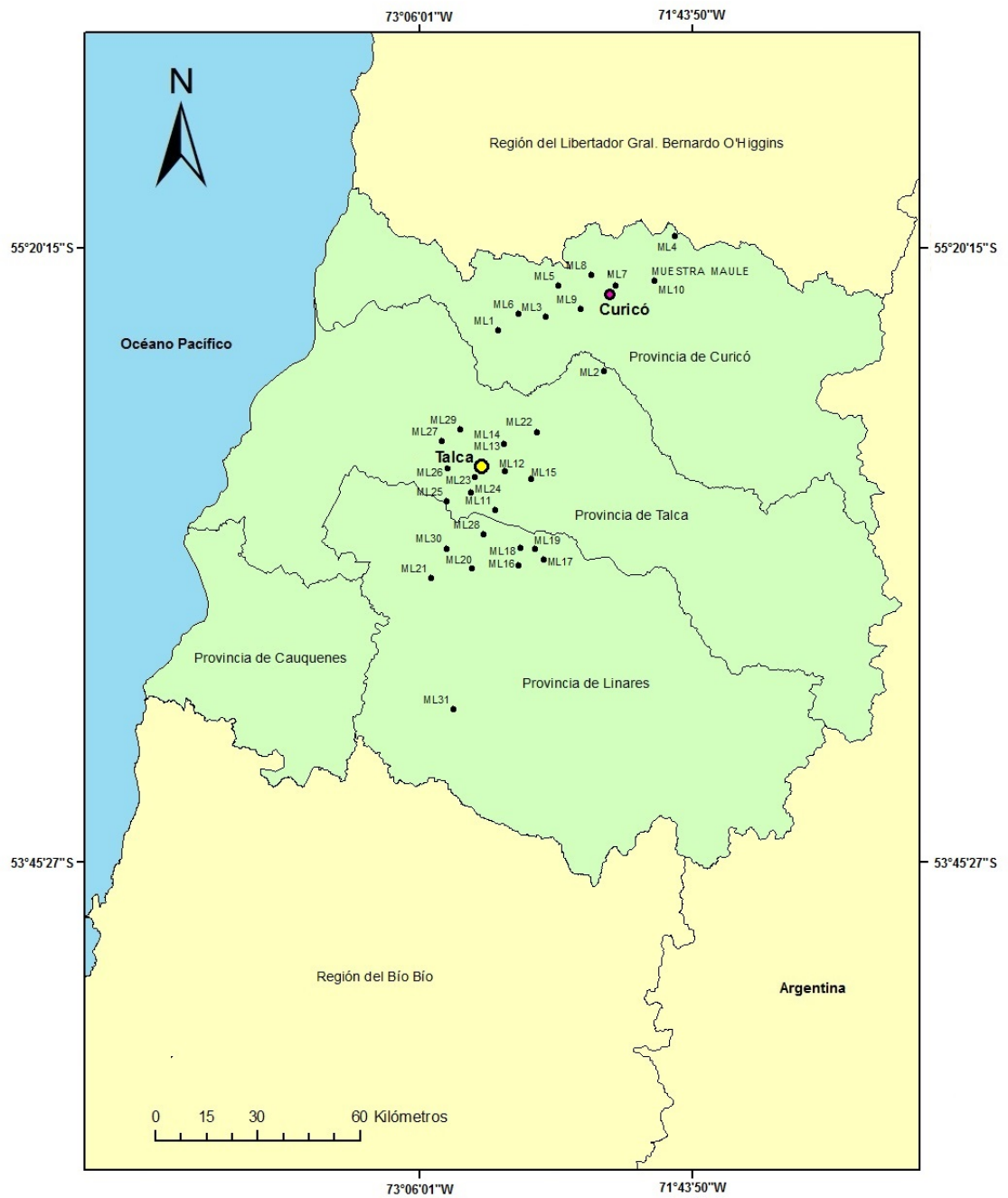


Figura 6. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región del Maule.

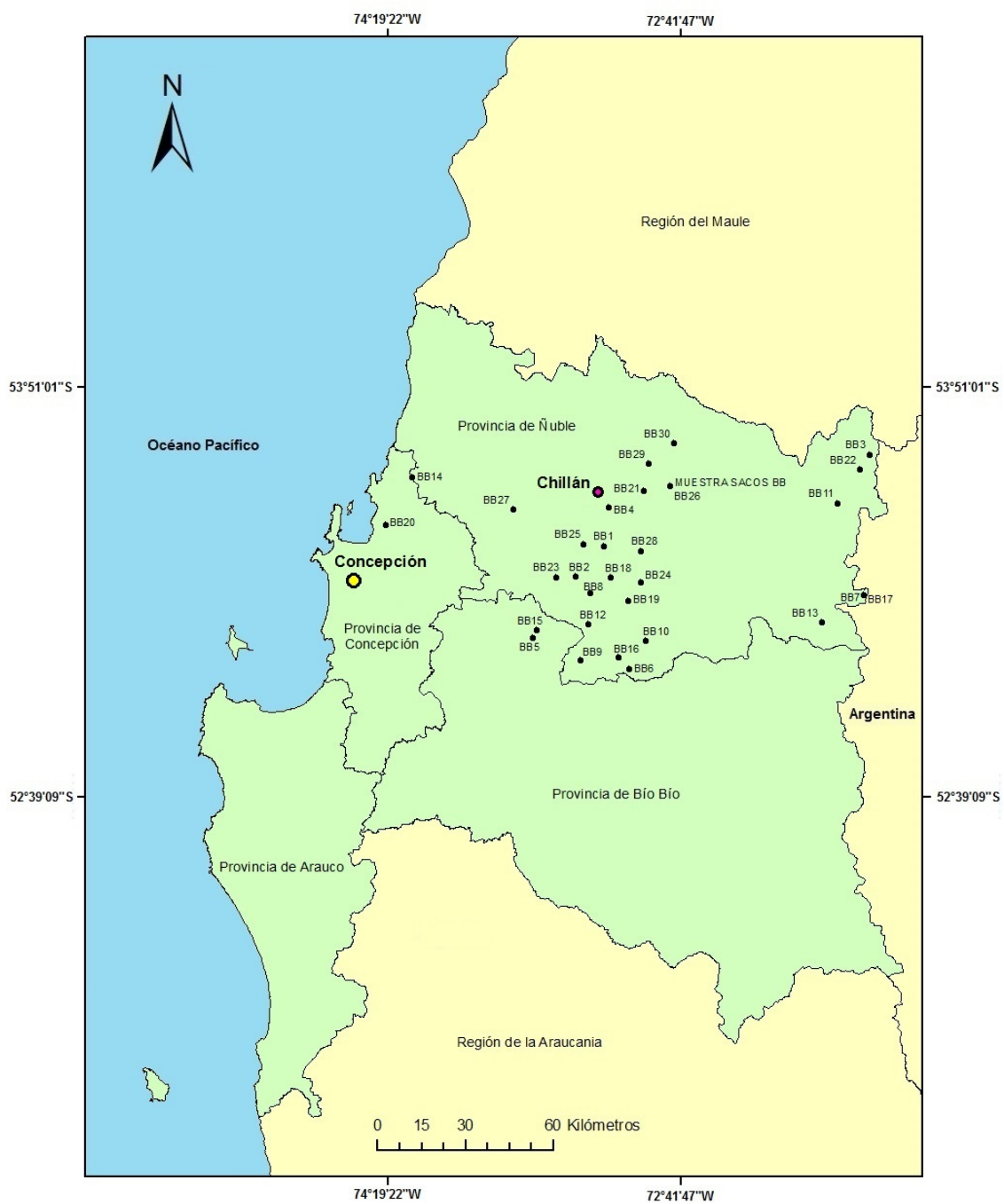


Figura 7. Ubicación de las muestras de suelo extraídas en la Región del Bío Bío.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Elementos traza metálicos (ETM) en estudio

Los elementos traza metálicos (ETM), son aquellos que están presentes en concentraciones (mgkg^{-1}) relativamente bajas en la corteza terrestre. Muchos de estos elementos (como por ejemplo el Cu y el Zn), son esenciales para el crecimiento de los seres vivos. Sin embargo, estos pueden llegar a ser tóxicos, si se ingieren o inhalan en cantidades suficientemente altas (Yaylalı-Abanuz, 2011).

Las potenciales fuentes de metales pesados en los suelos agrícolas, son el riego con aguas residuales, las actividades industriales, abuso de fertilizantes o pesticidas, y la combustión de combustibles fósiles (Hani & Pazira, 2011).

2.1.1. Arsénico (As).

El arsénico es un metal pesado altamente toxico, y está considerablemente distribuido en la corteza terrestre, este se encuentra de manera natural y también puede tener origen antropogénico. Este elemento se puede encontrar en compuestos inorgánicos y orgánicos, los primeros más tóxicos que los segundos (Sanz, 2001). Este aparece combinado con más de 150 elementos diferentes, entre ellos el Cu, Pb, Ni y Zn (Pérez Mínguez, 2015). El arsénico es un elemento que posee una alta toxicidad y que causa serios problemas al medio ambiente, además este presenta una baja movilidad en los suelos, por lo que tiende a acumularse en estos.

Actualmente, cerca de un 90% del arsénico que se produce es usado como preservante de la madera y en la fabricación de ciertos tipos de vidrio o como componente de herbicidas y de insecticidas (Nordberg, 1998).

Entre las principales fuentes antropogénicas de arsénico, están relacionadas a actividades industriales tales como la metalúrgica y química (Yaylalı-Abanuz, 2011), irrigación con aguas residuales (Nicholson et al., 2003), al uso de fertilizantes fosfatados y abonos orgánicos (Hani & Pazira, 2011), y en la formulación de numerosos plaguicidas, fungicidas

y biocidas (Pérez Mínguez, 2015). Adicionalmente, se reconoce como fuente natural las erupciones volcánicas, presente en toda la cordillera principal de Chile.

En el suelo, las principales vías de exposición de los seres vivos al arsénico son por ingesta (especialmente los niños), inhalación, contacto dérmico o el paso de este a la cadena alimentaria. El arsénico se va acumulando en cultivos, vegetales y frutas que crecen en suelos contaminados por este elemento (Zhao et al., 2009). Como indica Nordberg (1998), en el caso de una exposición a largo plazo al arsénico a través de la comida, en el cuadro clínico se presentan los síntomas abdominales vagos: diarrea o estreñimiento, enrojecimiento de la piel, pigmentación e hiperqueratosis.

2.1.2. Cadmio (Cd).

El cadmio es un metal pesado toxico en concentraciones muy bajas y en el suelo puede proceder de origen geogénico o de actividades antrópicas (Herrera, 2011). Este elemento presenta una elevada movilidad en los suelos, por lo que podría favorecer su transferencia hacia los cultivos o ser absorbido con facilidad por las plantas (Micó, 2005). En general, mientras mayor sea el pH del suelo o su CIC, tendrán mayor capacidad de retener cadmio (Herrera, 2011).

Los usos principales de Cd son principalmente en la fabricación de baterías y pinturas; en el recubrimiento de superficies metálicas (especialmente de acero y hierro) para protegerlas de la oxidación y la corrosión; como componente de fungicida; entre otros usos (Herrera, 2011).

El origen del cadmio puede ser debido a diversas fuentes, tales como de la deposición atmosférica originaria de carburantes y aceites lubricantes (Micó, 2005) o del desgaste de neumáticos y pastillas de frenos de vehículos motorizados (Jinadasa et al., 1997). Según como indica Adriano (2001), otras fuentes antrópicas de este elemento son tales como la urbano industrial y/o las prácticas agrícolas, esta última debido a la utilización de productos agroquímicos, tales como los fertilizantes fosfatados y la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003).

El Cd principalmente ingresa al organismo mediante vía oral, este a través del consumo de alimentos (vegetal o animal) procedentes de suelos contaminados, y en menor proporción mediante inhalación. Los daños más frecuentes producto de la intoxicación con cadmio son deficiencias renales, enfisema pulmonar, osteoporosis, hipertensión arterial y algunas formas de cáncer como el prostático (Herrera, 2011).

2.1.3. Cobre (Cu).

El elemento cobre forma parte esencial del metabolismo de los seres humanos (Nordberg, 1998). Este elemento se origina a partir de material parental como de fuentes antropogénicas. Un gran porcentaje del cobre que se produce es utilizado en la industria eléctrica, debido a las propiedades eléctricas que posee este elemento. Otros usos de este son en la fabricación de cañerías para el agua, material de techumbres, baterías de cocina y producción de aleaciones de cobre. Además, es un componente de productos agrícolas como insecticidas, fungicidas y fertilizantes (Nordberg, 1998).

Entre las principales fuentes de origen antrópico del elemento Cu están la utilización de aguas residuales para el regadío o la aplicación de lodos de depuración (Micó, 2005), uso de productos agroquímicos como fertilizantes fosfatados, abonos, desechos industriales de subproductos. Igualmente, los desechos agrícolas y municipales y las emisiones industriales harían aportes antrópicos de Cu a los suelos (Yaylalı-Abanuz, 2011). Otras entradas de cobre pueden surgir de la corrosión de materiales de construcción con aleación de cobre, tales como cables eléctricos y tuberías (Kabata-Pendias & Pendias, 2011).

El elemento cobre puede ingresar al organismo mediante inhalación o ingestión. En el primer caso puede provocar irritación en la nariz y garganta, y cuando es ingerido puede provocar náuseas, vómitos y diarrea. Este al ingerirse en grandes cantidades puede causar daños en el hígado y en el riñón (Rubio, 2015).

2.1.4. Níquel (Ni).

Este elemento se encuentra en forma de minerales, presentándose combinado con otros elementos, como el oxígeno, sílice, antimonio, arsénico y/o azufre (Nordberg, 1998), con este último teniendo una gran afinidad. Principalmente el níquel es usado en aleaciones con

otros elementos como por ejemplo el acero inoxidable, aleaciones utilizadas en arquitectura para la fabricación de elementos resistentes a la corrosión, baterías de níquel-cadmio, pigmentos de pintura, galvanizado, entre otros (Nordberg, 1998).

Las principales fuentes de contaminación por níquel, son tales como la combustión de bencina, el cual podría incrementar los niveles de Ni en suelos cercanos a caminos (Romic & Romic, 2003); a la aplicación frecuente de plaguicidas en suelos (Nicholson et al., 2003); por deposición atmosférica debido a actividades industriales como la minería (Streets et al., 2005), la producción de cemento (Bermudez et al., 2012) y procesos de fundición.

Según Rubio (2015), en el cual indica que en suelos contaminados con níquel, en la mayor parte de los casos ingresa al organismo vía inhalación o ingestión (Jennings, 2013). La inhalación de este elemento puede causar bronquitis crónica, disminuir la función pulmonar y hasta, puede provocar cáncer del seno nasal. En cambio, la ingestión de este puede afectar negativamente al estómago, la sangre y los riñones (Jennings, 2013).

2.1.5. Plomo (Pb).

Este elemento es muy toxico para los seres vivos, tanto seres humanos como animales. Los minerales de plomo se encuentran en varios lugares del mundo, en muchos casos estos minerales pueden contener otros metales tóxicos (Nordberg, 1998). Este se puede presentar por origen natural u origen de actividades antrópicas (Kabata-Pendias & Pendias, 2011).

Rubio (2015) indica que existen dos tipos de plomo en el medio ambiente, uno es de tipo primario y el otro secundario. El plomo de tipo primario es aquel que proviene de origen geológico y que se ha incorporado en el momento de su formación en forma de minerales, mientras que el plomo secundario es de origen radiogénico, procedente de la descomposición del uranio y el torio.

Los principales usos de este elemento a nivel mundial son para baterías de plomo-acido, soldaduras, cables, productos químicos, industria del vidrio y cerámica, fabricación de pinturas y aditivos, entre otros (Rubio, 2015). Una de las principales características que tiene el Pb es su elevada resistencia a la corrosión, por lo tanto este elemento ha destacado en la fabricación de acumuladores eléctricos y soldaduras (Micó, 2005).

Las principales fuentes de contaminación de este elemento son la utilización de aguas residuales para el riego o el uso de productos agroquímicos que contienen trazas de Pb en suelos de uso agrícola (Alloway & Ayres, 1993); producto de los gases de escape desde motores de combustión durante el siglo pasado, tales niveles estarían normalmente en la capa superficial de los suelos cercanos a autopistas y zonas muy poblada (Markus & McBratney, 2001); además, debido a la producción de baterías o las instalaciones de recuperación de baterías de desecho, las centrales térmicas, y las industrias de hierro y acero (Yaylali-Abanuz, 2011); y por último, producto de actividades relacionadas con la pintura y los barnices (Moreno et al., 1993).

El elemento plomo puede ingresar al organismo de los seres vivos, tanto seres humanos como animales, mediante la ingestión de alimentos contaminados con este o a través de la inhalación de polvo del suelo o por ingerir tierra (geofagia) (Rubio, 2015). Cuando se está expuesto a bajas dosis de Pb puede causar debilidad en las extremidades, aumento de la presión arterial y disminución de la función neurológica. En cambio, altas dosis a este pueden ocasionar lesiones cerebrales graves, daño a los riñones, abortos involuntarios y hasta la muerte (Jennings, 2013).

2.1.6. Selenio (Se).

El selenio es un elemento beneficioso para los seres vivos, pero este presenta un margen muy estrecho para producir efectos tóxicos. Este elemento se encuentra en todas las rocas y suelos de todo el mundo, y es uno de los pocos metales pesados que aumenta su solubilidad al aumentar el pH (Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, 1999).

El principal uso de este elemento es para la fabricación de rectificadores de selenio, los cuales son usados para convertir la corriente alterna en continua. Además, este también es utilizado como insecticida y en aleaciones con acero inoxidable y cobre (Nordberg, 1998).

Las principales fuentes de contaminación por selenio son producto de actividades metalúrgicas, riego con aguas que contengan desechos, la combustión del carbón y la aplicación de fertilizantes de selenio (Shunsheng et al., 2009).

Según indica Nordberg (1998), el selenio puede ser absorbido en cantidades tóxicas por los pulmones, el tracto intestinal o lesiones de la piel. Además, muchos compuestos de este elemento pueden causar quemaduras graves de la piel y membranas mucosas, y la exposición crónica de la piel a concentraciones bajas de polvo de determinados compuestos puede producir dermatitis y paroniquia.

2.1.7. Zinc (Zn).

El zinc se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza y pertenece a un grupo de ETM que para la biosfera son potencialmente más peligrosos (Romic & Romic, 2003). Este se encuentra asociado con la textura del suelo, mostrando contenidos más bajos en suelos arenosos (Kabata-Pendias & Pendias, 2011).

El principal uso del zinc es como protección del acero contra la corrosión atmosférica mediante galvanizado. Además, es un componente importante de diversas aleaciones y es utilizado como catalizador en la producción química de caucho, plásticos, lubricantes, y pesticidas, también en baterías de automóviles, equipos, tuberías y aparatos domésticos (Rubio, 2015).

Las principales fuentes antropogénicas de zinc están relacionadas con la industria de producción de cemento (Bermudez et al., 2012), como también de la industria de metales no ferrosos y las actividades agrícolas (Kabata-Pendias & Pendias, 2011), en esta última debido a la utilización de productos agroquímicos como fertilizantes y pesticidas en suelos agrícolas (Romic & Romic, 2003); además de la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003).

La exposición a altas dosis de zinc presentan efectos tóxicos y carcinogénicos, las cuales pueden dar lugar a complicaciones neurológicas, hipertensión, y trastornos de función de los riñones y el hígado (Yaylılı-Abanuz, 2011).

2.2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos

Antes de revisar todos los parámetros utilizados en este estudio, cabe mencionar que las diferentes propiedades edáficas del suelo, tales como la distribución de tamaño de grano y

la mineralogía, pueden tener un efecto sobre las concentraciones de elementos traza de origen natural presentes en estos (Wang & Qin, 2007).

2.2.1. pH.

La medida de pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos, incluidos las plantas y microorganismos, además de ser fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo (Fernández et al., 2006). En la **Tabla 4**, se presentan los términos descriptivos a utilizar para los rangos de pH de los suelos según la United States Department of Agriculture (USDA), como lo indica Soil Survey Division Staff (1993).

Tabla 4. *Clasificación de rangos de pH del suelo según la USDA (Fuente: Soil Survey Division Staff, 1993).*

Condición	Rango
Ultra ácido	< 3.5
Extremadamente ácido	3.5 - 4.4
Muy fuertemente ácido	4.5 - 5.0
Fuertemente ácido	5.1 - 5.5
Moderadamente ácido	5.6 - 6.0
Ligeramente ácido	6.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Ligeramente alcalino	7.4 - 7.8
Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4
Fuertemente alcalino	8.5 - 9.0
Muy fuertemente alcalino	> 9.0

2.2.2. Conductividad Eléctrica (CE).

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de una solución acuosa para transportar corriente eléctrica (Fernández et al., 2006), por lo tanto, esta medida es una forma indirecta de determinar la salinidad del suelo. En la **Tabla 5**, se presentan las diferentes clases de salinidad de los suelos determinadas mediante la CE de estos según la USDA (Soil Survey Division Staff, 1993).

Tabla 5. *Escala de salinidad de suelos según la USDA (Fuente: Soil Survey Division Staff, 1993).*

Clase	Conductividad Eléctrica
	mS gr ⁻¹
No salino	0 - 2
Ligeramente salino	2 - 4
Moderadamente salino	4 - 8
Fuertemente salino	8 - 16
Muy fuertemente salino	> 16

2.2.3. Materia Orgánica (MO).

El contenido de materia orgánica (MO) corresponde a la fracción orgánica presente en los suelos, donde esta incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición; tejidos y células de organismos que viven en este; sustancias producidas y vertidas por estos organismos; y compuestos orgánicos tóxicos provenientes de actividades antrópicas, tales como hidrocarburos del petróleo (Fernández et al., 2006). En la **Tabla 6**, se presentan las diferentes categorías para la interpretación del contenido de materia orgánica en los suelos (Fernández et al., 2006).

Tabla 6. *Categorías del contenido de materia orgánica en el suelo (Fuente: Fernández et al., 2006).*

Categoría	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 – 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

2.2.4. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se refiere a la capacidad del suelo de retener e intercambiar nutrientes vegetales, aumentando notablemente con la presencia de materia orgánica (Fernández et al., 2006). Con esta medida es posible inferir acerca de la fertilidad de los suelos. En la **Tabla 7**, se presentan las diferentes categorías para la clasificación de fertilidad de los suelos considerando el valor de CIC, tanto para suelos ácidos como alcalinos (Fernández et al., 2006).

Tabla 7. *Clasificación de la fertilidad del suelo según valor de CIC*
(Fuente: Fernández et al., 2006).

Categoría	CIC ($Cmol(+) kg^{-1}$)
Muy alta	> 40
Alta	25 – 40
Media	15 – 25
Baja	5 – 15
Muy baja	> 5

2.2.5. Distribución granulométrica.

El suelo está compuesto de partículas de diferentes tamaños, las cuales varían desde unos cuantos micrones (μm) hasta trozos de gran tamaño. Por lo tanto, la textura del suelo es la proporción relativa de los diferentes tamaños de partículas, porcentajes de arena, limo y arcilla. Estos porcentajes al combinarse permiten categorizar al suelo en una de las 12 clases texturales del sistema USDA (Soil Survey Division Staff, 1993). En resumen, los suelos arcillosos poseen textura fina; los suelos francos tienen textura moderadamente fina, media o moderadamente gruesa; y los suelos arenosos poseen textura gruesa. En la **Figura 8** se presenta el sistema de clasificación de textura del suelo en forma piramidal del USDA (Soil Survey Division Staff, 1993).

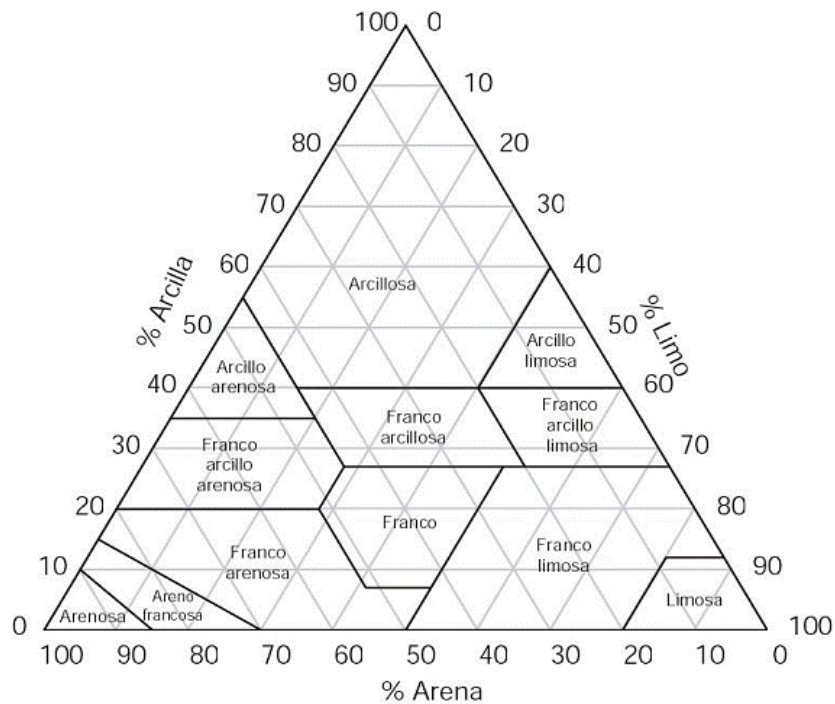


Figura 8. Diagrama triangular de textura del suelo según sistema de clasificación USDA.

2.3. Estadística

2.3.1. Estadística no paramétrica.

Son procedimientos estadísticos que no realizan hipótesis sobre la población o sus parámetros, ya que no es posible hacer de forma segura ningún supuesto sobre la forma de la distribución poblacional o los parámetros no han podido ser estimados. Existen diferentes tipos de pruebas según el número de muestras, entre los más comunes para una muestra son: Chi cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilks (Molinero, 2003).

Habitualmente los datos determinados de las muestras ambientales presentan valores extremadamente superiores al conjunto de datos, desviándose considerablemente de este. Incluso una transformación de estos datos no ayudará a acercarse a una distribución normal, función muy utilizada para verificar comportamiento de distribución de datos. Por esto, se hace necesario utilizar la estadística no paramétrica, ya que es la más útil para trabajar en estas condiciones (Reimann et al., 2011).

2.3.2. Gráficos estadísticos.

Las representaciones graficas de datos tienen la finalidad de poder recopilar y resumir de manera gráfica una base de datos. Estas graficas revelan de forma visual un patrón de comportamiento de la variable en estudio (Devore, 2005). En la naturaleza, si no hay otras entradas de fuentes como las antropogénicas, la concentración de elementos por lo general tiene una distribución normal (Zhao et al., 2010). Entre los gráficos más utilizados se encuentran el diagrama de frecuencia acumulada, histograma y diagrama de caja (Devore, 2005).

2.3.3. Estadística descriptiva.

La estadística descriptiva es un conjunto de técnicas para presentar y resumir un conjunto de datos para facilitar su comprensión y/o generar hipótesis (Micó, 2005). Una de estas técnicas es la utilización de los parámetros estadísticos, los cuales son representados por un valor numérico que se obtienen a partir del conjunto de datos y que resume la información contenida en esta (Devore, 2005). Existen distintas formas de resumir una distribución muestral de una variable, a continuación se presentan las diferentes medidas utilizadas en este estudio.

2.3.3.1. Medidas de tendencia central.

Estas medidas nos indican en torno a que valor se distribuyen los datos, es decir, la localización del centro de la distribución del conjunto de datos (Gorgas et al., 2009). Estas medidas corresponden a la media, mediana y moda.

2.3.3.2. Medidas de posición.

Las medidas de posición dividen un conjunto de datos en grupos con el mismo número de individuos, es decir, lo dividen en partes iguales (Montgomery & Runger, 2002). Los indicadores más usados son los cuartiles y percentiles.

2.3.3.3. Medidas de dispersión.

Estas medidas cuantifican la separación, la dispersión, la variabilidad de los valores de la distribución con respecto a ciertas medidas de tendencia central (Devore, 2005). Entre las medidas utilizadas se encuentran el rango, desviación estándar, coeficiente de variación, desviación absoluta de la mediana (MAD).

2.3.3.4. Medidas de forma.

Esta medida entrega información sobre el aspecto de la distribución de frecuencias (Gorgas et al., 2009). Estos indicadores corresponden a coeficiente de asimetría y curtosis.

2.3.4. Estadística multivariada.

La estadística multivariada es un análisis de datos que estudia, analiza, interpreta y elabora el material estadístico sobre un conjunto de un número de variables mayor a 1 de una población, las que pueden ser cuantitativas, cualitativas o ambas (Cuadras, 1981). Los objetivos de esta son poder resumir los datos mediante un conjunto reducido de nuevas variables sin perder demasiada información; encontrar grupos de datos, si es que existen; clasificar las observaciones en grupos definidos y relacionar dos conjuntos de variables (Rubio, 2015).

Para este estudio fueron utilizados los análisis multivariantes de correlación de Spearman, análisis de componentes principales (ACP) y análisis Cluster. Estos análisis se utilizan comúnmente para medir el nivel de correlación entre las variables (entre ETM, y entre parámetros fisicoquímicos y ETM) y proporcionar información sugerente sobre fuentes de metales pesados (Facchinelli et al., 2001).

2.3.4.1. Correlación de Spearman.

Es una medida de la correlación o asociación o interdependencia entre dos variables aleatorias continuas. Versión no paramétrica del coeficiente de correlación de Pearson, que se basa en los rangos de los datos en lugar de hacerlo con respecto a los valores reales. Resulta apropiada para datos que presentan valores extremos o aquellos que no satisfagan el supuesto de normalidad (Peris, 2006). Los valores del coeficiente van de -1 a +1, el signo

de este indica la dirección de la relación y el valor absoluto del coeficiente de correlación indica la fuerza de la relación entre las variables (Micó, 2005).

2.3.4.2. Análisis de componentes principales (ACP).

El análisis de componentes principales es una técnica estadística de síntesis de la información o de reducción del número de variables, es decir, ante un grupo de datos con muchas variables, mediante este análisis se lograra reducir el número de variables perdiendo la menor cantidad de información posible. Con esta se busca transformar el conjunto original de variables en otro conjunto de nuevas variables incorrelacionadas entre sí, que no tenga repetición o redundancia en la información, llamado conjunto de componentes principales (CP). Es importante resaltar el hecho de que el concepto de mayor información se relaciona con el de mayor variabilidad o varianza (Peris, 2006).

Las nuevas componentes principales serán una combinación lineal de las variables originales e independientes entre sí, estas se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra (Micó, 2005).

2.3.4.3. Análisis Cluster.

Esta técnica tiene la finalidad de clasificar las observaciones en grupos, tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos (Townend, 2002). A partir de la identificación de los grupos o clusters se podrá trabajar de forma segmentada sin necesidad de seguir trabajando con toda la muestra. La técnica Cluster presenta 2 tipos de métodos, estos son los jerárquicos y los no jerárquicos. Existe una representación gráfica que ayuda a interpretar el resultado de un análisis Cluster jerárquico, este se llama dendrograma. Este es un diagrama en forma de árbol que resume el proceso de agrupación del análisis (Vilà et al., 2014).

2.4. Geoestadística

En estadísticas al no conocerse todos los datos de una población, se suelen usar métodos de interpolación. Estos consisten en estimar valores desconocidos a partir de una serie de datos conocidos. Existen varias técnicas de interpolación, entre los más usados se encuentran el

método distancia inversa ponderada (IDW) y el método Kriging. Ambos se basan en la auto-correlación espacial de los puntos para la predicción y generación de superficies continuas (Díaz, 2002). Las técnicas geoestadísticas son ampliamente utilizados para la interpolación espacial de los niveles de metales pesados en los suelos y para la evaluación de sitios contaminados (Da Silva, 2004).

2.4.1. Método de interpolación IDW.

Como indica Fuenzalida et al. (2015), el interpolador IDW consiste en una combinación de tipo lineal de los datos promediados con un peso que es función del inverso de la distancia. Cuanto más cercano esté el punto de muestreo disponible al punto a interpolar, mayor influencia recibirá dicho dato en su cálculo. El principal factor que afecta a la exactitud de IDW es el valor del parametro de potencia, la opción mas utilizada es considerando el valor de este igual a 2 (Webster & Oliver, 2001). Este ultimo fue el metodo utilizado en este proyecto para realizar la interpolacion IDW.

2.4.2. Método de interpolación Kriging.

La técnica de interpolación Kriging es un conjunto de métodos de mínimos cuadrados de regresión generalizada en un barrio de búsqueda especificada con la finalidad de poder estimar valores en sitios donde no han sido muestreados o no se tiene valores del muestreo (Isaaks & Srivastava, 1989). Todas las versiones de Kriging son variaciones de la base generalizada del método de regresión lineal (Mair & Fares, 2011).

2.4.3. Pasos de una modelación geoestadística.

Los pasos que se deben seguir para poder realizar la modelación geoestadística mediante Kriging es primero efectuar el análisis exploratorio de datos (EDA: Exploratory data analysis), en el cual se busca establecer si algunos supuestos son válidos para la aplicación de la teoría geoestadística o para definir que procedimiento de predicción es el más conveniente (Díaz, 2002). Luego, se hace necesario ajustar el variograma experimental de los datos a un variograma teórico. El variograma experimental permite el conocimiento de la estructura de autocorrelación para cualquier distancia entre sitios dentro del área de

estudio (Giraldo, 2002). Según como indica Rubio (2015), en la actualidad existen varios modelos teóricos de semivarianza que pueden ajustarse al variograma experimental, que permiten generalizar lo observado en este último a cualquier distancia. Los modelos teóricos de variogramas utilizados en este estudio son los modelos esférico y exponencial. Una explicación a esto es que estos son los más usados y pueden ser calculados mediante el software Vesper versión 1.6, el cual fue utilizado en este trabajo. Por último, ya es posible realizar la interpolación Kriging, la cual ya fue expuesta en el punto anterior.

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1. Procedimiento de análisis

Se utilizó la base de datos del informe Estudio Ambiental sobre Contaminación de Suelos del SAG el cual fuera realizado por el INIA (2008), para suelos de uso agrícola del estrato arable de la zona central de Chile. Se determinaron las concentraciones de ETM de las muestras analizadas, algunas de las cuales presentaron niveles inferiores al límite de detección (LD) del equipo, por esta razón, dichos valores fueron reemplazados por $LD/2$ como lo indica Tume et al. (2014). Producto de lo anterior, se hace necesario poder limitar el número de datos con valores duplicados, ya que esto provocaría un efecto negativo en los análisis posteriores (Zhang, 2006; Romic & Romic, 2003). Por lo tanto, se descartaron los ETM que presentaron porcentajes superiores al 20% de muestras con concentraciones inferiores a LD. En tanto, en todas las regiones se consideraron los elementos As, Cu, Ni, Pb y Zn, solo en la Región de Valparaíso se agrega a estos el cadmio y en la Región Metropolitana de Santiago solo se incorpora el selenio. Luego, a estas muestras se le aplicó un tratamiento estadístico, multivariado y geoestadístico, para posteriormente establecer los valores de fondo de cada ETM y evaluar posible riesgo ecológico debido a contaminación por estos.

3.2. Obtención datos de granulometría faltantes

En el cumplimiento de los objetivos específicos propuestos, fue necesario tener un conjunto de datos completos, en el cual no faltasen mediciones de ningún tipo (ni en las concentraciones de ETM ni en los parámetros fisicoquímicos). Tal hecho puede perturbar la metodología utilizada dado que disminuye el tamaño del conjunto de datos y la representatividad de esta. En este estudio se dio tal situación en las variables de granulometría (porcentajes de arena, limo y arcilla), y en el cual se observó que estas no alcanzaban a ser un 10% de total de datos de cada región. Por esto, al ser un porcentaje pequeño de datos faltantes, estos fueron reemplazados con métodos estadísticos de relleno de datos (Devore, 2005), los cuales consisten en verificar la normalidad de los datos

medidos y de estos mismos datos pero transformados por un logaritmo, todo esto realizado mediante una prueba de bondad de ajuste. Terminado esto fue posible comenzar el relleno de datos faltantes y el cual depende de la función de distribución que sigue el conjunto de datos. Por tanto, si se cumplió la premisa de la normalidad de los datos, los faltantes fueron reemplazados por la media muestral y por el contrario, si la función de distribución fue Log-Normal, estos se reemplazaron por la media geométrica del conjunto de datos. Si estas dos situaciones no llegasen a ser satisfechas, entonces los datos faltantes fueron reemplazados por la mediana del grupo de datos de la variable considerada. Agregó, las pruebas de bondad de ajuste dependen del número de datos que se tienen y por esto se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, cuando se tuvieran un número de datos mayor o igual a 50 ($n \geq 50$), y por el contrario, se empleó la prueba de Shapiro-Wilk para un conjunto de datos menor a 50 ($n < 50$) (Molineró, 2003). Para este estudio se aplicó esta metodología en las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Debido a que el relleno de datos faltantes no forma parte de los objetivos específicos establecidos, los resultados de estos son presentados en el Anexo I del presente trabajo.

3.3. Análisis exploratorio de datos de ETM y propiedades fisicoquímicas

El objetivo del análisis exploratorio de datos (AED), es resumir y visualizar datos de manera que se consiga un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas. Además, con este tratamiento estadístico se busca la existencia de normalidad en los datos para la posterior interpolación Kriging e identificación de datos atípicos. Estos objetivos se consiguen mediante métodos sistemáticos sencillos para organizar y preparar los datos. Para este estudio, las variables a estudiar (As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se y Zn, según corresponda) y parámetros fisicoquímicos (pH, CE, MO, CIC y porcentajes de arena, limo y arcilla), fueron comparados visualmente mediante: Frecuencia Acumulada, Histograma y Box plot, para cada región. Para esto se utilizó el software R Project versión 3.2.4.

3.4. Análisis estadístico univariado de ETM y propiedades fisicoquímicas

Hasta ahora se tiene un limitado número de muestras extraídas de cada región, de las cuales se obtuvieron sus respectivas concentraciones totales de ETM. Con el fin de poder resumirlos y explicar las particularidades importantes de ellos, se utilizó el análisis estadístico univariado o estadística descriptiva.

En este análisis se utilizaron algunos de los principales estadísticos descriptivos, tales como la media, la mediana, la desviación estándar (SD), coeficiente de asimetría, curtosis, rango de valores, valores mínimo y máximo, coeficiente de variación (CV), desviación absoluta de la mediana (MAD) y percentiles, para las variables en estudio (As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se y Zn, según corresponda) y parámetros (pH, CE, MO, CIC y porcentajes de arena, limo y arcilla) para cada región. Para esto se utilizó el software IBM SPSS versión 23.0.0.0.

3.5. Análisis multivariado de ETM y propiedades fisicoquímicas

Como se señaló anteriormente, en el análisis multivariado se utilizaron las técnicas Correlación de Spearman entre ETM, entre estos elementos y parámetros fisicoquímicos, análisis de componentes principales (ACP) y análisis Clúster. Los resultados de estos análisis fueron obtenidos mediante el software IBM SPSS versión 23.0.0.0.

Para encontrar las relaciones existentes entre los mismos ETM o entre ETM y parámetros fisicoquímicos, se utilizó la correlación bivariada de Spearman en las 14 variables anteriormente mencionadas para cada una de las regiones en estudio, según corresponda.

Los factores de carga resultantes del análisis de componentes principales (ACP) fueron sometidos a un sistema de rotación mediante el método Varimax. Todo esto fue calculado a partir de la matriz de correlaciones de los datos de las muestras de suelo para cada una de las regiones. Fue primordial y necesario establecer cuantas componentes principales se iban a utilizar, para este trabajo se utilizó el Criterio de Kaiser, o sea, se eligieron las componentes cuyos autovalores fuesen superiores a la unidad (Micó, 2005). Cabe destacar, fueron considerados importantes los elementos que tuvieran factores de carga en valor absoluto mayores a 0.5, ya que con este valor es posible describir con suficiente eficacia la composición de cada factor (Zhou et al., 2013; Albanese et al., 2013).

Por último, previo a realizar el análisis Clúster, se procedió a estandarizar al conjunto de datos por medio de puntuaciones Z, debido a que no se dispone de un mismo tipo de variable o estas poseían diferentes unidades de medida. Luego, los grupos fueron unidos mediante el método de agrupación del vecino más próximo o Nearest Neighbor Method. Finalmente, la medida de proximidad entre individuos elegida y utilizada para este análisis fue la distancia euclídea al cuadrado. Estos 2 últimos análisis (ACP y Cluster), son conocidos como métodos efectivos para identificar fuentes de metales pesados (Mamat et al., 2014).

3.6. Estimación de los niveles de contaminación de los ETM

Los valores de fondo o background values sirven de referencia para poder distinguir las concentraciones de origen natural de un determinado elemento a partir de las concentraciones afectadas por actividades antrópicas, es decir, niveles que existirían sin la presencia de fuentes antrópicas. Los métodos Geoquímicos y Estadísticos son los que normalmente se utilizan para determinar los valores de fondo (Matschullat, 2000). Para este estudio se utilizaron los métodos estadísticos, ya que para poder usar las técnicas geoquímicas es necesario contar con muestras conocidas de estar libres de interferencias antrópicas y este no es el caso. Los métodos estadísticos se realizan por medio de procedimientos o técnicas estadísticas aplicadas al conjunto de datos en relación con diferentes elementos químicos, y con esto así es posible distinguir las concentraciones que son propias del suelo de las concentraciones que son aportadas por actividades humanas. Cabe señalar, con los métodos estadísticos por sí solos, no es posible concluir entre ambiente natural y antropogénico, debido a que no es considerado el entorno geoquímico específico (Myers & Thorbjornsen, 2004).

Para ayudar en la estimación de los valores umbrales se utilizó las técnicas de Boxplot, [$median \pm 2 \times MAD$] e Iterative 2σ -technique. El primer método fue adoptado para definir los valores de fondo por medio de representaciones de box plot (Reimann et al., 2005), por lo tanto, el valor de fondo o límite superior se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$UL = Q3 + (1.5 \times IQR)$$

Donde UL es el límite superior o valor de fondo, Q3 representa al cuartil superior o tercer cuartil y la variable IQR correspondería al rango intercuartil, el cual se obtiene mediante $Q_3 - Q_1$ (Tukey, 1977).

El segundo método corresponde a [*mediana* $\pm 2 \times MAD$] (Reimann et al., 2005), en el cual MAD corresponde a la desviación absoluta de la mediana, es decir, la mediana de las desviaciones absolutas de la mediana de todos los datos (Tukey, 1977). Se utilizó estos parámetros ya que estas estimaciones son robustas frente a los valores extremos, debido a que no se ven tan influenciados por estos (Reimann et al., 2005).

El último método que se utilizó fue el Iterative 2σ -technique, esta técnica tiene por objeto definir el valor de fondo acudiendo a un rango normal (*media* $+ 2\sigma$). Este es un método iterativo, donde el primer rango es obtenido de los estadígrafos del conjunto de datos original. Luego, se omiten todos los valores que se encuentran más allá del intervalo *media* $\pm 2\sigma$. Este procedimiento se repite hasta que todos los valores restantes se encuentran dentro de este rango. Finalmente, el rango *media* $\pm 2\sigma$ calculado a partir de la sub-colectivo resultante se considera que reflejan el background geogénico y por esto, este intervalo es considerado el intervalo de valor de fondo del elemento analizado, por lo cual el valor de fondo es el límite superior de dicho rango (*media* $+ 2\sigma$). Esta técnica construye una distribución normal aproximada en torno al valor medio de los datos originales (Matschullat, 2000). Es importante señalar, en el Anexo III del presente estudio, se encuentran los valores utilizados para el cálculo de cada background value de los métodos estadísticos.

3.7. Línea base de comparación

Un aspecto importante en el estudio de contaminación de suelos, es poder establecer valores de referencia para las concentraciones de ETM y así con esto identificar concentraciones con valores anormalmente grandes sobre la base de datos que se desea estudiar (Redon, 2013). La finalidad de utilizar estos valores de referencia es poder detectar la presencia de contaminación de ETM en los suelos del área en estudio. Para este trabajo se utilizó el valor objetivo (Target Value), el cual indica si existe un nivel de suelos

sustentable, y los valores contaminados (Intervention Value), los cuales indican niveles serios de contaminación de los suelos, ambos establecidos en el Acta de Protección de Suelos de Holanda (VROM, 2000). Dicha metodología fue propuesta por el SAG para que fuera utilizada como una primera aproximación, con la finalidad de encontrar valores de referencia para metales pesados (SAG, 2005). Esta consiste en convertir los valores de suelo estándar a los del suelo estudiado, considerando los parámetros medidos de materia orgánica (MO) y contenido de arcilla de estos. Posteriormente, estos valores convertidos fueron comparados con los niveles medidos de cada ETM de los suelos en estudio. La siguiente fórmula matemática de corrección es la utilizada para obtener tales valores de referencia (VROM, 2000).

$$(SW, IW)_b = (SW, IW)_{sb} \times \frac{(A + (B \times \%Arcilla)) + (C \times \%MO)}{A + (B \times 25) + (C \times 10)}$$

Donde $(SW, IW)_b$ corresponden a Target Value o Intervention Value para suelo que será evaluado, $(SW, IW)_{sb}$ corresponde al Target Value o Intervention Value para suelo estándar, $\%Arcilla$ a porcentaje de Arcilla medido en el suelo que debe ser evaluado, $\%MO$ sería porcentaje de materia orgánica (MO) medido en el suelo que debe ser evaluado y A, B, C corresponde a constantes dependientes de sustancias para los ETM.

3.8. Identificación de muestras contaminadas en suelos agrícolas

Como consecuencia de la normativa de aplicación de biosólidos en suelos agrícolas, en muchos países se han establecido concentraciones límites de metales pesados en suelos. En el caso de Chile, estos límites corresponden a concentraciones máximas permitidas de ETM que pueden contener los suelos agrícolas (previo a la aplicación de lodos), todo esto citado por el SAG (2005). Estos valores umbrales dependen de la macrozona a la cual corresponden los suelos que deben ser evaluados (INN, 2004). Estas macrozonas se identifican como macrozona norte y sur, la primera es representada por el área geográfica que comprende el territorio de las regiones I, II, III, IV, V, VI y Metropolitana de Santiago, y la segunda a las regiones VII, VIII, IX, X, XI y XII. En la **Tabla 8**, se presentan los

límites de metales pesados (mgkg^{-1}) en suelos agrícolas previo a aplicación de biosólidos para las macrozonas de Chile.

Tabla 8. Concentración máxima permitida (mgkg^{-1}) de ETM en suelos, previo a una aplicación de lodos (Fuente: INN, 2004).

ETM	Macrozona Norte		Macrozona Sur
	pH > 6.5	pH ≤ 6.5	pH > 5
As	20	12.5	10
Cd	2	1.25	2
Cu	150	100	75
Ni	112	50	30
Pb	75	50	50
Se	4	3	4
Zn	175	120	175

3.9. Análisis de variogramas

Para el posterior análisis geoestadístico del conjunto de datos es necesario antes analizar la correlación espacial entre los valores muestreados. Se utiliza una herramienta para el tratamiento geoestadístico y tal instrumento se llama Variograma. Estos entregan información fundamental para la generación de mapas espaciales de distribución. En este estudio se consideraron los modelos de variogramas Esférico y Exponencial, de los cuales uno de estos fue elegido para ser utilizado en la interpolación Kriging Simple realizado para las regiones de Valparaíso y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Pero antes, a los datos de cada ETM, se les realizó la prueba de normalidad dependiendo del número de muestras (n) que presentaba cada uno (prueba de Kolmogorov-Smirnov ($n > 50$) o Shapiro-Wilk ($n < 50$)). Primero fue realizado el test de normalidad para el conjunto de concentraciones, y si estos no cumplían con aquello fue realizado nuevamente la prueba de bondad de ajuste pero para el conjunto de datos transformados con un logaritmo (base 10). Si estos dos casos no tendían a seguir la distribución normal, entonces fue necesario proceder a estandarizar el conjunto de datos por medio de puntuaciones Z mediante el software IBM SPSS versión 23.0.0.0., de lo contrario se utilizó el conjunto de datos original o transformado, dependiendo del caso donde se cumplió la normalidad. A este conjunto de datos se le fue calculado el variograma experimental, y el cual posteriormente

se comparó con los modelos teóricos. El criterio utilizado para adoptar un modelo de variograma que se ajustase lo mejor posible al variograma experimental, fue considerando aquel que tuviera el menor valor de RMSE (desviación de la raíz cuadrada media). Se utilizó el software Vesper versión 1.6, el cual entrega de manera gráfica y estadística los criterios que permiten adoptar el variograma teórico que mejor se ajusta a los datos.

3.10. Análisis geoestadístico de ETM

Los métodos geoestadísticos, son ampliamente utilizados para la interpolación espacial de los metales pesados en los suelos y para la evaluación de sitios contaminados (Da Silva, 2004). Para este estudio se generaron mapas espaciales, los cuales contienen estimaciones de ETM ubicadas geográficamente en cada región. El modelado de las predicciones geoestadísticas se realizó con el software ArcGIS versión 10.2.1. mediante la extensión Geostatistical Analyst. Los principales métodos de interpolación utilizados para la obtención de mapas de predicciones, son el Kriging y la Distancia Inversa Ponderada (IDW). En el método IDW, a diferencia del Kriging, no se requiere conocer la normalidad del conjunto de datos, ya que este no se basa en ninguna suposición sobre la distribución estadística de estos (Zhang, 2006).

En cambio, el método de interpolación Kriging utiliza relaciones estadísticas entre puntos cercanos de la muestra estudiada. Este método realiza un análisis previo a interpolar, el cual consiste en hacer una exploración de los datos con el fin de verificar el comportamiento que sigue el conjunto de estos. Si el conjunto de datos de algún ETM tendía a seguir una distribución normal, al momento de realizar el Kriging en el programa ArcGIS, no se le fue aplicada ninguna transformación a estos. Si este último no fue el caso, entonces los datos debieron ser transformados (Logaritmo o Normal Score) según los resultados obtenidos de la selección de variograma. Para ambos casos el software ArcGIS lo realiza de manera automática, pero para esto es necesario elegir la opción de transformación al momento de realizar la interpolación. Por último, es importante señalar que se utilizó el método Kriging para un conjunto de puntos o datos que contuviesen como mínimo 50 de estos, y en cambio para el caso de un número menor de datos se empleó el método de interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW).

3.11. Evaluación de contaminación por ETM

La evaluación del riesgo ecológico, tiene por objetivo proporcionar información para medir amenazas de contaminación del suelo y que afectaría a los seres humanos y la salud ambiental (Wei & Yang, 2010). Se utilizaron 4 diferentes indicadores para la evaluación de riesgo ecológico de los suelos de cada región, para los diferentes ETM o muestras según corresponda. En ello, el valor de fondo geoquímico de cada ETM que fue utilizado en los cálculos, correspondió al menor valor obtenido de entre los tres métodos estadísticos empleados (ver punto 3.6.). Esto último tiene por objetivo el poder aplicar un criterio de protección de los suelos debido a que un menor valor, en comparación con los otros métodos tabulados, lleva consigo un mayor número de muestras contaminadas. Cabe mencionar, en el Anexo IV se encuentra información adicional del C_{deg} y de IPI , en donde se entrega los valores de estos factores obtenidos en cada muestra.

3.11.1. Índice de Geoacumulación (I_{geo}).

Este índice permite, poder estimar la contaminación comparando entre las concentraciones de metales preindustriales y los niveles recientes en los suelos (Yaylalı-Abanuz, 2011). Se calcula mediante la siguiente expresión.

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5 B_n)$$

Donde C_n es la concentración medida del elemento en la muestra de suelo y el término B_n es el valor de fondo geoquímico del ETM en estudio. El valor constante de 1.5, es incluido para considerar la fluctuación natural en el contenido de una determinada sustancia en el medio ambiente y muy pequeñas influencias antropogénicas (Yaylalı-Abanuz, 2011). Los valores de I_{geo} se clasifican en siete grupos de la siguiente manera.

Grupo de I_{geo}	Grado de Contaminación
$I_{geo} \leq 0$	Prácticamente sin contaminación
$0 < I_{geo} \leq 1$	Sin contaminación a moderadamente contaminado
$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderadamente contaminado
$2 < I_{geo} \leq 3$	De moderado a fuertemente contaminado
$3 < I_{geo} \leq 4$	Fuertemente contaminado
$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente a extremadamente contaminado
$5 \leq I_{geo}$	Extremadamente contaminado

3.11.2. Factor de Contaminación (C_f), Grado de Contaminación (C_{deg}) e Índice Integrado de Contaminación (IPI).

Este factor corresponde a la relación entre la concentración de contaminantes y los valores de concentraciones de referencia preindustrial, esto revela la contaminación de un solo elemento (Yaylali-Abanuz, 2011). Este factor se calcula mediante la siguiente expresión.

$$C_f = C_o/C_n$$

Donde C_o es la concentración medida del elemento en la muestra de suelo y C_n es el valor de fondo del elemento n (Yaylali-Abanuz, 2011). Los valores de C_f se clasifican en cuatro categorías de la siguiente manera.

Categoría de C_f	Grado de Contaminación
$C_f < 1$	Contaminación baja
$1 \leq C_f < 3$	Contaminación moderada
$3 \leq C_f < 6$	Contaminación considerable
$6 \leq C_f$	Contaminación muy alta

El grado de contaminación (C_{deg}) corresponde a la suma de los factores de contaminación C_f de todos los elementos, y entrega el grado de contaminación del entorno investigado (Yaylali-Abanuz, 2011). Este índice es calculado mediante la siguiente expresión.

$$C_{deg} = \sum C_f$$

Los grupos de clasificación de C_{deg} fueron reclasificados según Håkanson (1980), y esto fue tomando en cuenta el número de ETM considerados para cada región, que va entre 5 a 6 elementos (Albanese et al., 2013). Estos se dividen en cuatro grupos de la siguiente manera.

Grupo de C_{deg}	Grado de Contaminación
$C_{deg} < a$	Bajo grado de contaminación
$a \leq C_{deg} < 2a$	Moderado grado de contaminación
$2a \leq C_{deg} < 4a$	Alto grado de contaminación
$4a \leq C_{deg}$	Muy alto grado de contaminación

Donde a equivale al número de ETM considerados para la región en estudio.

El índice integrado de contaminación (*IPI*), es un método utilizado para la determinación de contaminación de metales pesados en muestras individuales del área en estudio. Se define como el promedio de los factores de contaminación C_f calculados para cada muestra (Yaylali-Abanuz, 2011). Estos valores son divididos en cuatro categorías (Wei & Yang, 2010).

Categoría de <i>IPI</i>	Nivel de Contaminación
$IPI \leq 1$	Nivel bajo de contaminación
$1 < IPI \leq 2$	Nivel moderado de contaminación
$2 < IPI \leq 5$	Nivel alto de contaminación
$5 < IPI$	Nivel muy alto de contaminación

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos y la discusión de estos, para los datos utilizados entre las regiones de Valparaíso y del Bío Bío. Los tratamientos estadísticos como análisis exploratorio de datos, univariado, multivariado y geoestadístico, además de los valores de fondo y la evaluación del riesgo potencial ecológico, se presentarán en conjunto para cada región.

4.1. Región de Valparaíso

Se debe tener presente que en la Región de Valparaíso, se consideraron los elementos As, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn. Debido a que, como se dijo anteriormente, no se consideraron para el estudio de esta región los elementos que contuvieran un porcentaje mayor o igual al 20% de muestras con concentraciones inferiores al límite de detección de estos.

4.1.1. Análisis exploratorio de datos de la Región de Valparaíso.

A continuación, se presentará el correspondiente análisis exploratorio de datos de la Región de Valparaíso para cada ETM y propiedad edáfica utilizado en este estudio.

En el histograma del arsénico en la **Figura 9**, se puede observar que esta es una distribución de tipo bimodal. Por otro lado, en el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que no tiende a la forma de S típica de la distribución Normal, es más existe un cambio o leve quiebre de la curva a partir de los 20 mgkg⁻¹. Para terminar, se puede observar que en el box plot existe una leve inclinación hacia el bigote superior, es decir, los datos están levemente sesgado hacia la izquierda. Por lo anterior, se puede concluir que los datos de este elemento no siguen una distribución normal.

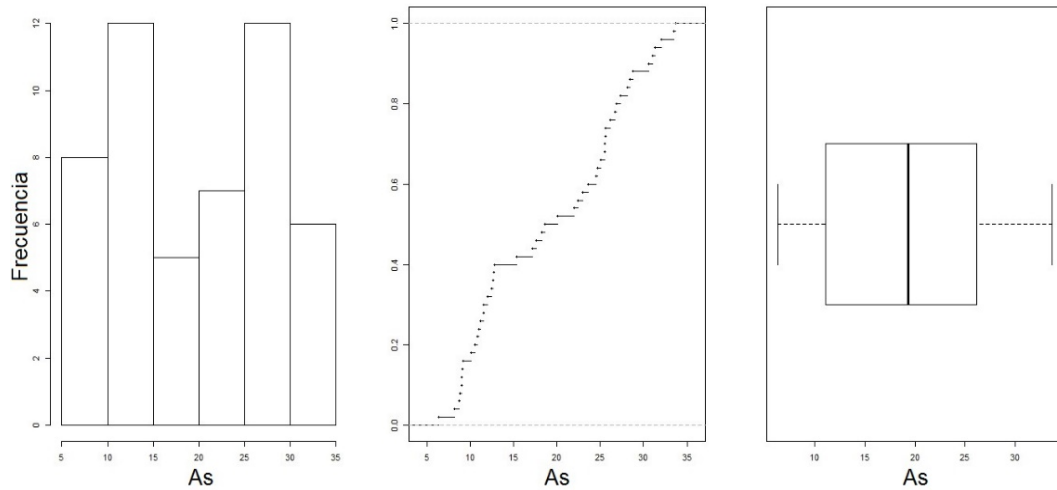


Figura 9. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 10**, la distribución de los datos de Cd es asimétrica con un sesgo positivo, con la cola en dirección hacia la derecha. Por otro lado, en el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que tiende a ser una curva, pero no con la asimetría necesaria para establecer su tendencia a distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existen varios valores atípicos por encima del bigote superior. De lo anterior, se puede inferir que los datos de este elemento no presentan la forma requerida para que estos sigan una distribución normal.

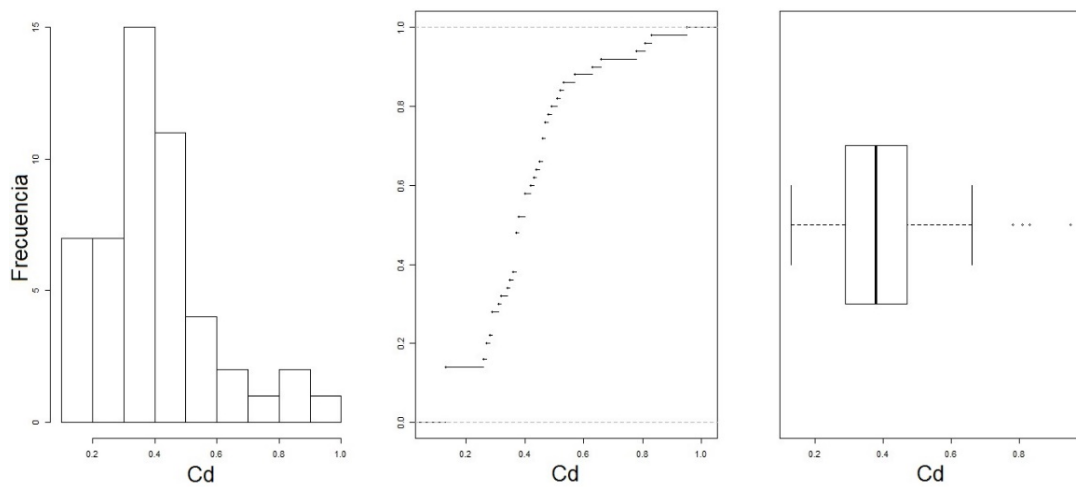


Figura 10. Representaciones gráficas del AED del elemento Cd, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 11**, se puede observar que la distribución del elemento Cu tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, lo que se puede inferir que la media es mayor a la mediana. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que tiende a ser una curva muy marcada, por esto, no cumple con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, en el box plot es posible apreciar la presencia de dos valores mayores al bigote superior de los datos, esto ocurre en las muestras AcC 21 y AC 07, en esta última con una concentración de Cu de $1,983 \text{ mgkg}^{-1}$. De los tres gráficos analizados anteriormente, se pudo llegar a concluir que los datos del elemento cobre de esta región no siguen la distribución normal.

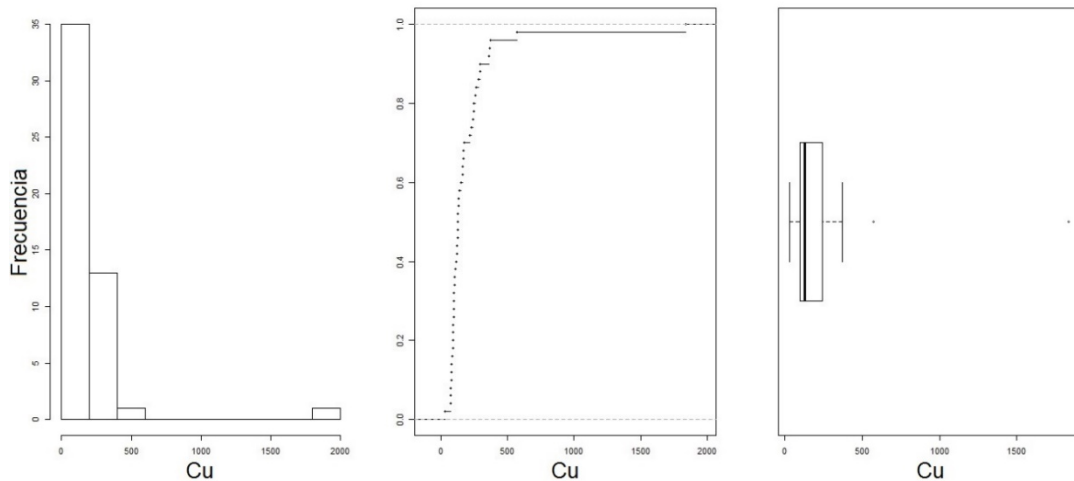


Figura 11. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el primer gráfico de la **Figura 12**, se puede observar un sesgo positivo del conjunto de datos del níquel, pudiéndose inferir que la media es mayor a la mediana de estos pero esto debido a la presencia de un valor atípico que provoca esto. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este elemento tiende a comportarse como una distribución normal. Para terminar, en el box plot es posible distinguir la presencia de un valor atípico, esto ocurre en la muestra ACN 33 con una concentración de Ni de 28.2 mgkg^{-1} . De todo este análisis se puede concluir que los datos de este elemento siguen la distribución normal.

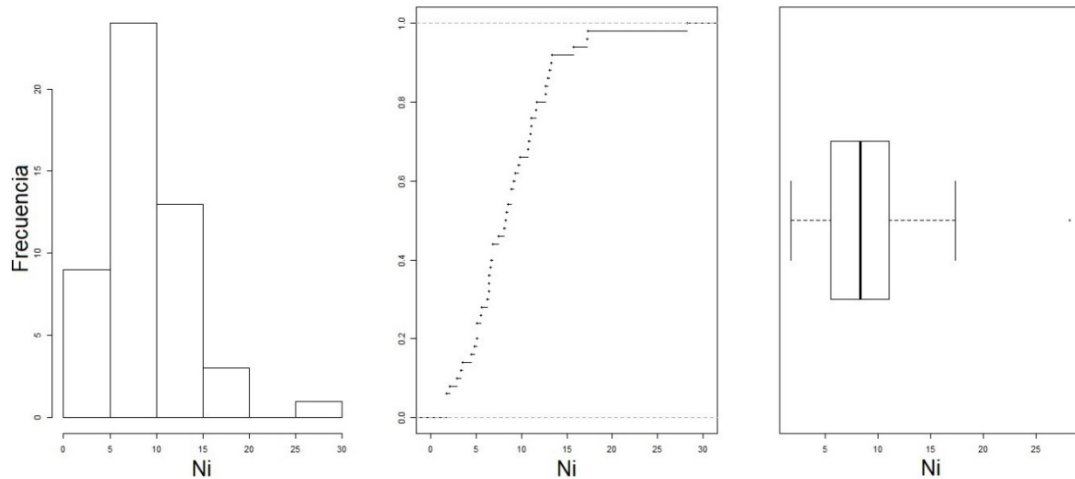


Figura 12. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg⁻¹).

En el histograma de la **Figura 13**, la distribución del elemento Pb tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, pero esto es debido a la presencia de un valor extremadamente superior a la media, el cual produce que se forme este sesgo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que no tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel, se puede apreciar que existe una muestra que supera ostensiblemente a los demás datos. Tal situación ocurre en la muestra ACN 33, con una concentración de Pb de 74.4 mgkg⁻¹. Finalmente, por todo lo anterior, se puede aseverar que este elemento no tiende a comportarse como la distribución normal.

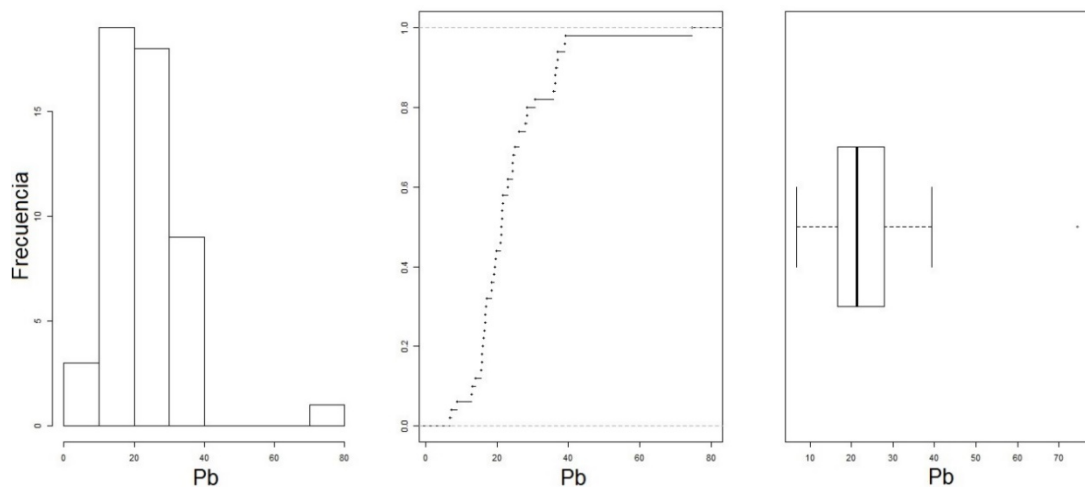


Figura 13. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg⁻¹).

En el histograma del Zn en la **Figura 14**, se puede apreciar que la distribución de este elemento no tiende a seguir una distribución normal, por el contrario, presenta sesgo positivo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que presenta algunas irregularidades en la curva, pero esta tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. Sin embargo, no es suficiente para asegurar que este elemento sigue una distribución normal. En el tercer gráfico del panel se puede apreciar que existe una muestra que supera ostensiblemente a los demás datos. Tal situación ocurre en la muestra ACN 33, con una concentración de Zn de 399 mgkg^{-1} . Por lo tanto, por todo lo dicho anteriormente es posible concluir que este elemento no tiende a seguir una distribución normal.

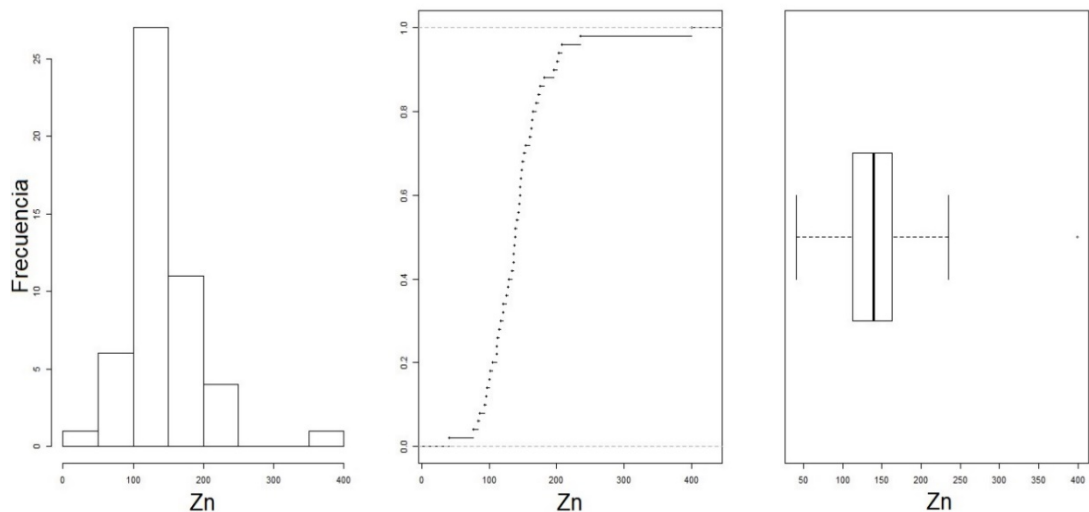


Figura 14. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En la **Figura 15**, se presentan los gráficos utilizados para el análisis exploratorio de datos del parámetro pH presente en la Región de Valparaíso. En el histograma de la figura, se puede observar que existe un par de muestras con valores de pH muy inferiores al conjunto de datos. Este par de datos hace que se vean dos conjuntos de barras separados. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que no tiende a la forma de S típica de la distribución normal. Continuando con el tercer gráfico del panel, se pueden distinguir dos muestras que están bajo el bigote inferior y una por encima del bigote superior. Por lo dicho anteriormente, es posible inferir que los datos de este parámetro no siguen una distribución normal.

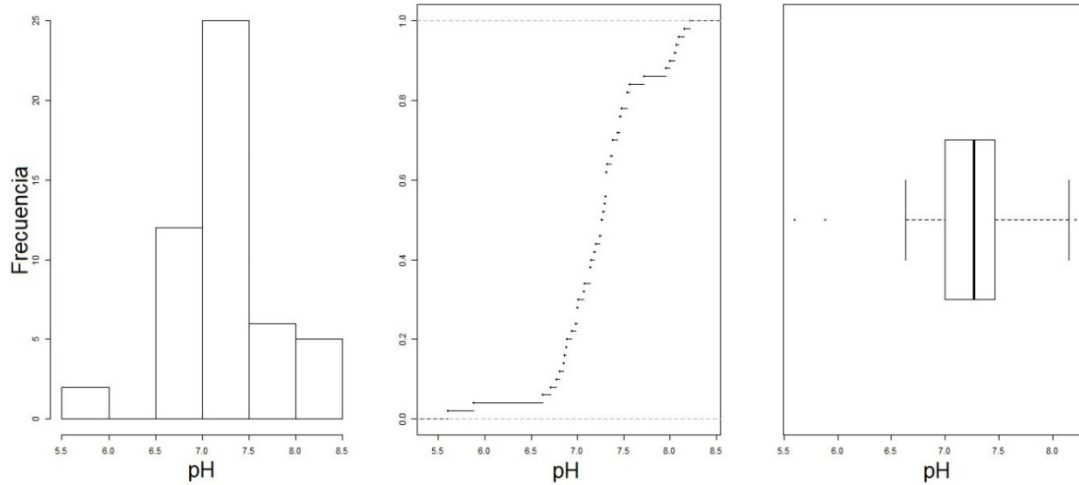


Figura 15. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.

En el histograma de la **Figura 16**, se puede observar que la distribución de los datos del CE es asimétrica con un sesgo positivo, por lo que se puede inferir que la media es superior a la mediana de los datos. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta no tiene la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existe un valor atípico por encima del bigote superior. De lo anterior, se puede inferir que los datos de este parámetro no presentan la forma requerida para que estos sigan una distribución normal.

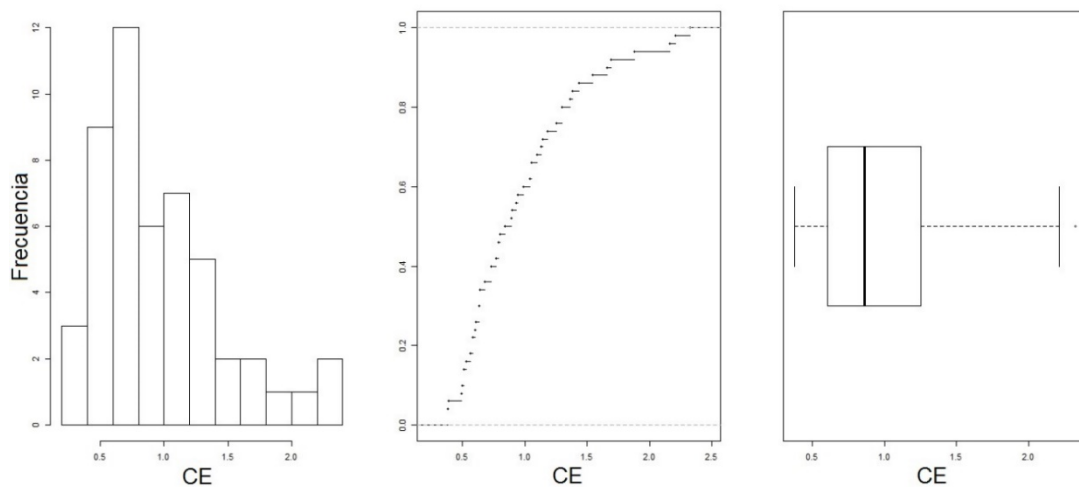


Figura 16. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida $mS\ gr^{-1}$.

En el histograma de la **Figura 17**, se puede observar que la distribución del parámetro MO tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, con lo cual se puede inferir que la mediana es menor a la media. En el segundo gráfico del panel se puede apreciar que los datos cumplen con la asimetría necesaria con forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existe la presencia un valor que está por encima del bigote superior, tal caso ocurre en la muestra AcC 29, con un valor de 6.1 % bs. De los tres gráficos analizados anteriormente, se puede llegar a concluir que los datos del parámetro materia orgánica de esta región siguen la distribución normal.

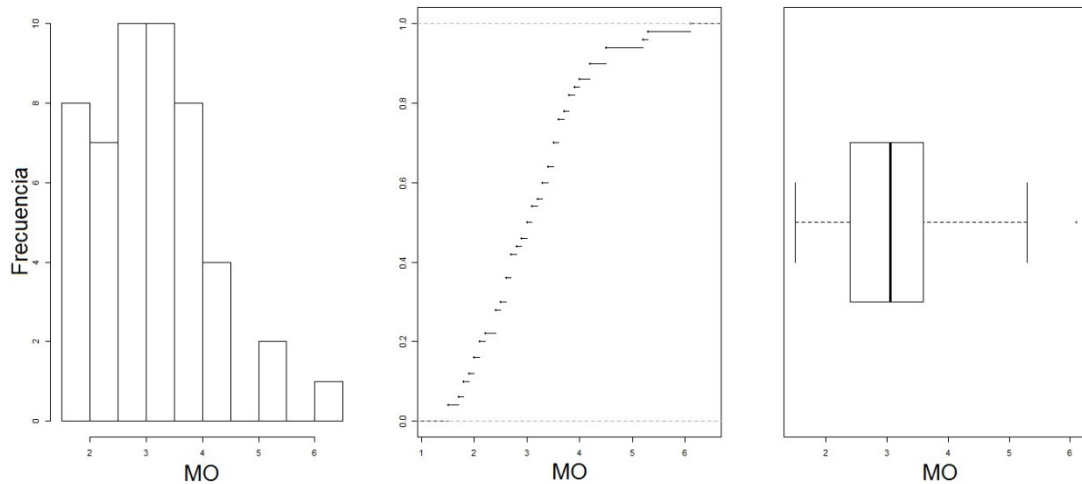


Figura 17. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.

En el primer gráfico de la **Figura 18**, es posible apreciar que el histograma de los datos del parámetro capacidad de intercambio catiónico tiende a seguir una distribución normal, pero esta es más puntiaguda. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este parámetro en algún grado tiende a tener la forma de S típica, pero no lo suficiente para poder inferir que esta se comporta como una distribución normal. Para terminar, en el box plot es posible distinguir la presencia de cuatro valores atípicos. De todo el análisis descrito anteriormente, se puede concluir que este parámetro no sigue la distribución normal.

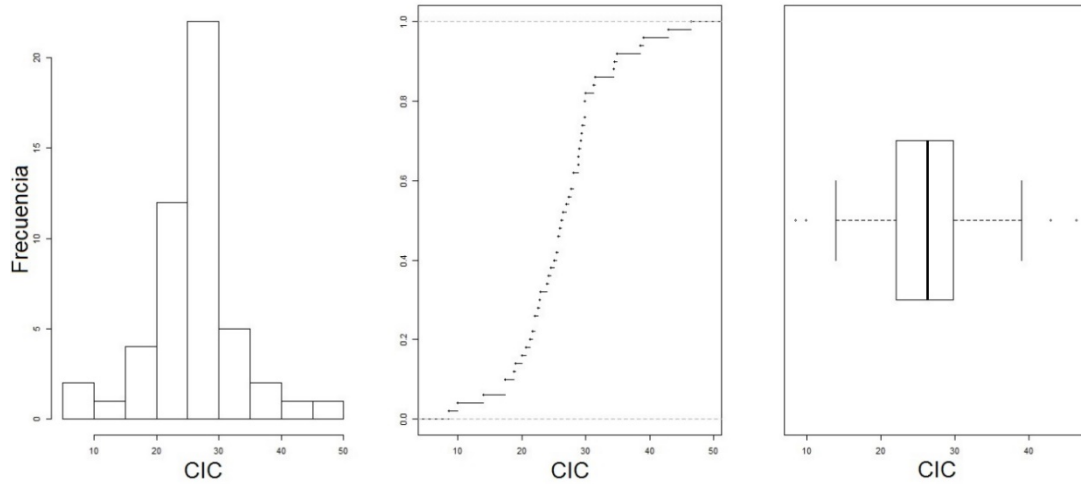


Figura 18. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$.

En la **Figura 19**, se puede ver que la distribución del parámetro porcentaje de arena tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, pero esto es debido a la presencia de un valor extremadamente superior a la media, el cual produce que se forme este sesgo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta curva no tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel se puede apreciar que existe una muestra que supera ostensiblemente a los demás datos. Tal situación ocurre en la muestra PUC 44, con un porcentaje de arena del 84.3%. Finalmente, por todo lo anterior se puede aseverar que este parámetro no tiende a comportarse como la distribución normal.

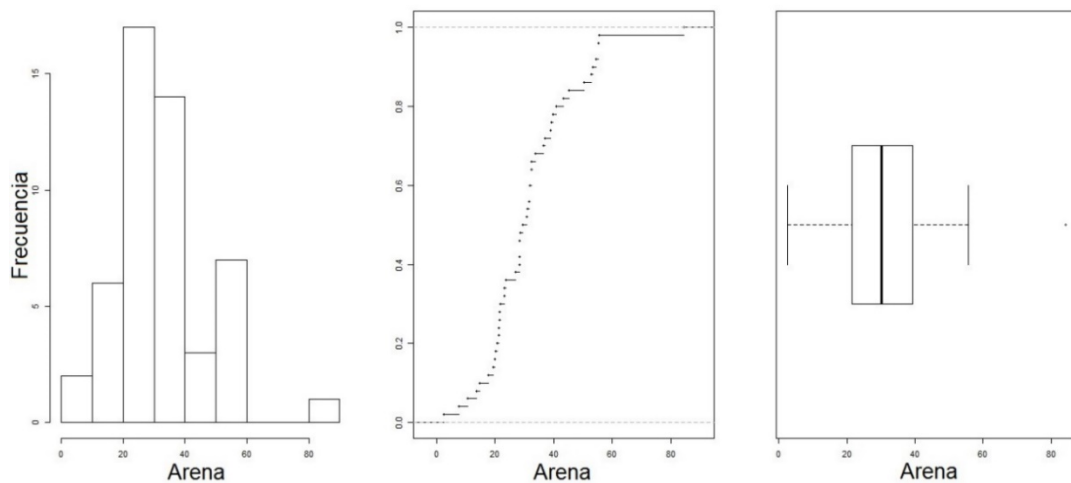


Figura 19. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).

En la **Figura 20**, se presentan los gráficos utilizados para el AED del porcentaje de limo de las muestras extraídas en la Región de Valparaíso. En el histograma del panel, se puede apreciar que la distribución de este parámetro presenta sesgo negativo con la cola en dirección hacia la izquierda. En el gráfico de frecuencia acumulada del panel se puede apreciar que el diagrama de los datos tiene una curva parecida a la forma típica de S de la distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar la existencia de dos datos atípicos que están por debajo del bigote inferior, además se puede apreciar simetría en el gráfico. Por lo anterior, se puede concluir que el parámetro porcentaje de limo determinado de las muestras recolectadas en esta región sigue una distribución normal.

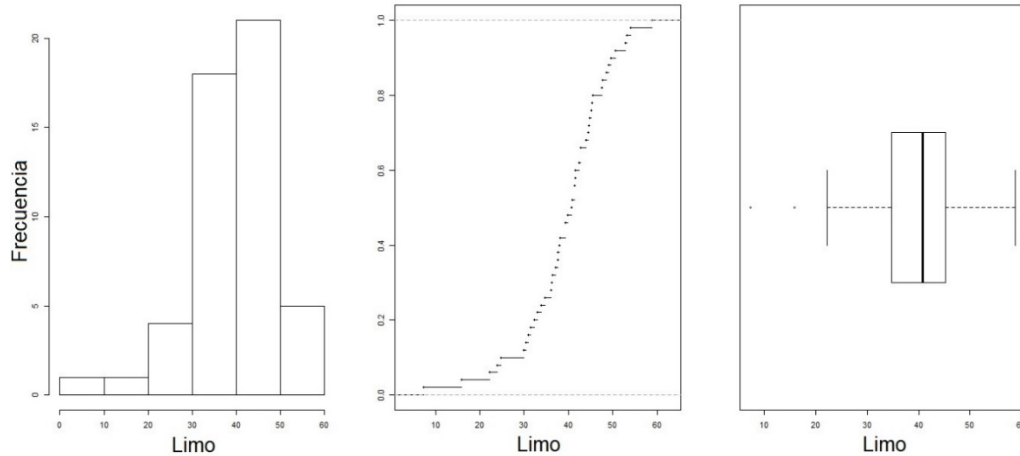


Figura 20. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).

En el primer gráfico de la **Figura 21**, se puede apreciar que la distribución del parámetro porcentaje de arcilla presenta un leve sesgo negativo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que presenta algunas irregularidades en la curva pero esta tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. Por último, en el tercer gráfico del panel donde se muestra el box plot, se puede apreciar que existen dos muestras que están por debajo del bigote inferior y una por encima del bigote superior. Además, el box plot tiene cierta simetría con la correspondiente a la distribución normal. Por lo tanto, por todo lo dicho anteriormente, es posible concluir que este parámetro tiende a seguir una distribución normal.

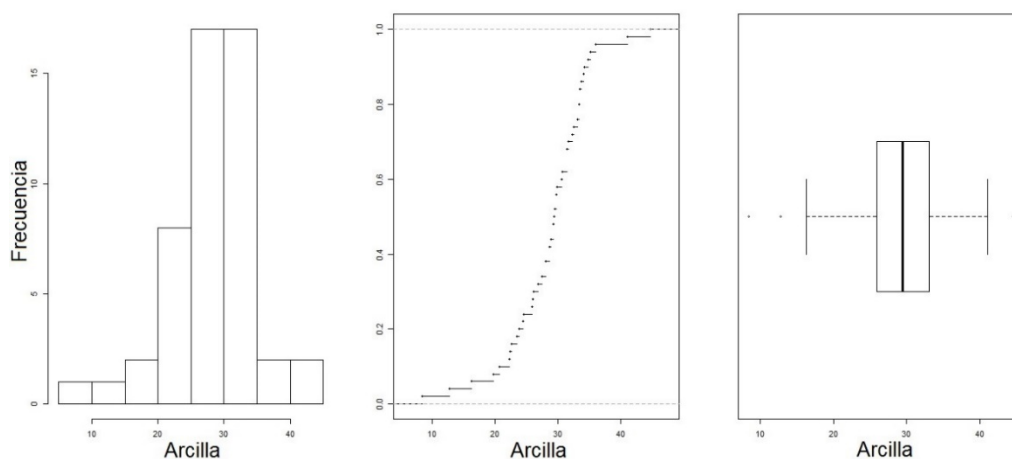


Figura 21. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).

4.1.2. Análisis univariado de la Región de Valparaíso.

Para realizar el análisis univariado de la Región de Valparaíso, se trataron por separado a las variables que representan propiedades de los suelos y por otro lado, a las concentraciones totales de ETM determinados para este estudio.

4.1.2.1. Propiedades de los suelos.

En la **Tabla 9**, se presentan los estadísticos descriptivos de los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de arena, limo y arcilla, determinados de las muestras de suelo recolectados en la Región de Valparaíso. Considerando los porcentajes de tamaño de partículas, se puede apreciar que existe predominio absoluto de la fracción de limo. También es posible notar que tanto la arena como la arcilla, poseen porcentajes promedio muy cercanos entre sí, además estos poseen coeficientes de variación menores a 1, con lo cual se pudo inferir que estos tienen una distribución homogénea. Según la clasificación propuesta por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, USDA (Soil Survey Division Staff, 1993), los suelos en estudio eran generalmente de textura franco arcillosa o franca. Profundizando en esto, el 70% de los suelos fueron de texturas moderadamente finas y un 20% de textura media.

Por otro lado, con respecto a los valores de pH medidos, estos se pueden clasificar en diferentes categorías dependiendo de su valor (Soil Survey Division Staff, 1993). A continuación, los porcentajes de muestras en cada una de las categorías se presentan de la siguiente manera: 4% de las muestras corresponden a moderadamente ácido (pH entre 5.6 y 6.0), 66% a neutro (pH entre 6.6 y 7.3), 16% a ligeramente alcalino (pH entre 7.4 y 7.8) y 14% moderadamente alcalina (pH entre 7.9 y 8.4). De los estadísticos se pudo destacar la cercanía entre los valores de la media y la mediana, además de una baja dispersión y muy bajo valor de CV, cercano a 0, con lo cual fue posible inferir la homogeneidad del conjunto de datos de pH.

Analizando el parámetro de conductividad eléctrica, a partir de la mediana y SD se pudo deducir que una gran cantidad de muestras presentan valores de CE menores a 2 mSgr^{-1} , con lo que fue posible concluir que en las muestras predominan los suelos no salinos, de acuerdo con la clasificación propuesta por el USDA (Soil Survey Division Staff, 1993). Profundizando en este punto, el 96% de los datos correspondían a muestras no salinas y solo un 4% de estas pertenecían a la clase muy ligeramente salina (valores de CE entre 2 y 4 mS gr^{-1}). Por esto, ninguna muestra fue superior al valor de 4 mSgr^{-1} , con lo que se pudo aseverar que estas no reflejaban problemas de salinidad en el suelo, según los criterios del USDA, y que este pudo estar originado por un exceso de sales en las aguas de riego o por problemas de drenaje que, indirectamente, producen acumulaciones salinas en la superficie o en diferentes profundidades del suelo (Ruiz, 1984).

Del total de datos del parámetro MO, para cada una de las categorías de clasificación según el tipo orden de taxonomía de suelos, se tiene que un 80% de las muestras tuvieron muy bajo contenido de MO y un 12% correspondió a bajo contenido de esta. Estos bajos contenidos de MO son consecuencia de un uso intensivo de los suelos en estudio. Por lo tanto, en esta región existe un porcentaje muy alto de muestras con problemas de materia orgánica.

De la tabla se puede apreciar que la mediana y la media poseen valores muy cercanos, con esto se pudo deducir que un poco más del 50% de las muestras superan los $25 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, por lo tanto fue posible asegurar que este porcentaje de muestras poseen alta

fertilidad. Por último, mediante el parámetro capacidad de intercambio catiónico fue posible determinar la clase de fertilidad de los suelos (Fernández et al., 2006). Mediante esto se pudo aseverar que un 58% de las muestras tienen una alta fertilidad y un 32% correspondieron a la clase fertilidad media. Además, es importante mencionar que un 4% de las muestras presentaron una baja capacidad de almacenamiento de nutrientes ($\text{CIC} < 10 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$) (Fernández et al., 2006).

Tabla 9. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región de Valparaíso.

Estadísticos Descriptivos	pH	CE (mS gr ⁻¹)	MO (% bs)	CIC (Cmol (+) kg ⁻¹)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Media	7.2	0.98	3.1	26.4	31.9	39.4	28.7
SD ^a	0.50	0.49	1.0	7.3	14.9	9.7	6.4
Mediana	7.3	0.87	3.1	26.3	30.2	40.9	29.5
Mínimo	5.6	0.38	1.5	8.5	2.5	7.3	8.4
Máximo	8.2	2.3	6.1	46.4	84.3	58.8	44.6
Rango	2.6	1.9	4.6	37.9	81.8	51.5	36.2
CV (%) ^b	6.9	49.4	32.3	27.5	46.8	24.6	22.3

^a Desviación Estándar

^b Coeficiente de Variación

4.1.2.2. Concentraciones totales de ETM.

Como se puede apreciar en la **Tabla 10**, el número de muestras es de 50 para la Región de Valparaíso. En esta también es posible observar las altas concentraciones en promedio que presentan los elementos Cu y Zn (200 y 143 mgkg⁻¹, respectivamente) con respecto a los otros elementos en estudio. Además, se puede ver la gran desviación de las concentraciones del elemento Cu y en menor medida para el elemento Zn (257 y 52.3 mgkg⁻¹, respectivamente), con respecto a estos dos elementos fue posible concluir que existe una enorme dispersión de las concentraciones de Cu y, en menor medida, de Zn sobre la media de las muestras extraídas. Una posible explicación para esta variabilidad estaría asociada a actividades industriales en algunas sub-áreas o derechamente producto de puntos notoriamente contaminados. Los elementos restantes presentan baja variabilidad de las

concentraciones, no sobrepasando los 11 mgkg^{-1} , lo que indicaría la cercanía de los datos con su media.

Mediante el coeficiente de asimetría o sesgo es posible identificar si los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor de la media. Para este estudio todos los elementos presentaron un valor positivo de este, es decir, todos los elementos están positivamente sesgados. Para el elemento As se tiene un valor muy cercano a 0, lo cual nos indica que para este elemento los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor de la media, es decir, la curva es relativamente simétrica. Además, es importante señalar que los elementos Cu, Ni, Pb y Zn presentaron valores de coeficiente de asimetría mayores a 1, infiriéndose que estos se encuentran fuertemente sesgados. El valor de asimetría más alto de todos, ocurre en el elemento cobre, con un coeficiente de asimetría de 5.5. Con respecto a esto se puede señalar que existen una o más muestras notoriamente contaminadas con Cu, con valores muy superiores al conjunto de datos. Coeficientes de asimetría o sesgo no tan altos son comunes para los metales pesados, debido a que por lo general tienen bajas concentraciones en el ambiente, por lo que la presencia de una fuente puntual de contaminación puede causar un fuerte aumento de la concentración local y por esto presentar un valor alto de sesgo, de esto se puede inferir que en esta región tal situación ocurre en las concentraciones de cobre. Asimismo, considerando la medida de curtosis se puede indicar que todos los elementos, excepto el As, tienen una distribución más apuntada que la distribución normal, es decir, una gran cantidad de los datos están concentrados en la parte central de la distribución. Esto no ocurrió con el elemento As, ya que presentó una curtosis negativa, indicándonos que los datos tienen una distribución más achatada que la normal.

Por otro lado, de la **Tabla 10** se puede observar que el coeficiente de variación (CV) de todos los elementos, excepto el Cu, tienen un valor menor a 1 con lo cual fue posible concluir la homogeneidad de sus datos. Para el caso del Cu donde el coeficiente de variación es de 1.3, como este se encuentra entre 1 y 1.5, esto indicó que no es posible asegurar que los datos son homogéneos.

Tabla 10. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg^{-1}) de las variables As, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, obtenidos de las muestras de la Región de Valparaíso.

Estadísticos Descriptivos	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Número de Muestras	50	50	50	50	50	50
Media	19.3	0.40	200	8.7	23.5	143
SD ^a	8.4	0.19	257	4.8	11.0	52.3
Mediana	19.3	0.38	129	8.3	21.3	139
MAD ^b	7.7	0.09	40.4	2.8	4.9	24.7
Sesgo	0.07	0.78	5.5	1.4	2.1	2.4
Curtosis	-1.5	1.1	34.4	4.1	8.1	11.1
Rango	27.3	0.82	1,802	26.4	67.6	359
Mínimo	6.3	0.13	31.3	1.8	6.8	40.6
Máximo	33.6	0.95	1,833	28.2	74.4	399
CV (%) ^c	43.2	45.8	128	55.3	46.9	36.5
	5	8.5	0.13	73.1	1.8	8.1
	25	11.1	0.29	97.1	5.4	16.6
Percentiles	50	19.3	0.38	129	8.3	21.3
	75	26.3	0.47	243	11.2	28.0
	95	32.7	0.82	463	17.3	39.1

^a Desviación Estándar

^b Desviación Absoluta de la Mediana

^c Coeficiente de Variación

También es importante señalar que para los elementos Cu y Zn existe un gran rango de concentraciones ($1,802$ y 359 mgkg^{-1} , respectivamente), mientras que para el Cd se tiene un rango de concentración menor a 0.82 mgkg^{-1} . Para el caso de los primeros, estos rangos reflejan contaminación en algunos de los suelos muestreados. Con respecto a las muestras que presentaron concentraciones de ETM inferiores a LD, se sabe que los elementos Cd y Ni presentaron porcentajes del 14 y 6%, respectivamente, del total de muestras que no superaron tal límite. En cambio el selenio tuvo un 54% de datos, por lo que este elemento fue descartado para todos los análisis hechos en esta región.

Por lo anterior, se puede concluir que para la Región de Valparaíso ninguno de los ETM y parámetros seleccionados para este estudio, excepto el Ni, MO, limo y arcilla, sigue una distribución normal.

4.1.3. Análisis multivariado de la Región de Valparaíso.

Con el fin de entender el comportamiento de los ETM con los parámetros considerados y las relaciones entre elementos, se realizó el siguiente tratamiento multivariado a los datos determinados de las muestras recolectadas de la Región de Valparaíso. Para esto se efectuaron los análisis de correlación de Spearman entre ETM, correlación de Spearman entre ETM y parámetros, análisis de componentes principales (ACP) y análisis Cluster.

4.1.3.1. Correlación de Spearman entre ETM de la Región de Valparaíso.

Para poder ver las relaciones que pueden existir entre los ETM considerados en este estudio, se realizó el respectivo análisis de correlación de Spearman. Las medidas de correlación de este análisis se obtuvieron mediante el software IBM SPSS. En la **Tabla 11**, se presentan los coeficientes de correlación de Spearman entre ETM de esta región.

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn de la Región de Valparaíso.

	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1.0					
Cd	0.01	1.0				
Cu	0.13	0.45**	1.0			
Ni	0.52**	0.04	0.36*	1.0		
Pb	0.25	0.62**	0.39**	0.14	1.0	
Zn	-0.14	0.53**	0.45**	0.19	0.53**	1.0

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 12**, se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos. Con respecto a esta, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre los elementos Cd y Pb, lo que mostraría una correlación moderadamente alta entre estos ETM y esta correlación podría ser evidencia de un origen similar de estos ETM. También se observaron correlaciones moderadas, pero más débiles entre Zn/Pb, Zn/Cd, Ni/As, Zn/Cu y Cu/Cd, posiblemente indicando la adición de estos ETM de diferentes fuentes. Estas correlaciones

significativamente positivas entre los ETM sugieren una fuente en común (Al-Khashman & Shawabkeh, 2006). Sin embargo, las correlaciones significativas no siempre representan que sea una fuente en común (Hani & Pazira, 2011). Esto implica que el análisis de correlación por sí solo no es suficiente para poder identificar una posible fuente de contaminación de metales pesados, sino que debe ser llevado a cabo junto con otras herramientas de análisis. Por otro lado, es posible notar que las relaciones Zn/Ni, Zn/As y Pb/Ni, presentaron escasas correlaciones entre estos con medidas de correlación menores a 0.20.

Tabla 12. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región de Valparaíso.

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Pb/Cd	0.62**
2	Zn/Pb	0.53**
3	Zn/Cd	0.53**
4	Ni/As	0.52**
5	Zn/Cu	0.45**
6	Cu/Cd	0.45**
7	Pb/Cu	0.39**
8	Ni/Cu	0.36*
9	Pb/As	0.25
10	Zn/Ni	0.19
11	Zn/As	-0.14
12	Pb/Ni	0.14
13	Cu/As	0.13
14	Ni/Cd	0.04
15	Cd/As	0.01

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Asimismo, las relaciones entre Ni/Cd y Cd/As presentaron valores bastante bajos, permitiendo inferir que la correlación entre estos elementos es casi nula. Es importante mencionar que la correlación típica y ampliamente conocida es la que presentan los elementos Zn y Cd, para esta región se presenta de manera moderada, esto sugiere un origen común entre estos ETM procedente de la aplicación de fertilizantes fosfatados donde

ambos elementos suelen ser parte como impurezas (Adriano, 2001). También es necesario destacar, el Pb presentó una escasa correlación con elementos que mayoritariamente tienen origen geogénico como es el caso del Ni, por el contrario presentó una correlación moderada a fuerte con elementos que principalmente provienen de actividades antropogénicas como lo son el Cu y Cd. Así mismo, se puede apreciar que el Cu tiene correlaciones moderadas con Cd, Pb y Zn, debido a su posible procedencia de fuentes antropogénicas. Por último, existe una correlación casi nula entre el Cd, Cu y Zn, de posible origen antropogénico, y el elemento As, revelando un posible origen natural de este elemento u origen antrópico pero de fuentes totalmente diferentes a los demás ETM.

4.1.3.2. Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.

El análisis de correlación de Spearman permite ver las relaciones que pueden existir entre los ETM y parámetros de propiedades del suelo. Los coeficientes de correlación de Spearman entre ETM y parámetros edáficos de esta región son entregados en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.

	pH	CE	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
As	-0.02	-0.27	0.03	-0.01	-0.34	0.34*	0.27
Cd	-0.03	0.09	0.37**	-0.12	-0.15	0.18	0.10
Cu	-0.13	-0.06	0.40**	-0.04	-0.14	0.21	0.00
Ni	-0.03	-0.26	0.06	0.24	-0.34	0.37**	0.30*
Pb	-0.15	0.07	0.35*	-0.26	-0.22	0.28	0.21
Zn	-0.05	0.35*	0.30*	0.01	-0.15	0.18	0.16

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 14** y **Tabla 15** se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos.

Tabla 14. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Cu/MO	0.40**
2	Ni/Limo	0.37**
3	Cd/MO	0.37**
4	Zn/CE	0.35*
5	Pb/MO	0.35*
6	Ni/Arena	-0.34
7	As/Arena	-0.34
8	As/Limo	0.34*
9	Zn/MO	0.30*
10	Ni/Arcilla	0.30*
11	Pb/Limo	0.28
12	As/CE	-0.27
13	As/Arcilla	0.27
14	Pb/CIC	-0.26
15	Ni/CE	-0.26
16	Ni/CIC	0.24
17	Pb/Arena	-0.22
18	Pb/Arcilla	0.21
19	Cu/Limo	0.21
20	Zn/Limo	0.18
21	Cd/Limo	0.18
22	Zn/Arcilla	0.16
23	Pb/pH	-0.15
24	Cd/Arena	-0.15
25	Zn/Arena	-0.15
26	Cu/Arena	-0.14
27	Cu/pH	-0.13
28	Cd/CIC	-0.12
29	Cd/Arcilla	0.10
30	Cd/CE	0.09
31	Pb/CE	0.07
32	Cu/CE	-0.06
33	Ni/MO	0.06

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Tabla 15. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región de Valparaíso. (Continuación)

Posición	Combinación	Coefficiente
34	Zn/pH	-0.05
35	Cu/CIC	-0.04
36	As/MO	0.03
37	Ni/pH	-0.03
38	Cd/pH	-0.03
39	As/pH	-0.02
40	As/CIC	-0.01
41	Zn/CIC	0.01
42	Cu/Arcilla	0.00

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

En las tablas, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre el elemento Cu y el parámetro MO, lo que mostraría una correlación significativamente positiva entre estos. Existen correlaciones significativamente positivas entre el contenido de la mayoría de ETM y MO del suelo o porcentaje de limo. También fue posible observar que las concentraciones de As, Ni, Pb y el contenido de arcilla muestran una correlación positiva pero débil. Todas estas correlaciones significativamente positivas entre ETM y parámetros, mencionadas anteriormente, pueden indicar que estos últimos tienen influencia sustancial en el contenido total de estos metales en los suelos. Se encontraron correlaciones relativamente débiles o casi nulas entre los parámetros porcentaje de arena, CE, pH y CIC, y los ETM. La falta de una correlación significativa entre las propiedades del suelo y los metales pesados se puede atribuir a una entrada continua de metales pesados o la presencia de varias fuentes de contaminación (Chen et al., 2008), ya que la liberación y transporte de metales pesados corresponden a procesos complejos (Grant & Sheppard, 2008). Otra posible explicación es que puede haber variaciones en el tipo de suelo, el uso de fertilizantes y el sistema de cultivo dentro del área de muestreo (Grant & Sheppard, 2008).

4.1.3.3. Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.

Mediante el análisis de componentes principales (ACP) se lograron revelar las relaciones entre los ETM y parámetros en suelos superficiales, lo que permitió identificar posibles fuentes de contaminación de estos elementos en la Región de Valparaíso. En la **Tabla 16**, se presentan los resultados de los factores de carga y varianza explicada del ACP con rotación varimax para la región en estudio.

En la **Tabla 16**, se puede apreciar que se extrajeron 5 componentes principales que explican el 80.7% de la varianza total de los datos, aplicando el criterio Kaiser para la selección del número de factores o componentes. Esto último se puede apreciar en la **Tabla 67** del Anexo II. En la **Figura 22**, se presenta una representación gráfica de los patrones de componentes de los ETM y parámetros en estudio para esta región.

El primer componente (CP1) explica un 29.6% de la varianza total. Este factor lo componen los parámetros arena, limo y arcilla, con factores de carga iguales a -0.95, 0.88 y 0.90, respectivamente. El parámetro de porcentaje de arena posee un factor de carga negativo, el cual contrapone el peso de las demás variables.

La segunda componente (CP2) explica un 18.7% de la varianza total. Donde los mayores coeficientes de carga son aportados por los metales pesados Cd, Pb y Zn, con factores de carga iguales a 0.64, 0.89 y 0.89, respectivamente. Por varios estudios, los elementos Cd y Pb están asociados con fuentes antropogénicas, probablemente como resultado del uso de fertilizantes de fosfato y abonos orgánicos (Hani & Pazira, 2011). Los fertilizantes de fosfato pueden ser un importante contribuyente de estos elementos en las tierras de cultivo (Chen et al., 2008). Además, estos 3 elementos están moderadamente correlacionados, con coeficiente de correlación entre 0.53 y 0.62. Por otro lado, existe un porcentaje relativamente significativo de muestras que superan al valor de fondo para esta región, en promedio un 15% del total de muestras. Este factor se podría asociar a origen antropogénico, pero de diferente fuente a los otros factores, debido a su débil carga con los otros factores, a excepción del cadmio que presenta una carga importante (mayor a 0.5) en

la CP4. Esto último indicaría que el elemento Cd estaría recibiendo aportes antrópicos de dos fuentes distintas.

Tabla 16. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parametros de la Región de Valparaíso.

ETM y Parámetros	Componentes Principales				
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
As	0.20	0.10	0.75	-0.02	0.04
Cd	-0.04	0.64	-0.02	0.62	0.01
Cu	0.02	0.02	0.19	0.91	0.02
Ni	0.19	0.50	0.68	0.01	0.12
Pb	0.10	0.89	0.14	0.03	-0.24
Zn	0.06	0.89	-0.09	0.08	0.13
pH	0.03	0.03	-0.06	-0.07	0.91
CE	-0.04	0.28	-0.70	-0.17	0.15
MO	0.54	0.20	-0.26	0.56	-0.24
CIC	0.47	-0.09	0.07	0.07	0.70
Arena	-0.95	-0.06	-0.18	-0.03	-0.12
Limo	0.88	0.02	0.21	0.01	0.03
Arcilla	0.90	0.11	0.10	0.04	0.22
Porcentaje Varianza Explicada (%)	29.6	18.7	12.0	10.7	8.6
Porcentaje Varianza Explicada Acumulada (%)	29.6	48.3	60.3	70.9	79.6

La tercera componente (CP3) explica un 12.0% de la varianza total. Este factor lo componen los elementos As, Ni y el parámetro CE, con factores de carga iguales a 0.75, 0.68 y -0.70, respectivamente. Los elementos que componen este factor podrían ser asociados a un origen geogénico. Una posible explicación es que el elemento Ni presentó un pequeño porcentaje de muestras que contienen concentraciones mayores al valor de fondo, aproximadamente un 8% del total de muestras. Por último, estos 2 elementos tuvieron una correlación moderada entre ellos y correlación casi nula con elementos que principalmente provienen de actividades humanas, pero ocurre algo importante con relación a que el Ni presenta una carga importante en la segunda componente, sugiriendo que fueron

afectados por las actividades humanas, además del contenido natural. A pesar de esto, esta componente recibiría aportes predominantemente de fuentes geogénicas.

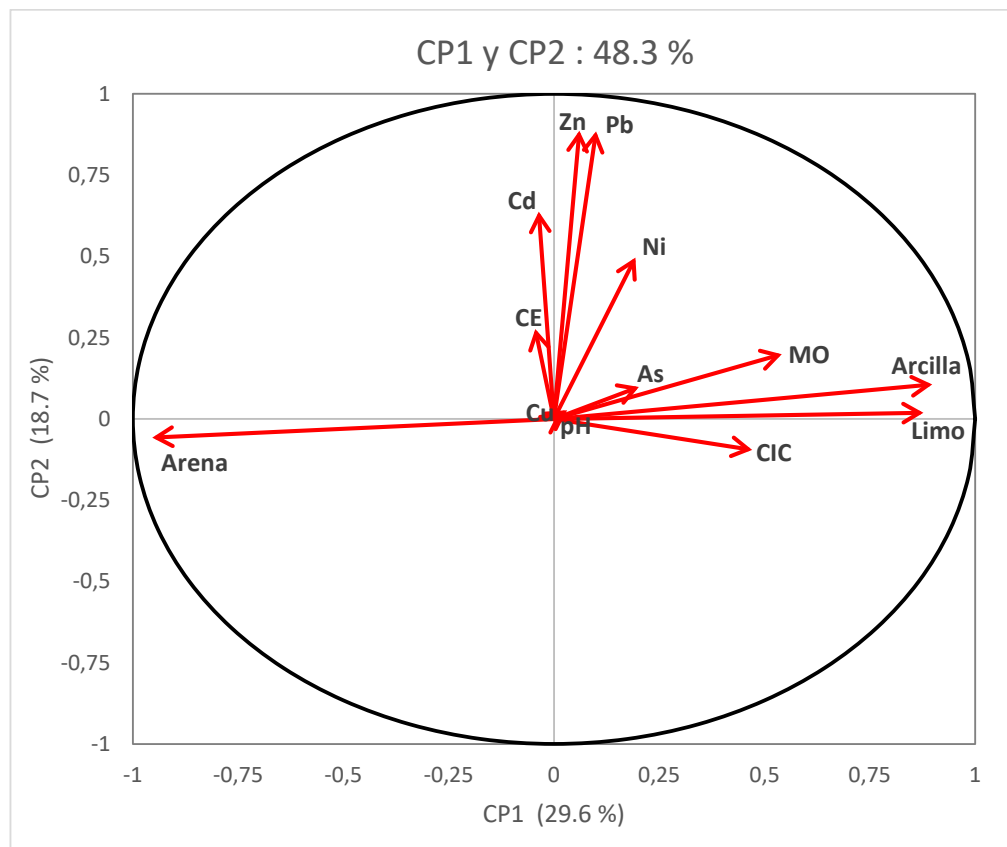


Figura 22. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región de Valparaíso.

La cuarta componente (CP4) explica un 10.7% de la varianza total. Este factor lo compone el elemento Cu y el parámetro MO, con factor de carga igual a 0.91 y 0.56, respectivamente. Esta componente podría estar relacionada con un origen antropogénico, debido a que el elemento Cu contiene un porcentaje considerable de muestras que superaron al valor de fondo para esta región, aproximadamente un 42% del total de muestras. Además, este elemento está moderadamente correlacionado con ETM que proceden de fuentes antropogénicas, como lo es el Cd, Pb y Zn. Por lo tanto, esta componente está relacionada a un aporte antropogénico. Aunque el Cd tiene cierta relación con esta componente principal, con factor de carga considerable igual a 0.62. Este último

tiene cargas altas tanto en la CP2 como en la CP4, en esta última en menor medida. Por lo tanto, esta componente está relacionada a un aporte antropogénico.

La quinta componente (CP5) explica un 8.6% de la varianza total. Este factor lo componen los parámetros pH y CIC, con factores de carga mayores a 0.70. Esta componente representa a propiedades del suelo con una fuerte carga del parámetro pH. Todo lo anterior, es consistente con lo realizado en el análisis de correlación de Spearman.

4.1.3.4. Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región de Valparaíso.

Mediante el análisis Cluster fue posible clasificar y ayudar a identificar a las posibles fuentes de ETM, tanto de origen antrópico como natural. Además, entregó la posibilidad de corroborar el análisis de componentes principales realizado a la Región de Valparaíso. En la **Figura 23**, se presenta la representación gráfica del análisis Cluster, el cual fue obtenido aplicando el método de agrupación del vecino más próximo y distancia Euclídea al cuadrado. Todo esto realizado mediante el software IBM SPSS.

En la figura, es posible apreciar que hay dos parámetros con escasa asociación con las demás variables, estos corresponden a los parámetros CE y porcentaje de arena y conformarían un grupo independiente de los demás. Luego, se puede observar que existen 2 grandes grupos, el primero en donde se encuentran todos los parámetros restantes (limo, arcilla, CIC MO y pH), y el segundo grupo se encuentran todos los ETM.

Como se dijo anteriormente, el primer grupo lo componen todos los ETM (As, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn). En la figura se puede observar que estas variables se dividen en 2 grupos, separados uno de otro en términos de distancias euclidianas al cuadrado. El primero lo compone los elementos Cd, Cu, Pb y Zn. También es posible apreciar que existe una gran asociación entre los elementos Pb y Zn, pudiéndose inferir que estos provienen de una misma fuente. Por otro lado está el Cu, debido a la distancia que existe entre él y los otros 3 elementos, este debe recibir aportes antrópicos de al menos una fuente en común con los elementos Cd, Pb y Zn. El segundo grupo lo componen los elementos As y Ni, los cuales claramente parecen desligarse del resto de ETM, para así formar un grupo independiente. Asimismo, estos pertenecen a la misma componente principal (PC3) y de la cual el resto de ETM tiene una baja carga en esta, además presentan una correlación casi nula con

elementos que principalmente provienen de actividades humanas y agregando a esto el escaso o nulo porcentaje de muestras que superan el valor de fondo de estos elementos. Por lo anterior, fue posible inferir que el As y el Ni, reciben aportes predominantemente de origen natural. Cabe señalar que formar este grupo no excluye completamente la influencia de procesos antropogénicos, es decir, la identificación de grupos se basa en la influencia dominante. Todo lo anterior ratifica lo afirmado en el análisis de correlación de Spearman y ACP.

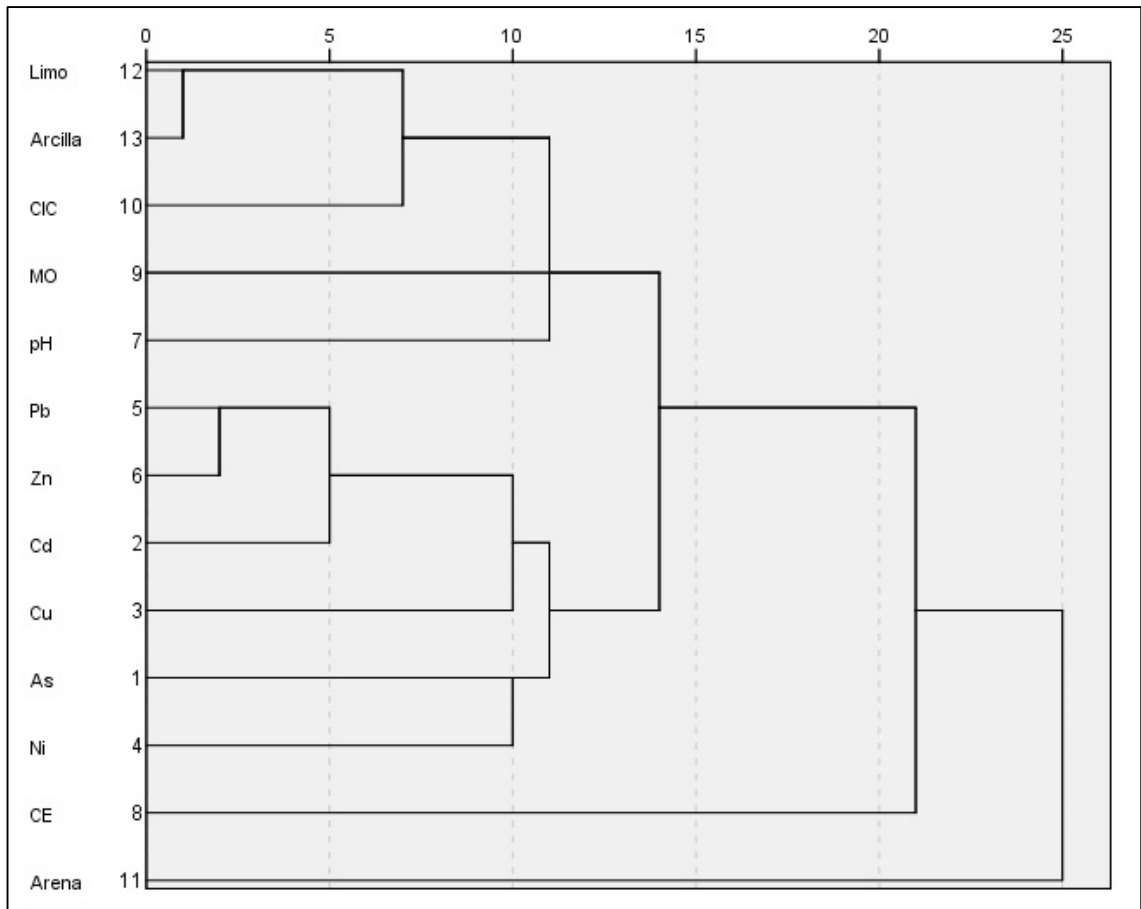


Figura 23. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región de Valparaíso.

4.1.4. Background Values de los ETM de la Región de Valparaíso.

Con el fin de poder detectar valores atípicos en el conjunto de datos se usaron las técnicas Boxplot, Median+2MAD e Iterative 2σ -technique. Además, a esto se agregaron los valores

umbrales citados por el SAG, uno correspondiente a la Norma Chilena (INN, 2004) y el otro propuesto por el SAG como primera aproximación (Target Value), obtenido de la Dutch Guidelines (VROM, 2000) perteneciente a la normativa holandesa, de esta metodología también se entrega el valor de intervención (Intervention Value). En la **Tabla 17**, se presentan los valores umbrales obtenidos mediante los diferentes métodos anteriormente mencionados. Asimismo, en la **Tabla 18**, se presenta la proporción de muestras de la Región de Valparaíso que exceden dichos límites superiores.

Tabla 17. Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región de Valparaíso.

		ETM (mgkg ⁻¹)					
		As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Boxplot		49.0	0.75	463	19.9	45.2	239
Método [Median+2 MAD]		34.7	0.56	210	13.9	31.0	188
Método iterativo 2 σ -technique		36.1	0.60	145	14.6	37.2	185
Target Value		27.7	0.68	34.1	38.7	81.8	141
Intervention Value		52.6	10.2	180	232	510	724
Concentración Máxima	pH > 6.5	20.0	2.0	150	112	75.0	175
Permitida	pH < 6.5	12.5	1.3	100	50.0	50.0	120

En las estas tablas, se puede apreciar que el método [Median+2 MAD] presenta valores umbrales inferiores a los otros 2 métodos estadísticos, excepto para los elementos Cu y Zn. Por consiguiente, tal método presenta un mayor número de muestras que excederían tal límite superior, tales porcentajes de muestras no excederían el 20%. Al momento de comparar todos los métodos o concentraciones propuestas, es posible observar que el método [Median+2 MAD] sigue siendo el que posee los límites superiores con los valores más bajos, a excepción del Cu y Zn. Con respecto al arsénico fue posible observar que todos los métodos estadísticos no presentan muestras que excedan a los límites superiores de estos, sin embargo el valor umbral citado por el SAG presenta un 50% de muestras que excedieron dicho valor.

Cabe destacar, la metodología de la norma holandesa presentó grandes porcentajes de muestras contaminadas para los elementos Cu y Zn, con porcentajes del 98 y 48%, respectivamente. Esto último, es debido a que esta normativa entrega un valor umbral de

estos 2 elementos muy inferior a los métodos homólogos a este. Asimismo, considerando el valor de intervención fue posible observar que para el elemento cobre, un 30% de las muestras excedían dicho valor.

Tabla 18. *Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región de Valparaíso.*

		As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Boxplot		0	8.0	4.0	2.0	2.0	2.0
Método [Median+2 MAD]		0	14.0	30.0	8.0	18.0	12.0
Método iterative 2 σ -technique		0	12.0	42.0	8.0	6.0	12.0
Target Value		18.0	8.0	98.0	0	0	48.0
Intervention Value		0	0	30.0	0	0	0
Concentración Máxima	pH > 6.5	50.0	0	40.0	0	0	16.0
Permitida	pH < 6.5	0	0	2.0	0	0	0

Con respecto a los valores umbrales citados por el SAG, para los suelos con pH menor a 6.5 no tendrían grandes complicaciones, gran parte de estos no presentarían contaminación por ETM. Por otro lado, los suelos que presentan pH mayor a 6.5, para el arsénico se presentó el valor umbral más bajo en relación a los demás métodos, 50% de las muestras son consideradas contaminadas considerando el límite superior entregado en la Norma Chilena (INN, 2004). Agregando a esto lo ocurrido para el elemento cobre, donde un 42% de las muestras sobrepasaron los valores citados por el SAG para suelos agrícolas de la macrozona en que se ubica la región.

La técnica Boxplot posee valores umbrales más altos en los elementos As, Cu y Zn con respecto a los demás métodos. Por esto se tuvo un menor porcentaje de muestras que superaron los límites superiores de dichos elementos, en los cuales se presentaron proporciones de muestras contaminadas entre 0 y 4%. Asimismo, los valores citados por el SAG para muestras con pH>6.5 para la macrozona norte, los elementos Cd y Ni, entregaron los umbrales más altos para estos comparado con los demás métodos, en los cuales no se presentaron muestras que sobrepasaron a tales límites superiores.

4.1.5. Interpolación de Kriging de la Región de Valparaíso.

A continuación, se presenta el análisis de predicciones geoestadísticas mediante el método Kriging Simple para la Región de Valparaíso. En la **Figura 3**, se muestra la ubicación geográfica de las muestras recolectadas, con la respectiva identificación de cada una. Las agroindustrias frutícolas cercanas a sitios con niveles críticos o de consideración de ETM, fueron localizadas mediante un mapa de la región en referencia de catastro frutícola del Ministerio de Agricultura de Chile², en el cual todas estas empresas se encuentran ubicadas geográficamente.

Tabla 19. Variogramas teóricos utilizados en interpolación Kriging de ETM en muestras de la Región de Valparaíso.

Elemento	Transformación	RMSE		Mínimo	Modelo
		Exponencial	Esférico		
As	Normal Score	0.21	0.19	0.19	Esférico
Cd	Normal Score	0.16	0.16	0.16	Exponencial
Cu	Normal Score	0.93	0.92	0.92	Esférico
Ni	Ninguna	7.3	6.9	6.9	Esférico
Pb	Logaritmo	0.01	0.01	0.01	Exponencial
Zn	Logaritmo	0.01	0.01	0.01	Exponencial

Es necesario entregar los variogramas utilizados para esta interpolación Kriging, los cuales son un requisito para la realización de esta técnica. En la **Tabla 19**, se entregan estos variogramas teóricos, los cuales fueron elegidos considerando el menor valor de RMSE (error cuadrático medio) y luego utilizados para realizar el método Kriging Simple. Además, en esta tabla se muestran las transformaciones que se hicieron a los datos de cada ETM, dependiendo de las pruebas de normalidad hechas a estos, lo cual también es necesario para la aplicación de este método. Luego, se presentan las interpolaciones Kriging para cada ETM de la Región de Valparaíso, con el respectivo análisis de estas.

²<http://ide2.minagri.gob.cl/publico/>

4.1.4.1. Distribución del Arsénico.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 19**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Esférico y necesitaron una transformación Normal Score o estandarización. En la **Figura 24**, se presenta la distribución espacial de As en las muestras extraídas de la Región de Valparaíso. En la figura se puede apreciar que los niveles de As en la zona norte del área en estudio tienden a aumentar de oeste a este, partiendo de una región donde las concentraciones son inferiores a 8.5 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles son superiores a 33.6 mgkg^{-1} de arsénico, franja con concentraciones estimadas críticas. Cabe destacar, todos los puntos cercanos a la frontera entre la zona amarilla y naranja (equivalente a niveles entre 19.3 y 26.3 mgkg^{-1}), presentaron niveles de As superiores a la concentración máxima permitida (20 mgkg^{-1}) para la macrozona norte citada por el SAG (2005), como también ocurrió con las áreas que presentaron valores predichos superiores a 26.3 mgkg^{-1} , zona NE del área en estudio. Considerando el Target Value del As igual a 27.7 mgkg^{-1} (ver **Tabla 17**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos en las zonas naranja oscura y roja (niveles mayores a 31.0 mgkg^{-1}) no cumplieron con los estándares holandeses. A pesar de esto, todas las franjas, excepto las zonas de color rojo o niveles estimados críticos, tienen concentraciones que no superaron a los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos, como también con el valor de intervención de la norma de Países Bajos (ver **Tabla 17**). Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de As tiende a aumentar su estimación hacia el este, y esto puede deberse a que estas corresponden principalmente a zonas de frutales, cultivos anuales, parronales, además de la presencia de pequeña y mediana minería hacia la cordillera, con lo que en esos sitios podrían existir aportes antrópicos debido al uso de fertilizantes fosfatados y abonos orgánicos (Hani & Pazira, 2011) y de la industria metalúrgica (Yaylalı-Abanuz, 2011), en especial del cobre. Asimismo, es importante señalar que algunas muestras al sureste de San Felipe, exactamente en la localidad de San Esteban, se encuentran cercanas a una empresa procesadora de alimentos y un frigorífico frutícola, donde es posible ver una diferencia con las muestras que están alrededor. Con respecto al frigorífico, este puede llegar a ser una fuente antrópica a considerar debido a sus

residuos industriales líquidos (RILes) que posiblemente no han sido tratados de la manera adecuada. Por lo anterior, la zona cercana a esta industria de la fruta podría también estar recibiendo aportes que harían alcanzar los niveles obtenidos. Por otro lado, el área de la franja amarillo hacia la franja azul (equivalente a niveles inferiores a 26.3 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por arsénico.

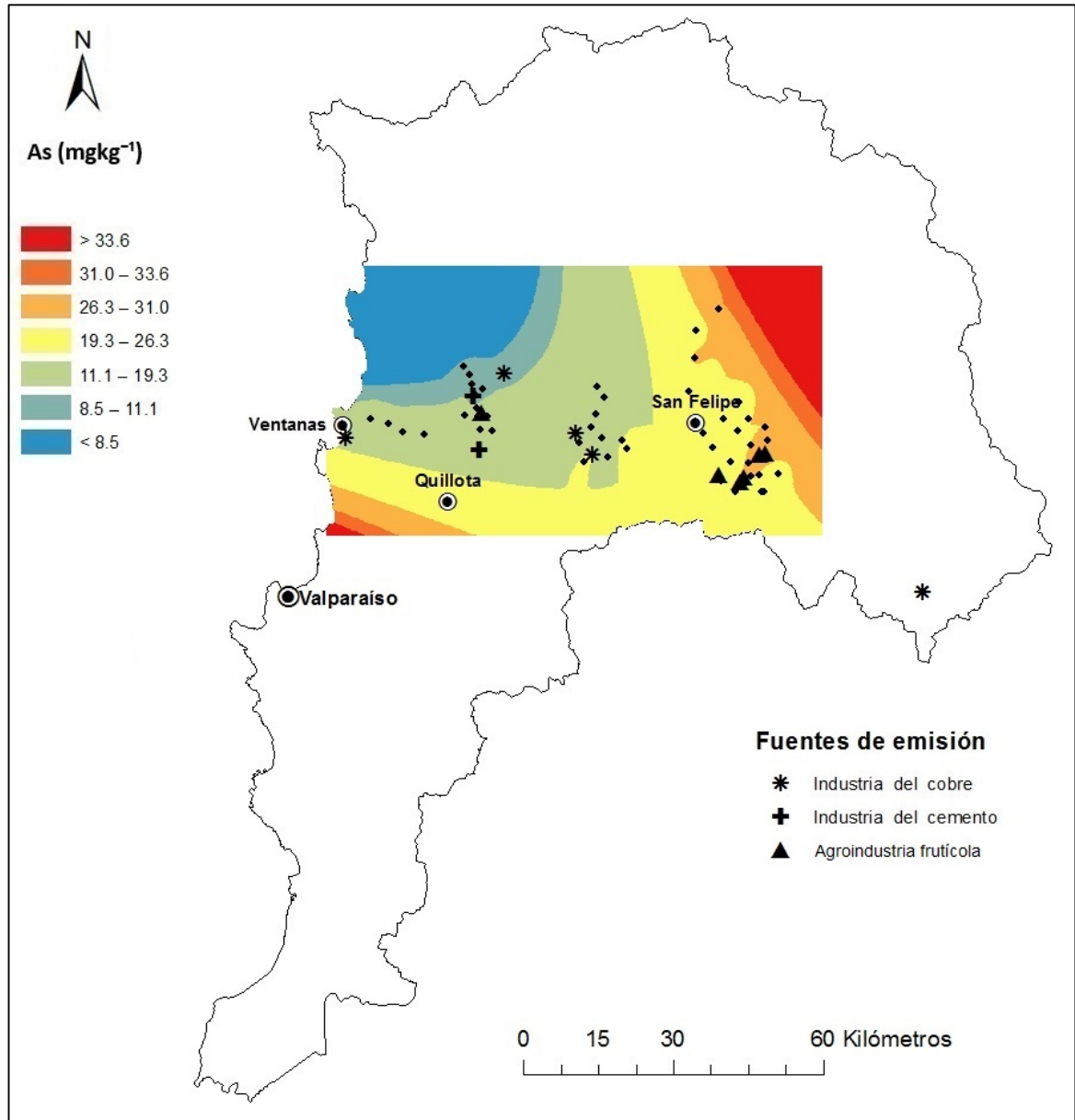


Figura 24. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.

4.1.4.2. Distribución del Cadmio.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 19**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Exponencial y necesitaron una transformación Normal Score o estandarización. En la **Figura 25**, se presenta la distribución espacial de Cd en las muestras extraídas de la Región de Valparaíso. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 0.94 mgkg^{-1} . Los niveles de Cd en el área en estudio tienden a aumentar de norte a suroeste, partiendo de una región donde las concentraciones son inferiores a 0.29 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 0.94 mgkg^{-1} de cadmio. Además, en la zona donde las concentraciones predichas son del rango entre $0.65 - 0.94 \text{ mgkg}^{-1}$, área de color naranja oscuro, estas tuvieron valores que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 17**. Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Cd tiende a aumentar su estimación hacia el suroeste, por lo que habría aportes de actividades antrópicas a esta zona. Por esto, estas 2 franjas (concentraciones superiores a 0.47 mgkg^{-1}), no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, parronales, y la presencia de la industria del cobre y del cemento (en especial Fundición Chagres de Anglo American y Planta Catemu de Minera Amalia, además de la Planta La Calera de Cemento Melón), con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido al resultado de la utilización de productos agroquímicos, como los fertilizantes fosfatados (Adriano, 2001); la aplicación frecuente de plaguicidas lo que permitiría la acumulación de este elemento en la capa superficial del suelo (Nicholson et al., 2003); producto del tráfico vehicular por caminos cercanos, especialmente al desgaste de los neumáticos (Alloway, 1990); y principalmente como resultado de la actividad industrial (Adriano, 2001), en especial a la fundición de metales (Yaylali-Abanuz, 2011), en este caso por el cobre. Continuando, el área de la franja amarilla hacia la franja azul (equivalente a niveles inferiores a 0.47 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por cadmio. Igualmente, es importante señalar que todas las zonas o franjas del área en estudio presentan niveles de Cd

inferiores a la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), ver **Tabla 17**.

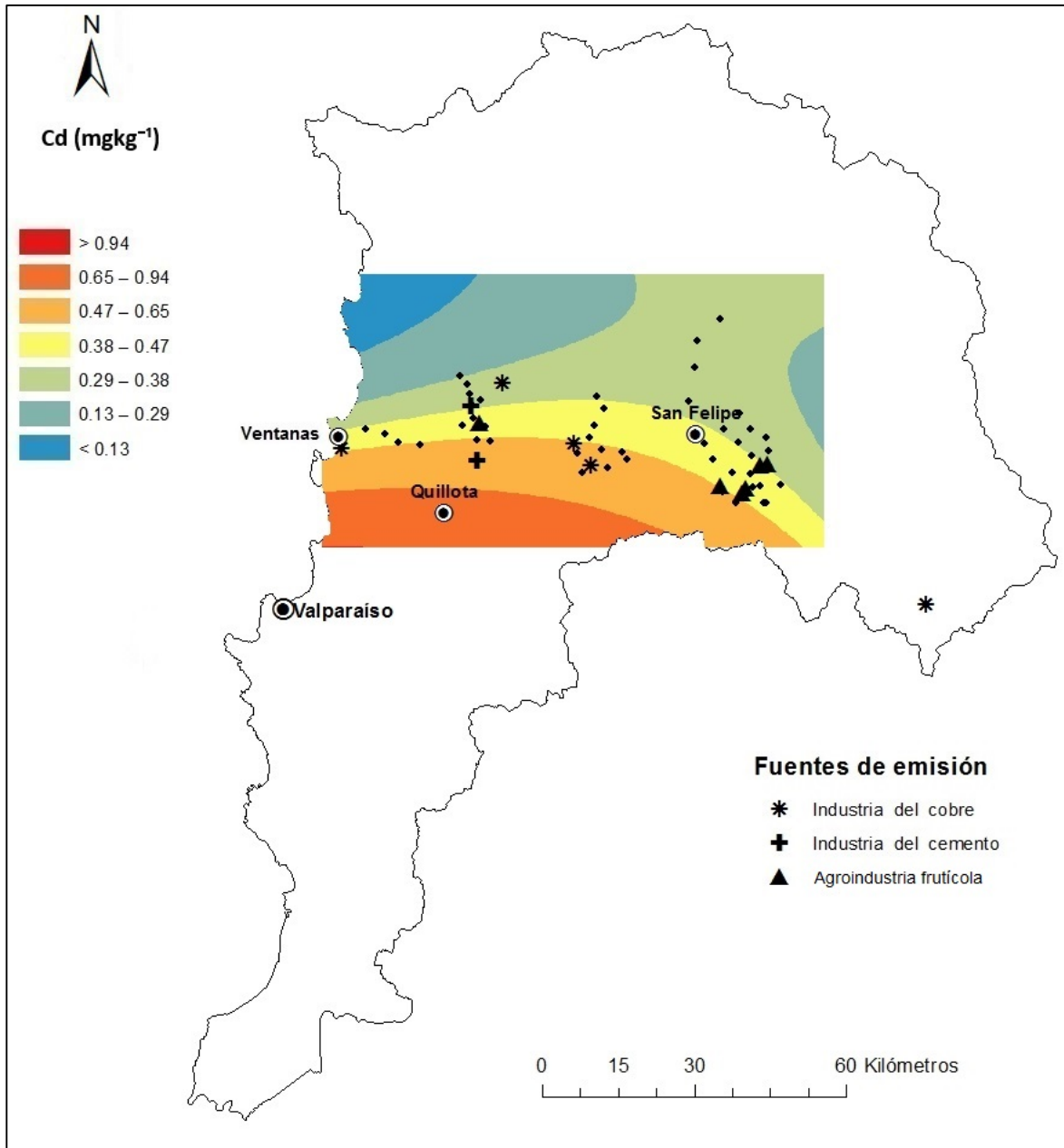


Figura 25. Distribución de contenidos de Cd en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.

Considerando el Target Value del Cd igual a 0.68 mgkg⁻¹ (ver **Tabla 17**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que la mayoría de los suelos en la franja

naranja oscura (niveles entre 0.65 y 0.94 mgkg⁻¹), a poca distancia del límite entre esta franja y la zona naranja, no cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, ninguna zona del área en estudio superó los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.1.4.3. Distribución del Cobre.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 19**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Esférico y necesitaron una transformación Normal Score o estandarización. En la **Figura 26**, se presenta la distribución espacial de Cu en las muestras extraídas de la Región de Valparaíso. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 1,808 mgkg⁻¹. Los niveles de Cu en el área en estudio tienden a aumentar del centro de la zona hacia el sur y el norte, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 73.1 mgkg⁻¹ hasta zonas donde los niveles alcanzan los 1,808 mgkg⁻¹ de cobre. Además, las franjas de color naranja ubicadas en las zonas norte y sur del área en estudio, con concentraciones predichas entre 243 – 356 mgkg⁻¹, presentaron niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2 MAD, iterative 2σ-technique), ver **Tabla 17**.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Cu tiende a aumentar su estimación hacia el sur, por lo que habría aportes de actividades antrópicas a esta zona mencionada. Por esto, estas 2 franjas que representarían a los suelos del sur del área en estudio (concentraciones superiores a 243 mgkg⁻¹), no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales y parronales, además de la presencia de la industria del cobre y agroindustrias frutícolas cercanas a esta zona, con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido al resultado de la utilización de productos agroquímicos que contienen Cu en forma de impurezas, como los fertilizantes fosfatados (Kabata-Pendias & Pendias, 2011); la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003); y debido a emisiones industriales (Yaylali-Abanuz, 2011). Con respecto a esto último, fue posible apreciar que dentro de la franja naranja en el centro sur del área de estudio existe una zona

con forma de isla de color naranja oscuro, la cual se encuentra muy cercana a la Planta Catemu de Minera Amalia que extrae cobre y de la que podría estar recibiendo aportes de origen antrópico.

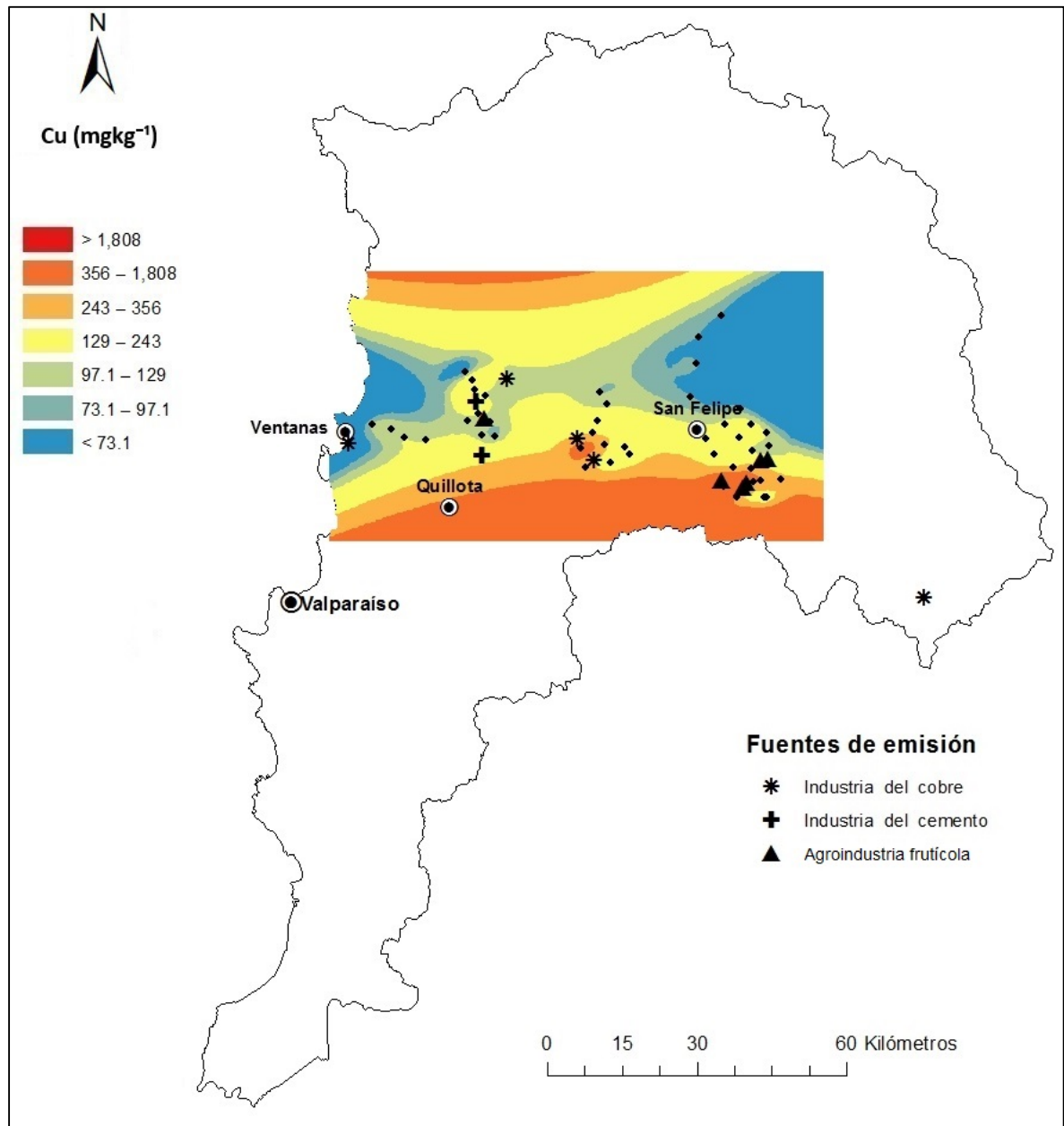


Figura 26. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.

Por otra parte está la zona al sureste de San Felipe, exactamente en las localidades cercanas a Los Andes, estas se verían afectadas por la presencia de 3 agroindustrias frutícolas y de la

actividad minera del cobre (debido a posibles descargas en algún grado de material de desechos mineros del cobre, de División Andina de Codelco, en ríos que aguas abajo son utilizados para riego), de las cuales podrían estar recibiendo aportes de Cu. Donde hechos de derrame han ocurrido con anterioridad en dichas aguas (Cooperativa.cl, 2016).

El área de la franja verde hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 129 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por cobre. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras en los suelos que están ubicados en zonas de niveles superiores de concentración, fue posible asegurar que este umbral corresponde a 150 mgkg^{-1} (ver **Tabla 17**). Esta concentración estaría dentro del intervalo $129 - 243 \text{ mgkg}^{-1}$ (franja color amarillo), por lo que gran parte de esta zona, sumando a esto las zonas superiores a esta (franjas color naranja y naranja oscuro), tendrían suelos con niveles que superarían la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas. Considerando el Target Value del Cu igual a 34.1 mgkg^{-1} (ver **Tabla 17**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que los suelos de todas las franjas no cumplieron con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de las zonas de color naranja y naranja oscuro tuvieron niveles que superarían los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.1.4.4. Distribución del Níquel.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 19**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Esférico y necesitaron una transformación, ya que estos siguen una distribución normal. En la **Figura 27**, se presenta la distribución espacial de Ni en las muestras extraídas de la Región de Valparaíso. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 28.0 mgkg^{-1} . Los niveles de Ni en el área en estudio tienden a aumentar hacia el sureste, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 8.3 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 28.0 mgkg^{-1} de níquel. Otro punto a destacar, es que cerca de la esquina sureste del área en estudio se presentó una pequeña zona con forma de isla

superior a las que la rodean, lo mismo ocurre en el centro del área de estudio. Los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos estarían dentro de la franja de color naranja oscuro (concentraciones predichas entre 13.4 – 28.0 mgkg^{-1}) ubicada en la zona sureste y sitio con forma de isla al centro del área en estudio. Por esto, estas presentaron zonas, dentro de la franja, con niveles superiores a los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos utilizados (ver **Tabla 17**).

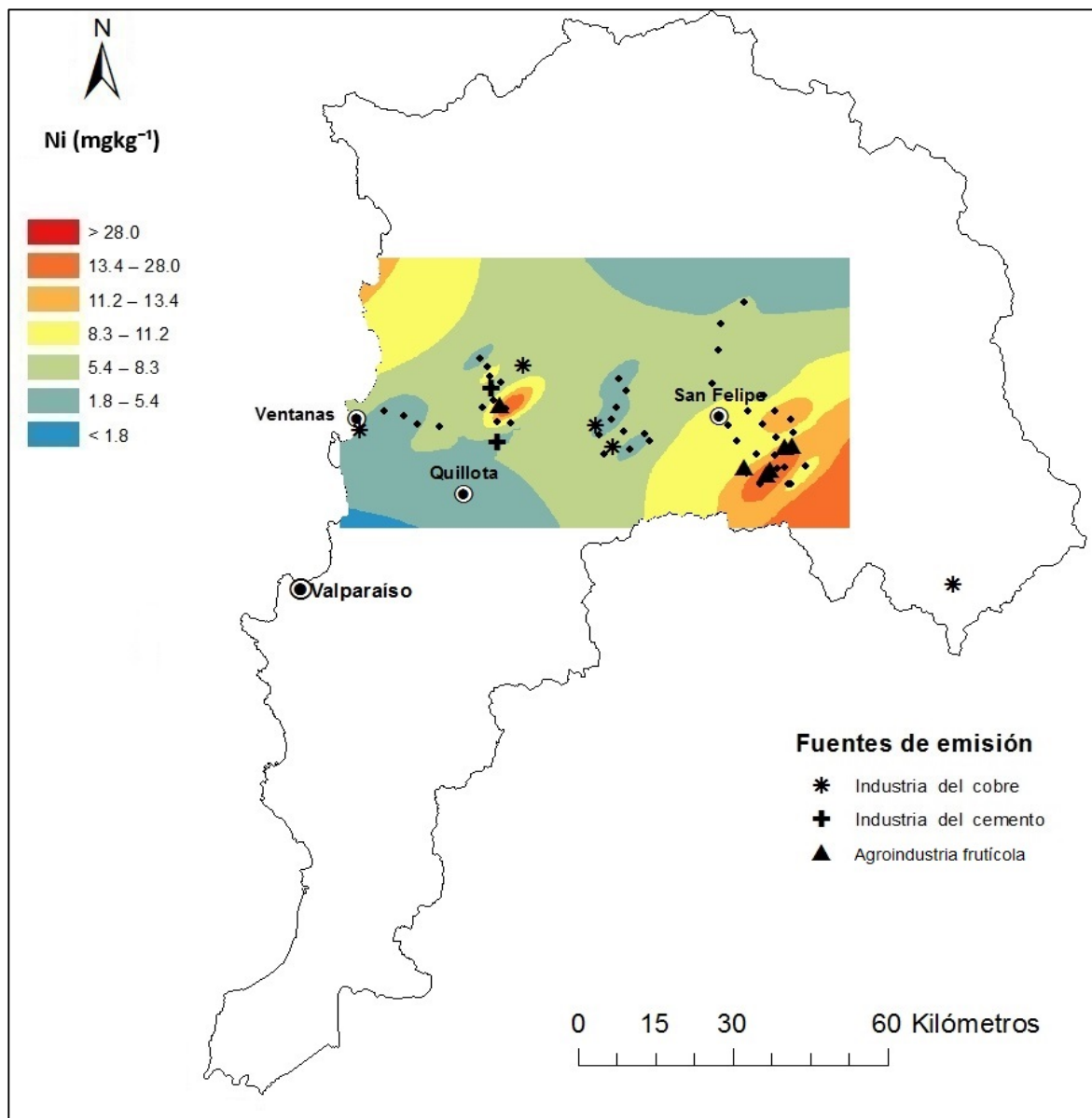


Figura 27. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Ni tiende a aumentar su estimación hacia el sureste, por lo que habría un cierto aporte de actividades antrópicas a la zona mencionada. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, cultivos anuales y parronales, además de la presencia de agroindustrias en ambos sitios de concentraciones altas. Con respecto a los sitios al norte de Quillota y al sureste de San Felipe, estos se encuentran muy cercanos a 2 agroindustrias frutícolas (una de ellas procesa en frío), y por esto tal diferencia con zonas cercanas a estos puntos. Este aumento en las concentraciones puede ser resultado de la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003) por parte de estas agroindustrias y no descartando además los aportes antrópicos que provienen de la combustión de bencina de los caminos cercanos (Romic & Romic, 2003). Además, la zona al sureste del área de estudio puede estar recibiendo aportes de este elemento posiblemente debido al riego de cultivos agrícolas con las aguas del río Aconcagua y Estero Pocuro, producto de que en estas aguas se podría estar descargando, en algún grado, material de desechos mineros del cobre aguas arriba por la División Andina de Codelco, donde han ocurrido hechos de derrames anteriormente (Cooperativa.cl, 2016). El área de la franja amarilla hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 11.2 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por níquel.

Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras en las zonas comprendidas entre las franjas amarillas y naranja oscura, fue posible asegurar que este umbral corresponde a 112 mgkg^{-1} (ver **Tabla 17**). Por lo anterior, en la figura se puede apreciar que todos los suelos tendrían niveles muy inferiores a la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas. Considerando el Target Value del Ni igual a 38.7 mgkg^{-1} (ver **Tabla 17**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que todos los suelos en estudio cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentarían niveles de este ETM inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.1.4.5. Distribución del Plomo.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 19**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Exponencial y necesitaron una transformación logarítmica. En la **Figura 28**, se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 73.7 mgkg^{-1} .

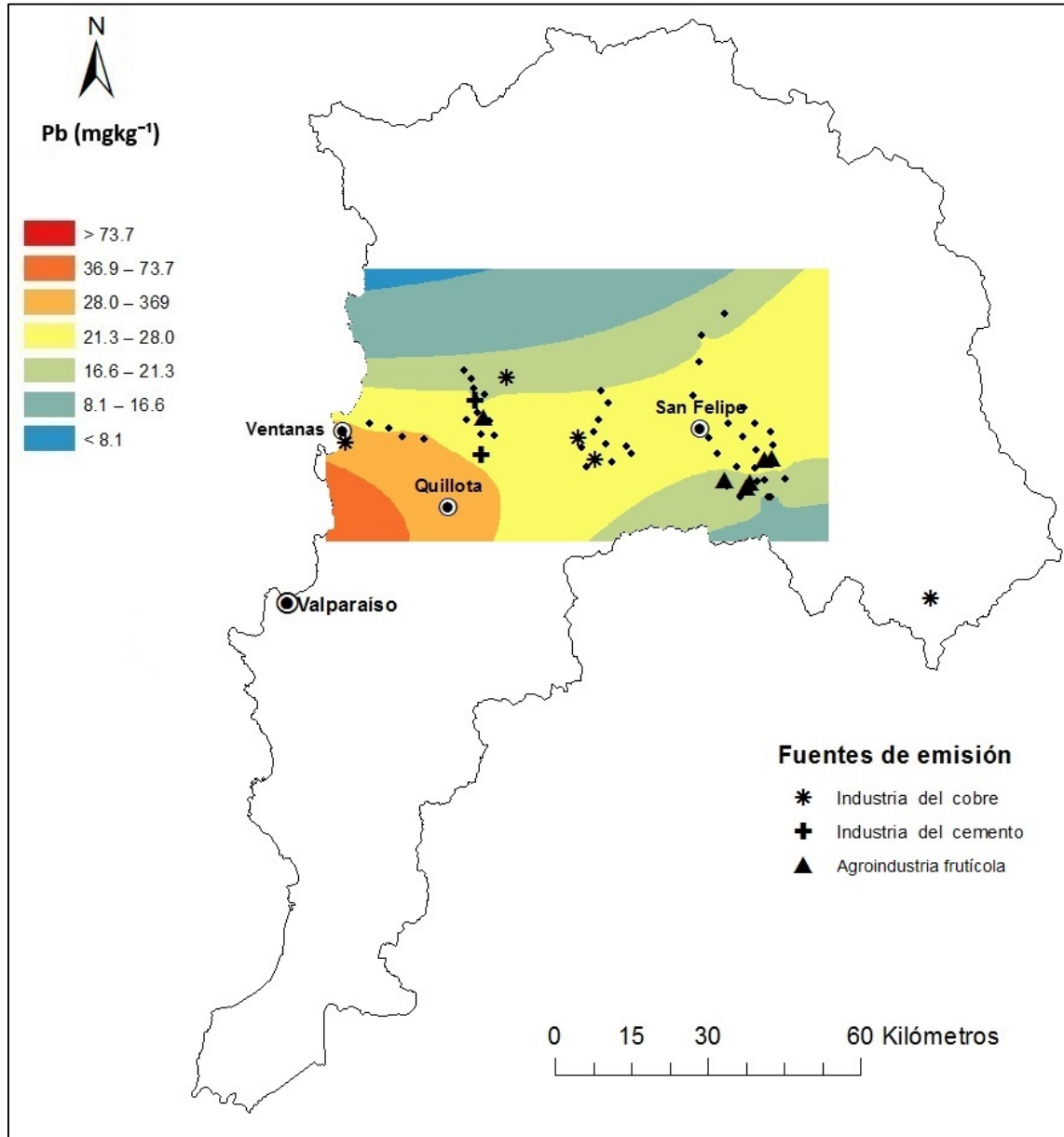


Figura 28. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.

Los niveles de Pb en el área en estudio tienden a aumentar hacia el suroeste, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 8.1 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 73.7 mgkg^{-1} de plomo. Asimismo, la franja de color naranja oscuro ubicada en la zona suroeste del área en estudio, con concentraciones predichas entre $36.9 - 73.7 \text{ mgkg}^{-1}$, presentaron niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante los métodos Median+2 MAD e Iterative 2σ -technique, y una gran parte de suelos dentro de esta franja sobrepasaron a los valores de fondo del método restante (ver **Tabla 17**).

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Pb tiende a aumentar su estimación hacia la Bahía en Con Con, por lo que podría haber aportes de actividades antrópicas a la zona mencionada. Por esto, la franja que representaría a los suelos del suroeste del área en estudio que tienen concentraciones superiores a 36.9 mgkg^{-1} , no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zona de frutales y la presencia de industria del cobre (División Ventanas de Codelco), con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido al uso de productos agroquímicos que contienen trazas de Pb (Alloway & Ayres, 1993); producto de los gases de escape que procedían de la combustión de bencinas con plomo durante el siglo pasado y que se encuentran normalmente en la capa superficial (Markus & McBratney, 2001), y de la actividad metalúrgica del cobre (Ambisat Ingeniería Ambiental, 2004) en la zona cercana a la caleta de Ventanas.

Por otro lado, el área de la franja amarilla hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 28.0 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por plomo. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras que están ubicadas en zonas de niveles superiores de concentración, fue posible deducir que este umbral corresponde a 50 mgkg^{-1} , ver **Tabla 17**. Esta concentración estaría dentro del intervalo $36.9 - 73.7 \text{ mgkg}^{-1}$ (franja color naranja oscuro), debido a esto tendrían una porción de suelos que sobrepasarían dicha concentración máxima. Considerando el Target Value del Pb igual a 81.8 mgkg^{-1} (ver **Tabla 17**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que los suelos de todas las

franjas cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de este ETM inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.1.4.6. Distribución del Zinc.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 19**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Exponencial y necesitaron una transformación logarítmica. En la **Figura 29**, se presenta la distribución espacial de Zn en las muestras extraídas de la Región de Valparaíso. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 396 mgkg^{-1} . Los niveles de Zn tienden a aumentar hacia el centro del área en estudio, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 80.8 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 200 mgkg^{-1} de zinc. Además, una parte de la zona correspondiente a la franja de color naranja ubicada en el centro del área en estudio, con concentraciones predichas entre $163 - 200 \text{ mgkg}^{-1}$, presentaron niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2 MAD, iterative 2σ -technique), ver **Tabla 17**.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Zn tiende a aumentar su estimación hacia el centro, por lo que habría aportes de actividades antrópicas a esta zona mencionada. Por esto, los sitios ubicados en esta franja en el centro del área en estudio (concentraciones superiores a 163 mgkg^{-1}) no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, parronales y de pequeña y mediana minería, presentes precisamente en la localidad de El Cobre, con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido a la práctica agrícola (Kabata-Pendias & Pendias, 2011), la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003), y las entradas resultantes de la deposición atmosférica, como consecuencia de las actividades mineras (Zhou et al., 2013).

El área de la franja amarilla hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 163 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por zinc. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de

las muestras en los suelos que están ubicados en zonas de niveles superiores de concentración, fue posible asegurar que este umbral corresponde a 175 mgkg^{-1} (ver **Tabla 17**). Esta concentración estaría dentro del intervalo $163 - 200 \text{ mgkg}^{-1}$ (franja color naranja), por lo que habrían suelos con niveles que superarían este último umbral.

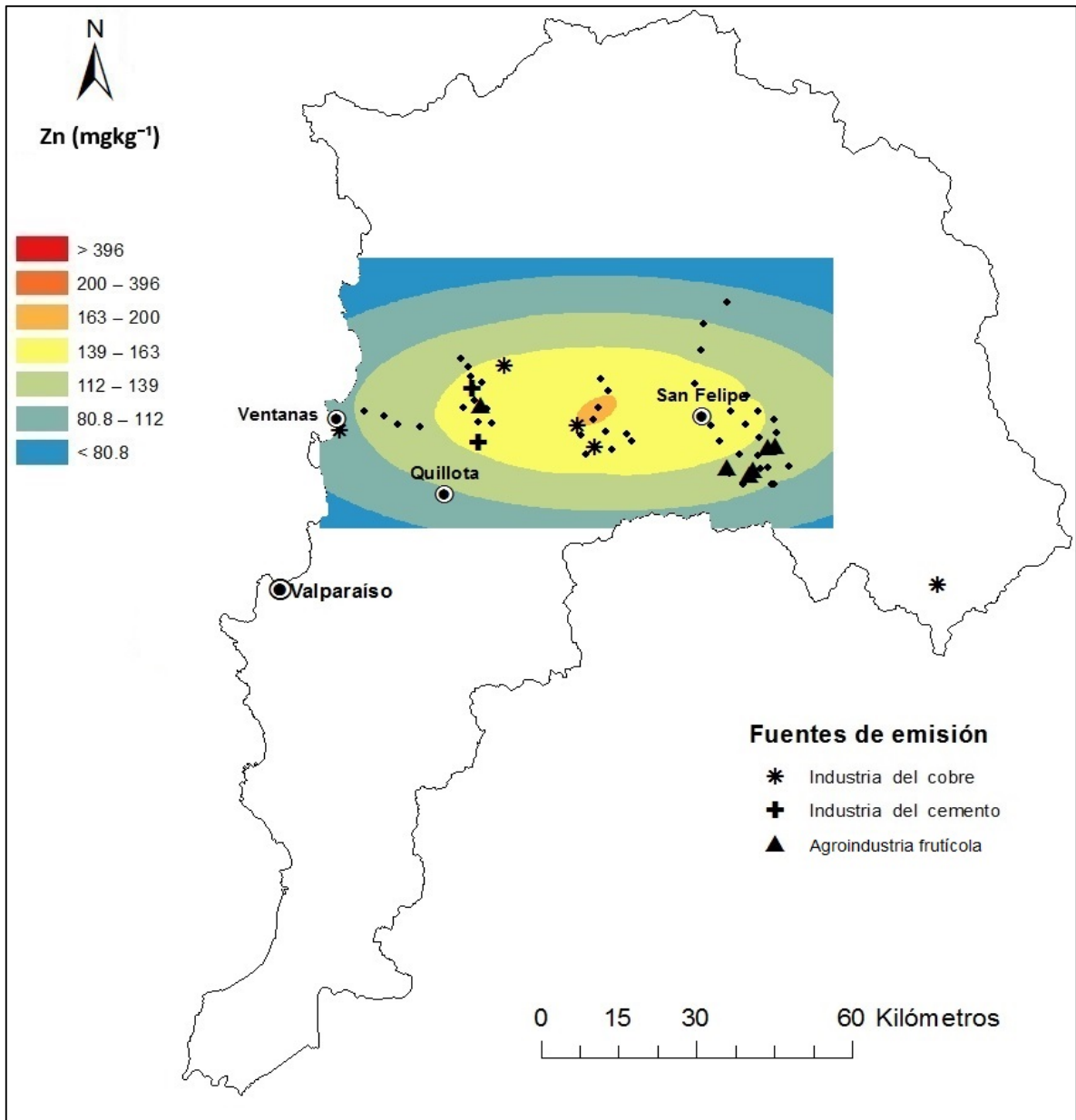


Figura 29. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región de Valparaíso.

Considerando el Target Value del Zn igual a 141 mgkg^{-1} (ver **Tabla 17**), obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que los suelos de las franjas amarilla y naranja (concentraciones mayores a 139 mgkg^{-1}) no cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de este ETM inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.1.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región de Valparaíso.

Las muestras de suelo de la Región de Valparaíso, fueron evaluadas con la finalidad de poder determinar la contaminación existente en estas. Para lograr esto se utilizó el Índice de Geoacumulación (I_{geo}), Factor de Contaminación (C_f), Grado de Contaminación (C_{deg}) e Índice Integrado de Contaminación (IPI) (Yaylali-Abanuz, 2011). En todos estos factores de evaluación fueron utilizados los valores de fondo de menor valor de entre los 3 métodos estadísticos utilizados. Para los elementos As, Cd, Ni y Pb, se usaron los valores de fondo obtenidos mediante el método *Median + 2 MAD*, y para los elementos restantes, los valores conseguidos a través de la técnica Iterative 2σ -technique. Por consiguiente, los valores de fondo de los elementos As, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn corresponden a 34.7, 0.56, 145, 13.9, 31.0 y 185 mgkg^{-1} , respectivamente. A continuación se presentará la evaluación de riesgo ecológico mediante los diferentes factores utilizados para cada ETM o muestra, según corresponda.

4.1.6.1. Índice de Geoacumulación (I_{geo}).

Los resultados de los valores obtenidos del índice de geoacumulación para cada ETM son presentados en la **Figura 30**. En esta es posible apreciar que el elemento Cu presentó suelos entre no contaminados hasta fuertemente contaminados, valores de I_{geo} entre -2.8 a 3.1. Además, los suelos de esta región mayoritariamente (70% de las muestras) presentaron nula contaminación con respecto al cobre (valores de I_{geo} menor a 0). Asimismo, un 98% de las muestras como máximo presentaron contaminación moderada por este elemento, este 2% restante que corresponde a la muestra AC-07 estaría entre fuertemente contaminada. Con respecto al resto de elementos (As, Cd, Ni, Pb y Zn), el 98% de las muestras de suelo del

área en estudio prácticamente no tuvo contaminación por estos elementos, a excepción de arsénico donde todas las muestras poseen valores menores 0 (Prácticamente sin contaminación).

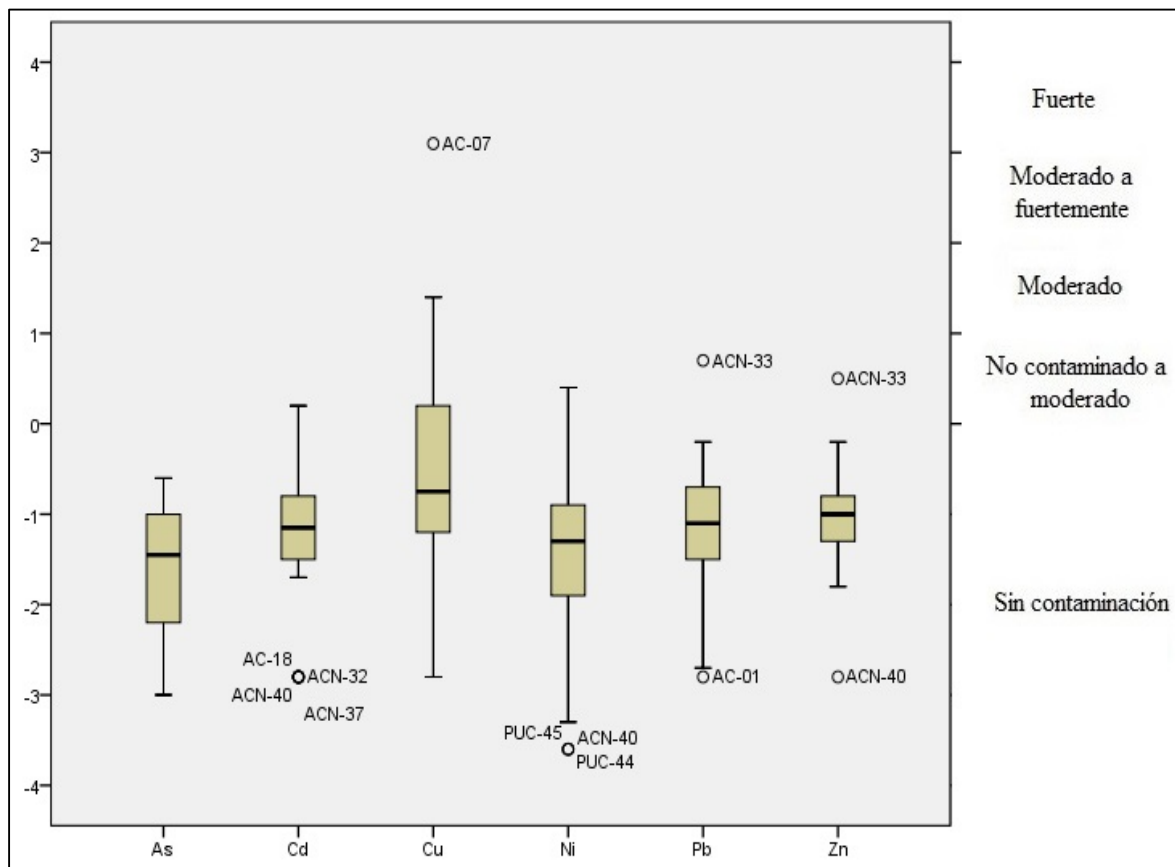


Figura 30. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región de Valparaíso.

4.1.6.2. Factor de Contaminación (C_f), Grado de Contaminación (C_{deg}) e Índice Integrado de Polución (IPI).

Los resultados de los valores obtenidos del factor de contaminación para cada ETM son presentados en la **Figura 31** y **Figura 32**, además en la **Tabla 20**, se entregan algunos parámetros estadísticos de cada elemento para contribuir a la interpretación de los resultados. En la figura es posible apreciar que el elemento Cu presentó un 38% del total de suelos que están dentro de la categoría de contaminación moderada, además tendría una pequeña cantidad de muestras con contaminación considerable y muy alta por este

elemento, ambas con un 2%. Para esta última categoría, se tiene una muestra (AC-07) que presentó contaminación muy alta con respecto al cobre, con coeficiente de contaminación igual a 12.6. Con respecto al resto de elementos (As, Cd, Ni, Pb y Zn), gran parte de las muestras de suelo del área en estudio presentaron contaminación baja por estos elementos y un pequeño porcentaje de estas están dentro de la categoría contaminación moderada ($1 \leq C_f < 3$), a excepción de arsénico donde todas las muestras tuvieron valores menores 1 (Contaminación baja).

Tabla 20. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región de Valparaíso.

Metales	Mínimo	Máximo	Media	SD ^a	Mediana
As	0.18	0.97	0.56	0.24	0.56
Cd	0.22	1.7	0.72	0.33	0.68
Cu	0.22	12.6	1.4	1.8	0.89
Ni	0.13	2.0	0.63	0.35	0.60
Pb	0.22	2.4	0.76	0.36	0.69
Zn	0.22	2.2	0.78	0.28	0.75

^a Desviación Estándar

Finalmente, de la tabla y figura es posible inferir que los suelos de esta región tienen contaminación baja con respecto a As, Cd, Ni, Pb y Zn, y contaminados moderadamente con respecto a Cu. Con respecto a esto último, todos estos suelos estarían contaminados considerablemente con cobre en la zona sur del área de estudio.

En la **Figura 33**, se presenta la distribución espacial de los grados de contaminación de las muestras recolectadas en la Región de Valparaíso. Pero antes es necesario establecer la clasificación de estos valores, para esto fueron reclasificados según Håkanson (1980) y de acuerdo al número de ETM (6 elementos) que se utilizaron para esta región (Albanese et al., 2013), ver página 45.

En la figura se puede apreciar que existe un 82%, de muestras que están dentro de la categoría bajo grado de contaminación (valores de C_{deg} menores a 6). Por lo tanto, en los sitios de las muestras restantes (16% del total de muestras) presentaron moderado grado de contaminación con respecto a los ETM en estudio, el porcentaje restante pertenecería a

contaminación considerable. Sobre este último, este correspondería al sitio cercano a la muestra AC-07 y en gran proporción fue debido a contaminación por cobre, 72% del C_{deg} obtenido es aportado por el cobre. Esto indica que en estos sitios están moderadamente o considerablemente afectados por actividades antrópicas y por esto, tendrían contaminación por tales elementos.

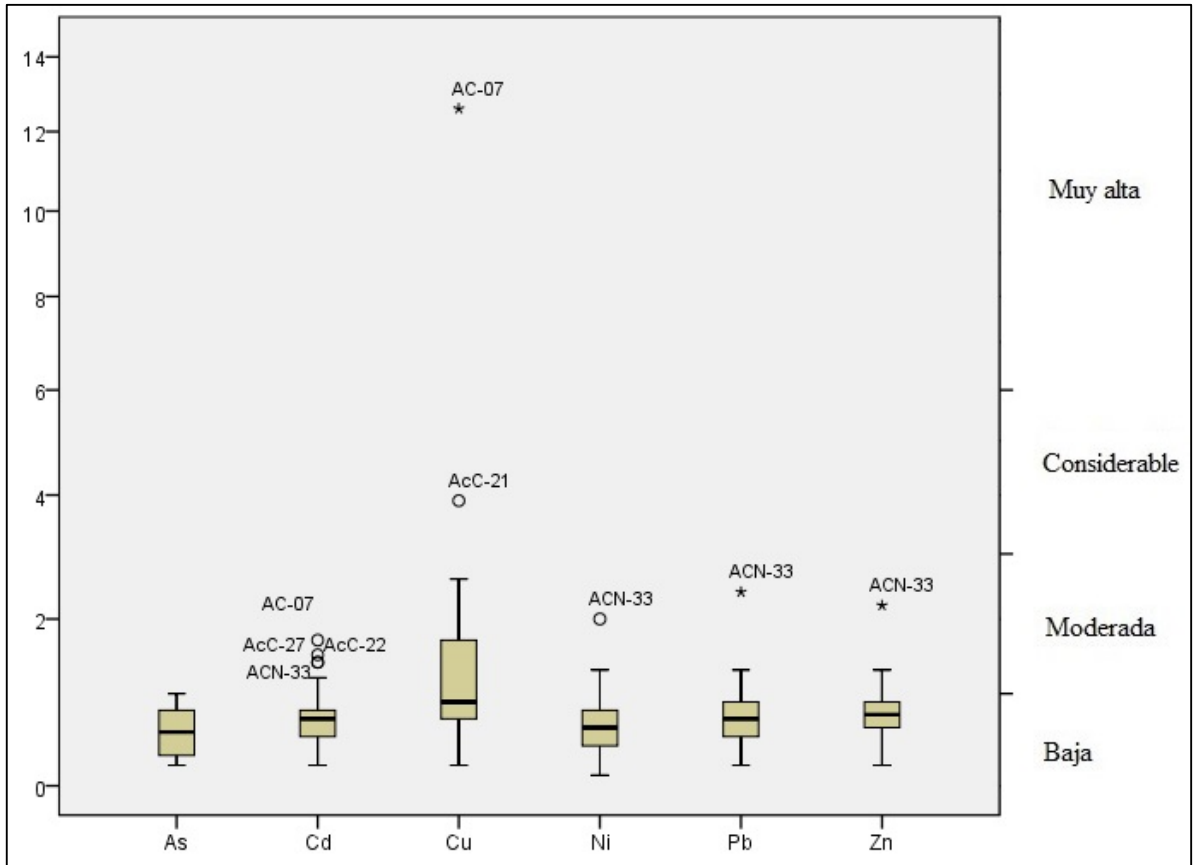


Figura 31. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región de Valparaíso.

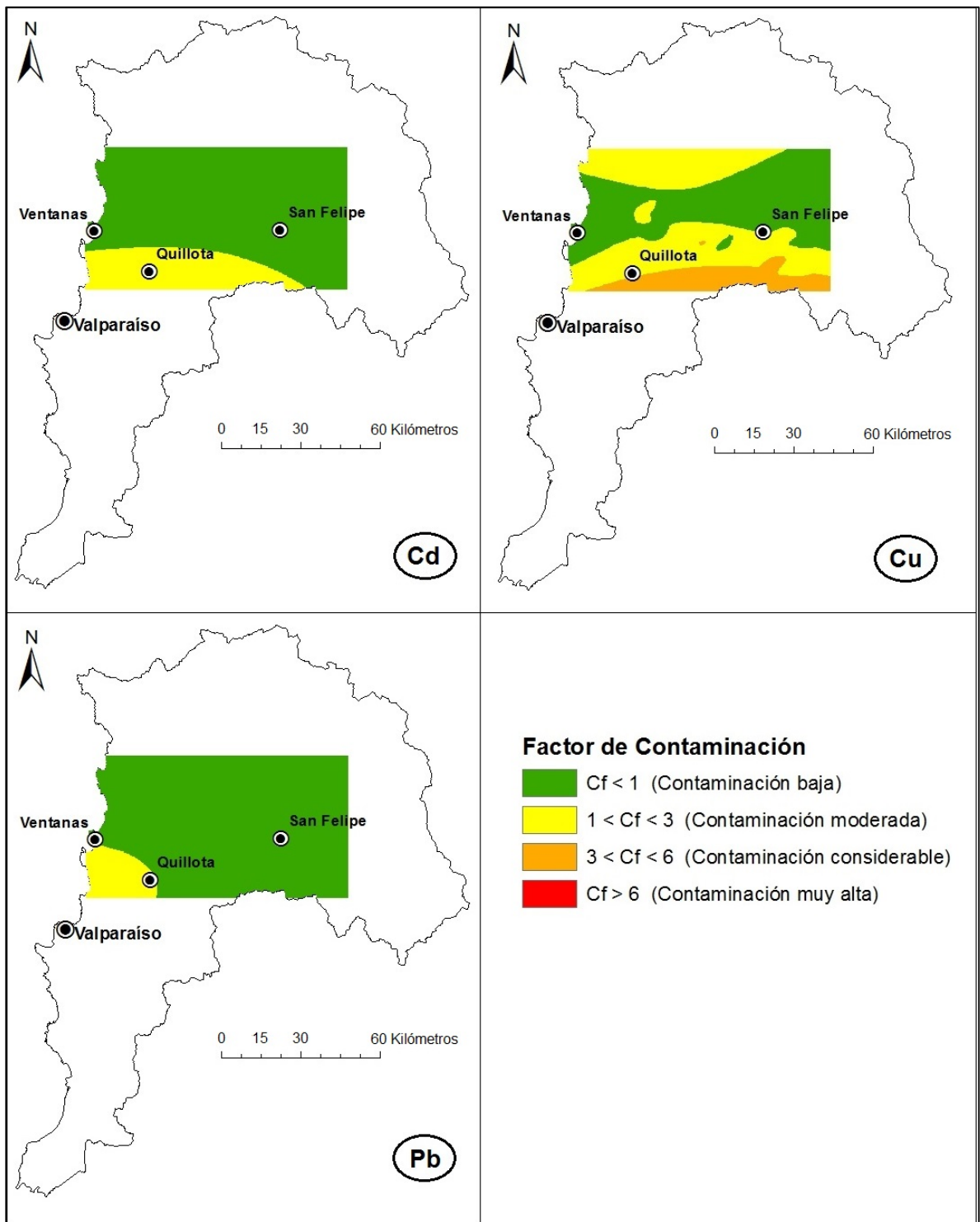


Figura 32. Distribución espacial de los factores de contaminación (C_f) de los elementos Cd, Cu y Pb de la Región de Valparaíso.

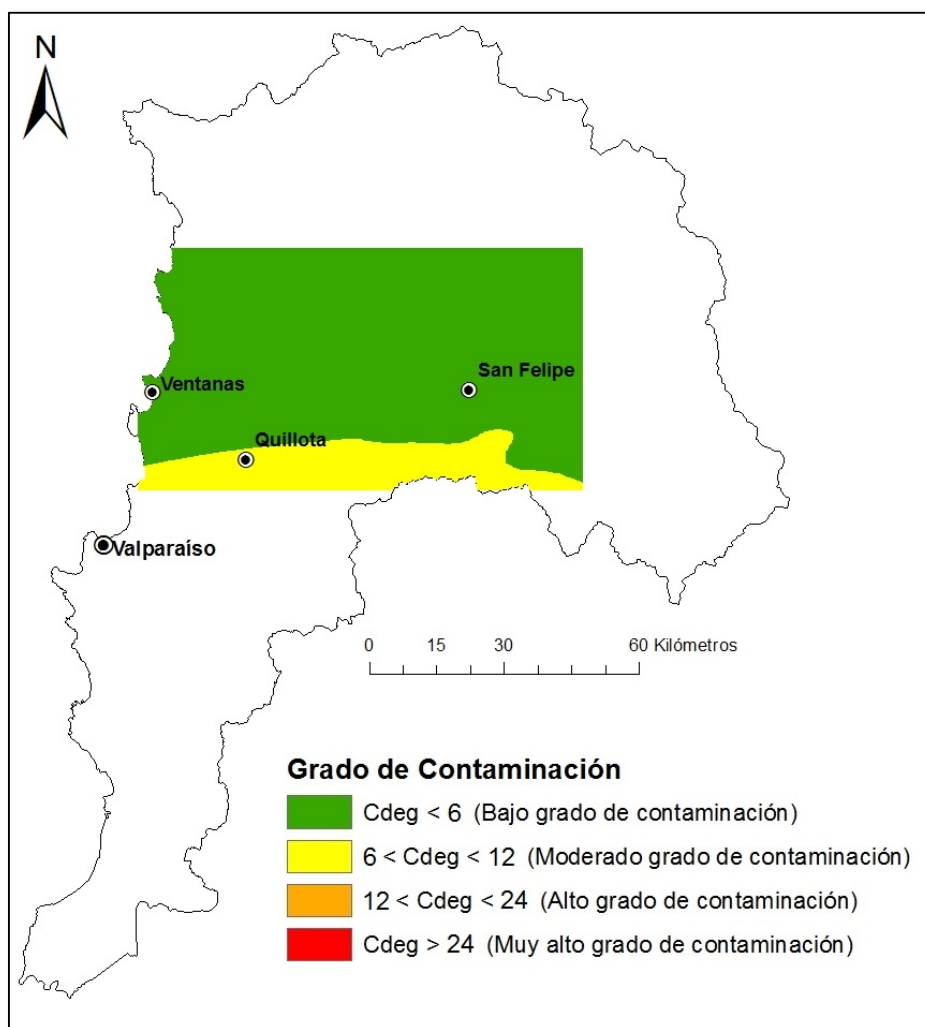


Figura 33. Distribución espacial de los grados de contaminación (C_{deg}) de la Región de Valparaíso.

Finalmente, el índice integrado de polución es presentado mediante la **Figura 34**. En la distribución geográfica presentada en la figura se puede ver que existe un gran porcentaje, 82% del total, de muestras con nivel bajo de contaminación ($IPI \leq 1$). Además, existe un 16% de las muestras que tendrían un nivel moderado de contaminación, y solo un 2% (muestra AC-07) que presentaría un nivel alto de contaminación por ETM, esta última con un valor de este igual a 2.9. En esta muestra existiría un gran aporte del elemento cobre al valor de IPI alcanzado, ocurriendo lo mismo que en el C_{deg} . Esto indica que este último sitio podría estar altamente afectado por actividades de la industria del cobre, y por esto tendría un nivel alto de contaminación por los elementos en estudio, principalmente por Cu.

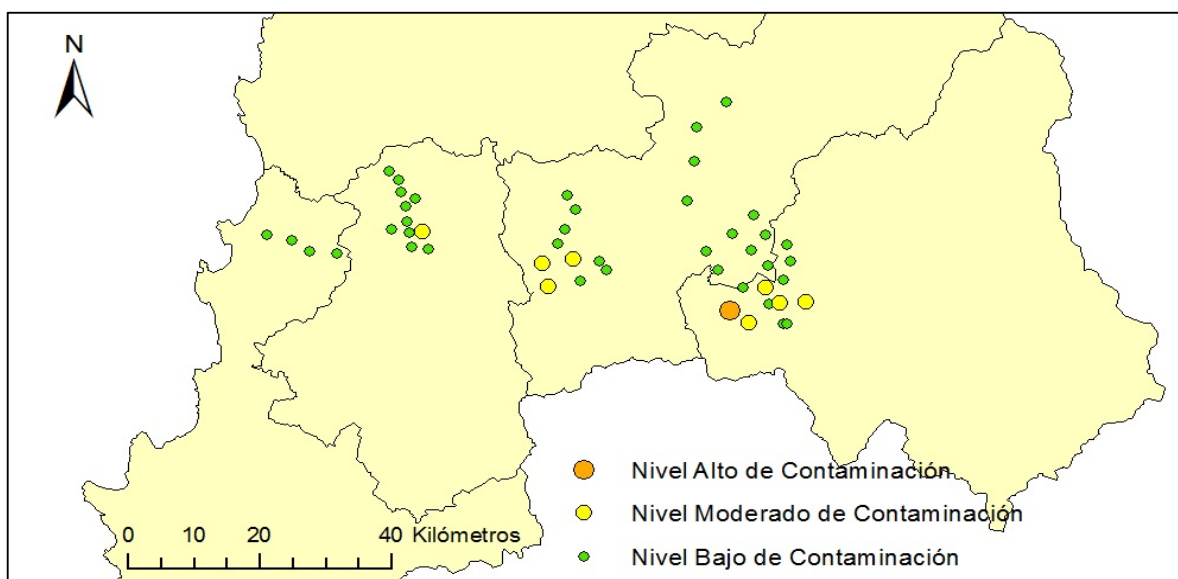


Figura 34. Ubicación geográfica de los índices integrados de contaminación (*IPI*) de la Región de Valparaíso.

4.2. Región Metropolitana de Santiago

Los ETM utilizados en la Región Metropolitana de Santiago son los elementos As, Cu, Ni, Pb, Se y Zn, ya que como se estableció en el capítulo anterior, no fueron considerados los elementos que contuviesen un porcentaje mayor o igual al 20% de datos con concentraciones inferiores al límite de detección de estos.

4.2.1. Análisis exploratorio de datos de la Región Metropolitana de Santiago.

Considerando los datos de la Región Metropolitana de Santiago, en este punto se entregará los resultados del AED para cada ETM y parámetro utilizado en este trabajo. En el histograma de la **Figura 35**, se puede apreciar que la distribución de arsénico tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, pero esto es debido a la presencia de un valor extremadamente superior a la media. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que no tiende a la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se puede observar que en el box plot existe un valor atípico que se encuentra muy por encima del bigote superior. Tal caso es la muestra RM 03, con una concentración de As de 101 mgkg^{-1} . Por lo anterior, se puede concluir que los datos de este elemento no siguen una distribución normal.

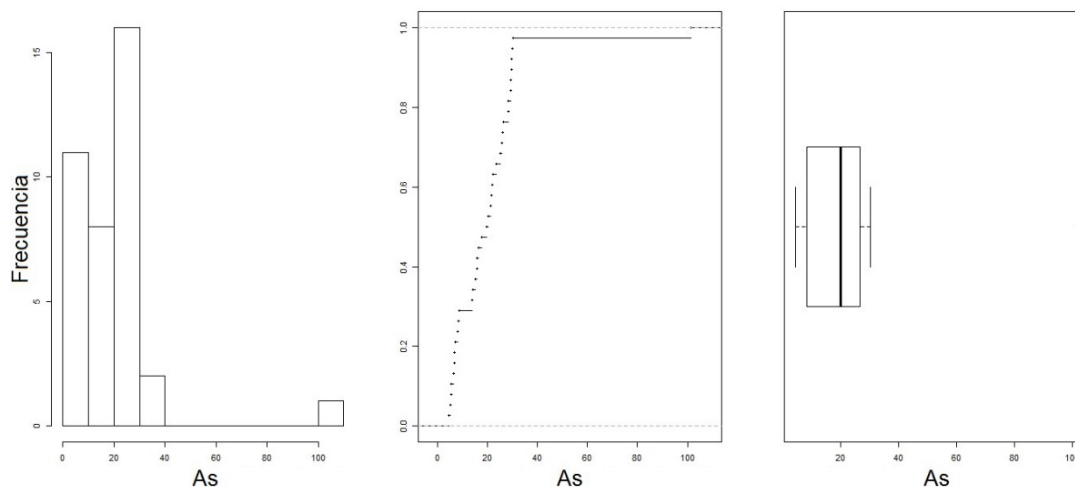


Figura 35. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 36**, se puede observar que la distribución del elemento Cu tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, lo que se puede inferir que la media es mayor a la mediana. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta no cumple con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, en el box plot existe la presencia de cuatro valores mayores al bigote superior de los datos y esto ocurre en las muestras RM 26, RM 24, RM 34 T y RM 04. De los tres gráficos analizados anteriormente, se pudo llegar a concluir que los datos del elemento cobre de esta región no siguen la distribución normal.

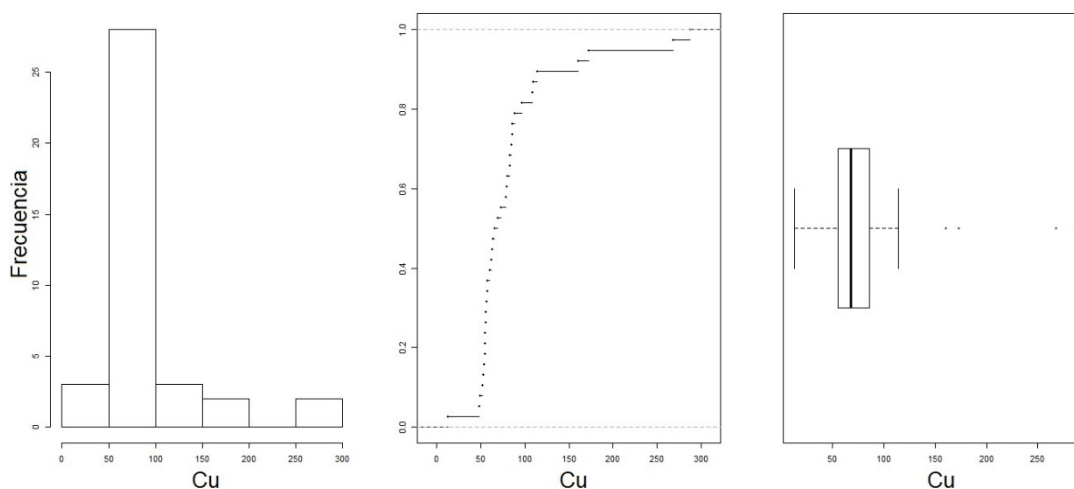


Figura 36. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el primer gráfico de la **Figura 37**, se puede observar un sesgo negativo del conjunto de datos del níquel, pudiéndose inferir que la media es menor a la mediana de estos. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este elemento no tiende a comportarse como una distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que existe un mayor distanciamiento entre el bigote inferior y el primer cuartil, lo que demostraría que este elemento no tiene un diagrama de caja simétrico. De todo este análisis se puede concluir que los datos no siguen la distribución normal.

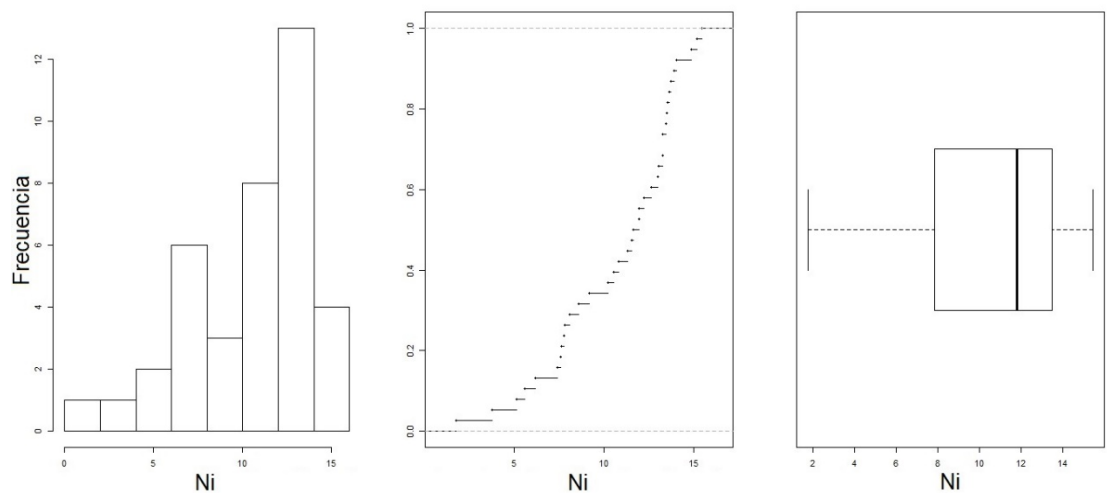


Figura 37. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg⁻¹).

En el histograma del plomo en la **Figura 38**, se puede apreciar que la distribución de este elemento tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, por lo que se puede inferir que la media es superior a la mediana de los datos. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que la curva tiende a tener la forma de S típica de distribución normal, aunque de manera no tan clara. En el box plot del panel, se puede observar que existe una muestra que supera ostensiblemente a los demás datos y agregando que el gráfico tiene cierta simetría. Tal situación ocurre en la muestra RM 04, con una concentración de Pb de 35.7 mgkg⁻¹. Finalmente, por todo lo anterior es posible aseverar que este elemento tiende a comportarse como la distribución normal.

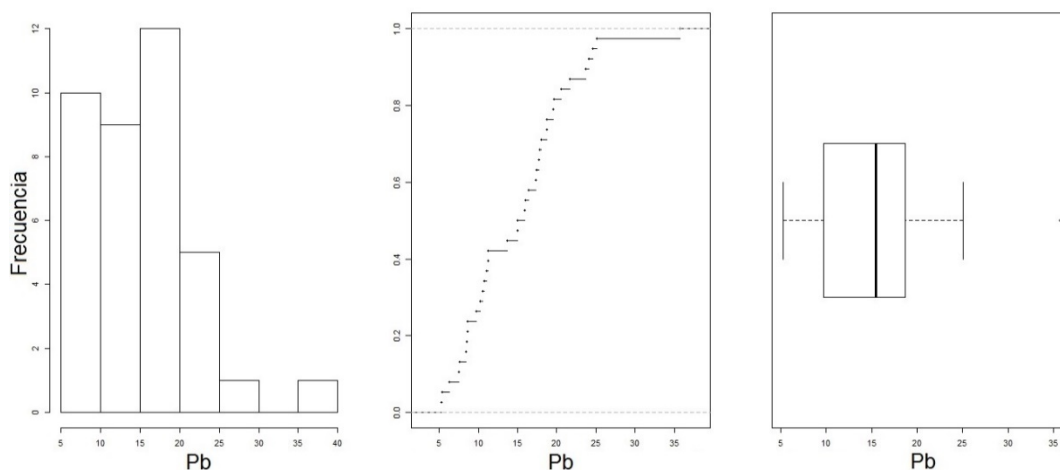


Figura 38. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg⁻¹).

En el histograma de la **Figura 39**, la distribución del elemento Se no tiende a seguir una distribución normal, por el contrario, presenta sesgo positivo. Por otro lado, en el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta no tiene la forma típica de S de la distribución normal. Para terminar, se puede observar que el box plot tiene una forma muy achatada, con los cuartiles y bigotes muy cercanos entre sí. Además es posible apreciar la existencia de dos muestras que están muy por encima del bigote superior. Por lo anterior, se puede concluir que las concentraciones de selenio de las muestras recolectadas en esta región no siguen una distribución normal.

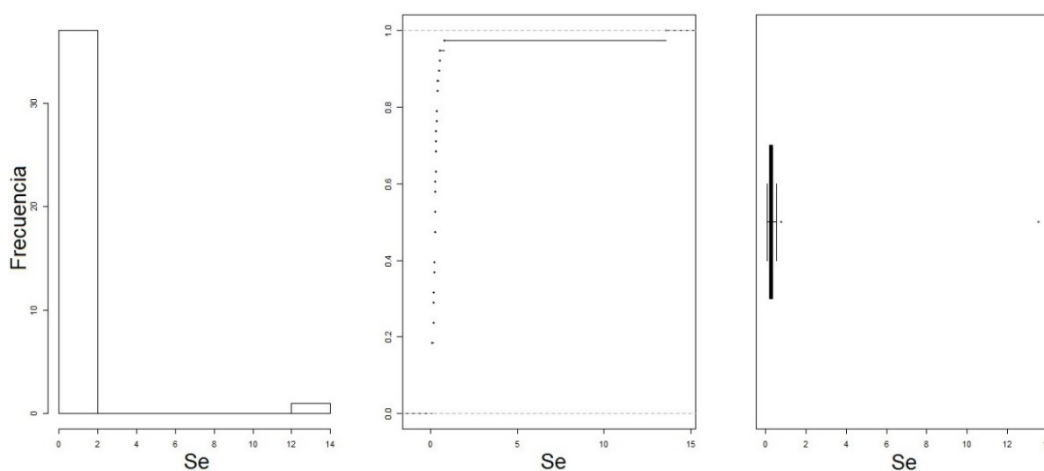


Figura 39. Representaciones gráficas del AED del elemento Se, con respecto a las concentraciones (mgkg⁻¹).

En la **Figura 40**, se presentan los gráficos utilizados para el AED de las concentraciones de zinc de las muestras recolectadas en la Región Metropolitana de Santiago. En el histograma del panel, se puede apreciar que la distribución de este elemento tiende a seguir una distribución normal. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar este tiene la forma de S típica de distribución normal. Sin embargo, no es suficiente para asegurar que este elemento sigue una distribución normal. En el tercer grafico del panel se puede observar que existe una muestra que supera ostensiblemente a los demás datos. Tal situación ocurre en la muestra RM 04, con una concentración de Zn de 184 mgkg^{-1} . Por lo tanto, por todo lo dicho anteriormente es posible concluir que este elemento tiende a seguir una distribución normal.

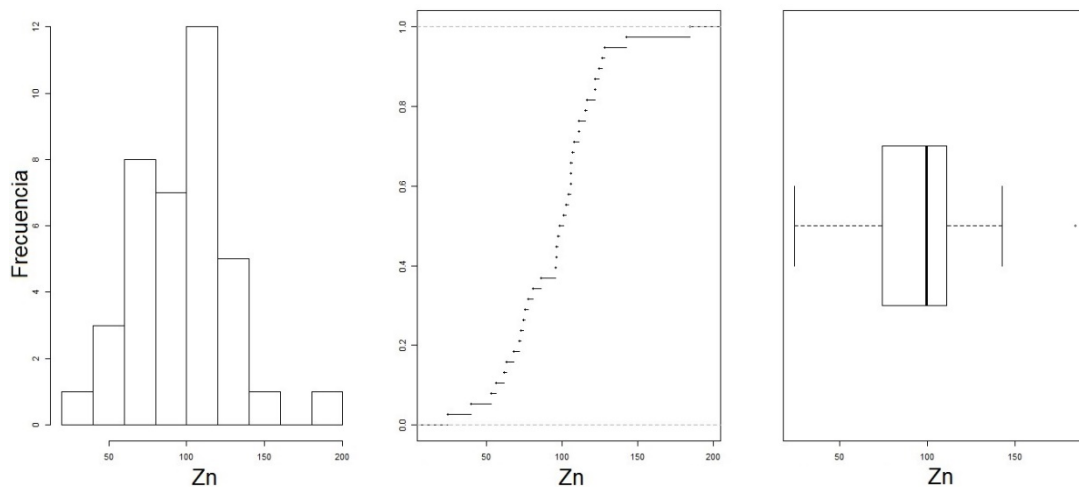


Figura 40. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 41**, se puede observar que los datos del parámetro pH tienen sesgo negativo con la cola hacia la izquierda. Por otro lado, en el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta tiende a la forma de S típica de la distribución normal con algunas irregularidades. Continuando con el tercer grafico del panel, en este se pueden distinguir cuatro muestras que están bajo el bigote inferior. Por lo dicho anteriormente, se puede inferir que los datos de este parámetro no siguen una distribución normal.

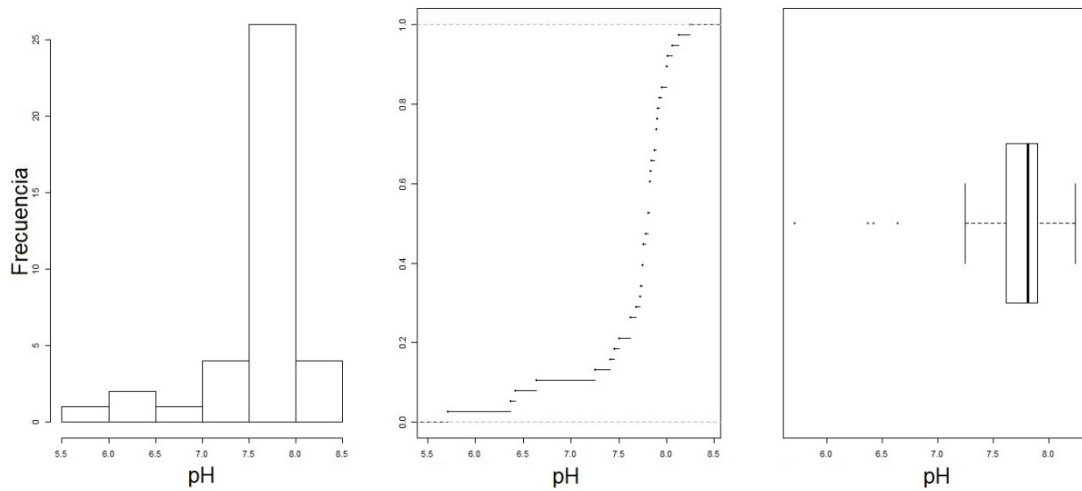


Figura 41. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.

En el histograma del parámetro CE en la **Figura 42**, se observa que la distribución de los datos es asimétrica con un sesgo positivo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta no tiene la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existe un valor atípico por encima del bigote superior. Además, cabe destacar que en este grafico se puede ver un notorio distanciamiento entre el tercer cuartil y el bigote superior.

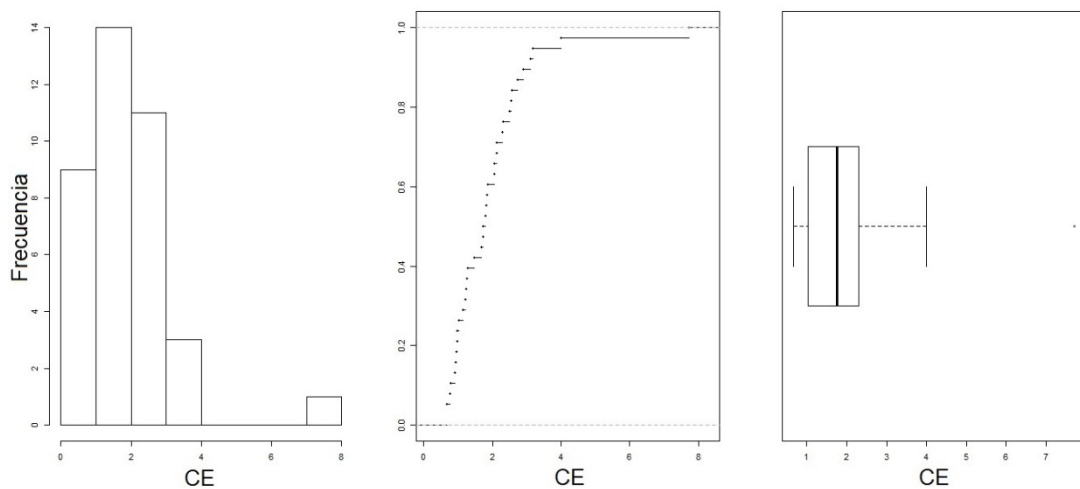


Figura 42. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida $mS\ gr^{-1}$.

En el histograma de la **Figura 43**, se puede observar que la distribución del parámetro MO tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha. Continuando con el análisis, en el segundo gráfico del panel se puede apreciar que los datos no cumplen con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existe la presencia de un valor que está muy por encima del bigote superior. De los tres gráficos analizados anteriormente, fue posible llegar a concluir que los datos del parámetro materia orgánica de esta región no siguen la distribución normal.

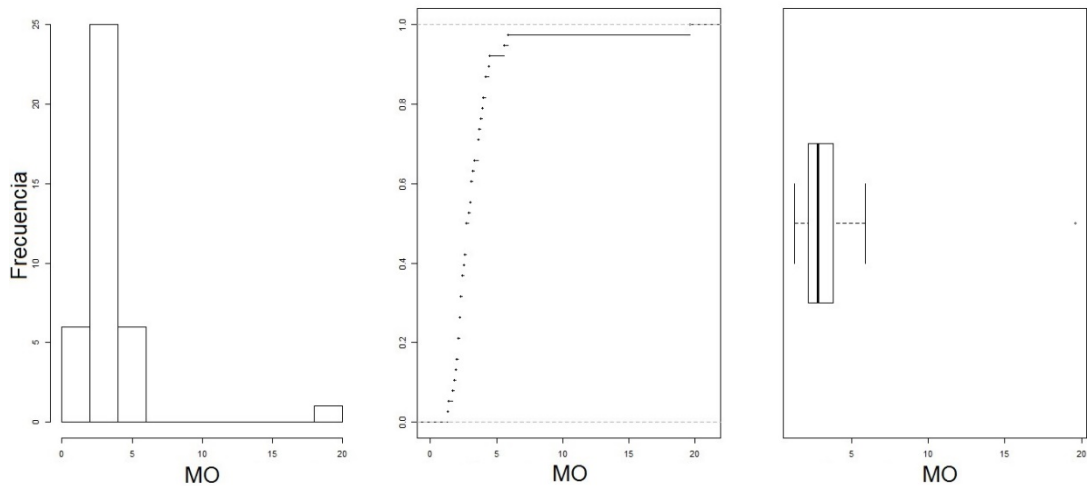


Figura 43. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.

En la **Figura 44**, se presentan los gráficos utilizados para el AED del parámetro capacidad de intercambio catiónico determinado para las muestras recolectadas en la Región Metropolitana de Santiago. En el primer gráfico del panel, se puede observar que el histograma de los datos es asimétrica con sesgo positivo. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este parámetro no tiende a tener la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que existe una cierta simetría. Pero cabe agregar que también es posible distinguir la presencia de dos valores atípicos. Estos dos casos ocurren en valores que se encuentran por encima del bigote superior. De todo el análisis descrito anteriormente, se puede concluir que los datos no siguen la distribución normal.

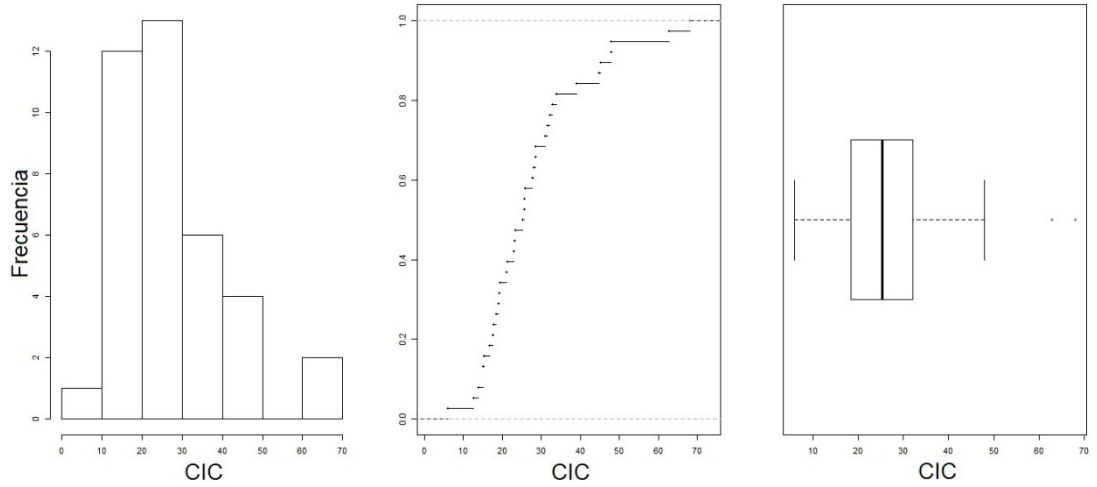


Figura 44. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$.

En el histograma de la **Figura 45**, se puede observar que la distribución de los datos del porcentaje de arena tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta curva no tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel se puede que existen muestras que superan a los demás datos. Finalmente, por todo lo anterior, se puede aseverar que este parámetro no tiende a comportarse como la distribución normal.

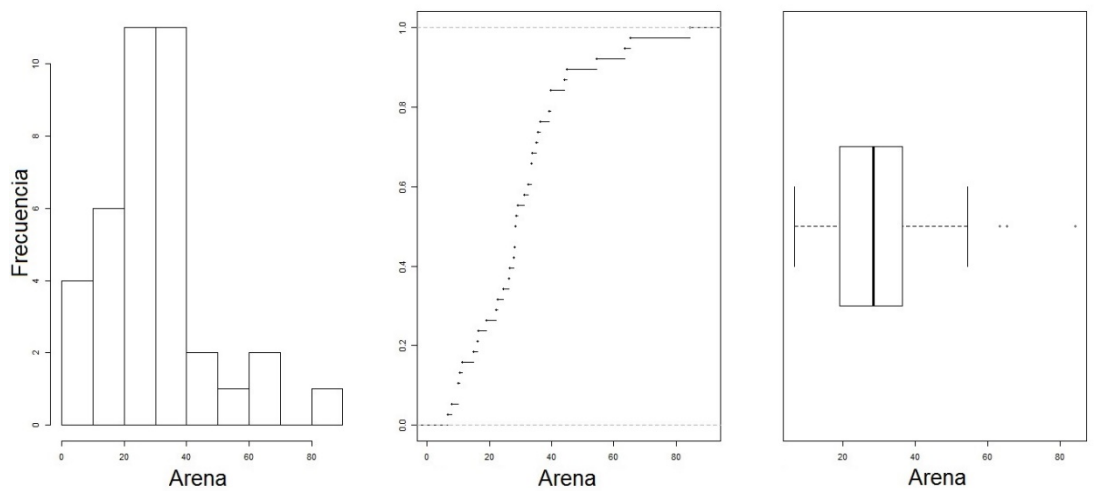


Figura 45. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).

En el histograma de la **Figura 46**, se puede apreciar que la distribución del parámetro porcentaje de limo no tiende a seguir una distribución normal, por el contrario, presenta sesgo negativo con la cola en dirección hacia la izquierda. En el gráfico de frecuencia acumulada del panel se puede apreciar que el diagrama de los datos tiene una curva parecida a la forma típica de S de la distribución normal, pero con algunas irregularidades. Para terminar, en el box plot se puede observar la existencia de datos atípicos que están por debajo del bigote inferior. Por lo anterior, es posible concluir que el parámetro porcentaje de limo no sigue una distribución normal.

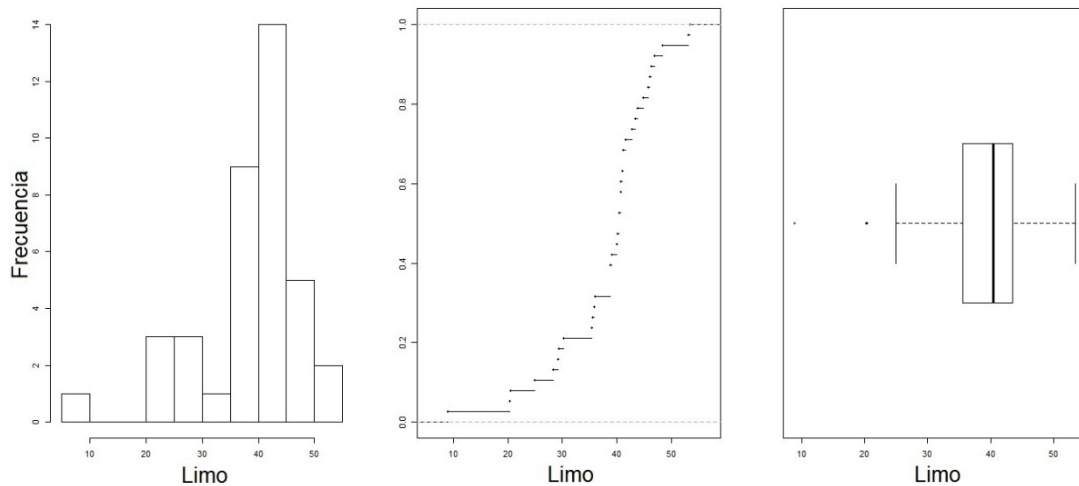


Figura 46. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).

En la **Figura 47**, se presentan los gráficos utilizados para el análisis exploratorio del parámetro porcentaje de arcilla determinado de las muestras extraídas en la Región Metropolitana de Santiago. En el primer gráfico del panel, se puede apreciar que la distribución de este parámetro tiende a seguir una distribución normal, pero con un salto o quiebre entre los valores 50 y 60%. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta curva tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. Por último, en el tercer gráfico del panel donde se muestra el box plot, se puede apreciar que existe una muestra que está por debajo del bigote inferior y otra que se encuentra por encima del bigote superior. Por todo lo dicho anteriormente, es posible concluir que este parámetro tiende a seguir una distribución normal.

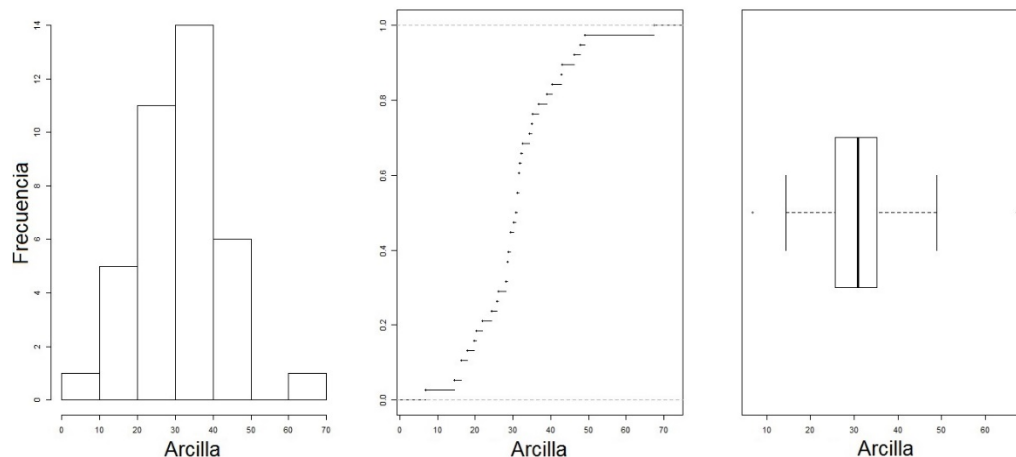


Figura 47. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).

4.2.2. Análisis univariado de la Región Metropolitana de Santiago.

A continuación se realizó el respectivo análisis univariado para la Región Metropolitana de Santiago, en el cual se trataron por separado a las variables que representan propiedades de los suelos y a las concentraciones totales de ETM utilizados en este trabajo.

4.2.2.1. Propiedades de los suelos.

En la **Tabla 21**, se presentan los estadísticos descriptivos de los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de arena, limo y arcilla, determinados de las muestras de suelo extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. Los parámetros porcentajes de tamaño de partículas, en la tabla se puede observar que existe un predominio del porcentaje de limo, con un 61% de las muestras que contienen mayor porcentaje de limo que de arena y arcilla. Conforme a la clasificación propuesta por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, USDA (Soil Survey Division Staff, 1993), los suelos en estudio eran generalmente de textura franco arcillosa o franca. Profundizando en esto, el 18% de los suelos fueron de texturas finas, un 53% moderadamente fina y un 18% de textura media.

Con respecto a las unidades de pH medidas, estas se pueden clasificar en diferentes categorías dependiendo de su valor (Soil Survey Division Staff, 1993). A continuación, los porcentajes de muestras en cada una de las categorías se presentan de la siguiente manera:

3% de las muestras corresponden a moderadamente ácido (pH entre 5.6 y 6.0), 5% de estas son ligeramente ácidas (pH entre 6.1 y 6.5), 5% a neutro (pH entre 6.6 y 7.3), 61% a ligeramente alcalino (pH entre 7.4 y 7.8) y 26% moderadamente alcalino (pH entre 7.9 y 8.4). De los estadísticos se puede destacar la cercanía entre los valores de la media y la mediana, además de una baja dispersión y muy bajo valor de CV, cercano a 0, con lo cual se pudo inferir la homogeneidad del conjunto de datos de pH.

El parámetro de conductividad eléctrica, a partir de la mediana y SD fue posible deducir que una gran cantidad de muestras presentaron valores de CE menores a 2 mSgr^{-1} , con lo que se puede concluir que en las muestras de esta región existe una gran cantidad de los suelos que son no salinos, de acuerdo con la clasificación propuesta por el USDA (Soil Survey Division Staff, 1993). Profundizando en este punto, el 61% de los datos correspondieron a muestras no salinas y solo un 34% de estas pertenecen a la clase muy ligeramente salina (valores de CE entre 2 y 4 mS gr^{-1}). Por esto, existe un 5% de las muestras que fueron superiores al valor de 4 mS gr^{-1} , con lo que se puede aseverar que en estas se reflejan problemas de salinidad del suelo, según los criterios del USDA, y que este puede estar originado por un exceso de sales en las aguas de riego o por problemas de drenaje que, indirectamente, producen acumulaciones salinas en la superficie o en diferentes profundidades del suelo (Ruiz, 1984).

Del total de datos del parámetro materia orgánica, para cada una de las categorías de clasificación según el tipo orden de taxonomía de suelos, se tiene que un 74% de las muestras tuvieron muy bajo contenido de MO y un 18% corresponde a bajo contenido de esta. Estos bajos contenidos de MO son consecuencia de un uso intensivo de los suelos en estudio. Por lo tanto, en esta región existe un porcentaje muy alto de muestras con problemas de materia orgánica.

De la tabla se puede apreciar que la mediana y la media poseen valores no muy cercanos, pero debido a la mediana se puede deducir que un poco más del 50% de las muestras superan los $25 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, por lo tanto se puede asegurar que este porcentaje de muestras poseen alta fertilidad. Por último, mediante el parámetro capacidad de intercambio catiónico es posible determinar la clase de fertilidad de los suelos (Fernández

et al., 2006). Mediante esto se puede aseverar que un 16% de las muestras tiene una fertilidad muy alta, 37% alta fertilidad y un 39% corresponden a la clase fertilidad media. Además, es importante mencionar que un 8% de las muestras presentaron una baja capacidad de almacenamiento de nutrientes ($CIC < 10 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$) (Fernández et al., 2006).

Tabla 21. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región Metropolitana de Santiago.

Estadísticos Descriptivos	pH	CE (mS gr ⁻¹)	MO (% bs)	CIC (Cmol (+) kg ⁻¹)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Media	7.6	1.9	3.4	27.6	30.6	38.2	31.1
SD ^a	0.52	1.3	2.9	13.4	16.6	9.1	11.1
Mediana	7.8	1.8	2.8	25.3	28.5	40.4	30.9
Mínimo	5.7	0.70	1.3	6.0	6.6	8.9	6.8
Máximo	8.2	7.7	19.6	68.0	84.3	53.4	67.3
Rango	2.5	7.0	18.3	62.0	77.7	44.5	60.5
CV (%) ^b	0.07	0.65	0.84	0.49	0.54	0.24	0.36

^a Desviación Estándar

^b Coeficiente de Variación

4.2.2.2. Concentraciones totales de ETM.

En la **Tabla 22**, se puede observar que para la Región Metropolitana de Santiago se extrajeron un total de 38 muestras. En esta se puede apreciar que los elementos Cu y Zn (85.3 y 95.6 mgkg⁻¹, respectivamente) presentan altas concentraciones en promedio comparados con los elementos restantes. Además, estos mismos elementos presentan una gran variabilidad (54.5 y 30.0 mgkg⁻¹, respectivamente), con respecto al Cu se puede concluir que existe una enorme dispersión de las concentraciones sobre la media de las muestras extraídas, una posible explicación para esta variabilidad estaría asociada a actividades industriales en algunas sub-áreas o derechamente producto de puntos contaminados. Los elementos Ni y Pb presentan bajas desviaciones, no superando los 6.7 mgkg⁻¹, lo que nos indica que los datos se encuentran cerca de su media.

Tabla 22. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg^{-1}) de las variables As, Cu, Ni, Pb, Se y Zn, obtenidos de las muestras de la Región Metropolitana de Santiago.

Estadísticos Descriptivos	As	Cu	Ni	Pb	Se	Zn	
Número de Muestras	38	38	38	38	38	38	
Media	20.3	85.3	10.8	15.1	0.62	95.6	
SD ^a	16.1	54.5	3.4	6.7	2.2	30.0	
Mediana	20.0	67.7	11.8	15.4	0.27	99.6	
MAD ^b	8.4	14.1	1.9	4.8	0.08	20.5	
Sesgo	3.5	2.6	-0.81	0.74	6.1	0.15	
Curtosis	17.2	7.1	-0.09	0.87	37.6	1.3	
Rango	96.7	274	13.7	30.4	13.5	160	
Mínimo	4.5	12.9	1.8	5.3	0.08	24.5	
Máximo	101	286	15.4	35.7	13.5	184	
CV (%) ^c	79.1	63.9	31.8	44.1	345.6	31.4	
	5	5.3	46.6	3.7	5.4	0.08	39.3
	25	8.3	55.4	7.8	9.4	0.19	74.0
Percentiles	50	20.0	67.7	11.8	15.4	0.27	99.6
	75	27.0	86.6	13.5	18.9	0.36	112
	95	33.8	269	15.2	25.6	1.4	144

^a Desviación Estándar

^b Desviación Absoluta de la Mediana

^c Coeficiente de Variación

A continuación, considerando el coeficiente de asimetría o sesgo se pudo observar que todos los elementos, excepto el Ni, presentaron un valor positivo de este coeficiente, es decir, gran parte de las concentraciones de cada elemento se encuentran bajo la media. En el caso de los elementos Ni, Pb y Zn que tuvieron un valor muy cercano a 0, de lo cual se pudo deducir que los datos de estos elementos se distribuyen de forma uniforme alrededor de la media. Además es importante señalar que los elementos As, Cu y Se presentaron valores de coeficiente de asimetría mayores a 1, infiriéndose que estos se encuentran fuertemente sesgados. El valor de asimetría más alto de todos, ocurrió en el elemento Se, con un coeficiente de asimetría de 6.1. Con respecto a esto se puede señalar que existen una o más muestras notoriamente contaminadas con Se, debido a la presencia de una fuente puntual de contaminación, lo cual produce un aumento de la concentración local y a su vez un mayor coeficiente de asimetría. Cabe agregar que la curtosis de todos elementos,

excepto el Ni, son valores positivos, esto indica que la distribución es más puntiaguda que la distribución normal. Para el caso del elemento Ni, donde la curtosis tiene valor negativo, este indica que los datos tienen una distribución más achatada que la normal.

Por otro lado, en la tabla se puede apreciar que el coeficiente de variación de todos los elementos, excepto el elemento Se, tienen un valor menor a 1 con lo cual podemos concluir que sus datos son homogéneos. Por el contrario, el elemento Se tiene un valor de coeficiente de variación mayor a 1.5 con lo cual podemos asegurar que los datos son heterogéneos.

Cabe señalar que los elementos Cu y Zn presentan una gran amplitud de datos (274 y 160 mgkg^{-1} , respectivamente), haciendo presumir la presencia de suelos contaminados con este metal. Por el contrario, para el elemento selenio se tiene un rango de datos de 13.5 mgkg^{-1} . Con respecto a las muestras que presentan concentraciones de ETM inferiores al límite de detección, en esta región se sabe que el elemento Ni y Se presentan un 3 y 18%, respectivamente, del total de muestras que no superan tal límite. En cambio el Cd tiene un 34% de datos, por lo que este elemento ha sido descartado para todos los análisis hechos en esta región.

Para terminar, de lo analizado anteriormente se pudo concluir que para la Región Metropolitana de Santiago ninguno de los ETM y parámetros en estudio, excepto el Pb, Zn y arcilla, tiende a una distribución normal.

4.2.3. Análisis multivariado de la Región Metropolitana de Santiago.

En el comportamiento de los ETM con los parámetros considerados, y las relaciones entre elementos se realizó el siguiente tratamiento multivariado a los datos de la Región Metropolitana de Santiago. Se efectuaron los análisis de correlación de Spearman entre ETM, correlación de Spearman entre ETM y parámetros, análisis de componentes principales (ACP) y análisis Cluster.

4.2.3.1. Correlación de Spearman entre ETM de la Región Metropolitana de Santiago.

Para entender las relaciones que pueden existir entre los elementos traza metálicos de la Región Metropolitana de Santiago, se efectuó un análisis de correlación de Spearman. Las medidas de correlación del análisis realizado a la región en referencia se obtuvieron mediante el software IBM SPSS, y las cuales son presentadas en la **Tabla 23**.

Tabla 23. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cu, Ni, Pb, Se y Zn de la Región Metropolitana de Santiago.

	As	Cu	Ni	Pb	Se	Zn
As	1.0					
Cu	-0.13	1.0				
Ni	0.22	0.43**	1.0			
Pb	0.61**	0.17	0.55**	1.0		
Se	0.57**	-0.11	0.03	0.22	1.0	
Zn	0.52**	0.21	0.47**	0.79**	0.11	1.0

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 24**, se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos. Con respecto a esta tabla, es posible apreciar que las correlaciones más altas se encuentran entre los elementos Zn y Pb, la que mostraría una correlación bastante fuerte entre estos ETM, esta gran correlación podría ser evidencia de un origen similar de estos ETM, posiblemente de actividades antrópicas. También se observaron correlaciones moderadas entre Pb/As, Se/As, Pb/Ni, Zn/As y Zn/Ni, posiblemente indicando la adición de estos ETM de diferentes fuentes. Estas correlaciones significativamente positivas entre ETM sugieren una fuente en común (Al-Khashman & Shawabkeh, 2006). Sin embargo, las correlaciones significativas no siempre representan que sea una fuente en común (Hani & Pazira, 2011). Esto implica que el análisis de correlación por sí solo no es suficiente para poder identificar una posible fuente de contaminación de metales pesados, si no debe ser llevado a cabo junto con otras herramientas de análisis.

Fue posible notar que las relaciones Pb/Cu y Cu/As presentan correlaciones relativamente escasas entre estos con medidas de correlación menores a 0.20 y en el caso de la relación entre Se/Ni que presentó un valor bastante bajo, lo cual permite inferir que la correlación entre estos elementos es casi nula. Así mismo, se puede apreciar que el Ni tiene correlaciones moderadas con Pb y Zn, debido a su posible procedencia de fuentes antropogénicas. Por último, existe una escasa a casi nula correlación entre los elementos Pb y Zn, de posible origen antropogénico, y los elementos Cu y Se, revelando un posible origen de fuentes diferentes de estos últimos. Otro punto importante a mencionar es la correlación moderada que existe entre el As y los elementos Pb y Se, esto permite inferir que este elemento pudo haber sido resultado tanto de actividades humanas como de material parental del suelo.

Tabla 24. *Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región Metropolitana de Santiago.*

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Zn/Pb	0.79**
2	Pb/As	0.61**
3	Se/As	0.57**
4	Pb/Ni	0.55**
5	Zn/As	0.52**
6	Zn/Ni	0.47**
7	Ni/Cu	0.43**
8	Ni/As	0.22
9	Se/Pb	0.22
10	Zn/Cu	0.21
11	Pb/Cu	0.17
12	Cu/As	-0.13
13	Se/Cu	-0.11
14	Zn/Se	0.11
15	Se/Ni	0.03

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

4.2.3.2. Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.

Asimismo, con la finalidad de ver las relaciones que pueden existir entre los ETM y los parámetros de propiedades del suelo, se realizó el respectivo análisis de correlación de Spearman. En la **Tabla 25** se presentan los coeficientes de correlación del análisis anteriormente mencionado.

Tabla 25. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.

	pH	CE	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
As	0.15	0.34*	0.20	-0.32	-0.11	0.22	0.04
Cu	0.34*	-0.01	-0.20	0.05	-0.21	0.07	0.14
Ni	0.40*	0.13	0.13	0.12	-0.48	0.48**	0.39*
Pb	0.35*	0.33*	0.13	-0.27	-0.12	0.21	0.04
Se	0.1	0.21	0.09	-0.1	-0.09	0.16	0.12
Zn	0.26	0.10	0.32*	-0.24	-0.13	0.07	0.12

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 26** y **Tabla 27**, se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos.

En la tablas, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre el elemento Ni y el parámetro limo, lo que mostraría una correlación significativamente positiva entre estos. Existen correlaciones significativamente positivas entre el contenido de la mayoría de ETM y pH del suelo o el parámetro CE, en menor medida. También fue posible observar que las concentraciones de As, Ni, Pb y el contenido de limo muestran una correlación positiva. Todas estas correlaciones significativamente positivas entre ETM y parámetros, mencionadas anteriormente, pueden indicar que estos últimos tienen influencia sustancial en el contenido total de estos metales en los suelos.

Tabla 26. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Ni/Limo	0.48**
2	Ni/Arena	-0.48
3	Ni/pH	0.40*
4	Ni/Arcilla	0.39*
5	Pb/pH	0.35*
6	Cu/pH	0.34*
7	As/CE	0.34*
8	Pb/CE	0.33*
9	Zn/MO	0.32*
10	As/CIC	-0.32
11	Pb/CIC	-0.27
12	Zn/pH	0.26
13	Zn/CIC	-0.24
14	As/Limo	0.22
15	Pb/Limo	0.21
16	Se/CE	0.21
17	Cu/Arena	-0.21
18	Cu/MO	-0.20
19	As/MO	0.20
20	Se/Limo	0.16
21	As/pH	0.15
22	Cu/Arcilla	0.14
23	Zn/Arena	-0.13
24	Ni/CE	0.13
25	Ni/MO	0.13
26	Pb/MO	0.13
27	Ni/CIC	0.12
28	Pb/Arena	-0.12
29	Se/Arcilla	0.12
30	Zn/Arcilla	0.12
31	As/Arena	-0.11
32	Zn/CE	0.10

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Tabla 27. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago. (Continuación)

Posición	Combinación	Coefficiente
33	Se/pH	0.10
34	Se/CIC	-0.10
35	Se/MO	0.09
36	Se/Arena	-0.09
37	Cu/Limo	0.07
38	Zn/Limo	0.07
39	Cu/CIC	0.05
40	Pb/Arcilla	0.04
41	As/Arcilla	0.04
42	Cu/CE	-0.01

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Se encontraron correlaciones relativamente débiles o casi nulas entre los parámetros MO, arena, arcilla, y los ETM. La falta de una correlación significativa entre las propiedades del suelo y los metales pesados se puede atribuir a una entrada continua de metales pesados o la presencia de varias fuentes de contaminación (Chen et al., 2008), ya que la liberación y transporte de metales pesados corresponden a procesos complejos (Grant & Sheppard, 2008). Otra posible explicación es que puede haber variaciones en el tipo de suelo, el uso de fertilizantes y el sistema de cultivo dentro del área de muestreo (Grant & Sheppard, 2008).

4.2.3.3. Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.

Con el análisis de componentes principales (ACP) fue posible encontrar relaciones entre elementos traza metálicos y propiedades edáficas, y por consiguiente poder identificar probables fuentes de contaminación de dichos ETM en la Región Metropolitana de Santiago. En la **Tabla 28**, se presentan los resultados de los factores de carga y varianza explicada del ACP. En la esta, se puede apreciar que se extrajeron 3 componentes principales que explican el 74.1% de la varianza total de los datos, aplicando el criterio

Kaiser para la selección del número de factores o componentes. Esto último se puede apreciar en la **Tabla 68** del Anexo II, en este se encuentra información adicional del ACP. En la **Figura 48**, se presenta una representación gráfica de los patrones de componentes de los ETM y parámetros en estudio para esta región.

Tabla 28. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.

ETM y Parámetros	Componentes Principales		
	CP 1	CP 2	CP 3
As	0.94	0.04	0.12
Cu	-0.12	0.20	0.57
Ni	-0.26	0.46	0.67
Pb	0.14	-0.13	0.91
Se	0.94	0.15	-0.23
Zn	-0.15	-0.09	0.87
pH	0.02	0.33	0.57
CE	0.86	0.05	0.02
MO	0.89	0.27	-0.20
CIC	0.30	0.83	-0.29
Arena	-0.12	-0.93	-0.25
Limo	0.10	0.62	0.37
Arcilla	0.09	0.90	0.09
Porcentaje Varianza Explicada (%)	32.4	28.3	14.9
Porcentaje Varianza Explicada Acumulada (%)	32.4	60.7	75.6

La primera componente (CP1) explica un 32.4% de la varianza total. Donde los coeficientes de carga son mayores a 0.86, los cuales son aportados por los elementos As y Se, y los parámetros CE y MO. Por un lado, los elementos As y Se no poseen grandes porcentajes de muestras con concentraciones superiores a los valores de fondo, en promedio un 8% del total de muestras. Por otro lado, el As presenta correlación moderada tanto como con el selenio como con algunos elementos que pertenecen a la CP3, componente de los cuales sus elementos proceden de fuentes antropogénicas. Todo esto parece evidenciar que este recibe aportes tanto de material originario como de actividades

antrópicas de al menos una fuente en común con la CP3, el cual influiría en la concentración alcanzada de estos metales en los suelos estudiados. Esto último, debido a su correlación con elementos de procedencia de actividades humanas, pero no ocurriría lo mismo con el Selenio.

La segunda componente (CP2) explica un 32.5% de la varianza total. Este factor lo componen los parámetros CIC, arena, limo y arcilla, con factores de carga iguales a 0.83,-0.93, 0.62 y 0.90, respectivamente. Aunque el Ni tiene cierta relación con esta componente principal, ya que presenta un factor de carga relativamente considerable y esto posiblemente muestre que este está recibiendo aportes de dos fuentes diferentes. Esta componente representa a propiedades del suelo y con el parámetro porcentaje de arena que contrapone el peso de las demás variables.

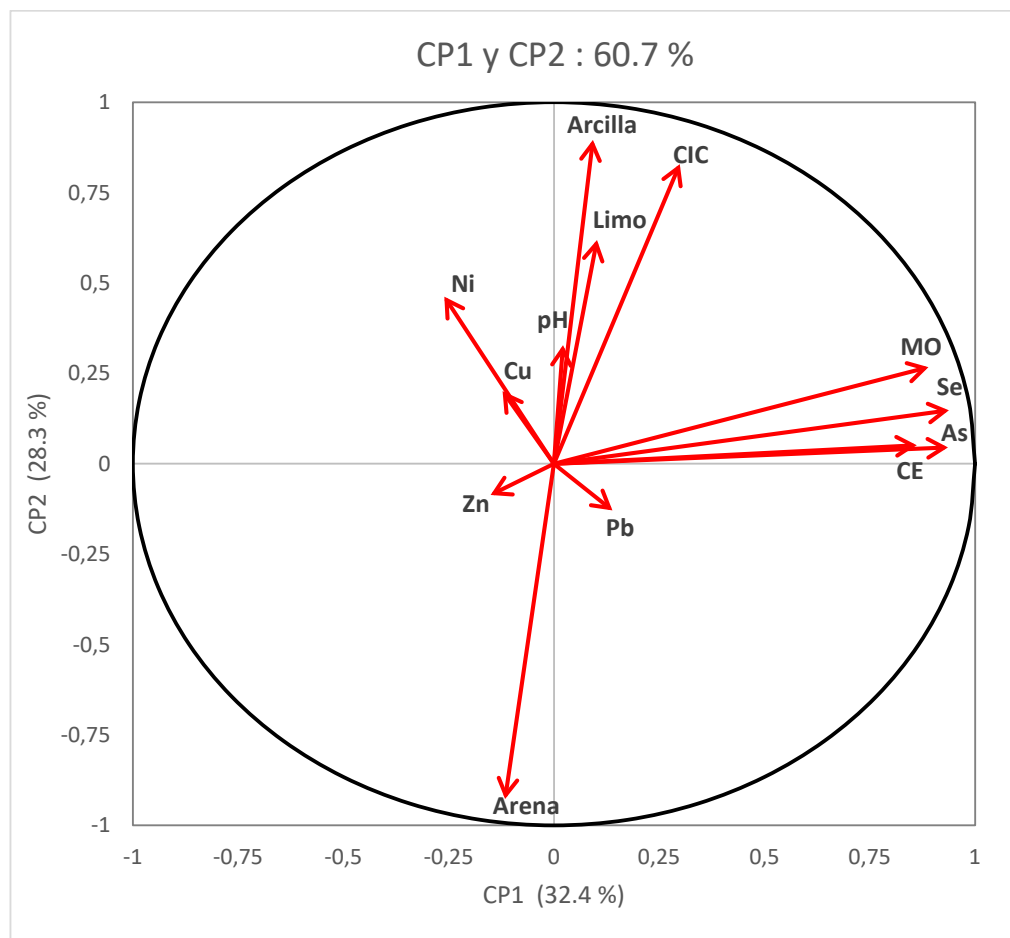


Figura 48. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región Metropolitana de Santiago.

La tercera componente (CP3) explica un 14.9% de la varianza total. Este factor lo componen los elementos Cu, Ni, Pb y Zn y el parámetro pH, con factores de carga iguales a 0.57, 0.67, 0.91, 0.87 y 0.57, respectivamente. Tres elementos (Ni, Pb y Zn) de esta componente presentaron en promedio un 97% de las muestras con concentraciones menores a los valores de fondo de los 3 elementos. Solo el Cu presentó un porcentaje relativamente considerable de muestras que superan a su valor de fondo (aproximadamente un 21%). Debido a que el elemento Cu generalmente está más relacionado a procedencia de actividades humanas (Micó, 2005), esto sugiere un origen antropogénico de esta componente. Todo lo anterior, es consistente con lo realizado en el análisis de correlación de Spearman.

4.2.3.4. Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región Metropolitana de Santiago.

El análisis Cluster corresponde a una herramienta útil que permite clasificar e identificar posibles fuentes de ETM, tanto de origen antrópico como natural, además de ayudar a corroborar el ACP de la región en referencia. La representación gráfica del análisis Cluster (dendrograma) se presenta en la **Figura 49**, el cual se obtuvo aplicando el método de agrupación del vecino más próximo y distancia Euclídea al cuadrado.

En la figura, es posible apreciar que existe un parámetro con escasa asociación con las demás variables, este corresponde al parámetro arena. Esto ayuda a ratificar lo afirmado en el análisis de correlación de Spearman, ya que el parámetro arena tiene una casi nula correlación con casi todos los ETM, excepto el Ni que presenta correlación significativamente negativa.

El primer grupo lo componen los elementos Cu, Ni, Pb y Zn, y los parámetros pH y limo. En la figura se puede observar que este grupo se divide en 2 subgrupos, separados uno de otro en términos de distancias euclidianas al cuadrado. El primero lo compone los elementos Pb y Zn, este subgrupo corresponde a los elementos que tienen origen antrópico. También es posible apreciar que existe una gran asociación entre los elementos Pb y Zn, pudiéndose inferir que estos provienen de una misma fuente. Por otro lado está el segundo subgrupo que lo componen los elementos Cu y Ni, los cuales claramente parecen desligarse del resto de ETM, para así formar un subgrupo. Debido a la distancia que existe entre estos

2 subgrupos, sugiere que estos provienen de fuentes diferentes. Estos 2 subgrupos están relacionados entre sí debido a su origen antropogénico, pero parece razonable que estos tienen varias fuentes y al menos una fuente en común.

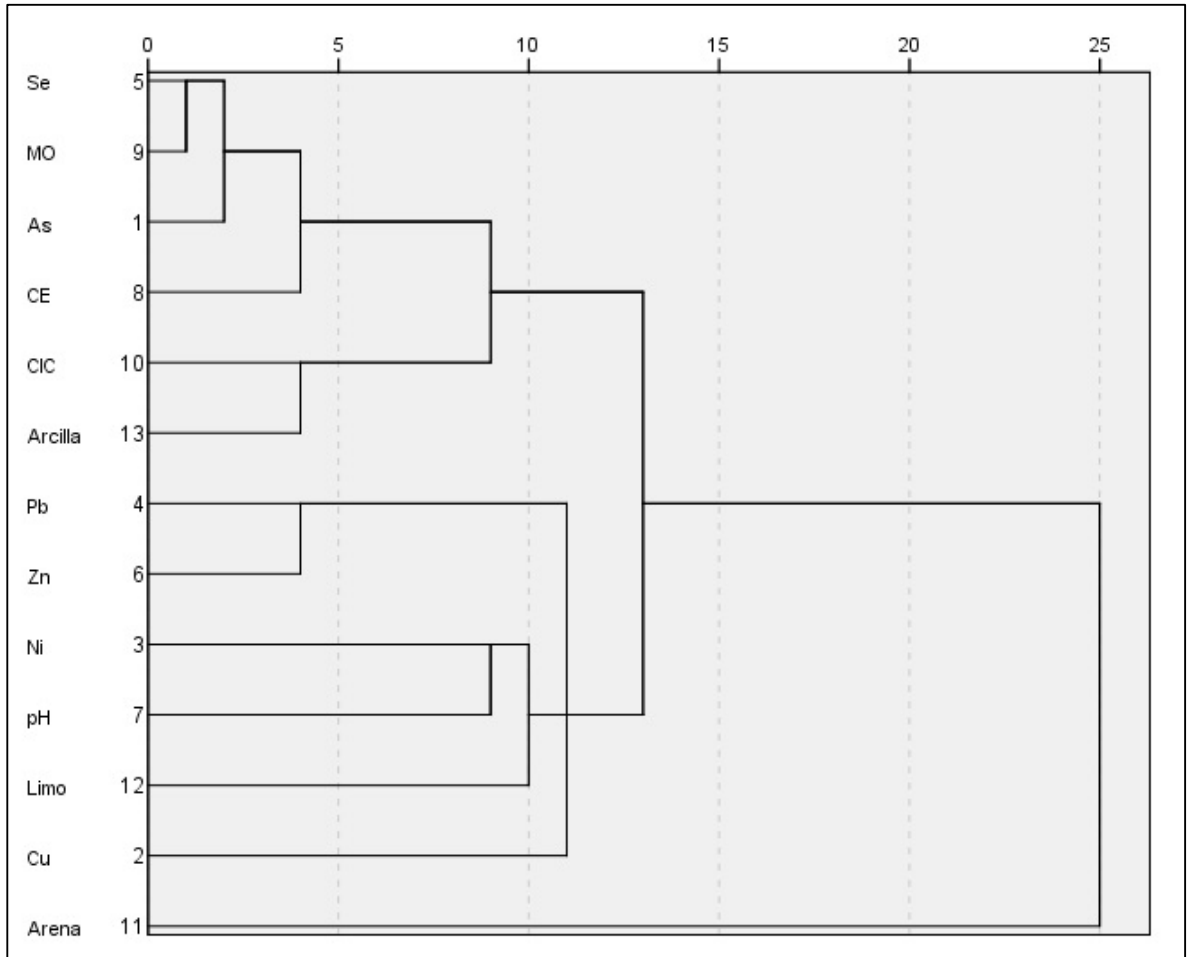


Figura 49. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.

En el segundo grupo se encuentran el elemento As, Se y los parámetros MO, CE, CIC y arcilla. En este también es posible apreciar la gran asociación que hay entre el As y el parámetro MO, propiedad edáfica que resulta muy relevante en los procesos de adsorción de los metales pesados. Por lo anterior, este grupo lo conforman elementos que claramente están relacionados entre sí debido a que reciben aportes predominantemente de origen antropogénicos. Aunque no se descarta que el As reciba aportes antrópicos de al menos una

fuente en común con el primer grupo, debido a que este presenta correlaciones moderadas con varios ETM que componen tal grupo. Todo esto corroborando las conclusiones obtenidas mediante el análisis de correlación de Spearman y componentes principales. Cabe señalar que formar este grupo no excluye completamente la influencia de procesos antropogénicos, la identificación de grupos se basa en la influencia dominante.

4.2.4. Background Values de los ETM de la Región Metropolitana de Santiago.

A fin de poder detectar valores atípicos en el conjunto de datos se usaron las técnicas estadísticas para la obtención de valores de fondo de cada ETM. Asimismo, se utilizaron valores umbrales citados por el SAG (INN, 2004) y además valores objetivo y de intervención calculados mediante la metodología propuesta como primera aproximación por esta mismo organismo del Estado de Chile, el cual corresponde a la normativa holandesa (VROM, 2000). Los valores umbrales obtenidos mediante los diferentes métodos anteriormente mencionados y el porcentaje de muestras que exceden dichos límites superiores para la Región Metropolitana de Santiago, son presentados en la **Tabla 29** y **Tabla 30**, respectivamente.

Tabla 29. Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región Metropolitana de Santiago.

Técnica Estadística	ETM (mgkg ⁻¹)						
	As	Cu	Ni	Pb	Se	Zn	
Boxplot	55.0	133	22.0	33.2	0.61	169	
Método [Median+2 MAD]	36.7	96.0	15.6	25.1	0.43	140	
Método iterative 2σ-technique	36.0	92.1	16.6	26.1	0.44	138	
Target Value	28.8	35.7	41.1	84.6	-	148	
Intervention Value	54.7	189	247	527	-	764	
Concentración Máxima	pH > 6.5	20.0	150	112	75.0	4.0	175
Permitida		pH < 6.5	12.5	100	50.0	50.0	3.0

En la **Tabla 29** y **Tabla 30**, se puede apreciar que el método [Median+2 MAD] presenta valores umbrales inferiores a los otros métodos utilizados para los elementos Ni, Pb y Se. Por consiguiente, tal método presentó un mayor número de muestras consideradas como

contaminadas debido a que exceden tal límite superior, tales proporciones de muestras no excederían el 14%. Al momento de comparar todos los métodos o concentraciones propuestas, fue posible observar que el método [Median+2 MAD] e Iterative 2 σ -technique son los que poseen los límites superiores con valores más bajos, a excepción del As y Cu. Como se dijo recién, la técnica Iterative 2 σ -technique presentó el valor de fondo más bajo para el elemento Zn, con proporción de muestras consideradas contaminadas del 5.3%. Con respecto al níquel fue posible observar que todos los métodos estadísticos no presentan muestras que excedan a los límites superiores de estos.

Cabe destacar, la metodología de la norma holandesa presenta un gran porcentaje de muestras contaminadas para el elemento Cu, con proporción de muestras contaminadas del 97.4%. Esto último, es debido a que esta normativa entrega un valor umbral de este elemento muy inferior a los métodos homólogos a este. Asimismo, considerando el valor de intervención fue posible observar que las muestras exceden dicho valor para los elementos arsénico y cobre, con un 2.6 y 5.3%, respectivamente.

Con respecto a los valores umbrales citados por el SAG, los niveles para el As serían las concentraciones límite más bajas con respecto a los demás métodos. Estos valores permitirían establecer que un 71.1% de las muestras estarían contaminadas considerando el límite superior entregado en la Norma Chilena (INN, 2004). Agregando a esto lo que ocurre para los elementos cobre y zinc, donde un 18.4% de las muestras, para ambos casos, sobrepasarían estos valores para suelos agrícolas de la macrozona en que se ubica el área de estudio.

Tabla 30. *Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región Metropolitana de Santiago.*

		As	Cu	Ni	Pb	Se	Zn
Boxplot		2.6	10.5	0	2.6	5.3	2.6
Método [Median+2 MAD]		2.6	21.1	0	2.6	13.2	5.3
Método iterative 2 σ -technique		2.6	21.1	0	2.6	13.2	5.3
Target Value		18.4	97.4	0	0	0	2.6
Intervention Value		2.6	5.3	0	0	0	0
Concentración Máxima	pH > 6.5	65.8	18.4	0	0	2.6	18.4
Permitida	pH < 6.5	5.3	0	0	0	0	0

Por otro lado, los valores umbrales citados por el SAG fueron los más altos para los elementos Cu, Ni, Se y Zn con respecto a los demás métodos. Por esto se tiene un menor porcentaje de muestras que superaron los límites superiores de dichos elementos, en los cuales se presentan proporciones de muestras contaminadas entre 0 y 18.4%. Asimismo, los valores obtenidos mediante los métodos Boxplot y de la normativa holandesa, presentaron los valores más altos comparado con los demás métodos para los elementos As y Pb, respectivamente, en los cuales se tuvieron proporciones inferiores al 2.6% de muestras que sobrepasen a tales límites superiores.

4.2.5. Interpolación IDW de la Región Metropolitana de Santiago.

Antes, en la **Figura 4** se muestra la ubicación geográfica de las muestras recolectadas en la Región Metropolitana de Santiago, con la respectiva identificación de cada una de estas. Cabe señalar, se utilizó el mapa de catastro frutícola del Ministerio de Agricultura de Chile³, para localizar geográficamente las agroindustrias frutícolas cercanas a zonas con niveles críticos o de posible contaminación por ETM. En los siguientes apartados se presenta el análisis de los mapas de distribución de ETM obtenidos mediante el método Distancia Inversa Ponderada (IDW) para la región en referencia.

4.2.4.1. Distribución del Arsénico.

En la **Figura 50**, se presenta la distribución espacial de As en las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. En la figura se puede apreciar que existe una zona con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 48.7 mgkg^{-1} , lo cual puede ser un indicio de que se manipula este elemento en estos suelos. Los niveles de As en el área en estudio tienden a aumentar hacia el centro ligeramente hacia una zona cercana a Talagante, partiendo de una región donde las concentraciones fueron inferiores a 5.3 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles superaron los 48.7 mgkg^{-1} de arsénico, por lo que habría un cierto aporte de actividades antrópicas a esta zona mencionada. Además, la zona de color rojo, donde las concentraciones predichas son superiores a 48.7 mgkg^{-1} , presentaron niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos utilizados, ver

³<http://ide2.minagri.gob.cl/publico/>

Tabla 29. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, parronales, además de la presencia de 4 agroindustrias frutícolas (una de ellas procesa en frío) y la viña Doña Javiera, con lo cual se puede atribuir a que estos niveles son alcanzados debido al uso de fertilizantes de fosfato y abonos orgánicos (Hani & Pazira, 2011). También es posible encontrar criaderos de animales en esta zona, tanto de pollos como de cerdos, y de los cuales podrían estar recibiendo aportes antrópicos de dicho elemento.

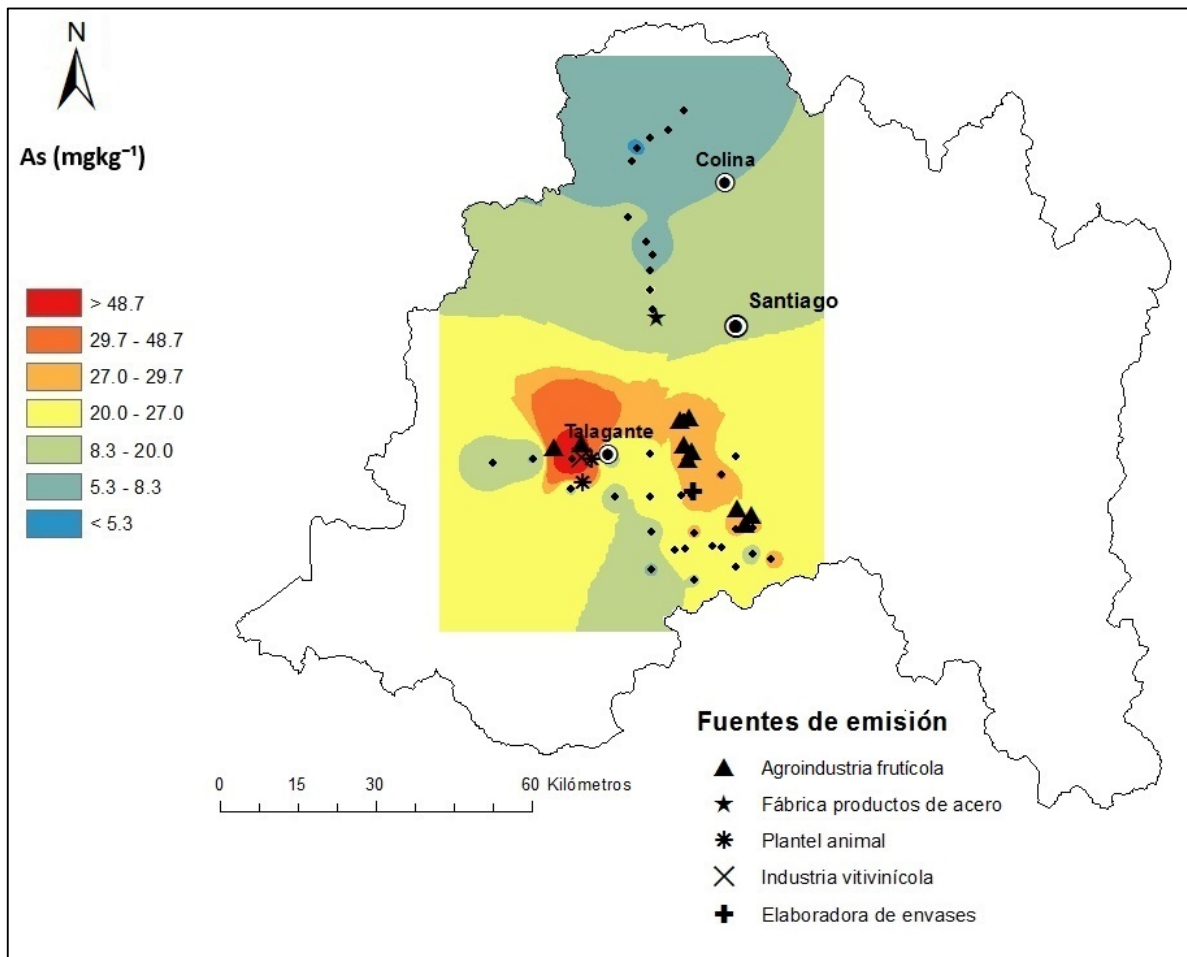


Figura 50. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.

Por otro lado, el área de la franja amarilla hacia la franja verde (equivalente a niveles inferiores a 27.0 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por arsénico. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte

citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH mayor a 6.5 de las muestras en la zona céntrica del área en estudio, fue posible inferir que este umbral corresponde a 20 mgkg^{-1} , ver **Tabla 29**. Esta concentración coincidiría con el límite entre la franja amarilla y naranja, por lo que los suelos en las zonas de color amarillo a color rojo tendrían niveles que superarían dicho umbral y por esto no cumplirían con la norma chilena (INN, 2004). Considerando el Target Value del As igual a 28.8 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que parte de los suelos en la franja naranja (niveles entre 27.0 y 29.7 mgkg^{-1}), y las zonas de colores superiores, no cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, solo los suelos de la zona roja tuvieron niveles predichos que superarían los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.2.4.2. Distribución del Cobre.

En la **Figura 51**, se presenta la distribución espacial de Cu en las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 273 mgkg^{-1} . Los niveles de Cu en el área en estudio tienden a aumentar a 2 zonas circulares donde los niveles alcanzaron los 273 mgkg^{-1} de cobre, permitiendo suponer que en estas 2 zonas existe la presencia de fuentes antrópicas que harían aumentar los niveles en torno a estas. Para agregar, las franjas de color naranja oscuro ubicadas en toda la zona norte y algunos suelos al sur del área en estudio, con concentraciones predichas entre $161 - 273 \text{ mgkg}^{-1}$, presentaron niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos utilizados, ver **Tabla 29**. Sin embargo, es importante agregar que gran parte de los suelos que están en la zona naranja niveles entre 86.6 y 161 mgkg^{-1} presentarían concentraciones mayores a los valores de fondo obtenidos por 2 métodos (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 29**.

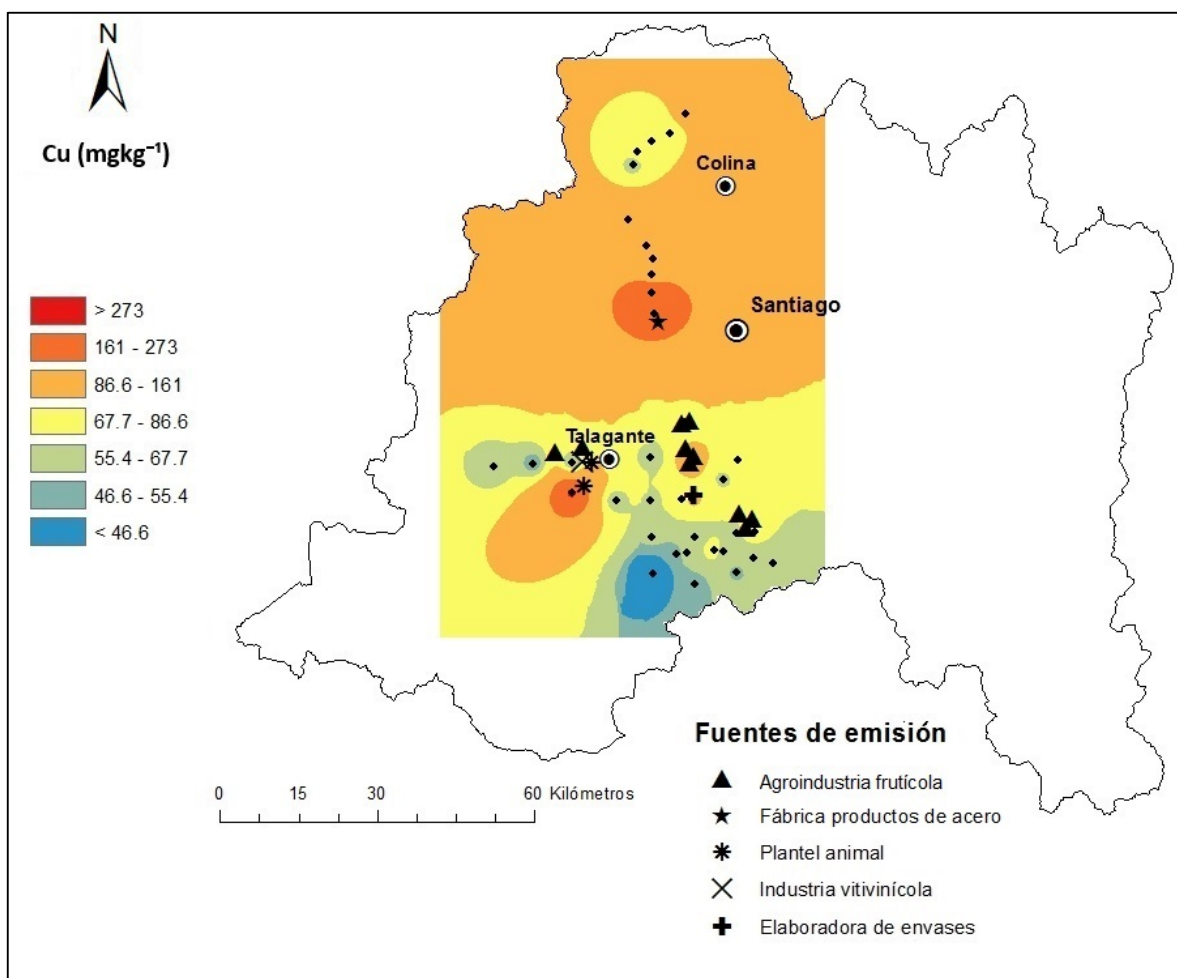


Figura 51. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Cu tiende a aumentar su estimación hacia 2 zonas, por lo que se podría inferir que existen aportes de actividades antrópicas a estas zonas mencionadas y por esto, estas 2 franjas (concentraciones superiores a 86.6 mgkg^{-1}), no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, cultivos anuales, parronales y en la zona cercana a Santiago, localidad de Noviciado, existe la presencia de una compañía de fabricaciones en acero (Metalúrgica FAT). Con lo cual se podría atribuir a que los niveles alcanzados son debido a uso de productos agroquímicos, como los plaguicidas, y fertilizantes fosfatados (Micó, 2005; Nicholson et al., 2003), y producto de la fabricación de productos metálicos (Ambisat Ingeniería Ambiental, 2004).

Con respecto al sitio cercano a Talagante, exactamente en la localidad de Naltagua, los suelos de esta zona pudieron haberse visto muy afectados por el historial minero relacionado con el cobre (Mina de Cobre de Naltagua (Donoso D., 2015)), por lo que los niveles de este elemento pudieron haber sido alcanzados por emisiones industriales antiguas que han sido depositadas en estos suelos.

Por otro lado, el área de la franja amarilla hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 86.6 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por cobre. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte y citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras en las zonas comprendidas entre las franjas con valores cercanos a críticos, fue posible asegurar que este umbral corresponde a 150 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**). Esta concentración estaría dentro del intervalo $86.6 - 161 \text{ mgkg}^{-1}$ (franja color naranja), por lo que gran parte de esta zona, sumando a esto las zonas superiores a esta (franja naranja oscuro), tendrían suelos con niveles que sobrepasarían tal umbral. Considerando el Target Value del Cu igual a 35.7 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que los suelos de todas las franjas no cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de las zonas de color naranja oscuro tuvieron niveles que superarían los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.2.4.3. Distribución del Níquel.

En la **Figura 52**, se presenta la distribución espacial de Ni en las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 15.2 mgkg^{-1} . Los niveles de Ni en el área en estudio tienden a aumentar hacia el centro y norte, en particular 2 pequeñas zonas. Partiendo de suelos donde las concentraciones fueron inferiores a 3.7 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzaron los 15.2 mgkg^{-1} de níquel. Por otro lado, los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos no estarían dentro de ninguna franja ubicada en el área en estudio (ver **Tabla 29**).

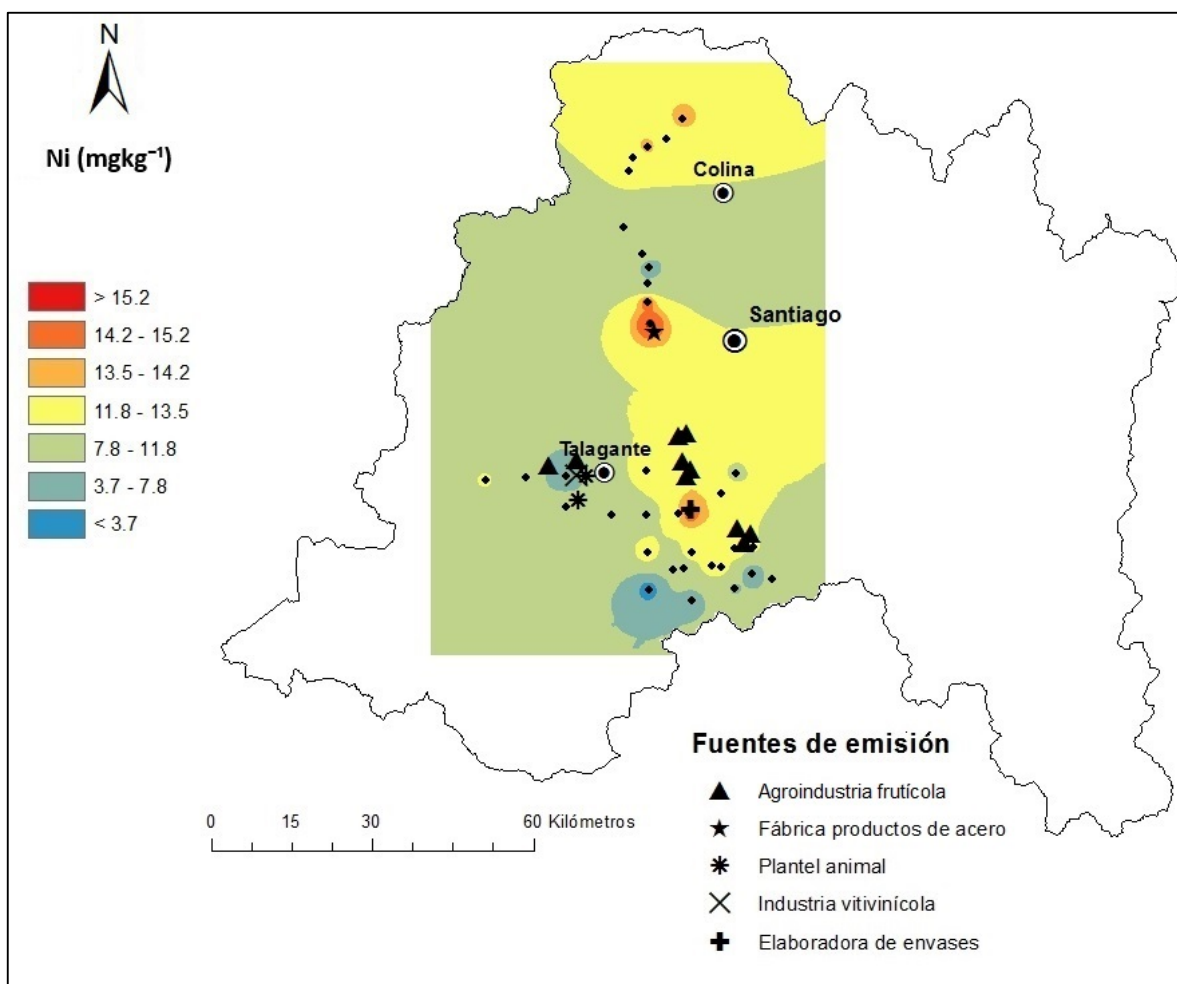


Figura 52. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Ni tiende a aumentar su estimación hacia zonas puntuales, por lo que habría ciertos aportes de fuentes puntuales de origen antropogénico en estos sitios. Uno de esos sitios se encuentra cercano a una compañía de fabricaciones en acero (Metalúrgica FAT) y el otro cercano a una empresa que elabora envases de metal. Ambas instalaciones incrementarían las concentraciones de níquel producto de la la fabricación de productos metálicos y también de la manufactura de envases y embalajes ligeros en metal (Ambisat Ingeniería Ambiental, 2004). Por otro lado, se puede asegurar que el área de la franja amarilla hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 13.5 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por níquel.

Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras en las zonas de valores de niveles superiores, fue posible asegurar que este umbral corresponde a 112 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**). Por lo anterior, en la figura se puede apreciar que todos los suelos tuvieron niveles inferiores a dicha concentración máxima permitida.

Considerando el Target Value del Ni igual a 41.1 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que todos los suelos en estudio cumplieron con los estándares holandeses. Por lo anterior, se podría asegurar que todos los suelos de esta región estarían libres de contaminación a excepción de 3 pequeños sitios que reciben algún aporte y que a pesar de esto, igual cumplirían con los valores citados por el SAG y los obtenidos por la norma holandesa para el elemento níquel. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de este ETM inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.2.4.4. Distribución del Plomo.

En la **Figura 53**, se presenta la distribución espacial de Pb en las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. En la figura se puede apreciar que existe una zona con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 27.8 mgkg^{-1} , estos niveles podrían ser producto del aporte de alguna fuente puntual de contaminación. Los niveles de Pb en el área en estudio tienden a aumentar hacia una zona puntual al suroeste de la región en estudio, partiendo de suelos donde las concentraciones fueron inferiores a 5.4 mgkg^{-1} hasta la zona donde los niveles superaron los 27.8 mgkg^{-1} de plomo. Asimismo, la franja de color rojo ubicada en la zona anteriormente mencionada presentaron niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos (ver **Tabla 29**), por lo que habría aportes de actividades antrópicas a la zona mencionada y por esto no se encontraría con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, con lo cual se podría atribuir a que los niveles son alcanzados debido al uso de productos agroquímicos que contienen trazas de Pb (Alloway & Ayres, 1993), relacionado con los gases de escape desde motores de combustión durante

el siglo pasado (Markus & McBratney, 2001) y debido a que en la zona operaba en el pasado una mina de cobre que posiblemente haya generado sustancias contaminantes de Pb (Ambisat Ingeniería Ambiental, 2004). Es importante señalar que en la zona naranja, al sur de Santiago, se puede apreciar de manera evidente que hay un aumento en los niveles en gran parte de la Ruta 5 Sur y esto es debido a que los suelos probablemente fueron afectados por la combustión de bencina de los vehículos que circulaban el siglo pasado (Romic & Romic, 2003) por esta autopista.

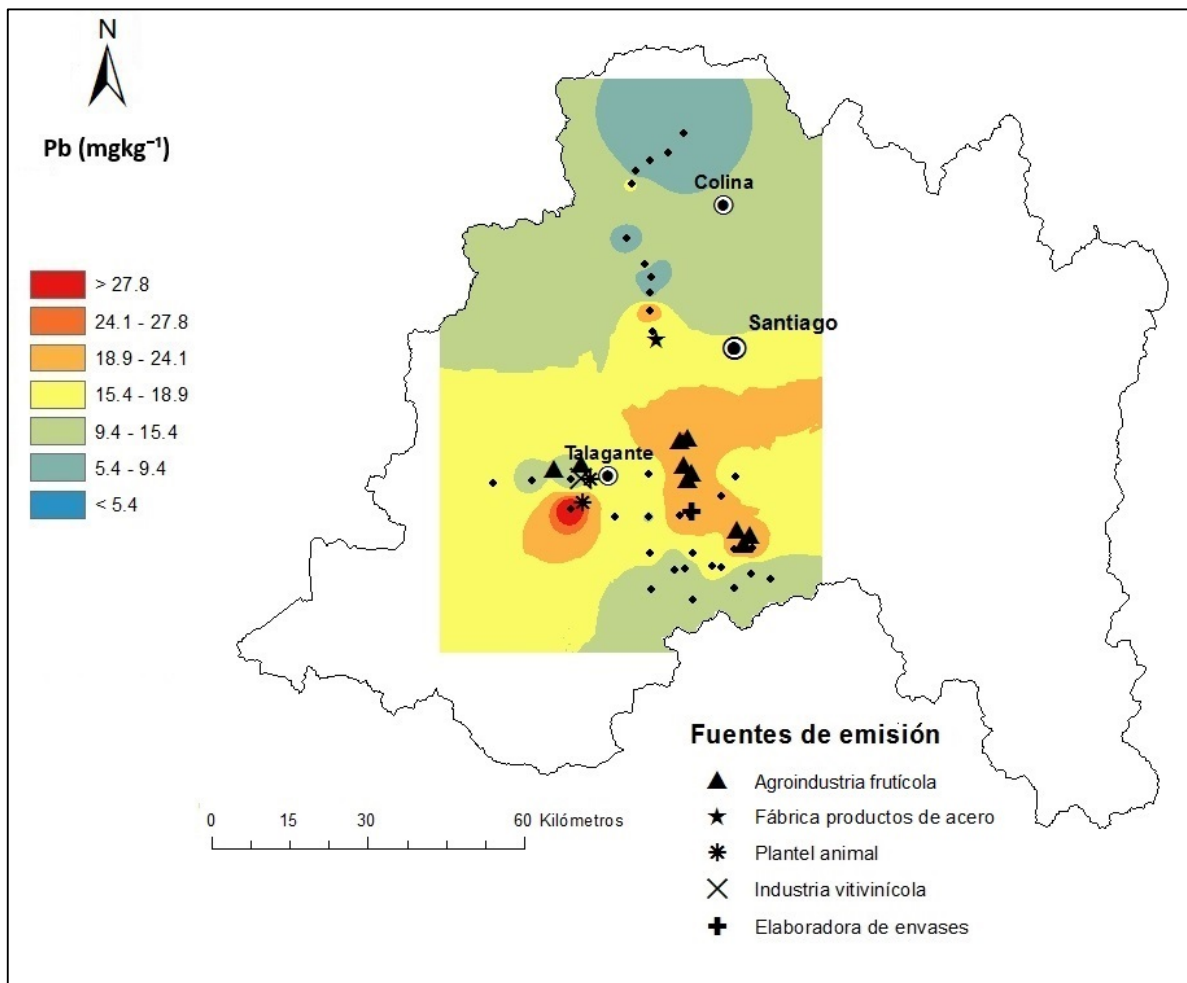


Figura 53. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.

El área de la franja amarilla hacia las zonas de color verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 18.9 mgkg⁻¹), correspondería a suelos que están libres de contaminación por

plomo. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras en la zona con probables problemas, fue posible deducir que este umbral corresponde a 75 mgkg^{-1} , ver **Tabla 29**. Por lo anterior, es posible asegurar que todas las zonas del área en estudio, excepto los sitios de color rojo, tendrían niveles inferiores a este valor umbral.

Considerando el Target Value del Pb igual a 84.6 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que los suelos de todas las franjas, excepto la zona de color rojo donde no es posible asegurar, cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de todas las zonas, excepto la franja roja, presentaron niveles de este ETM inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.2.4.5. Distribución del Selenio.

En la **Figura 54**, se presenta la distribución espacial de Se en las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. En la figura se puede apreciar que existe una zona con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 4.1 mgkg^{-1} . Los niveles de selenio en el área en estudio tienden a aumentar en dirección suroeste, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 0.08 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles superan los 4.1 mgkg^{-1} , esta última correspondería a una zona en particular del área en estudio. Asimismo, las zonas de color naranja oscuro y rojo (equivalente a concentraciones predichas mayores a 0.52 mgkg^{-1}), esta es extensa y presenta niveles que fueron superiores a los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos (ver **Tabla 29**).

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Se tiende a aumentar su estimación hacia el suroeste, específicamente en la localidad de El Monte, por lo que supondría aportes de actividades antrópicas a esta zona mencionada y por esto no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. En esta zona crítica existe la presencia de agroindustrias frutícolas, criaderos de animales (cerdos y aves) y de la viña Doña Javiera, todas estas agroindustrias podrían estar aportando a los niveles de

selenio alcanzados. Con respecto a estas posibles fuentes, estas pueden estar afectando a los suelos debido al uso o abuso de fertilizantes que contengan selenio (Shunsheng et al., 2009), lo que también ocurriría al sureste de Talagante (cercano a la localidad de Valdivia de Paine), donde existe una gran cantidad de sitios destinados a la vid de mesa y en que se podría estar dando la misma situación.

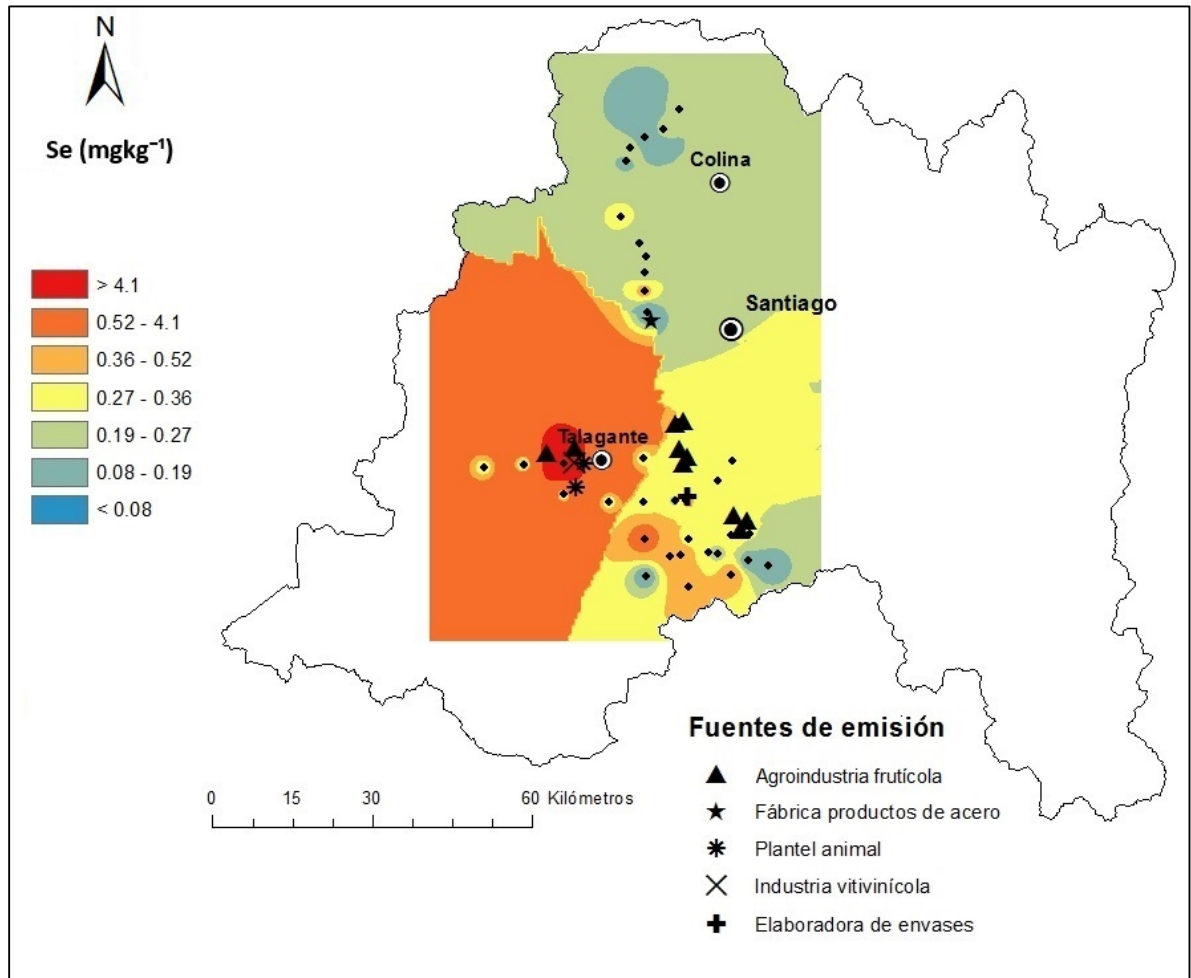


Figura 54. Distribución de contenidos de Se en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.

Por otro lado, el área de la franja de color amarillo hacia las zonas de color verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 0.36 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por selenio. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del

suelo. Por conocimiento del pH de las muestras en la zona de niveles superiores de concentración, fue posible inferir que el umbral corresponde a 4 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**). Esta concentración estaría dentro de la zona con concentraciones estimadas críticas mayores a 4.1 mgkg^{-1} (sitios de color rojo), es decir, los suelos de esta zona presentaron niveles que sobrepasarían la concentración máxima permitida para la macrozona norte de la Norma lodos (INN, 2004), y por esto los suelos de esta zona no cumplirían con lo anterior.

4.2.4.6. Distribución del Zinc.

En la **Figura 55**, se presenta la distribución espacial de Zn en las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. En la figura se puede apreciar que existe una pequeña zona al suroeste de la región en estudio con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 153 mgkg^{-1} , esto haría presumir la existencia de alguna fuente puntual de contaminación. Los niveles de Zn tienden a aumentar hacia dos zonas al centro sur del área en estudio, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 74.0 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 153 mgkg^{-1} de zinc o incluso lo superan, como ocurre en la zona de concentraciones estimadas críticas. Para agregar, parte de la zona correspondiente a la franja de color naranja oscuro, con concentraciones predichas entre 127 y 153 mgkg^{-1} , presentaron niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 29**. Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Zn tiende a aumentar su estimación en 2 zonas específicas, por lo que habría aportes de actividades antrópicas a estas y por esto no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. En los sitios críticos al sureste de Talagante existen principalmente zonas de frutales, viñas y parronales, en cambio en la localidad de Naltagua solo se producen zonas de frutales, con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido a la práctica agrícola (Yaylali-Abanuz, 2011), y por la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003). Asimismo, los suelos de los sitios cercanos a la fábrica Elaboradora De Envases S.A. estarían recibiendo aportes de Zn de esta instalación y por esto estarían siendo afectados por la presencia de esta empresa. Todo esto debido a que la fabricación de envases y embalajes ligeros, en metal, y la cual es una de las actividades

industriales generadoras de Zn (Ambisat Ingeniería Ambiental, 2004). Con respecto a la zona crítica presente en la localidad de Naltagua, el alto nivel de las concentraciones pudieron haber sido alcanzados por el pasado minero del cobre, Mina de Cobre de Naltagua (Donoso D., 2015), producto de emisiones de esta industria que contienen Zn (Yaylalı-Abanuz, 2011).

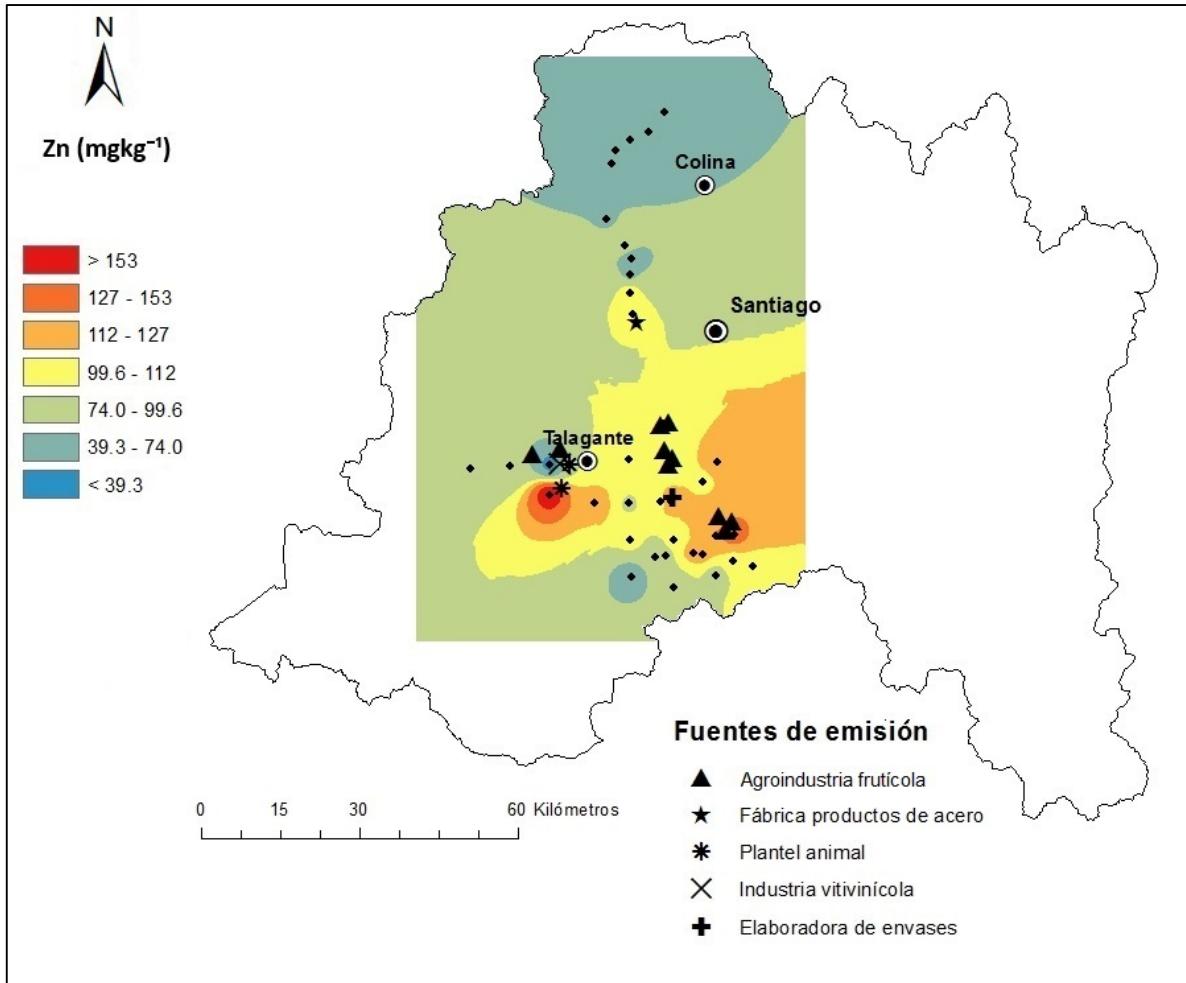


Figura 55. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región Metropolitana de Santiago.

El área de la franja amarilla hacia las zonas de color verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 112 mgkg⁻¹), correspondería a suelos que están libres de contaminación por zinc. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte citada

por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras que se ubican en las franjas de niveles altos, fue posible asegurar que este umbral corresponde a 175 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**). Esta concentración estaría dentro de la zona de color rojo (concentraciones mayores a 153 mgkg^{-1}), y estos suelos tendrían niveles que superarían tal umbral. Considerando el Target Value del Zn igual a 148 mgkg^{-1} (ver **Tabla 29**), obtenido mediante la metodología holandesa, se tuvo que los suelos de las zonas roja (concentraciones mayores a 153 mgkg^{-1}) y parte de la zona naranja oscuro, no cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de todas las zonas, excepto la franja roja, presentaron niveles de este ETM inferiores a los valores de intervención (Intervention Value) obtenidos mediante la metodología de la normativa holandesa, ver **Tabla 29**.

4.2.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región Metropolitana de Santiago.

En los apartados siguientes se presenta la aplicación de diferentes factores de evaluación de riesgo ecológico de los suelos de la Región Metropolitana de Santiago, ver metodología del punto 3.11. Para todos estos índices, se utilizó el valor de fondo de cada ETM de menor valor de entre los métodos estadísticos utilizados. Mediante el método Iterative 2σ -technique, se obtuvieron los valores empleados para los elementos As (36.0 mgkg^{-1}), Cu (92.1 mgkg^{-1}) y Zn (138 mgkg^{-1}), y los valores de la técnica *Median + 2 MAD* empleados para los factores de los elementos Ni, Pb y Se, con background value equivalentes a 15.6, 25.1 y 0.43, respectivamente.

4.2.6.1. Índice de Geoacumulación (I_{geo}).

Los resultados de los valores obtenidos del índice de geoacumulación para cada ETM son presentados en la **Figura 56**. En esta figura es posible apreciar que el elemento Se presentó una gran cantidad de suelos sin contaminación con respecto al selenio (valores de I_{geo} menores a 0), aproximadamente un 95% de los sitios muestreados. De este mismo modo, se pudo encontrar una muestra (RM-03) con valor igual a 4.4 y que estaría dentro de la categoría de fuertemente a extremadamente contaminado ($4 < I_{geo} < 5$), tal hecho

demostraría que en el sitio anteriormente mencionado estaría siendo afectado y recibiendo aportes de actividades antrópicas. El cobre tuvo un porcentaje relativamente mayor de suelos con problemas comparado con los demás ETM, a pesar de esto este elemento tendría un gran porcentaje (89%) de muestras que prácticamente no tienen contaminación. El porcentaje restante (11% del total de muestras) están dentro de la categoría sin contaminación a moderadamente contaminado ($0 < I_{geo} \leq 1$). Con respecto al resto de elementos (As, Ni, Pb y Zn), prácticamente todas las muestras de suelo no tuvieron contaminación por estos elementos, valores de I_{geo} menores 0.

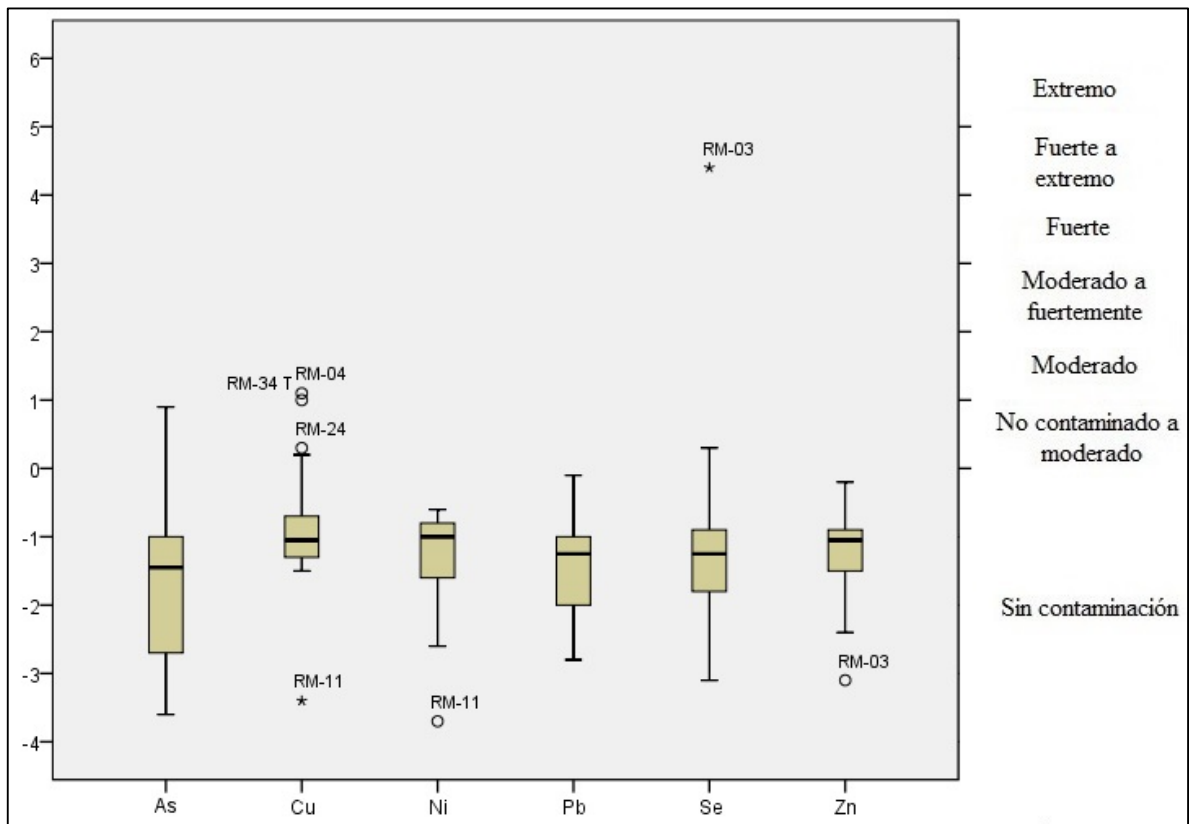


Figura 56. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.

4.2.6.2. Factor de Contaminación (C_f), Grado de Contaminación (C_{deg}) e Índice Integrado de Polución (IPI).

Los resultados de los valores obtenidos del factor de contaminación para cada ETM son presentados en la **Figura 57** y **Figura 58**, además en la **Tabla 31**, se entregan algunos parámetros estadísticos de cada elemento para contribuir a la interpretación de los resultados. En la figura es posible apreciar que el elemento Se presentó un gran porcentaje (87%) de suelos que están dentro de la categoría de contaminación baja, además tendría una pequeña cantidad de muestras con moderada y muy alta contaminación por este elemento, 11 y 3% respectivamente. Para esta última categoría, existiría una muestra (RM-0.3) con valor de coeficiente demasiado superior al resto y que, por lo tanto, presentó contaminación muy alta con respecto al selenio. Con respecto al resto de elementos (As, Cu, Ni, Pb y Zn), gran porcentaje de las muestras tendrían baja contaminación por estos elementos, a excepción de níquel, donde todas las muestras poseen valores menores a 1 (Contaminación baja), y un pequeño porcentaje de estas están dentro de la categoría contaminación moderada ($1 \leq C_f < 3$). Finalmente, de la tabla se puede inferir que los suelos de esta región tienen contaminación baja con respecto a los elementos As, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, y altamente contaminados con respecto a Se en la zona cercana a Talagante.

Tabla 31. *Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región Metropolitana de Santiago.*

Metales	Mínimo	Máximo	Media	SD ^a	Mediana
As	0.12	2.8	0.57	0.45	0.55
Cu	0.14	3.1	0.93	0.59	0.74
Ni	0.11	1.0	0.69	0.22	0.76
Pb	0.21	1.4	0.60	0.27	0.62
Se	0.17	31.5	1.4	5.0	0.63
Zn	0.18	1.3	0.69	0.22	0.72

^a Desviación Estándar

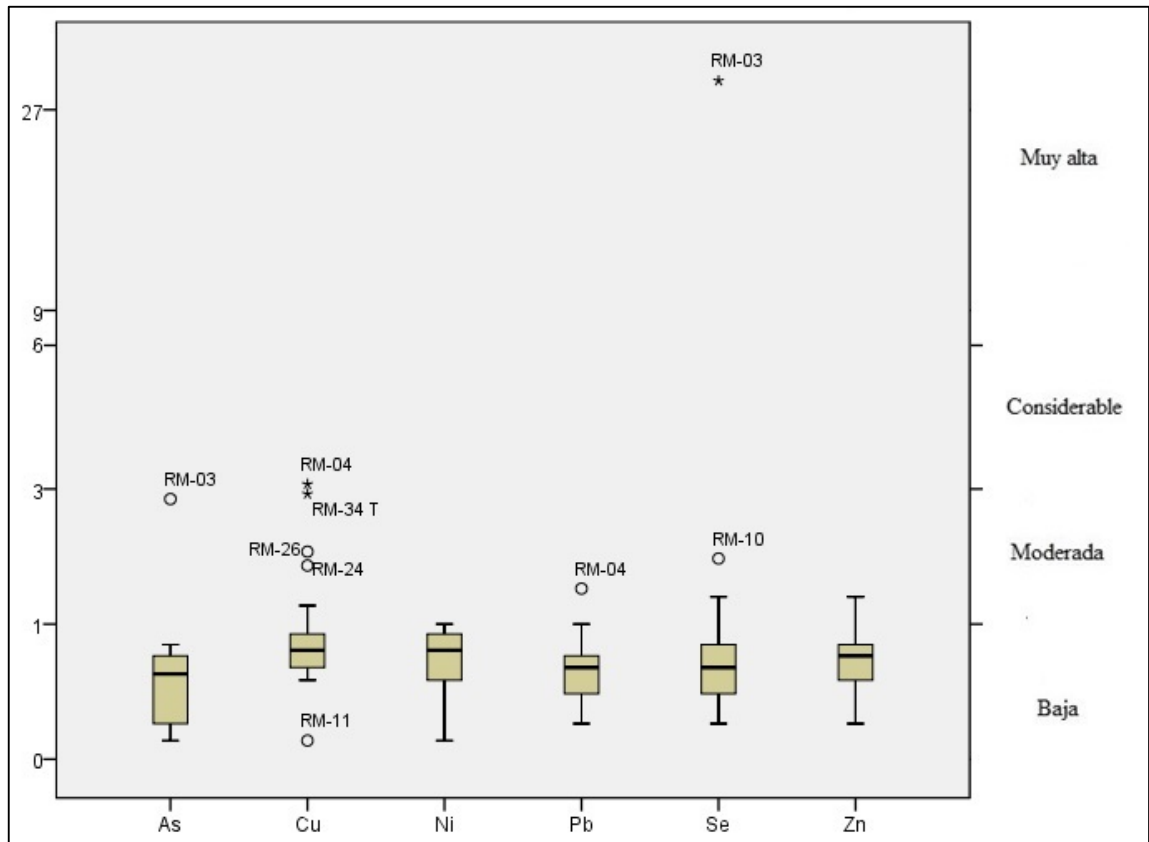


Figura 57. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.

En la **Figura 59**, se presenta la distribución espacial de los grados de contaminación de las muestras recolectadas en la Región Metropolitana de Santiago. Pero antes es necesario establecer la clasificación de estos valores, para esto fueron reclasificados según Håkanson (1980) y de acuerdo al número de ETM (6 elementos) que se utilizaron para esta región (Albanese et al., 2013), ver página 45. En la figura se puede apreciar que existe un 92% de muestras que están dentro de la categoría bajo grado de contaminación (valores de C_{deg} menores a 6). Por lo tanto, en los sitios restantes presentaron moderado y muy alto grado de contaminación con respecto a ETM en estudio, 5 y 3% respectivamente. Esto indica que en estos sitios están moderadamente y altamente afectados por actividades antrópicas y por esto, tendrían contaminación por los elementos en estudio, es especial la zona cercana a Talagante (en suelos de localidades de El Monte y Naltagua).

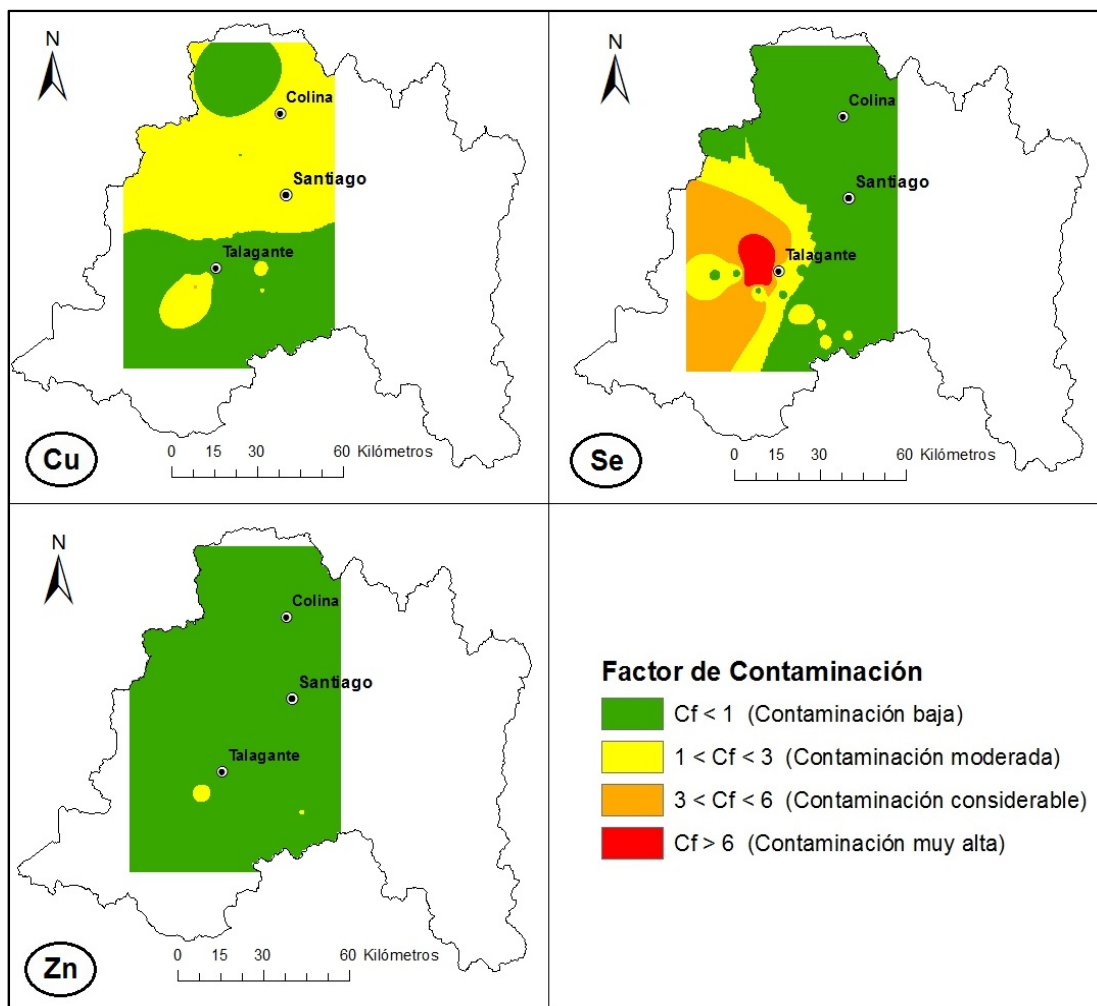


Figura 58. Distribución espacial de los factores de contaminación (C_f) de los elementos Cu, Se y Zn de la Región Metropolitana de Santiago.

Finalmente, el índice integrado de polución es presentado mediante la **Figura 60**. En la distribución espacial presentada en la figura se puede ver que existe un 92% del total de muestras con nivel bajo de contaminación ($IPI \leq 1$). De las restantes existe un 5% de las muestras que tendrían un nivel moderado de contaminación, y solo un 3% (muestra RM-0.3) que presentaría un nivel muy alto de contaminación por ETM, esta última con un valor de IPI igual a 6.0. En esta muestra existiría un gran aporte del elemento selenio al valor de IPI alcanzado, aproximadamente un 87% de este. Esto indica que este sitio está altamente afectado por actividades antrópicas y por esto, tendría un nivel extremadamente alto de contaminación por los elementos en estudio, principalmente por Se.

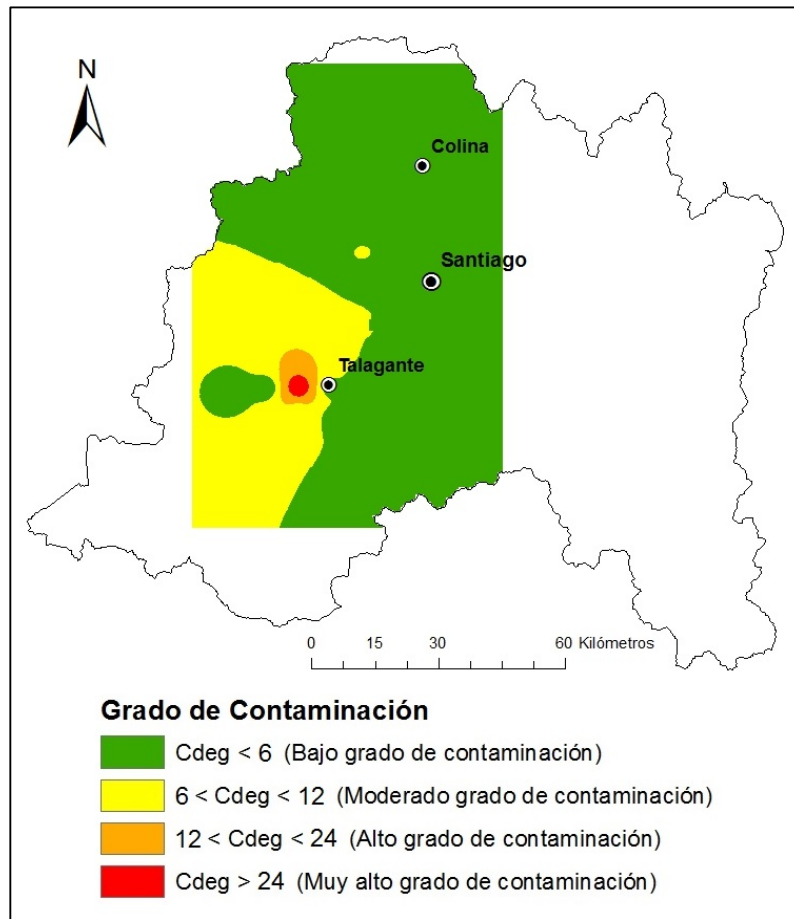


Figura 59. Distribución espacial de los grados de contaminación (C_{deg}) de la Región Metropolitana de Santiago.

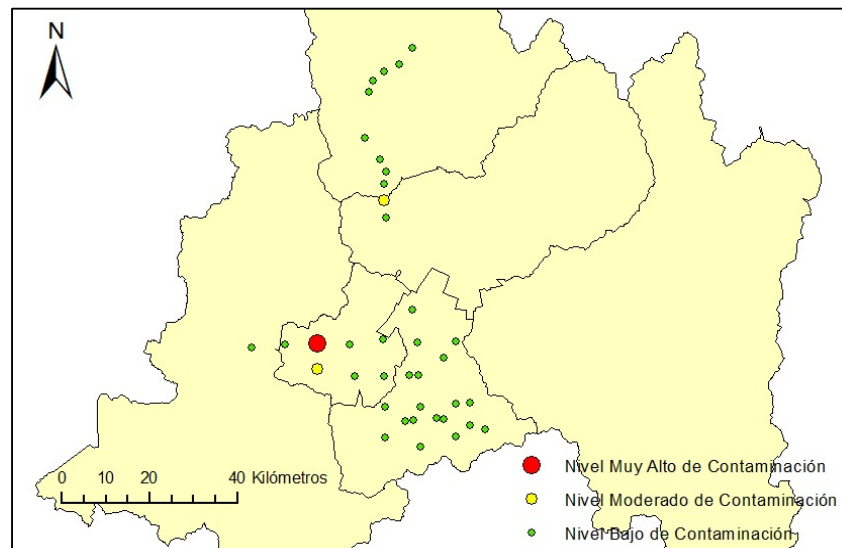


Figura 60. Ubicación geográfica de los índices integrados de polución (IPI) de la Región Metropolitana de Santiago.

4.3. Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

Es necesario y clarificador establecer los ETM utilizados en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, los cuales fueron los elementos As, Cu, Ni, Pb y Zn. A causa de que los elementos que presentan un porcentaje de muestras mayor o igual al 20% con niveles inferiores al límite de detección de estos, no fueron considerados para el estudio de esta región.

4.3.1. Análisis exploratorio de datos de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

En la región en referencia se presentará el correspondiente AED, considerando los elementos traza metálicos y propiedades edáficas utilizados en este estudio. En el histograma de la **Figura 61**, se puede apreciar que la distribución del elemento arsénico tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, pero esto es debido a la presencia de un valor extremadamente superior a la media y con lo cual se puede inferir que esta es mayor a la mediana. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que no tiende a la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se puede observar que en el box plot existe un valor atípico que se encuentra por encima del bigote superior. Tal caso es la muestra CC 01, con una concentración de As de 65.5 mgkg^{-1} . Por lo anterior, se puede concluir que los datos de este elemento no siguen una distribución normal.

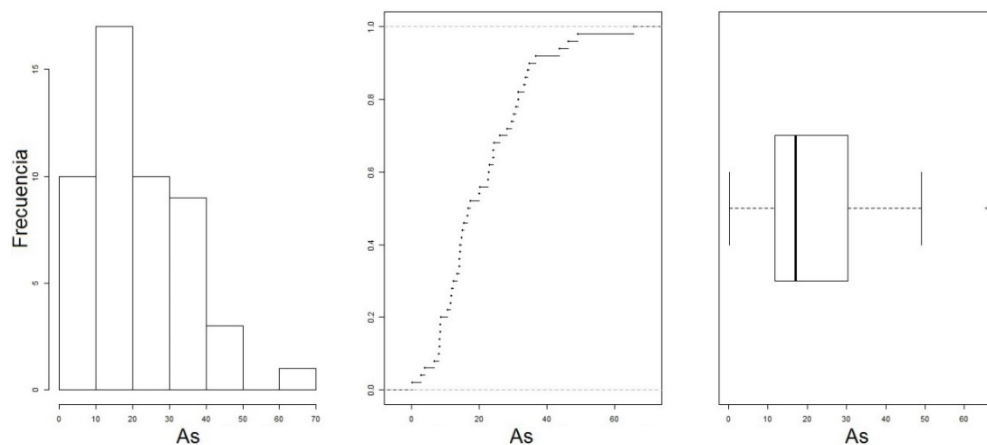


Figura 61. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 62**, se puede observar que los datos del elemento cobre se distribuyen con una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, lo que se puede inferir que la media es mayor a la mediana. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar claramente que esta no cumple con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, en el box plot existe la presencia de un valor mayor al bigote superior de los datos. Esto ocurre en la muestra CC 05, con una concentración de Cu de 676 mgkg^{-1} . Este valor es bastante superior a los demás datos, tomando en cuenta que un 60% de las muestras no superan los niveles de 100 mgkg^{-1} . De los tres gráficos analizados anteriormente, se puede llegar a concluir que los datos del elemento cobre de esta región no siguen la distribución normal.

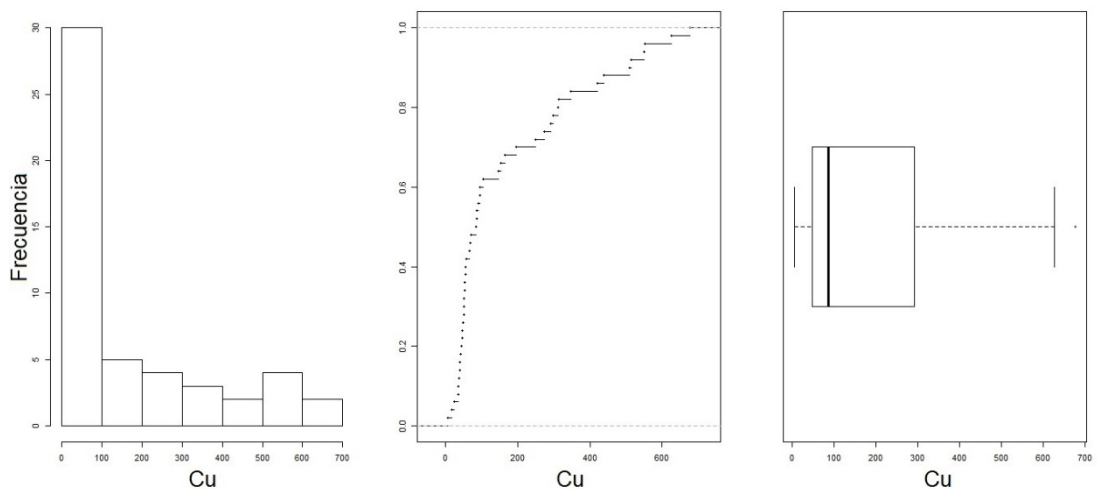


Figura 62. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el primer gráfico de la **Figura 63**, se puede observar que el conjunto de datos de níquel tiene una leve inclinación de la cola hacia la izquierda o sesgo negativo pudiéndose inferir que la media es levemente menor a la mediana. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este elemento no tiende a comportarse como una distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que este elemento no tiene un diagrama de caja simétrico. Además, es importante señalar la existencia de cuatro valores atípicos por debajo del bigote inferior y uno por encima del bigote superior. De todo este análisis se puede concluir que los datos no siguen la distribución normal.

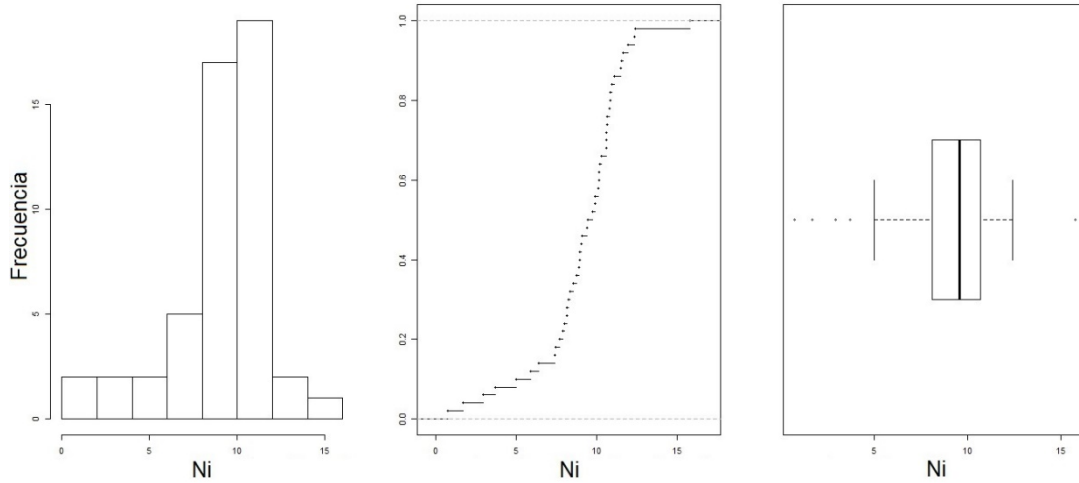


Figura 63. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 64**, se puede apreciar que la distribución del elemento Pb tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, por lo que se puede inferir que la media es superior a la mediana de los datos. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que la curva no tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel, se puede observar que existen dos muestras que superan a los demás datos. Por todo lo anterior, es posible aseverar que este elemento no tiende a comportarse como la distribución normal.

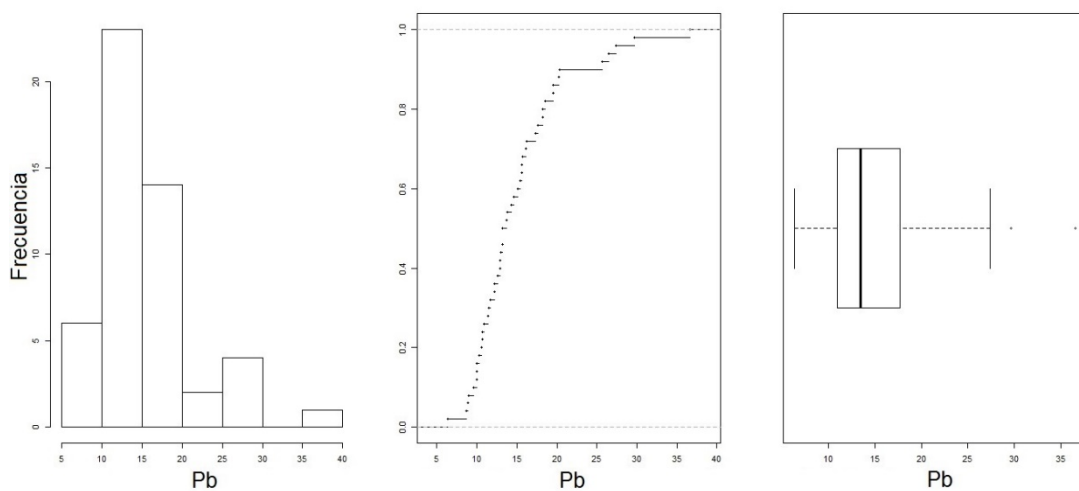


Figura 64. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 65**, se puede apreciar que la distribución de los datos de zinc tiende a seguir una distribución normal, aunque presenta algunas irregularidades pero no suficiente para asegurar lo contrario. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que presenta algunas irregularidades en la curva, pero esta tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el tercer grafico del panel se puede observar que existe una leve inclinación hacia el bigote inferior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último y este también tiene cierta simetría de una distribución. Por lo tanto, por todo lo dicho anteriormente es posible inferir que este elemento tiende a seguir una distribución normal.

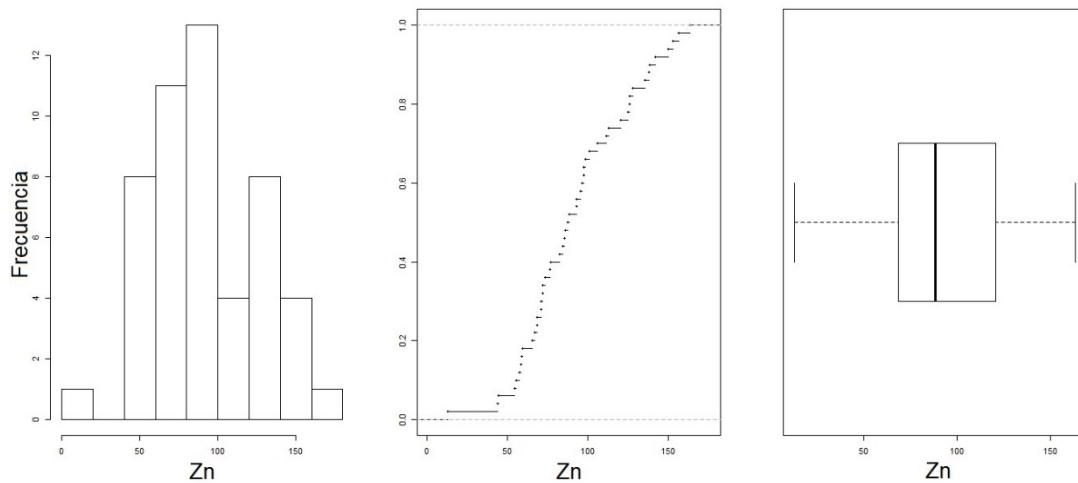


Figura 65. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de los datos del parámetro pH en la **Figura 66**, se puede apreciar que existe un cierto grado de simetría y parecido al de la distribución normal. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta presenta la asimetría requerida para comportarse como una distribución normal. Continuando con el tercer grafico del panel, en este se puede distinguir la simetría del gráfico, pero con una leve inclinación hacia el bigote inferior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último. Por lo dicho anteriormente, se puede concluir que los datos de este parámetro siguen una distribución normal.

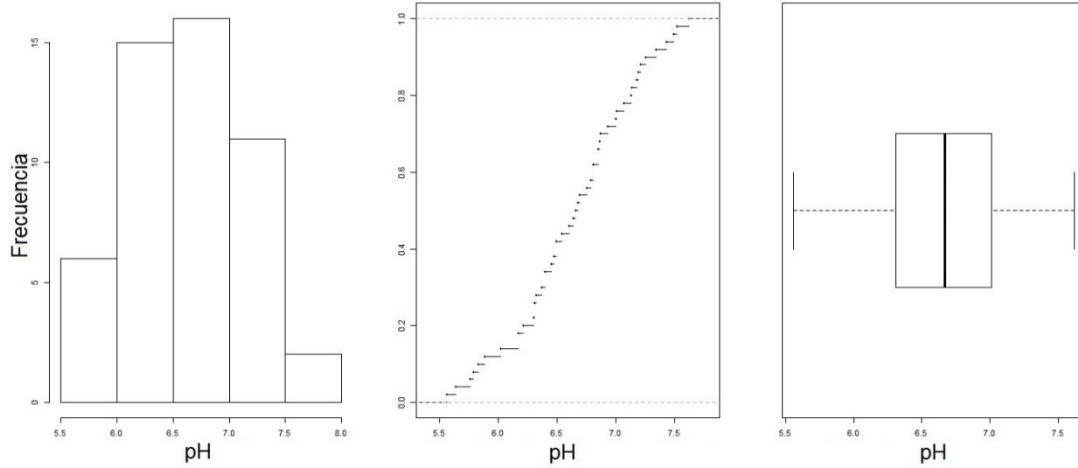


Figura 66. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.

En el histograma de la **Figura 67**, se destaca que la distribución de los datos de los valores de CE es asimétrica con un sesgo marcadamente positivo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta no tiene la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existen cuatro valores atípicos por encima del bigote superior. Además, es importante mencionar que este grafico tiene forma bastante achatada producto de estos valores atípicos. De lo anterior, se puede inferir que los datos de este parámetro no presentan la forma requerida para que estos sigan una distribución normal.

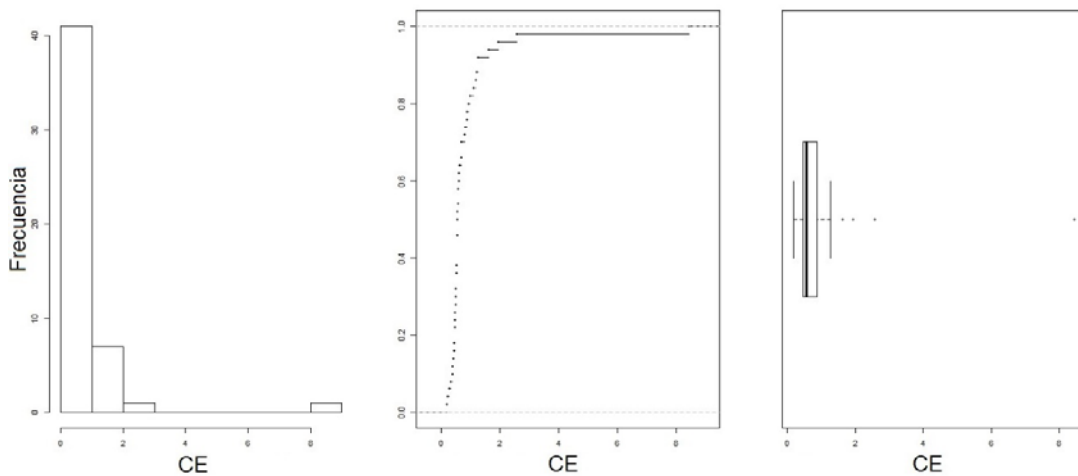


Figura 67. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida $mS\ gr^{-1}$.

En el histograma de la **Figura 68**, se puede observar que la distribución de materia orgánica tiene una asimetría de sesgo levemente positiva hacia la derecha. Continuando con el análisis, en el segundo gráfico del panel se puede apreciar que los datos cumplen con la asimetría necesaria con forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que los datos en el box plot están levemente sesgados hacia la derecha y con la presencia de un valor atípico que está por encima del bigote superior. A pesar de esto, en cierta medida existe algún grado de simetría del gráfico. De los tres gráficos analizados anteriormente, se puede llegar a concluir que los datos del parámetro materia orgánica de esta región siguen la distribución normal.

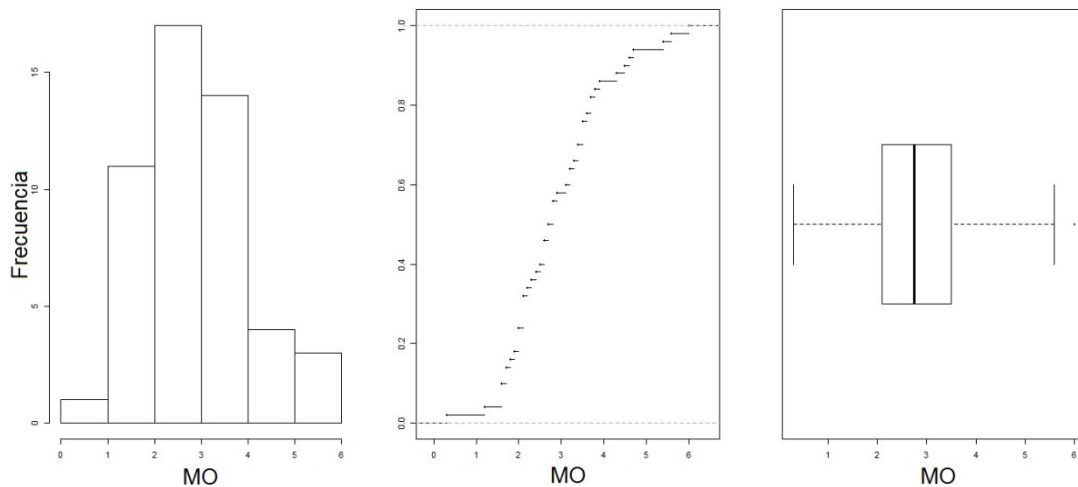


Figura 68. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.

En el primer gráfico de la **Figura 69**, se puede observar que el histograma de los datos de capacidad de intercambio catiónico es asimétrica con sesgo positivo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este parámetro tiende a tener la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que existe una cierta simetría, pero con una leve inclinación hacia el bigote superior, pero no alcanzando a tener valores que estén por encima de este último. De todo el análisis descrito anteriormente, se puede concluir que los datos siguen la distribución normal.

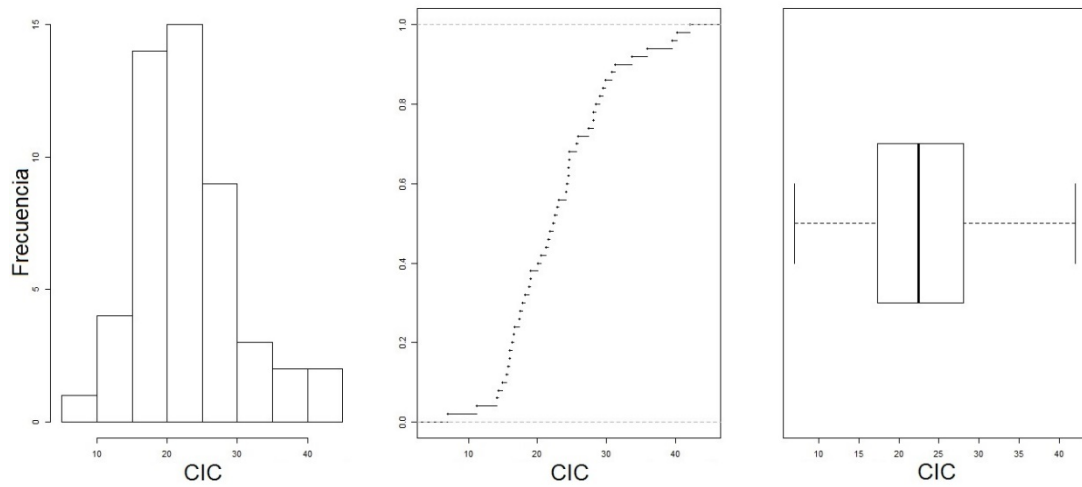


Figura 69. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$.

En el histograma de la **Figura 70**, se puede apreciar que el porcentaje de arena se distribuye con una leve asimetría de sesgo negativo hacia la izquierda. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que de alguna manera esta curva tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel se puede observar que existe una leve inclinación hacia el bigote inferior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último. Por todo lo anterior, se puede aseverar que este parámetro tiende a comportarse como la distribución normal.

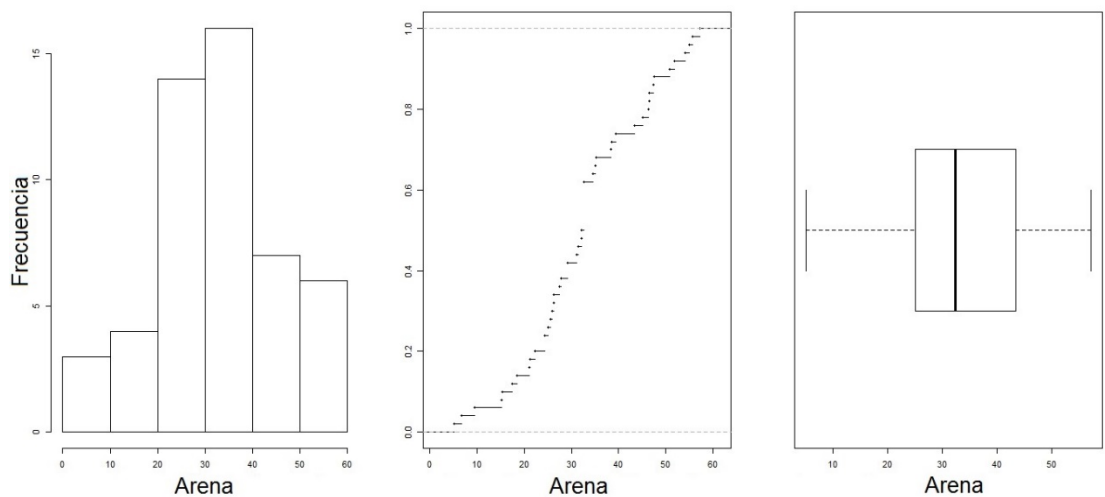


Figura 70. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).

En la **Figura 71**, se presentan los gráficos utilizados para el análisis exploratorio de los datos del porcentaje de limo de las muestras extraídas en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. En el histograma del panel, se puede apreciar que la distribución de este parámetro presenta sesgo negativo con la cola en dirección hacia la izquierda. En el gráfico de frecuencia acumulada del panel se puede apreciar que esta cumple de alguna manera con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que existe una marcada inclinación hacia el bigote inferior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último. Por lo anterior, se puede concluir que el parámetro porcentaje de limo determinado de las muestras recolectadas en esta región sigue una distribución normal.

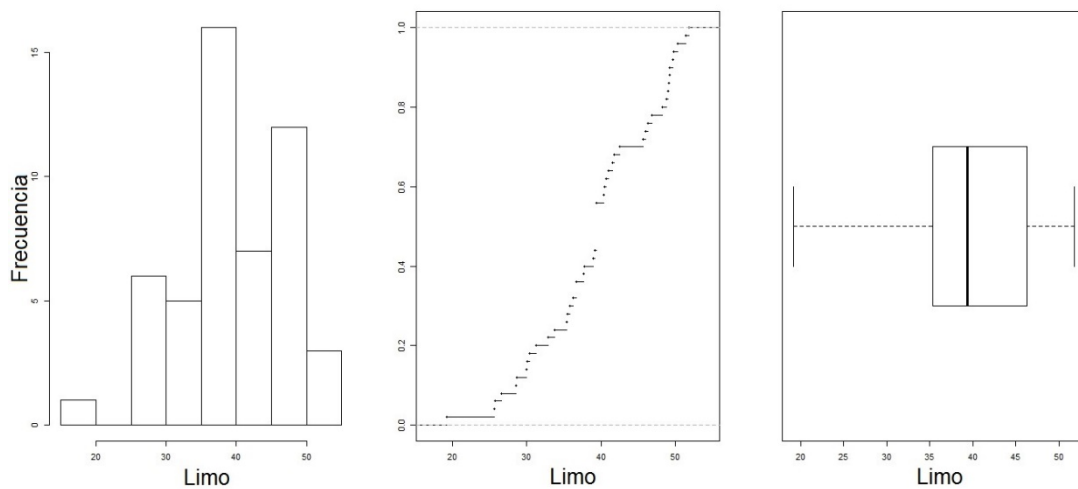


Figura 71. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).

En el primer gráfico de la **Figura 72**, se puede apreciar que la distribución del parámetro porcentaje de arcilla tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta curva tiende levemente a tener la forma de S típica de distribución normal, pero con algunas irregularidades no suficientes para afirmar lo contrario. Por último, en el tercer gráfico del panel donde se muestra el box plot, se puede ver que existe una marcada inclinación hacia el bigote superior, pero no alcanzando a

tener valores que estén por encima de este último. Por todo lo dicho anteriormente, es posible concluir que este parámetro tiende a seguir una distribución normal.

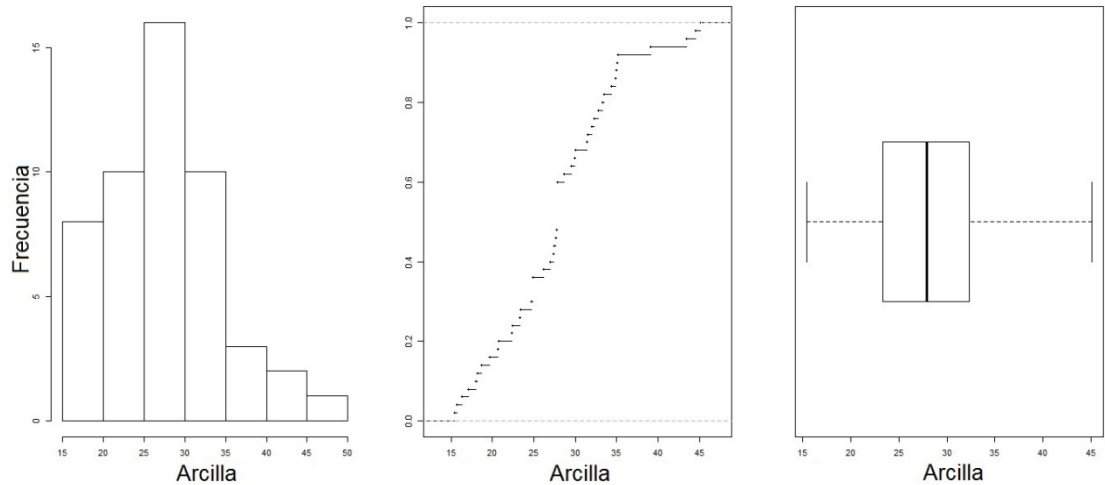


Figura 72. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).

4.3.2. Análisis univariado de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

En análisis univariado para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, resaltar en ello que tanto los parámetros edáficos de los suelos como las concentraciones totales de ETM, fueron analizados ambos por separado.

4.3.2.1. Propiedades de los suelos.

En la **Tabla 32**, se presentan los estadísticos descriptivos de los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de arena, limo y arcilla, determinados de las muestras de suelo extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Considerando los porcentajes de tamaño de partículas, se puede apreciar que existe un predominio de la fracción de limo, con un 66% de las muestras que contienen mayor porcentaje de limo que de arena y arcilla. Según la clasificación propuesta por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, USDA (Soil Survey Division Staff, 1993), los suelos en estudio eran generalmente de textura franco arcillosa o franca. Profundizando en esto, el 52% de los suelos fueron de textura moderadamente fina y un 34% de textura media.

Por otro lado, con respecto a los valores de pH medidos, estos se pueden clasificar en diferentes categorías dependiendo de su valor (Soil Survey Division Staff, 1993). A continuación, los porcentajes de muestras en cada una de las categorías se presentan de la siguiente manera: 12% de las muestras corresponden a moderadamente ácido (pH entre 5.6 y 6.0), 30% de estas son ligeramente ácidas (pH entre 6.1 y 6.5), 48% a neutro (pH entre 6.6 y 7.3) y 8% a ligeramente alcalino (pH entre 7.4 y 7.8). De los estadísticos se puede destacar la cercanía entre los valores de la media y la mediana, además de una baja dispersión y muy bajo valor de CV, cercano a 0, con lo cual fue posible inferir la homogeneidad del conjunto de datos de pH.

Analizando el parámetro de conductividad eléctrica, a partir de la mediana y SD se pudo deducir que una gran cantidad de muestras presentan valores de CE menores a 2 mSgr^{-1} , con lo que se puede concluir que en las muestras de esta región existe una gran cantidad de suelos que son no salinos, según con la clasificación propuesta por el USDA (Soil Survey Division Staff, 1993). Profundizando en este punto, el 96% de los datos corresponden a muestras no salinas y solo un 2% de estas pertenecen a la clase muy ligeramente salina (valores de CE entre 2 y 4 mS gr^{-1}). Por esto, existe un 2% de las muestras que fueron superiores al valor de 4 mS gr^{-1} , muestras de suelo fuertemente salinas, con lo que se puede aseverar que en estas se reflejan problemas de salinidad del suelo, según los criterios del USDA, y que este puede estar originado por un exceso de sales en las aguas de riego o por problemas de drenaje que, indirectamente, producen acumulaciones salinas en la superficie o en diferentes profundidades del suelo (Ruiz, 1984).

Del total de datos del parámetro materia orgánica, para cada una de las categorías de clasificación según el tipo orden de taxonomía de suelos, se tiene que un 76% de las muestras tiene muy bajo contenido de MO y un 12% corresponde a bajo contenido de esta. Estos porcentajes de bajos contenidos de MO son consecuencia de un uso intensivo de los suelos en estudio. Por lo tanto, en esta región existe un alto porcentaje de muestras con problemas de materia orgánica.

Tabla 32. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Estadísticos Descriptivos	pH	CE (mS gr ⁻¹)	MO (% bs)	CIC (Cmol (+) kg ⁻¹)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Media	6.6	0.87	2.9	23.0	32.7	39.4	27.9
SD ^a	0.51	1.2	1.2	7.5	12.8	7.9	7.1
Mediana	6.7	0.56	2.8	22.4	32.5	39.4	27.9
Mínimo	5.6	0.19	0.30	7.0	5.1	19.2	15.4
Máximo	7.6	8.4	6.0	42.0	57.2	51.8	45.1
Rango	2.1	8.3	5.7	35.1	52.1	32.6	29.7
CV (%) ^b	7.7	135	39.8	32.5	39.2	20.0	25.6

^a Desviación Estándar

^b Coeficiente de Variación

De la tabla se puede apreciar que la mediana y la media poseen valores no muy cercanos, por otro lado, observando la mediana y el SD se puede deducir que un gran porcentaje de las muestras pertenecen a la clase de fertilidad media (valores de CIC entre 15 y 25 Cmol (+) kg⁻¹). Por último, mediante el parámetro capacidad de intercambio catiónico es posible determinar la clase de fertilidad de los suelos (Fernández et al., 2006). Mediante esto se puede aseverar que un 4% de las muestras tiene una fertilidad muy alta, 28% alta fertilidad y un 58% corresponden a la clase fertilidad media. Además, es importante mencionar que un 2% de las muestras presentan una baja capacidad de almacenamiento de nutrientes (CIC <10 Cmol (+) kg⁻¹) (Fernández et al., 2006).

4.3.2.2. Concentraciones totales de ETM.

Como se puede apreciar en la **Tabla 33**, se tiene un total de 50 muestras extraídas en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. En la tabla se puede observar que en esta región ocurre lo mismo que en las anteriores regiones, hay presencia de altas concentraciones en promedio de los elementos Cu y Zn (176 y 92.9 mgkg⁻¹, respectivamente) en comparación con los otros elementos en los suelos extraídos. Por el contrario, no ocurre lo mismo al momento de analizar la desviación estándar, en esta se observa la gran variabilidad que presenta el elemento Cu (184 mgkg⁻¹) en comparación con

los otros elementos, del que la mayoría no supera los 33.5 mgkg^{-1} , de esto se puede concluir que existe una gran dispersión de las concentraciones de Cu sobre su media. Una posible explicación para esta variabilidad estaría asociada a actividades industriales en algunas sub-áreas o derechamente producto de puntos notoriamente contaminados.

Por otro lado, analizando el coeficiente de asimetría o sesgo se puede observar que todos los elementos, excepto el Ni, presentan un valor positivo, es decir, gran parte de las concentraciones de cada elemento se encuentran sobre la media. Para el elemento Zn se tiene un valor muy cercano a 0, lo cual nos indica que en este elemento los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor de la media, es decir, la curva es relativamente simétrica. Además es importante señalar que los elementos As, Cu, Ni y Pb presentan valores de coeficiente de asimetría mayores a 1, infiriéndose que estos se encuentran fuertemente sesgados. El valor de asimetría más alto de todos, ocurre en el elemento Pb con un coeficiente de asimetría de 1.6. Coeficientes de asimetría no tan altos son comunes para los metales pesados, debido a que por lo general tienen bajas concentraciones en el ambiente, por lo que la presencia de una fuente puntual de contaminación puede causar un fuerte aumento de la concentración local y por esto presentar un valor alto de coeficiente de asimetría, de esto se puede inferir que tal situación ocurre en las concentraciones de Pb en esta región. Asimismo, considerando la medida de curtosis se puede indicar que todos los elementos, excepto el Zn, tienen una distribución más puntiaguda que la distribución normal, en otras palabras, una gran cantidad de los datos están concentrados en la parte central de la distribución. Esto mismo no ocurre para el elemento Zn, ya que presenta un valor negativo, con lo cual nos está indicando que los datos tienen una distribución más achatada que la normal.

Continuando con el análisis, en la tabla se puede apreciar que el coeficiente de variación de todos los elementos, excepto el elemento Cu, tiene un valor menor a 1, pudiendo concluir que sus datos son homogéneos. Para el caso del Cu donde el coeficiente de variación es de 1.1, resultando estar en el intervalo entre 1 y 1.5 y con lo cual nos indica que no es posible asegurar la homogeneidad de los datos.

Tabla 33. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg^{-1}) de las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn, obtenidos de las muestras de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Estadísticos Descriptivos	As	Cu	Ni	Pb	Zn	
Número de Muestras	50	50	50	50	50	
Media	21.1	176	9.1	15.1	92.9	
SD ^a	13.2	184	2.7	5.9	33.5	
Mediana	17.1	86.3	9.6	13.5	88.1	
MAD ^b	8.4	47.8	1.3	2.8	22.0	
Sesgo	1.0	1.3	-1.0	1.6	0.24	
Curtosis	1.4	0.56	2.1	3.1	-0.39	
Rango	65.3	670	15.1	30.3	150	
Mínimo	0.24	6.0	0.72	6.3	12.9	
Máximo	65.5	676	15.8	36.6	163	
CV (%) ^c	62.2	105	30.2	38.9	36.0	
Percentiles	5	3.5	20.9	2.4	8.8	44.2
	25	11.8	48.1	8.1	10.8	68.4
	50	17.1	86.3	9.6	13.5	88.1
	75	30.4	294	10.7	17.8	122
	95	47.5	586	12.4	28.4	154

^a Desviación Estándar

^b Desviación Absoluta de la Mediana

^c Coeficiente de Variación

Otro punto que es importante considerar, es la amplitud de datos que presentan cada una de las concentraciones. En esta región se tiene que para los elementos Cu y Zn existe un gran rango de concentraciones (670 y 150 mgkg^{-1} , respectivamente), estos rangos reflejan contaminación en algunos de los suelos muestreados. Por otro lado, el elemento Ni y Pb tienen rangos de concentraciones menores a 30.3 mgkg^{-1} . Con respecto a las muestras que presentan concentraciones de ETM inferiores a LD, en esta región se sabe que el elemento Ni no presenta muestras que no superan tal límite. En cambio el Cd y Se tienen un 40 y 34%, respectivamente, de datos que no superan el límite, por lo que estos elementos han sido descartados para todos los análisis hechos en esta región.

Finalmente, por todo lo anterior, fue posible concluir que para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins ninguno de los ETM y parámetros seleccionados para este

estudio, excepto el Zn, pH, MO, CIC, arena, limo y arcilla, tiende a una distribución normal.

4.3.3. Análisis multivariado de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Señalar que el comportamiento de los ETM con los parámetros considerados, además de las relaciones entre elementos, por lo que se realizó el siguiente tratamiento multivariado a los datos determinados de las muestras recolectadas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Se realizaron los análisis de correlación de Spearman entre ETM, correlación de Spearman entre ETM y parámetros, análisis de componentes principales (ACP) y análisis Cluster.

4.3.3.1. Correlación de Spearman entre ETM de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

En las relaciones que pueden existir entre los ETM considerados en este estudio, se procedió a realizar el respectivo análisis de correlación de Spearman. Las medidas de correlación de este análisis se obtuvieron mediante el software IBM SPSS. Estas medidas, son presentadas en la **Tabla 34**.

Tabla 34. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1.0				
Cu	0.84**	1.0			
Ni	0.70**	0.55**	1.0		
Pb	0.54**	0.67**	0.51**	1.0	
Zn	0.66**	0.79**	0.55**	0.80**	1.0

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 35**, se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos.

Tabla 35. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Cu/As	0.84**
2	Zn/Pb	0.80**
3	Zn/Cu	0.79**
4	Ni/As	0.70**
5	Pb/Cu	0.67**
6	Zn/As	0.66**
7	Ni/Cu	0.55**
8	Zn/Ni	0.55**
9	Pb/As	0.54**
10	Pb/Ni	0.51**

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Con respecto a la tabla anterior, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre los elementos As y Cu, lo que mostraría una correlación muy fuerte entre estos ETM. Esta gran correlación podría ser evidencia de un origen similar de estos ETM. También se observaron correlaciones fuertes igual de altas que las anteriores, esto ocurre entre Zn/Pb, Zn/Cu y Ni/As, lo que mostraría una correlación bastante fuerte entre estos, haciendo inferir que estos ETM tienen un origen similar. Correlaciones moderadas entre Pb/Cu, Zn/As, Ni/Cu, Zn/Ni, Pb/As y Pb/Ni, posiblemente indicando la adición de estos ETM de diferentes fuentes. Estas correlaciones significativamente positivas entre ETM sugieren una fuente en común (Al-Khashman & Shawabkeh, 2006). Sin embargo, las correlaciones significativas no siempre representan que sea una fuente en común (Hani & Pazira, 2011). Esto implica que el análisis de correlación por sí solo no es suficiente para poder identificar una posible fuente de contaminación de metales pesados, si no debe ser llevado a cabo junto con otras herramientas de análisis. Por otro lado, es posible notar que no existen bajas correlaciones entre ETM. También es necesario destacar, el Pb presenta correlaciones fuertes con elementos que principalmente provienen de actividades antropogénicas como lo es el Cu (Micó, 2005).

4.3.3.2. Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Para comprender las relaciones que pueden existir entre los ETM y las propiedades edáficas, se utilizó el análisis de correlación de Spearman. Las medidas de correlación entre ETM y parámetros de dicho análisis se presentan en la **Tabla 36**.

Tabla 36. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

	pH	CE	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
As	0.27	-0.06	0.17	-0.02	-0.07	0.16	-0.04
Cu	0.41**	-0.04	0.17	-0.03	-0.04	0.12	-0.03
Ni	-0.04	-0.09	0.23	0.11	-0.24	0.31*	0.14
Pb	0.14	0.08	0.53**	0.10	-0.12	0.12	0.18
Zn	0.26	-0.04	0.52**	0.23	-0.18	0.16	0.17

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 37**, se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos. En esta, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre el elemento Pb y el parámetro MO, lo que mostraría una correlación significativamente positiva entre estos. Existen correlaciones significativamente positivas entre el contenido de la mayoría de ETM y pH o MO del suelo. También es posible observar que las concentraciones de Ni y el contenido de limo muestran una correlación positiva pero débil. Todas estas correlaciones significativamente positivas entre ETM y parámetros, mencionadas anteriormente, pueden indicar que estos últimos tienen influencia sustancial en el contenido total de estos metales en los suelos.

Tabla 37. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Pb/MO	0.53**
2	Zn/MO	0.52**
3	Cu/pH	0.41**
4	Ni/Limo	0.31*
5	As/pH	0.27
6	Zn/pH	0.26
7	Ni/Arena	-0.24
8	Zn/CIC	0.23
9	Ni/MO	0.23
10	Zn/Arena	-0.18
11	Pb/Arcilla	0.18
12	Zn/Arcilla	0.17
13	As/MO	0.17
14	Cu/MO	0.17
15	Zn/Limo	0.16
16	As/Limo	0.16
17	Pb/pH	0.14
18	Ni/Arcilla	0.14
19	Pb/Arena	-0.12
20	Pb/Limo	0.12
21	Cu/Limo	0.12
22	Ni/CIC	0.11
23	Pb/CIC	0.10
24	Ni/CE	-0.09
25	Pb/CE	0.08
26	As/Arena	-0.07
27	As/CE	-0.06
28	Ni/pH	-0.04
29	Zn/CE	-0.04
30	Cu/Arena	-0.04
31	Cu/CE	-0.04
32	As/Arcilla	-0.04
33	Cu/CIC	-0.03
34	Cu/Arcilla	-0.03
35	As/CIC	-0.02

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Se encontraron correlaciones relativamente débiles o casi nulas entre los parámetros arena, limo, arcilla, CE y CIC, y los ETM. La falta de una correlación significativa entre las propiedades del suelo y los metales pesados se puede atribuir a una entrada continua de metales pesados o la presencia de varias fuentes de contaminación (Chen et al., 2008), ya que la liberación y transporte de metales pesados corresponden a complejos procesos (Grant & Sheppard, 2008). Otra posible explicación es que puede haber variaciones en el tipo de suelo, el uso de fertilizantes y el sistema de cultivo dentro del área de muestreo (Grant & Sheppard, 2008).

4.3.3.3. Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Al revisar el análisis de componentes principales se logró revelar las relaciones entre los ETM y parámetros edáficos de suelos superficiales, lo permitió la identificación de presumibles fuentes de contaminación de estos elementos en la región en referencia. Los resultados de los factores de carga y varianza explicada del ACP con rotación varimax, son presentados en la **Tabla 38**. En esta tabla, es posible apreciar que se extrajeron 4 componentes principales que explican el 80.0% de la varianza total de los datos, aplicando el criterio Kaiser para la selección del número de factores o componentes. Esto último se puede apreciar en la **Tabla 69** del Anexo II, en este se encuentra información adicional del ACP. En la **Figura 73**, se presenta el gráfico de los patrones de componentes de los ETM y parámetros en estudio.

La primera componente (CP1) explica un 33.6% de la varianza total. Este factor lo componen los parámetros CIC, arena, limo y arcilla, con factores de carga iguales a 0.77, -0.96, 0.77 y 0.87, respectivamente. El parámetro porcentaje de arena posee un factor de carga negativo, el cual contrapone el peso de las demás variables. Esta componente principal representa a propiedades del suelo.

El segunda componente (CP2) explica un 22.5% de la varianza total. Este factor lo componen los elementos Pb, Zn y el parámetro MO, con factores de carga iguales a 0.88, 0.80 y 0.62, respectivamente. Por un lado, los elementos Pb y Zn no poseen grandes porcentajes de muestras con concentraciones superiores a los valores de fondo de cada uno

para esta región, en promedio un 17% del total de muestras. Además estos elementos poseen una alta correlación entre ellos y con el elemento Cu, este último generalmente relacionado a actividades antrópicas. Todo lo anterior sugiere un origen antropogénico de esta componente. Cabe agregar, el elementos Zn posee un factor de carga importante en dos componentes, tanto en CP2 como en CP3. Esto haría pensar que este elemento tendría cierta relación con la tercera componente, es decir, el Zn posiblemente procedería de dos fuentes distintas.

Tabla 38. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parametros de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

ETM y Parámetros	Componentes Principales			
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
As	0.01	0.13	0.90	0.10
Cu	-0.25	0.37	0.62	0.47
Ni	0.31	0.19	0.83	-0.17
Pb	0.03	0.88	0.25	-0.17
Zn	0.10	0.80	0.50	0.12
pH	-0.09	0.14	-0.01	0.88
CE	-0.07	0.47	-0.09	-0.70
MO	0.45	0.62	-0.01	0.08
CIC	0.77	0.28	-0.03	-0.23
Arena	-0.96	-0.01	-0.14	-0.02
Limo	0.77	-0.14	0.34	0.09
Arcilla	0.87	0.19	-0.13	-0.07
Porcentaje Varianza Explicada (%)	33.6	22.5	14.7	9.3
Porcentaje Varianza Explicada Acumulada (%)	33.6	56.1	70.7	80.0

La tercera componente (CP3) explica un 14.7% de la varianza total. Este factor lo componen los elementos As, Cu y Ni, con factores de carga iguales a 0.90, 0.62 y 0.83, respectivamente. Los elementos que componen este factor podrían ser asociados a un origen geogénico. Una posible explicación para esto es que en promedio un 90% de todas las muestras presentan concentraciones, de As y Ni, menores al valor de fondo de esta

región. Para agregar, en varios estudios el contenido del elemento Ni se ha relacionado principalmente a un origen natural (Facchinelli et al., 2001). Pero por el contrario, se tiene al Cu con un porcentaje considerable de muestras que superan el valor de fondo, aproximadamente un 40%. Además, el Cu generalmente está más relacionado a procedencia de actividades humanas (Micó, 2005). Por lo tanto, esta componente posee contribuciones tanto de fuentes geogénicas como de aportes de origen antrópico, debido además a la correlación significativa que tienen los elementos As y Ni con elementos de la segunda componente.

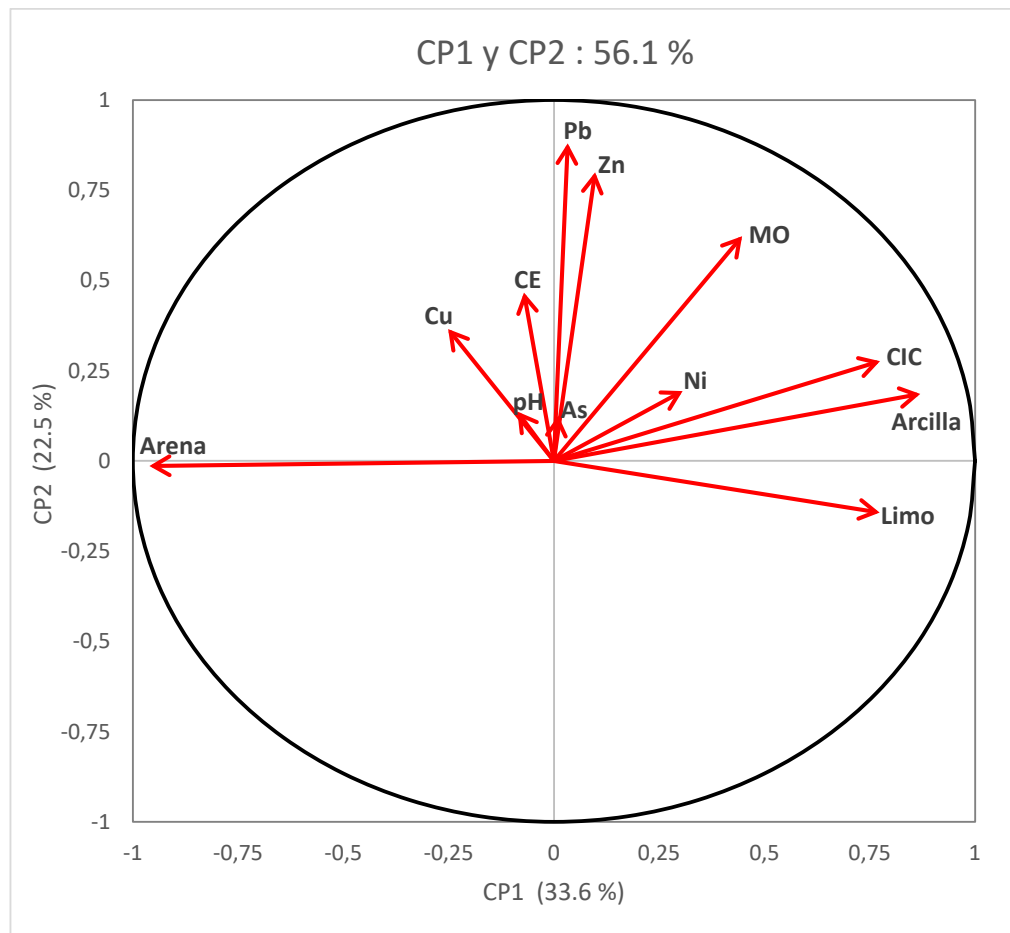


Figura 73. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

La cuarta componente (CP4) explica un 9.3% de la varianza total. Este factor lo componen los parámetros CE y pH, con factores de carga iguales a -0.70 y 0.88, respectivamente. Los

dos últimos componentes pueden ser definidos como asociaciones geogénicas, ya que la variabilidad de los parámetros parece estar controlada por el material originario del suelo. Todo lo anterior, es consistente con lo realizado en el análisis de correlación de Spearman.

4.3.3.4. Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región del Libertador General

Bernardo O'Higgins.

Al tener presente el análisis Cluster es posible clasificar e identificar las posibles fuentes de ETM (origen antrópico o natural). Otro objetivo de este análisis, es el de permitir verificar los resultados del ACP realizado anteriormente. En la **Figura 74**, se presenta el dendograma del análisis Cluster, el cual fue obtenido aplicando la metodología del punto 3.5.

En la figura, es posible apreciar que todos los parámetros de propiedades edáficas tienen una escasa asociación con todos los ETM. Esto ayuda a ratificar lo afirmado en el análisis de correlación de Spearman, ya que todos los parámetros tienen escasa correlación con casi todos los ETM, excepto el pH que presenta débil correlación con la mayoría de los metales pesados utilizados en este estudio. En la **Figura 74** se puede apreciar que las propiedades edáficas tienden a desligarse de todos los ETM, esto se podría interpretar que estos forman un grupo de solo parámetros edáficos. Separando este grupo de 6 parámetros, se puede observar que las variables restantes se podrían dividir en 2 grupos conformados por ETM.

El primer grupo lo componen los elementos Cu, Pb y Zn. Este grupo corresponde a elementos que provienen de actividades antrópicas, debido a que presentan una cantidad relativamente significativa de muestras con concentraciones mayores a los valores de fondo. También es posible apreciar que existe una gran asociación entre los elementos Pb y Zn, pudiéndose inferir que estos provienen de una misma fuente o tienen varias fuentes en común. Estos elementos están relacionados entre sí debido a su origen antropogénico, pero parece razonable que estos tienen varias fuentes y al menos una fuente en común.

En el segundo grupo se encuentran los elementos As y Ni. En la figura se puede ver que el As tiene una buena asociación con el Ni. Debido a que el arsénico y níquel presentan una casi nula o muy baja carga en la componente de origen antrópico (PC2) del ACP, se puede

concluir que este grupo lo componen elementos que están relacionados con contenidos de origen antrópico y de origen natural, pero principalmente vendría controlada por el material originario. Todo esto corroborando las conclusiones obtenidas mediante el análisis de correlación de Spearman y componentes principales. Cabe señalar que formar este grupo no excluye completamente la influencia de procesos antropogénicos, la identificación de grupos se basa en la influencia dominante.

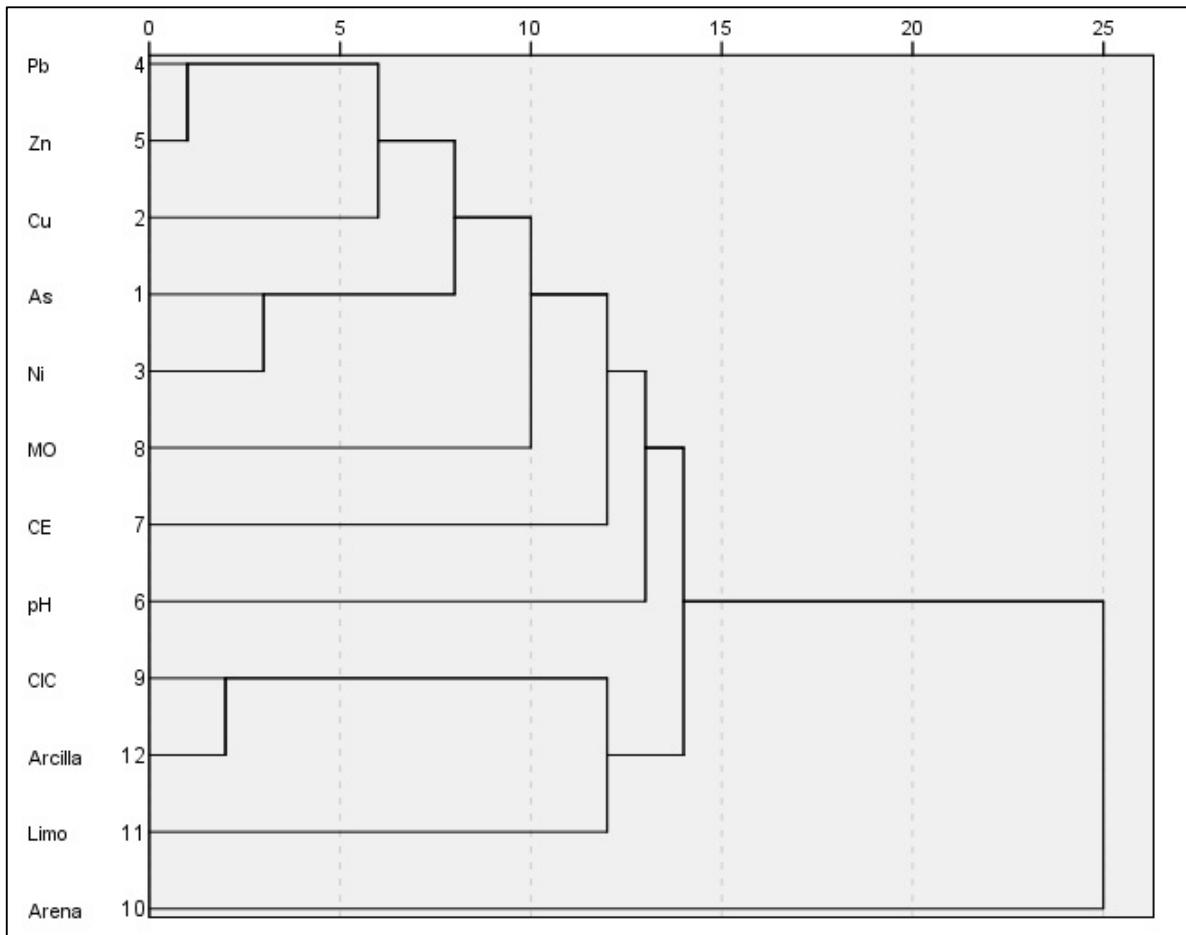


Figura 74. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

4.3.4. Background Values de los ETM de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Teniendo presente, para poder detectar valores atípicos en el conjunto de datos se utilizaron las técnicas Boxplot, Median+2MAD e Iterative 2σ -technique. Agregando a esto los

valores umbrales de la Norma Chilena (INN, 2004) y los valores obtenidos de la metodología de la Norma Holandesa (VROM, 2000), ambos citados por el SAG. Los valores umbrales usados en este estudio y conseguidos a través de los diferentes métodos indicados en el CAPÍTULO III, son entregados en la **Tabla 39**. Igualmente, en la **Tabla 40** se presenta la proporción de muestras que exceden tales valores umbrales utilizados para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Tabla 39. *Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.*

Técnica Estadística	ETM (mgkg ⁻¹)					
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	
Boxplot	58.4	662	14.6	28.2	201	
Método [Median+2 MAD]	33.9	182	12.1	19.1	132	
Método iterative 2σ-technique	38.0	99.0	12.5	20.4	143	
Target Value	27.3	33.5	37.9	80.8	138	
Intervention Value	51.8	177	227	504	710	
Concentración Máxima	pH > 6.5	20.0	150	112	75.0	175
Permitida	pH < 6.5	12.5	100	50.0	50.0	120

En la **Tabla 39** y **Tabla 40**, se puede apreciar que el método [Median+2 MAD] presenta valores umbrales inferiores a los otros métodos utilizados para los elementos Ni, Pb y Zn. Por consiguiente, tal método presentó un mayor número de muestras consideradas como contaminadas debido a que exceden tal límite superior, tales proporciones de muestras estarían entre el 6 y 18%. Al momento de comparar todos los métodos o concentraciones propuestas, fue posible observar que el método [Median+2 MAD] e Iterative 2σ-technique son los que poseen los límites superiores con valores más bajos, a excepción del As y Cu. Entre los métodos estadísticos, la técnica Iterative 2σ-technique presenta el valor de fondo más bajo para el elemento Cu, con proporción de muestras consideradas contaminadas del 40%.

Cabe destacar, el valor objetivo obtenido a partir de la fórmula de corrección del tipo de suelo de la guía holandesa presentó gran porcentaje de muestras contaminadas para el elemento Cu, con proporción de muestras contaminadas del 94%. Esto último, es debido a

que esta normativa entrega un valor umbral de este elemento muy inferior a los métodos homólogos a este. Otro caso a destacar, es lo que ocurre con el elemento As, donde un 30% de las muestras excederían el valor de 27.3 mgkg⁻¹ obtenido de la metodología empleada en la normativa holandesa. Asimismo, considerando el valor de intervención es posible observar que las muestras exceden dicho valor para el elemento cobre de manera considerable, con un 32%.

Tabla 40. *Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.*

		As	Cu	Ni	Pb	Zn
Boxplot		2.0	2.0	2.0	4.0	0
Método [Median+2 MAD]		14.0	32.0	6.0	18.0	16.0
Método iterative 2σ-technique		8.0	40.0	2.0	10.0	8.0
Target Value		30.0	94.0	0	0	12.0
Intervention Value		2.0	32.0	0	0	0
Concentración Máxima	pH > 6.5	44.0	30.0	0	0	16.0
Permitida	pH < 6.5	0	0	0	0	0

Con respecto a los valores umbrales citados por el SAG, el límite superior para el As para muestras con pH mayor a 6.5, presentaría el valor más bajo con respecto a los demás métodos, considerando que este contiene muestras que lo superan. Estos valores permitirían establecer que un 44% de las muestras estarían contaminadas considerando el límite superior entregado en la Norma Chilena para la macrozona en que se ubica el área de estudio (INN, 2004). Agregando a esto lo que ocurre para el elemento cobre, donde un 30% de las muestras sobrepasarían el valor de 150 mgkg⁻¹ citado por el SAG para suelos agrícolas de la macrozona norte.

Los valores umbrales citados por el SAG son los más altos para el elemento Ni, con respecto a los demás métodos. Por esto no existe proporción de muestras que exceden dicho límite. Asimismo, los valores obtenidos mediante el método Boxplot, presentarían los umbrales más altos comparado con los demás métodos para los elementos As, Cu y Zn, en los cuales se presentarían proporciones de 2, 2 y 0% de muestras que sobrepasen a tales límites superiores, respectivamente.

4.3.5. Interpolación de Kriging de la Región del Libertador General Bernardo

O'Higgins.

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se utilizó el método Kriging Simple para el análisis de predicciones geoestadísticas debido al número de datos que poseen los ETM de esta. La ubicación geográfica de las muestras recolectadas en la región en estudio, se presenta en la **Figura 5**. Las zonas o puntos con niveles de consideración de ETM, se les fue considerado posibles fuentes antrópicas cercanas a estos. Para esto fueron localizadas las agroindustrias frutícolas cercanas a dichos sitios mediante el mapa de catastro frutícola del Ministerio de Agricultura de Chile⁴, donde tal plano ubica geográficamente a estas empresas.

Tabla 41. Variogramas teóricos utilizados en interpolación Kriging de ETM en muestras de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Elemento	Transformación	RMSE		Mínimo	Modelo
		Exponencial	Esférico		
As	Normal Score	0.91	1.0	1.0	Exponencial
Cu	Normal Score	0.34	0.39	0.34	Exponencial
Ni	Normal Score	0.45	0.56	0.45	Exponencial
Pb	Logaritmo	0.00	0.01	0.00	Exponencial
Zn	Ninguna	258	389	258	Exponencial

Antes, es necesario entregar los variogramas utilizados y las transformaciones realizadas a los datos de cada ETM para esta interpolación Kriging, los cuales son un requisito para la realización de esta técnica. Estos variogramas teóricos, elegidos considerando el menor valor de RMSE, y las transformaciones efectuadas a los datos de cada ETM, las cuales dependen de las pruebas de normalidad hechas a estos mismos, son entregados en la **Tabla 41**. Luego, se presentan los mapas de distribución Kriging para cada ETM de la región en referencia.

⁴<http://ide2.minagri.gob.cl/publico/>

4.3.4.1. Distribución del Arsénico.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 41**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Exponencial y necesitaron una transformación Normal Score o estandarización. En la **Figura 75**, se presenta la distribución espacial de As en las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. En la figura se puede apreciar que existe una zona con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 65.2 mgkg^{-1} , lo cual puede ser un indicio de que se manipula este elemento en estos suelos. Los niveles de As en el área en estudio tienden a aumentar hacia el noreste, partiendo de una región donde las concentraciones son inferiores a 3.5 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles superan los 65.2 mgkg^{-1} de arsénico. Además, la zona de color naranja oscuro (concentraciones predichas entre 36.6 y 65.2 mgkg^{-1}) presenta niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 39**. Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de As tiende a aumentar su estimación hacia el noreste, por lo que habría un cierto aporte de actividades antrópicas a esta zona. En estos sitios existe la presencia de una gran cantidad de zonas de frutales, además de cultivos anuales y parronales. Por lo que se podría atribuir a que estos niveles son debido al uso de fertilizantes fosfatados y abonos orgánicos (Hani & Pazira, 2011), y también por la presencia de varios centros frutícolas de agricultura intensiva, lo que conlleva una mayor productividad agrícola. Debido a la envergadura de estas empresas, se generan gran cantidad de RILes (residuos industriales líquidos) y los cuales si no tienen el tratamiento adecuado por parte de las agroindustrias, pueden aportar As a los suelos cercanos. Agregando además la actividad minera cercana a la zona, tanto por la Fundición Caletones como por la División El Teniente de Codelco, debido a que ambas son fuentes antropogénicas de As (Yaylali-Abanuz, 2011). Estas a través de la emisión de partículas en suspensión en el aire de la fundición como de las descargas a ríos que son utilizados para riego de terrenos con material de desecho minero del cobre de la División El Teniente. Por otro lado, el área de la franja amarilla hacia la franja azul (equivalente a niveles inferiores a 30.4 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por

arsénico. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte y el cual fue citado por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras, es posible inferir que gran parte de zona amarilla hacia escalones superiores con concentraciones mayores a 30.4 mgkg^{-1} (franjas naranja, naranja oscuro y rojo) tendrían niveles que superarían la concentración máxima permitida para la macrozona norte y citada por el SAG para suelos agrícolas y no cumplirían con este. Considerando el Target Value del As igual a 27.3 mgkg^{-1} (ver **Tabla 39**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos en la franja naranja y las zonas de colores superiores (concentraciones mayores a 30.4 mgkg^{-1}), no cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de las zonas de color naranja oscuro y rojo tendrían niveles que superarían los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

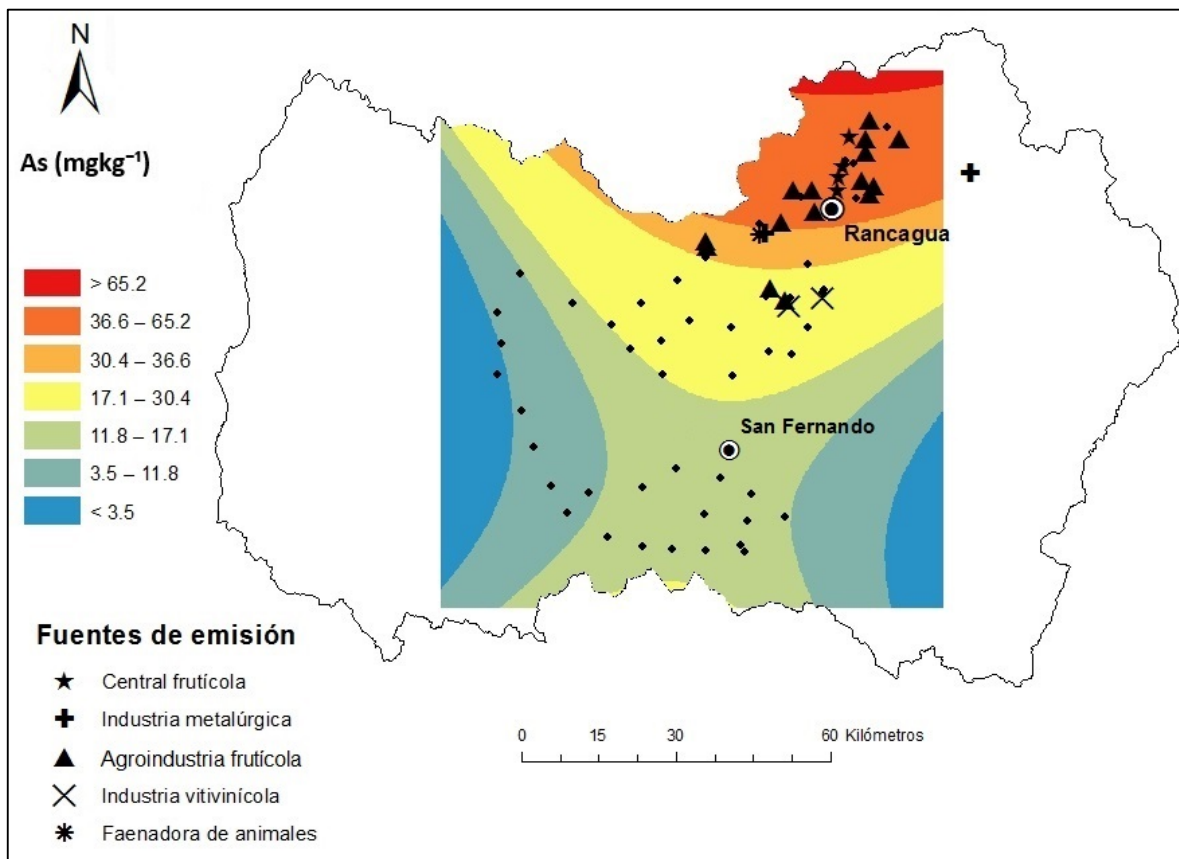


Figura 75. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

4.3.4.2. Distribución del Cobre.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 41**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Exponencial y necesitaron una transformación Normal Score o estandarización. En la **Figura 76**, se presenta la distribución espacial de Cu en las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 675 mgkg^{-1} . Los niveles de Cu tienden a aumentar hacia la zona de la Cuenca de Rancagua y se presentan 2 sitios al suroeste de esta ciudad con niveles superiores al resto de la región, donde los niveles pueden alcanzar los 675 mgkg^{-1} de cobre. Cabe destacar que la extensa zona que cubre la franja de color amarillo ($86.3 - 294 \text{ mgkg}^{-1}$), además de los territorios de color naranja y naranja oscuro (equivalente a concentraciones entre 294 y 675 mgkg^{-1}), presentarían niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 39**. Por lo tanto, gran parte del área en estudio presentaría concentraciones que podrían considerarse como suelos contaminados por cobre.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Cu tiende a aumentar su estimación hacia las áreas de color amarillo, naranja y naranja oscuro, por lo que se podría inferir que existen aportes de actividades antrópicas a estos y no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos suelos corresponden principalmente a zonas de cultivos anuales, frutales, viñas y parronales, además de la presencia de la industria del cobre (Fundición Caletones y la División El Teniente de Codelco), estas actividades estarían entregando aportes de este elemento debido a la utilización de productos agroquímicos que contienen Cu en forma de impurezas, como los fertilizantes fosfatados (Kabata-Pendias & Pendias, 2011); la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003); agregando a esto las emisiones industriales de los centros frutícolas y la presencia de actividades mineras del cobre. Esto último se puede ver claramente en la figura, pudiendo así poder concluir sobre los aportes que hace, esta fundición y mina El Teniente, a los niveles de cobre de la Cuenca de Rancagua a través de

partículas en suspensión en el aire y las descargas de material de desecho minero a ríos que son utilizados para riego en terrenos aguas abajo.

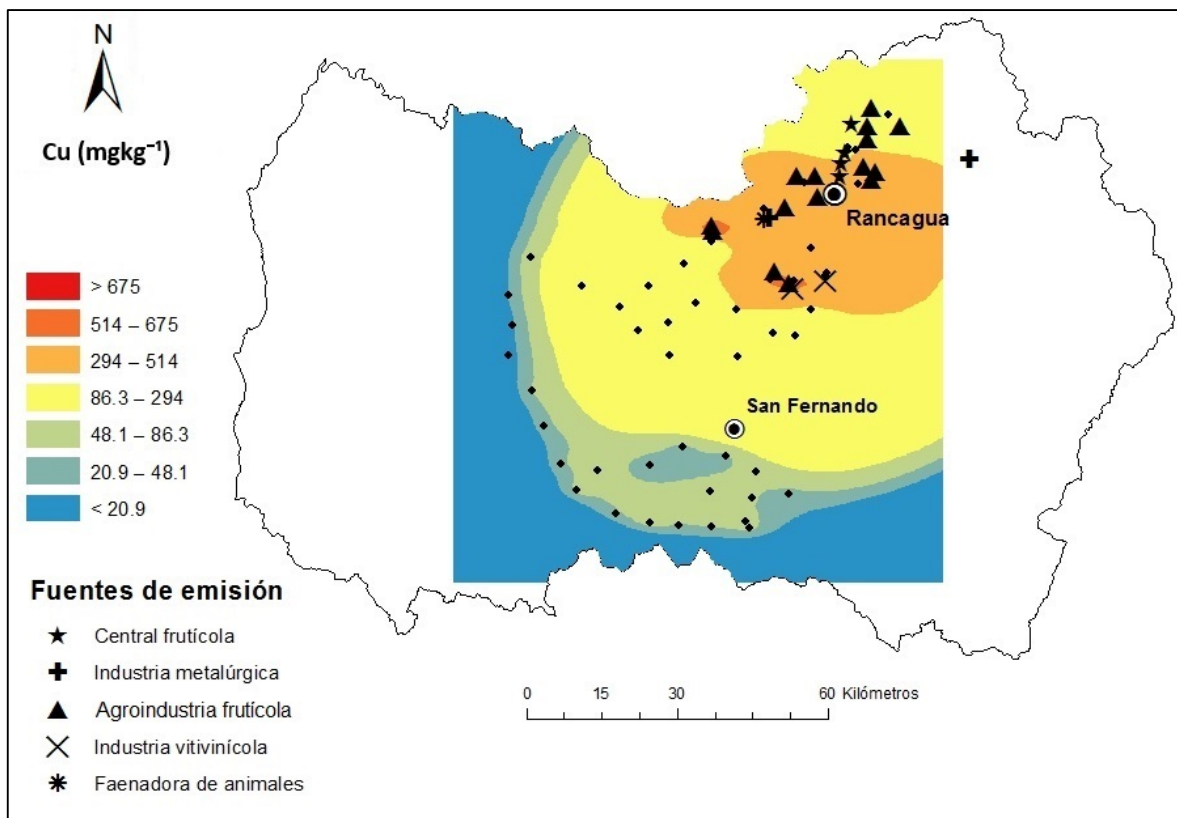


Figura 76. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Con respecto a los sitios de color naranja oscuro, se puede notar la influencia de agroindustrias frutícolas cercanas a estos y que aportarían sustancias contaminantes haciendo alcanzar tales niveles de Cu. El área de la franja verde hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 86.3 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por cobre. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte y citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras extraídas, esta concentración estaría dentro del intervalo $86.3 - 294 \text{ mgkg}^{-1}$ (franja color amarillo), por lo que gran parte de esta zona y el área de color naranja y naranja oscuro, tendrían suelos con niveles que sobrepasarían dicho umbral. Considerando el Target Value del Cu igual a 33.5 mgkg^{-1} (ver

Tabla 39) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos de casi todas las zonas (excepto la franja de color azul) no cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de las zonas de color naranja y naranja oscuro tendrían niveles que superarían los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.3.4.3. Distribución del Níquel.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 41**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Exponencial y necesitaron una transformación Normal Score o estandarización. En la **Figura 77**, se presenta la distribución espacial de Ni en las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 15.7 mgkg^{-1} . Los niveles de Ni en el área en estudio tienden a aumentar hacia el noreste, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 2.4 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 15.7 mgkg^{-1} de níquel. Los valores de fondo obtenidos mediante los 3 métodos estarían dentro de la zona naranja oscuro (concentraciones entre 11.7 y 15.7 mgkg^{-1}), ver **Tabla 39**. Por lo anterior, parte de esta área presentaría niveles superiores a los valores de fondo utilizados en este estudio. Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Ni tiende a aumentar su estimación hacia el noreste, por lo que habría un cierto aporte de fuentes de origen antropogénico en la zona mencionada. Estos sitios corresponden mayormente a zonas de frutales, además de cultivos anuales y parronales, por lo que se podría atribuir a estas actividades los niveles alcanzados debido a la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003). Esta situación coincide con la distribución del elemento arsénico ya que existe la presencia de varias agroindustrias de tipo frutícola, y las cuales estarían entregando aportes antrópicos de As y Ni, ambos de origen antrópico debido al uso de agroquímicos. Agregando además la actividad minera cercana a la zona, tanto por la Fundición Caletones como por la División El Teniente de Codelco, ya que estas son fuentes de emisión de este elemento (Streets et al., 2005), y pueden aportar Ni a través de la emisión de partículas en suspensión en el aire de la fundición como de las descargas de

material de desecho minero del cobre de la División El Teniente a ríos que son utilizados aguas abajo para riego de terrenos. Se puede asegurar que el área comprendida entre la franja amarilla y las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 10.7 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por níquel.

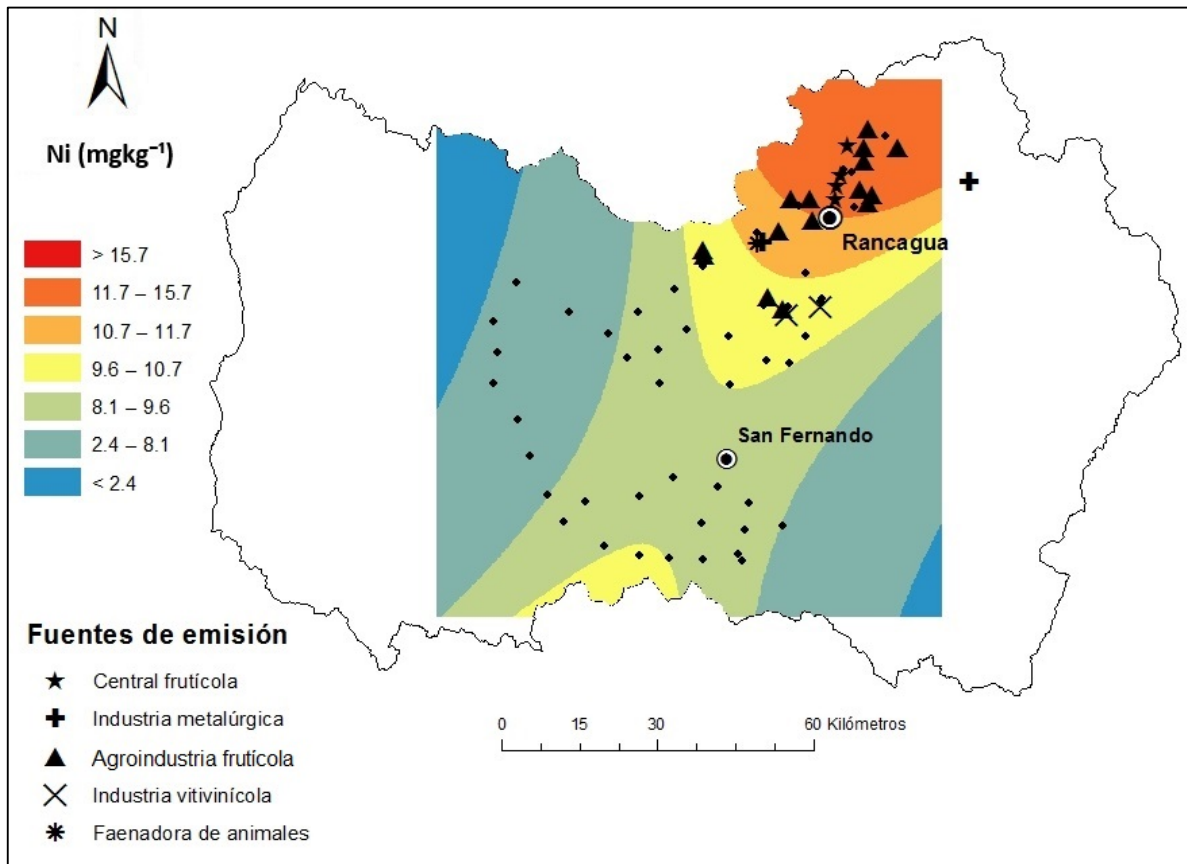


Figura 77. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte y citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras, en la figura se puede apreciar que todos los suelos tendrían niveles muy inferiores a la concentración máxima permitida citada por el SAG. Considerando el Target Value del Ni igual a 37.9 mgkg^{-1} (ver **Tabla 39**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que todos los suelos en estudio cumplirían con los estándares holandeses. Por lo anterior, se podría asegurar que todos los suelos de esta región estarían

libres de contaminación, a excepción de la zona noreste, con lo que los suelos en estas zonas cumplirían con los valores propuestos tanto por el SAG como por la norma holandesa para el elemento níquel. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentarían niveles inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.3.4.4. Distribución del Plomo.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 41**, se puede ver que los datos de este elemento siguieron el modelo Exponencial y necesitaron una transformación Logarítmica. En la **Figura 78**, se presenta la distribución espacial de Pb en las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 36.5 mgkg^{-1} . Los niveles de Pb en el área en estudio tienden a aumentar hacia el norte de la región en estudio, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 8.8 mgkg^{-1} hasta la zona donde los niveles alcanzan los 17.8 mgkg^{-1} de plomo.

Asimismo, los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 39**, están dentro de la franja naranja (niveles entre 17.8 y 25.2 mgkg^{-1}). De esto es posible concluir que mediante los métodos de valores de fondo, ninguna zona presenta signos de contaminación. Sin embargo, si es posible apreciar que las concentraciones de Pb en esta región tienden a aumentar su estimación hacia el centro, por lo que esto daría indicios de que en esta zona si habría algún grado de pequeños aportes de actividades antrópicas. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, pero además existe la presencia de una faenadora de aves de la empresa Agrosuper (Faenadora Lo Miranda) y una fundición de acero para la minería (Metalúrgica Rancagua S.A.), por lo tanto todas estas actividades podrían estar aportando Pb a estos suelos pero no de una manera preocupante, más bien el aporte es bajo. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte y citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras, es posible asegurar que todas las zonas tendrían niveles inferiores a la concentración máxima permitida citada por el SAG. Considerando el Target Value del Pb igual a 80.8 mgkg^{-1} (ver

Tabla 39) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos de todas las zonas del área en estudio cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentarían niveles inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

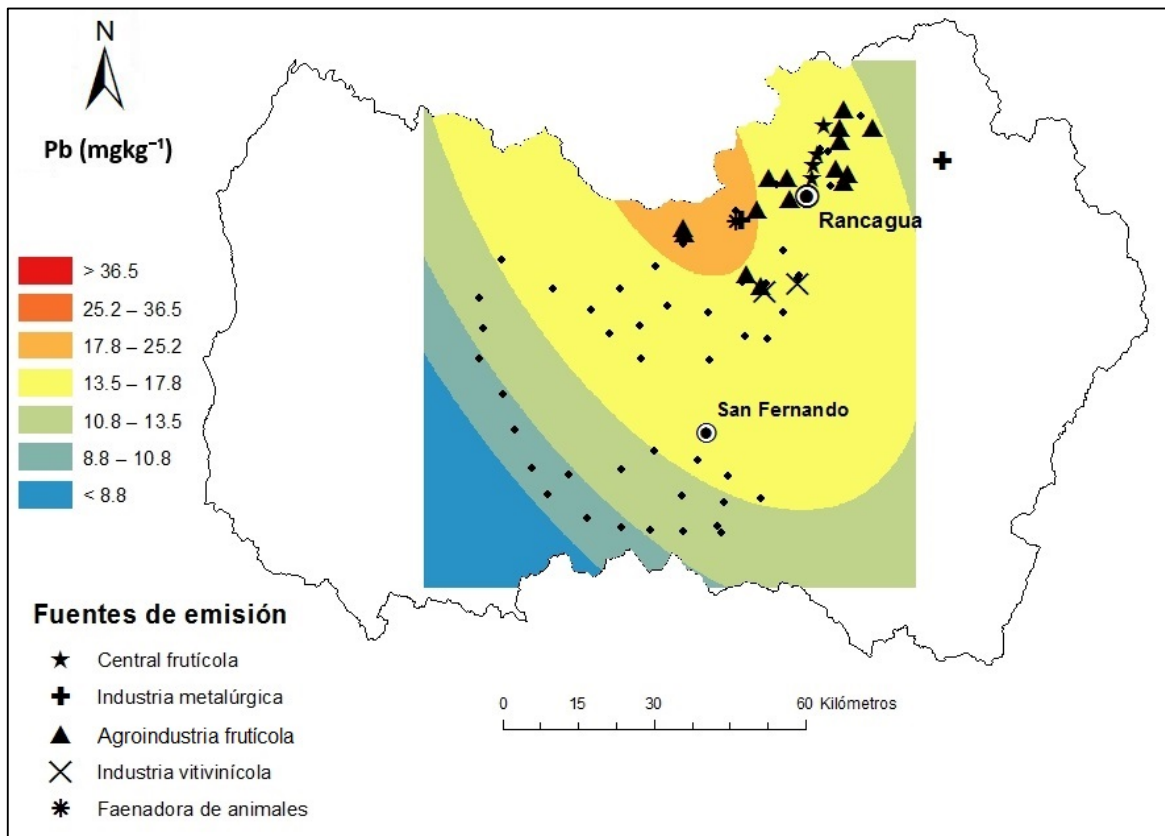


Figura 78. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

4.3.4.5. Distribución del Zinc.

En el análisis de comportamiento de variograma de la **Tabla 41**, se puede ver que los datos de este elemento siguen el modelo Exponencial y estos no necesitan una transformación. En la **Figura 79**, se presenta la distribución espacial de Zn en las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 163 mgkg⁻¹. Los niveles de Zn tienden a aumentar hacia centro del área en estudio, partiendo de suelos

donde las concentraciones son inferiores a 44.2 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 142 mgkg^{-1} de zinc. Para agregar, parte de la zona correspondiente a la franja de color naranja, con concentraciones predichas entre 122 y 142 mgkg^{-1} , presentan niveles que son superiores al valor de fondo obtenido mediante el método Median+2 MAD, ver **Tabla 39**. Para los 2 métodos restantes no existen zonas que superen a tales valores de fondo.

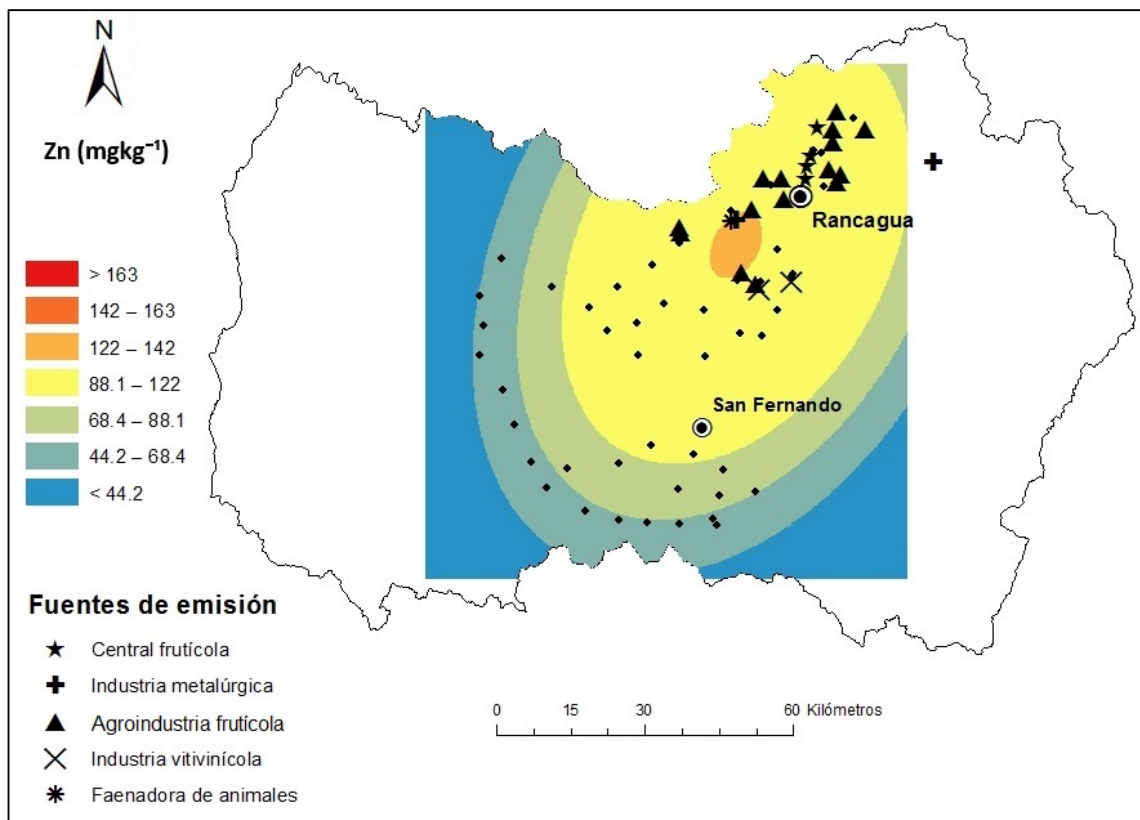


Figura 79. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Zn tiende a aumentar su estimación hacía el centro, de alguna manera esto mostraría que hay aportes de actividades antrópicas a estas. Por esto, los sitios ubicados en esta zona (zona color naranja) no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a aportes antrópicos. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, parronales, la presencia de una faenadora de animales y una fundición de acero para la minería, con lo cual se podría atribuir a que

estos niveles son alcanzados es debido a la práctica agrícola (Kabata-Pendias & Pendias, 2011), producto del sacrificio de animales (Ambisat Ingeniería Ambiental, 2004) y a los procesos de fundición (Zhou et al., 2013).

Por otro lado, el área de la franja amarilla hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 122 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por zinc. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona norte y citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), depende del pH del suelo. Por conocimiento del pH de las muestras que se ubican en los sitios de niveles altos (zona naranja), es posible asegurar que esta concentración no estaría dentro de ninguna zona, y por esto tales suelos tendrían niveles inferiores a dicho umbral. Considerando el Target Value del Zn igual a 138 mgkg^{-1} (ver **Tabla 39**), obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos de una pequeña área de la zona naranja (concentraciones entre 122 y 142 mgkg^{-1}), no cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentarían niveles inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.3.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Con la finalidad de poder determinar la contaminación existente en las muestras de suelo de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, estas fueron evaluadas mediante los diferentes factores de evaluación de riesgo ecológico (ver punto 3.11.). Los valores de fondo de los elementos As (33.9 mgkg^{-1}), Ni (12.1 mgkg^{-1}), Pb (19.1 mgkg^{-1}) y Zn (132 mgkg^{-1}) corresponden a los obtenidos mediante técnica *Median + 2 MAD*, y con respecto al Cu (99.0 mgkg^{-1}), este fue el resultado de la aplicación del método Iterative 2σ -technique.

4.3.6.1. Índice de Geoacumulación (I_{geo}).

Los resultados de los valores obtenidos del índice de geoacumulación para cada ETM son presentados en la **Figura 80**. En esta figura es posible apreciar que el elemento Cu presentó suelos entre no contaminados hasta moderadamente contaminados, valores de I_{geo} entre -4.6 a 2.2.

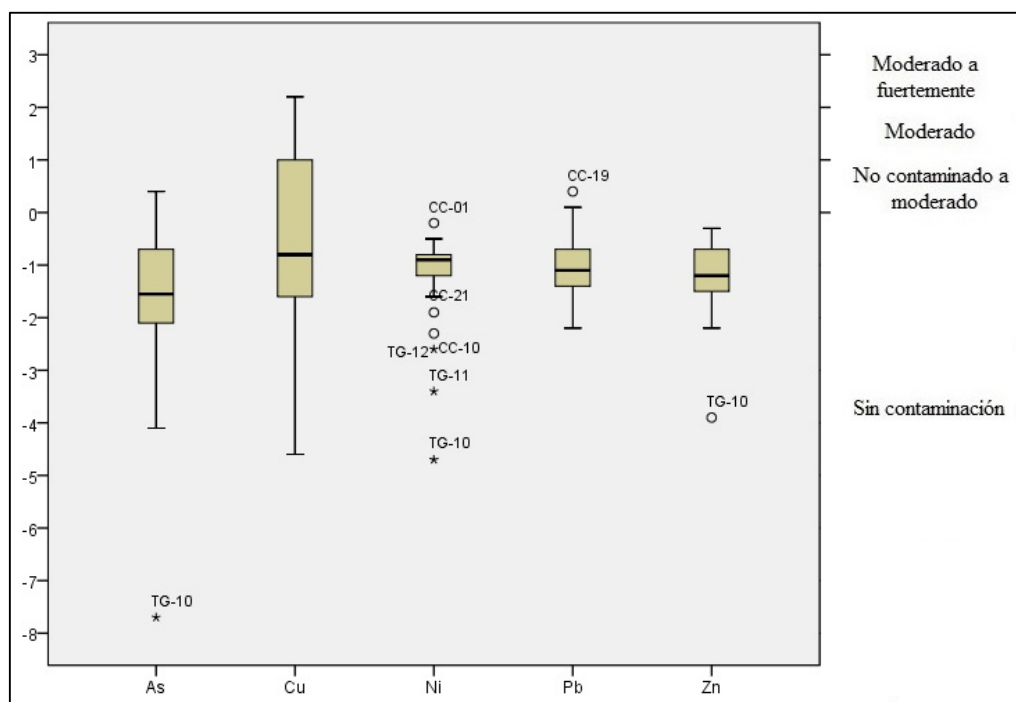


Figura 80. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Además, estos suelos mayoritariamente presentan nula contaminación con respecto al cobre (valores de I_{geo} menor a 0). Asimismo, un 24% de las muestras extraídas a lo más estarían dentro de la categoría moderado a fuertemente contaminado por este elemento ($2 < I_{geo} \leq 3$). Con respecto al resto de elementos (As, Ni, Pb y Zn), la mayoría de las muestras de suelo, mayor a un 96%, prácticamente no tienen contaminación por estos elementos, a excepción de níquel y zinc, donde todas las muestras poseen valores menores a 0 (Prácticamente sin contaminación).

4.3.6.2. Factor de Contaminación (C_f), Grado de Contaminación (C_{deg}) e Índice Integrado de Polución (IPI).

Los resultados de los valores obtenidos del factor de contaminación para cada ETM son presentados en la **Figura 81** y **Figura 82**, además en la **Tabla 42**, se entregan algunos parámetros estadísticos de cada elemento para contribuir a la interpretación de los resultados. En la figura es posible apreciar que el elemento Cu presenta un porcentaje importante de suelos que están dentro de la categoría de contaminación considerable (20%

del total), y además tendría una pequeña cantidad de muestras, cercana al 4%, con contaminación muy alta por este elemento. A pesar de esto, la mayoría de las muestras de suelo (60% de los sitios) están dentro de la categoría contaminación baja con valores menores a 1. Con respecto al resto de elementos (As, Ni, Pb y Zn), gran parte de las muestras tendrían baja contaminación por estos elementos, sobre el 82% de los sitios, y un pequeño porcentaje de estas están dentro de la categoría contaminación moderada ($1 \leq C_f < 3$). Finalmente, de la tabla se puede inferir que los suelos de esta región tienen contaminación baja con respecto a todos los ETM en estudio, a excepción del cobre donde si ha estado afectado por actividades antrópicas que han permitido alcanzar tales niveles.

Tabla 42. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Metales	Mínimo	Máximo	Media	SD ^a	Mediana
As	0.01	1.9	0.62	0.39	0.50
Cu	0.06	6.8	1.8	1.9	0.87
Ni	0.06	1.3	0.75	0.23	0.79
Pb	0.33	1.9	0.79	0.31	0.71
Zn	0.10	1.2	0.70	0.25	0.67

^a Desviación Estándar

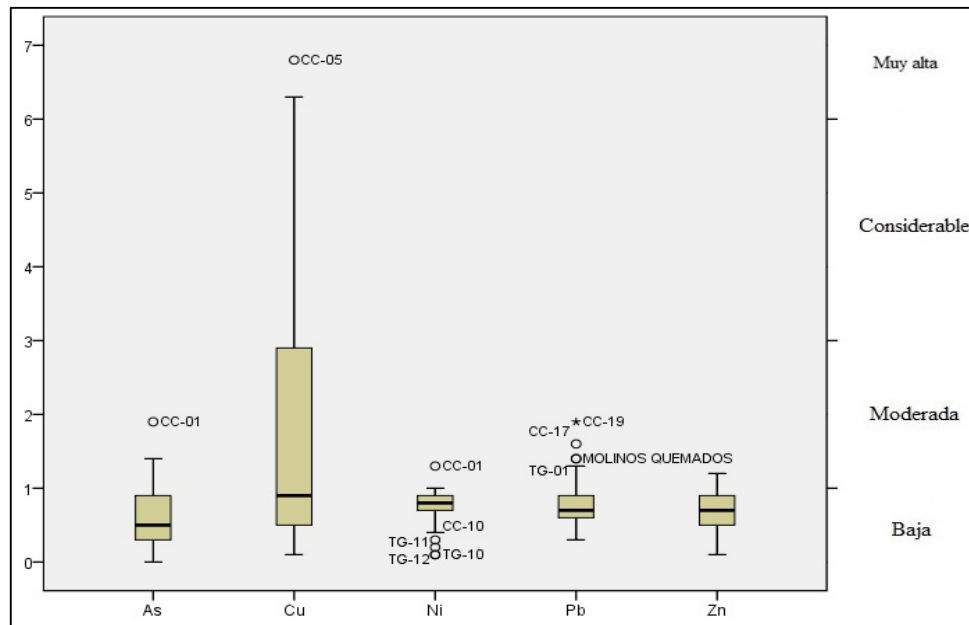


Figura 81. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

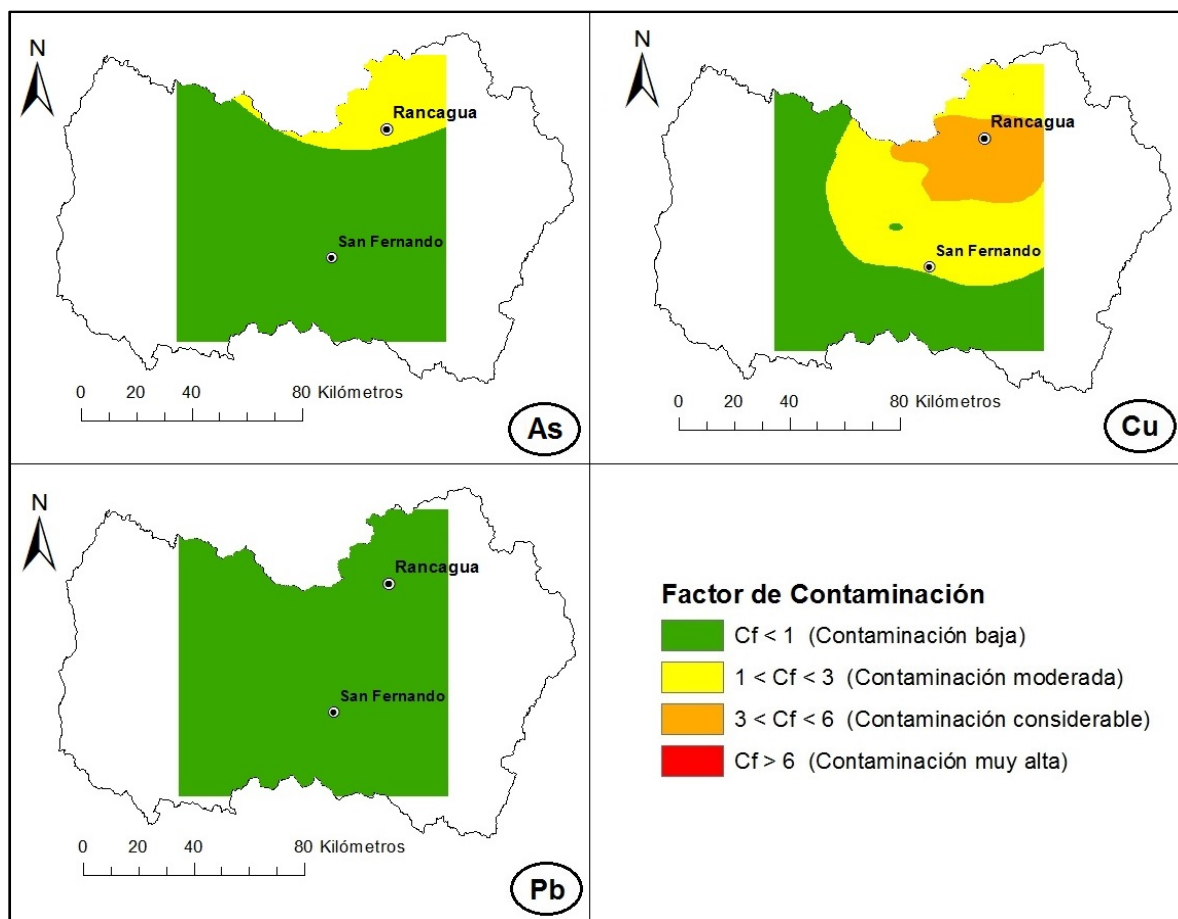


Figura 82. Distribución espacial de los factores de contaminación (C_f) de los elementos As, Cu y Pb en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

En la **Figura 83**, se presenta la distribución espacial de los grados de contaminación de las muestras recolectadas en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Pero antes es necesario establecer la clasificación de estos valores, para esto fueron reclasificados según Håkanson (1980) y de acuerdo al número de ETM (5 elementos) que se utilizaron para esta región (Albanese et al., 2013), ver página 45. En la figura se puede apreciar que existe un porcentaje considerable, aproximadamente un 62%, de muestras que están dentro de la categoría bajo grado de contaminación (valores de C_{deg} menores a 5), todas estas ubicadas en la zona oeste de la región en estudio. Por lo tanto, en los sitios de las muestras restantes (38% del total) presentaron moderado y alto grado de contaminación con respecto a los ETM en estudio, la gran mayoría de estos ubicados en la zona noreste de la región.

Esto indica que estos sitios están siendo afectados por actividades antrópicas, por lo que tendrían contaminación por tales elementos, principalmente por cobre.

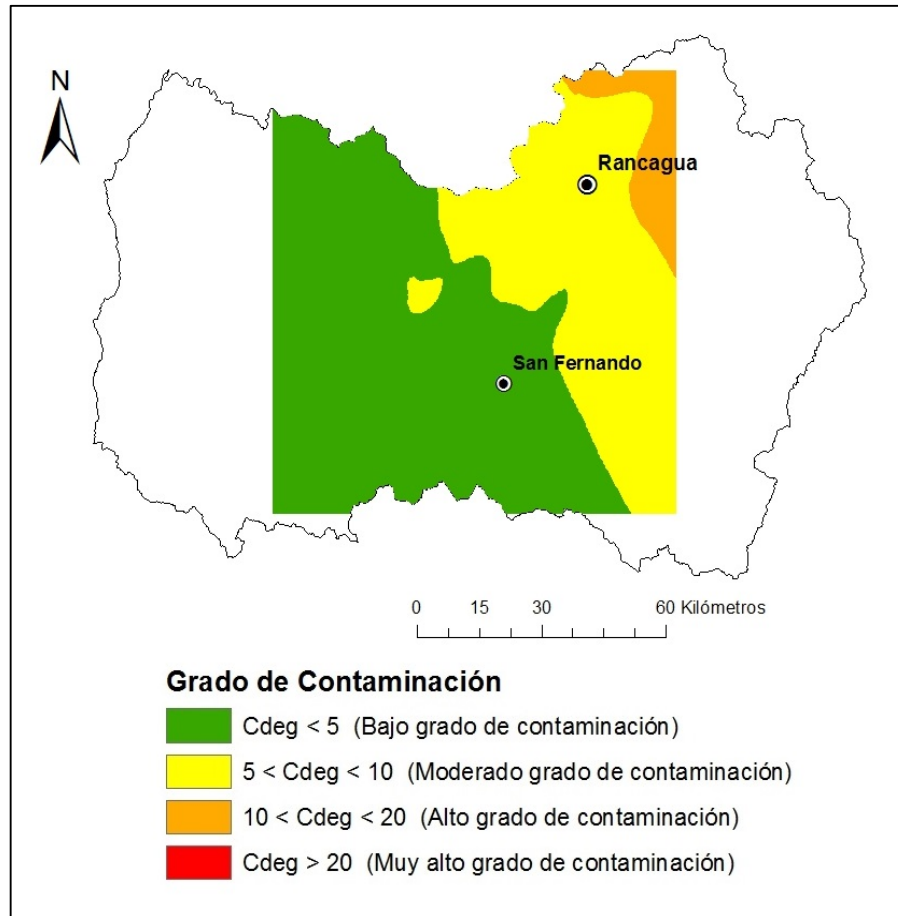


Figura 83. Distribución espacial de los grados de contaminación (C_{deg}) de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Finalmente, el índice integrado de polución es presentado mediante la **Figura 84**. En la distribución espacial presentada en la figura se puede observar que existe un gran porcentaje de muestras, 62% del total, con nivel bajo de contaminación ($IPI \leq 1$). Asimismo, existe un 36 y 2% de las muestras que tendrían un nivel moderado y alto de contaminación, respectivamente, todas estas ubicadas al noreste de la región en estudio. Esto indica que estos sitios están siendo afectados por actividades antrópicas, tales como actividades agroindustriales y mineras, y por esto tendrían un nivel moderado o alto de contaminación por los ETM en estudio, principalmente por Cu.

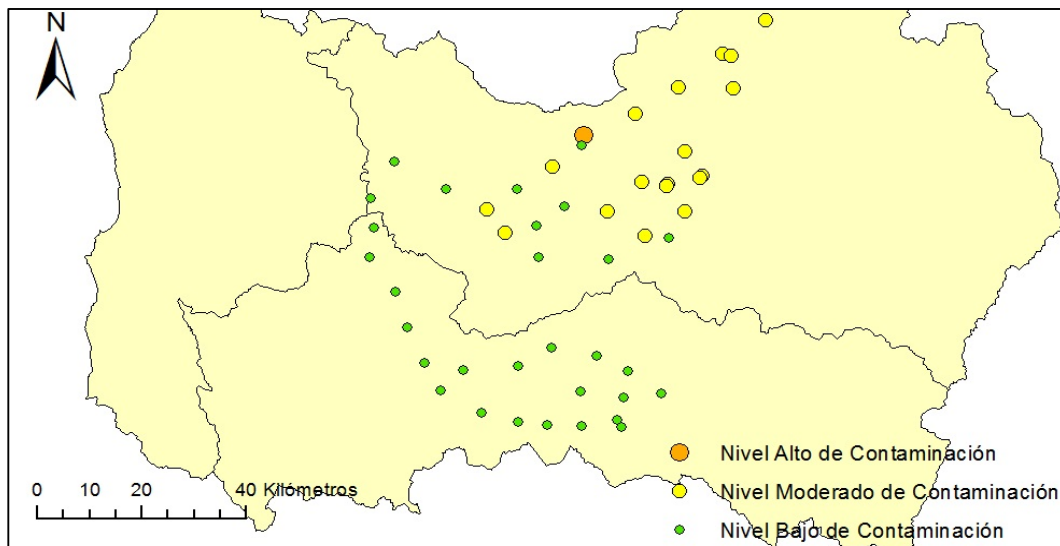


Figura 84. Ubicación geográfica de los índices integrados de contaminación (*IPI*) de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

4.4. Región del Maule

Se debe establecer los ETM utilizados en la Región del Maule y estos corresponden a los elementos As, Cu, Ni, Pb y Zn. Y se debe tener presente que estos ETM fueron considerados debido a que contenían un porcentaje de muestras menor al 20% con concentraciones superiores al límite de detección de estos.

4.4.1. Análisis exploratorio de datos de la Región del Maule.

Se informa el correspondiente análisis exploratorio de datos de la Región del Maule para cada ETM y parámetro edáfico utilizado en este trabajo. En el histograma de la **Figura 85**, se puede apreciar que la distribución de arsénico tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, pero esto es debido a la presencia de un par de valores extremadamente superiores a la media, con lo cual se puede inferir que este valor es mayor a la mediana. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que tiende a la forma de S típica de la distribución normal, aunque con algunos saltos pero no suficientes para afirmar lo contrario. Para terminar, se puede observar que en el box plot existe un valor atípico que se encuentra por encima del bigote superior (muestra ML 09, con una concentración de As de 16.1 mgkg^{-1}). Por lo anterior, se puede concluir que los datos de este elemento siguen una distribución normal.

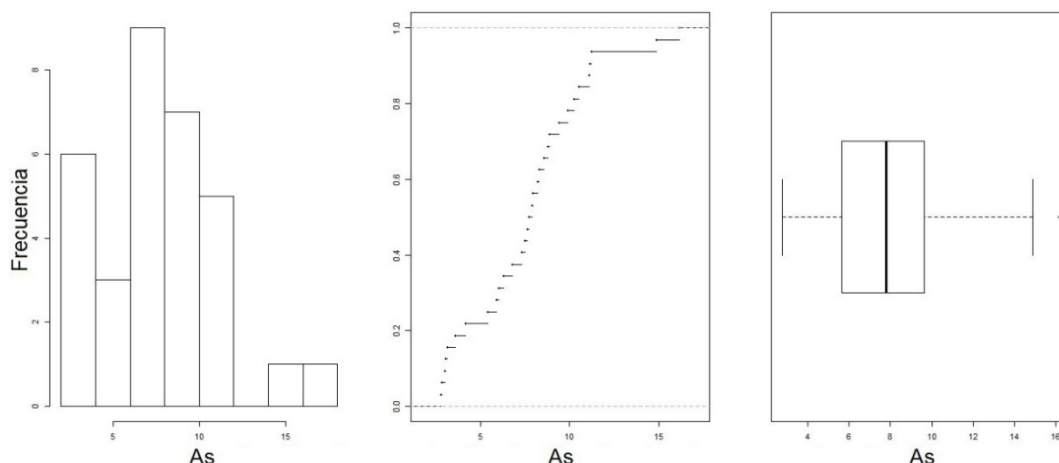


Figura 85. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 86**, se puede observar que el elemento Cu se distribuye con una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, lo que se puede inferir que la media es mayor a la mediana. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar claramente que esta no cumple con la asimetría necesaria con forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, en el box plot existe la presencia de dos valores mayores al bigote superior de los datos. Esto ocurre en la muestra ML 07 Y ML 10, con concentraciones de Cu de 68.9 y 73.6 mgkg^{-1} . Estos valores son bastante superiores a los demás datos, tomando en cuenta que un 60% de las muestras no superan los niveles de 40 mgkg^{-1} . De los tres gráficos analizados anteriormente, se puede llegar a concluir que los datos del elemento cobre de esta región no siguen la distribución normal.

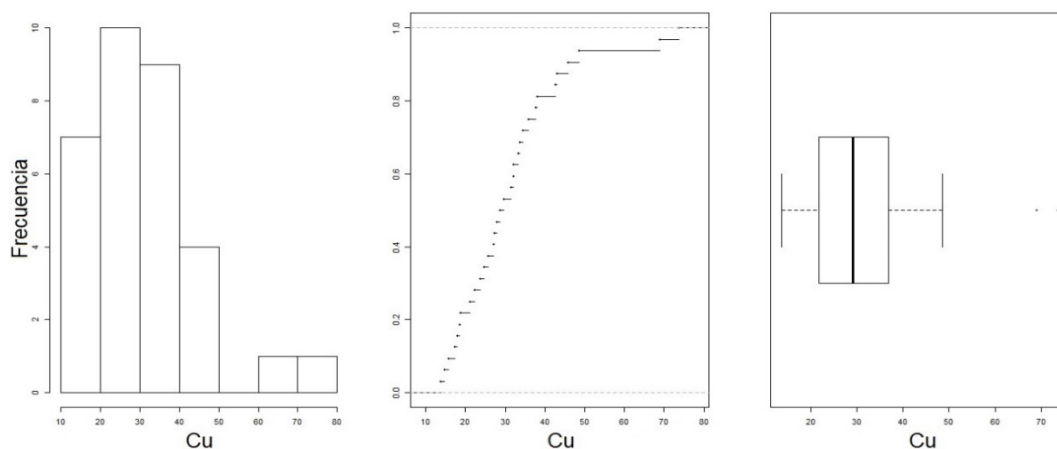


Figura 86. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el primer gráfico de la **Figura 87**, se puede observar una leve inclinación de la cola hacia la derecha del conjunto de datos del elemento níquel, es decir, esta posee sesgo positivo. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar claramente que este elemento tiende levemente a comportarse como una distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que este elemento tiene un diagrama de caja simétrico pero con alguna inclinación hacia el bigote superior. De todo este análisis se puede concluir que los datos siguen la distribución normal.

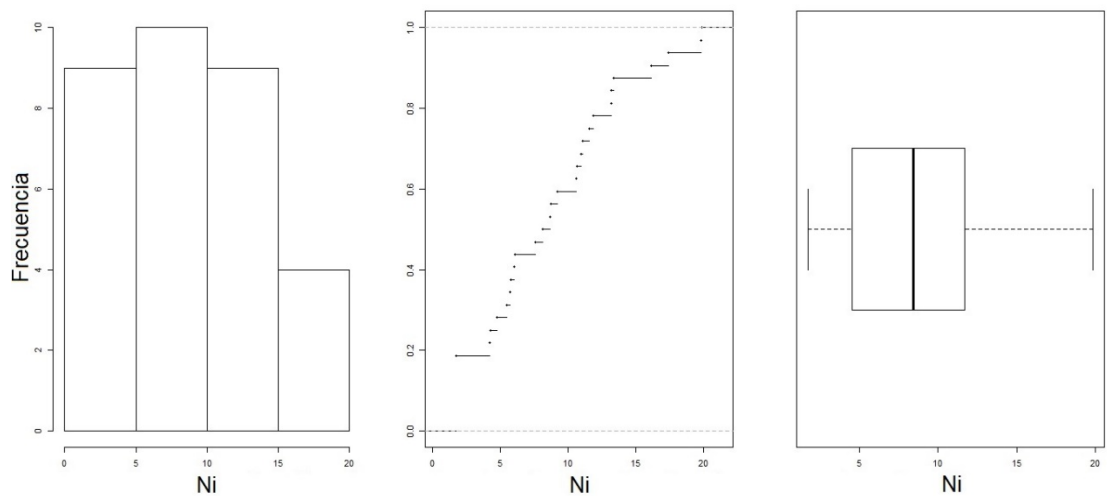


Figura 87. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En la **Figura 88**, se presentan los gráficos utilizados para el análisis exploratorio de datos del elemento plomo de las muestras recolectadas en la Región del Maule. En el histograma de la figura, se puede apreciar que la distribución de este elemento tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, por lo que se puede inferir que la media es superior a la mediana de los datos. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que la curva no tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel, se puede observar que el gráfico no tiene simetría. Finalmente, por todo lo anterior, se puede aseverar que este elemento no tiende a comportarse como la distribución normal.

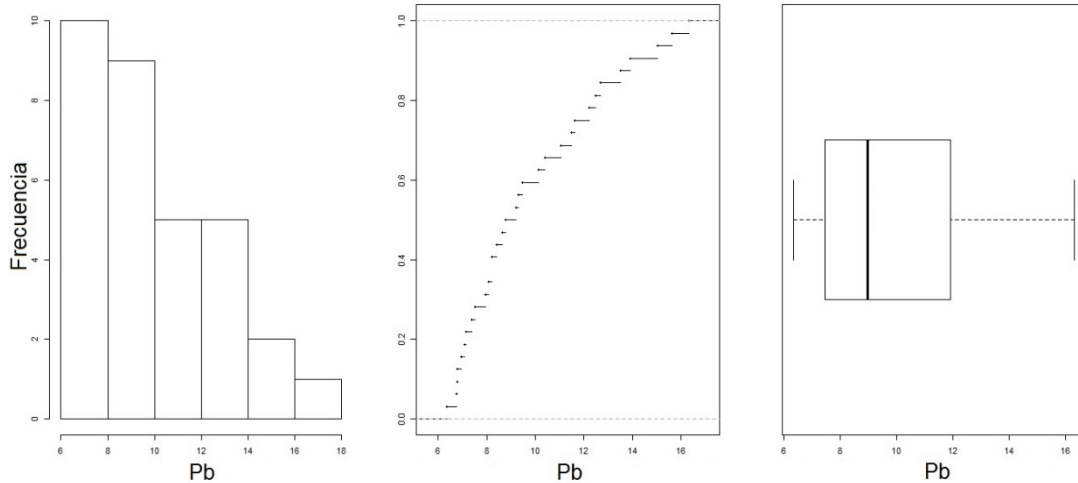


Figura 88. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 89**, se puede apreciar que la distribución de las concentraciones de Zn tiende a tener una forma simétrica en torno a un valor céntrico. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el tercer gráfico del panel se puede observar que existe una leve inclinación hacia el bigote superior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último. Por todo lo dicho anteriormente es posible concluir que este elemento tiende a seguir una distribución normal.

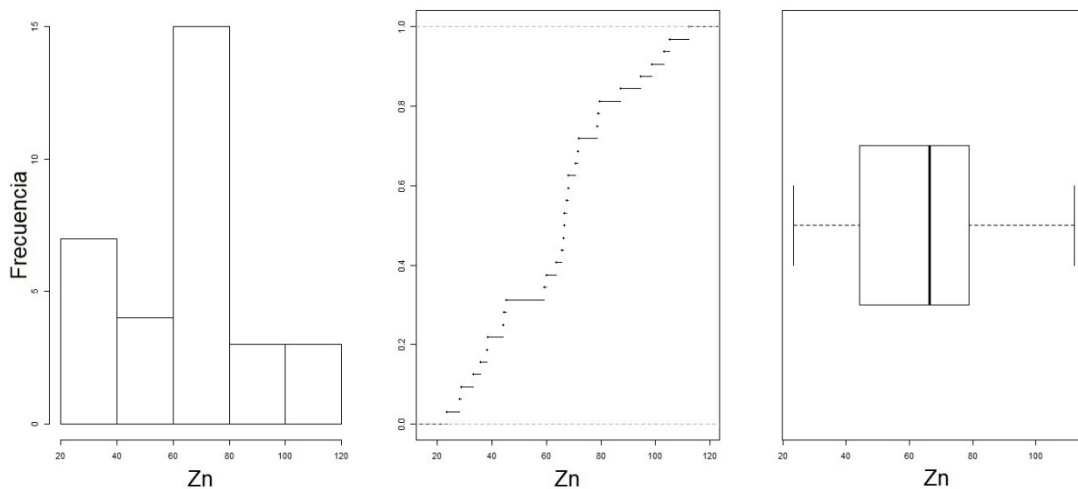


Figura 89. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el primer gráfico de la **Figura 90**, se puede apreciar que existe un valor mayor al conjunto de datos del parámetro pH, lo cual provoca que el histograma no cumpla con la simetría requerida para poder concluir que sigue una distribución normal. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta no presenta la forma requerida para comportarse como una distribución normal. Continuando con el tercer gráfico del panel, en este se puede distinguir que existe un dato atípico que se encuentra por encima del bigote superior. Por lo dicho anteriormente, se puede inferir que los datos de este parámetro no siguen una distribución normal.

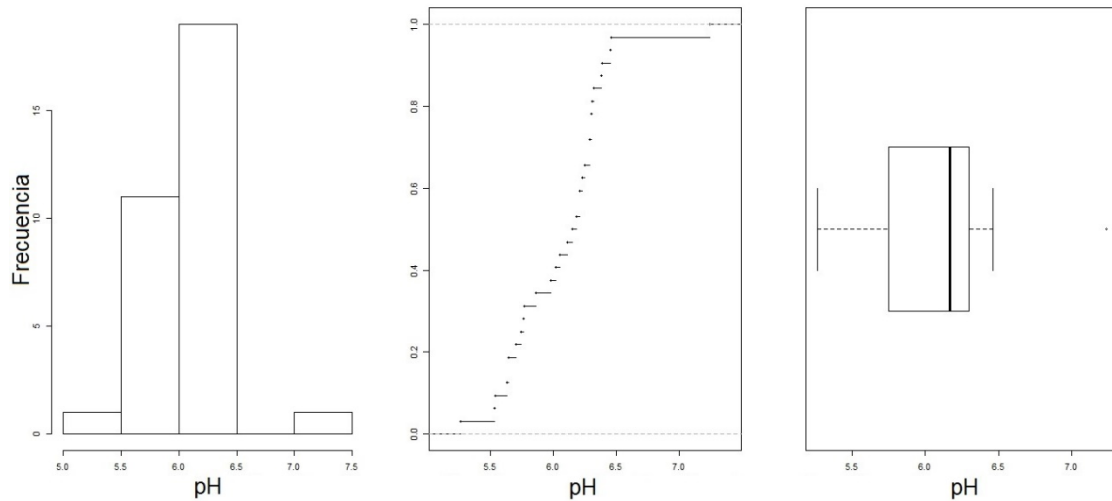


Figura 90. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.

En el histograma de la **Figura 91**, se destaca que la distribución de los datos de conductividad eléctrica es asimétrica con un sesgo marcadamente positivo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta no tiene la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existen cinco valores atípicos por encima del bigote superior. Además, es importante mencionar que este gráfico tiene forma bastante achatada producto de estos valores atípicos. De lo anterior, se puede inferir que los datos de este parámetro no presentan la forma requerida para que estos sigan una distribución normal.

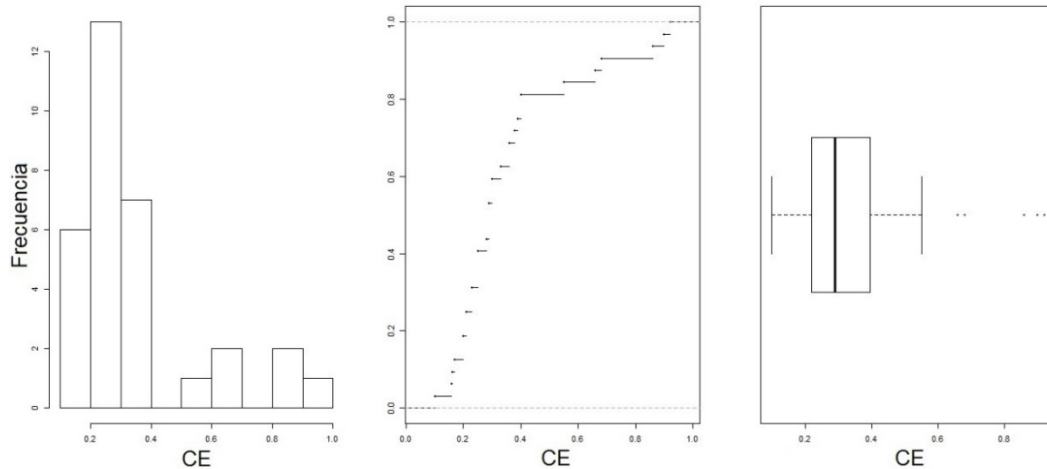


Figura 91. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida $mS\ gr^{-1}$.

En el histograma de la **Figura 92**, se puede observar que los datos del parámetro MO se distribuyen con una asimetría de sesgo positiva hacia la derecha, con esto se puede deducir que la media es mayor a la mediana. Continuando con el análisis, en el segundo gráfico del panel se puede apreciar que los datos no cumplen con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede apreciar que tanto el bigote superior como el segundo cuartil y la mediana, se encuentran cercanos entre sí en comparación al otro lado de la mediana. De los tres gráficos analizados anteriormente, se puede llegar a concluir que los datos del parámetro materia orgánica de esta región no siguen la distribución normal.

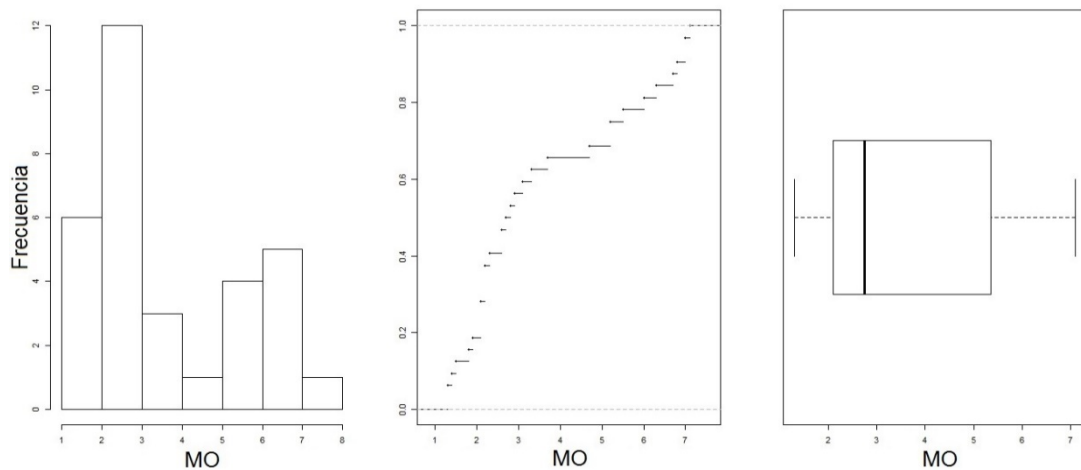


Figura 92. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.

En la **Figura 93**, se presentan los gráficos utilizados para el AED del parámetro capacidad de intercambio catiónico determinado para las muestras recolectadas en la Región del Maule. En el primer gráfico del panel, se puede observar que el histograma de los datos es asimétrica con sesgo positivo. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este parámetro no tiende a tener la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, en el box plot se tiene que tanto el bigote superior como el segundo cuartil y la mediana, se encuentran cercanos entre sí en comparación al otro lado de la mediana. De todo el análisis descrito anteriormente, se puede concluir que los datos no siguen la distribución normal.

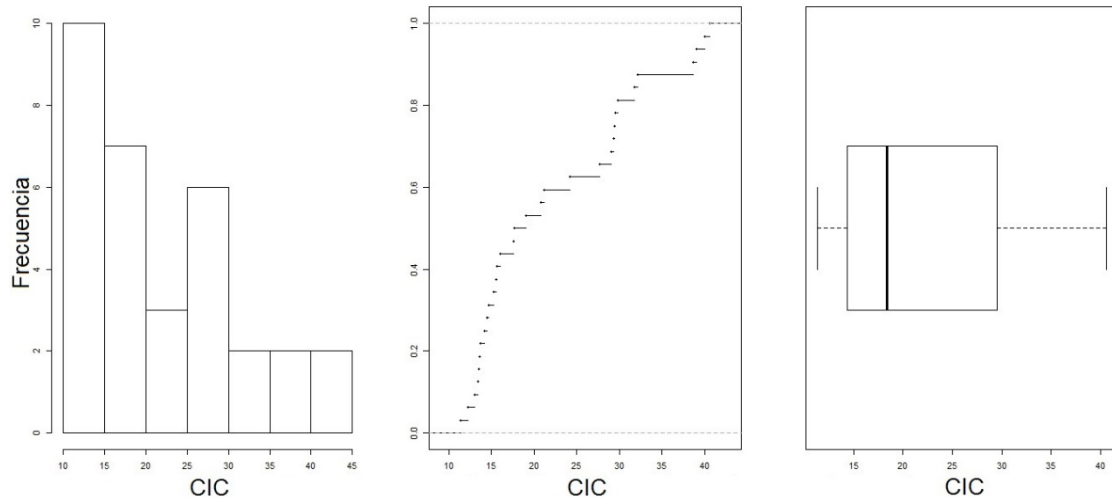


Figura 93. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$.

En el histograma de la **Figura 94**, se puede observar que la distribución del parámetro porcentaje de arena tiene una cierta simetría con respecto a un valor céntrico. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta curva tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel se puede observar que existe una leve inclinación hacia el bigote superior, agregando que existen datos debajo y encima del bigote inferior y superior, respectivamente, pero observándose cierta simetría en este. Finalmente, se puede aseverar que este parámetro tiende a comportarse como la distribución normal.

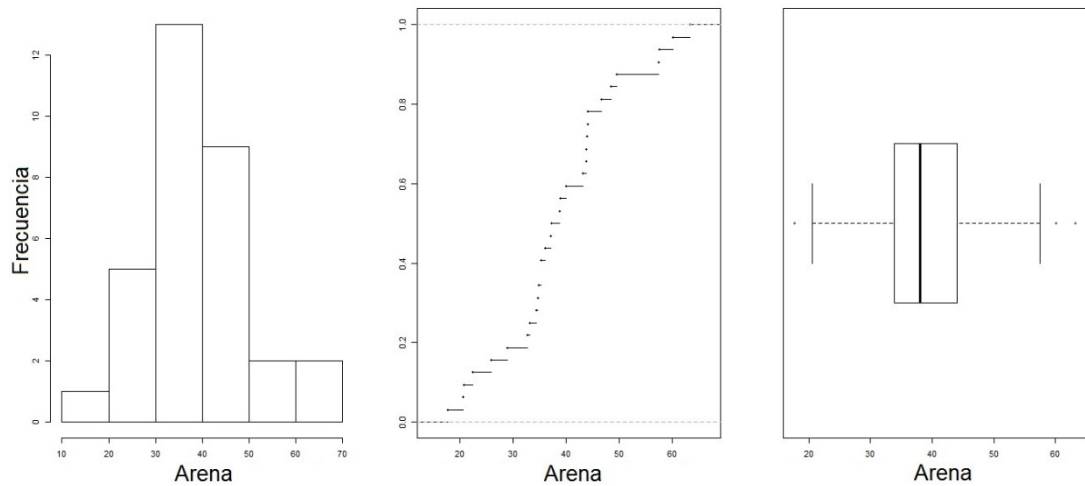


Figura 94. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).

En el histograma de la **Figura 95**, se puede apreciar que los datos del porcentaje de limo tienden a seguir una distribución normal. En el gráfico de frecuencia acumulada del panel se puede apreciar claramente que esta cumple con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que existe un leve equilibrio entre los límites, se ve un box plot casi simétrico y no alcanzando a tener valores por encima de los bigotes. Considerando todo lo anterior, se puede concluir que el parámetro porcentaje de limo de esta región sigue una distribución normal.

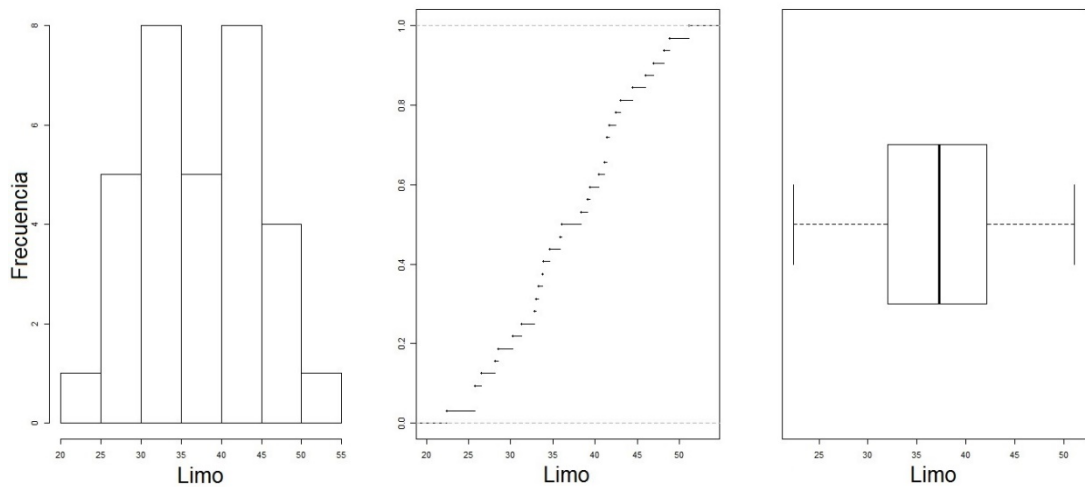


Figura 95. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).

En el primer gráfico de la **Figura 96**, se puede apreciar que el histograma del parámetro porcentaje de arcilla tiene cierta simetría aunque levemente sesgado hacia la derecha. Por otro lado, en el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta curva tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. Por último, en el tercer gráfico del panel donde se muestra el box plot, se puede ver que existe una inclinación hacia el bigote superior, pero no alcanzando a tener valores que estén por encima de este último. Por todo lo dicho anteriormente, es posible concluir que este parámetro tiende a seguir una distribución normal.

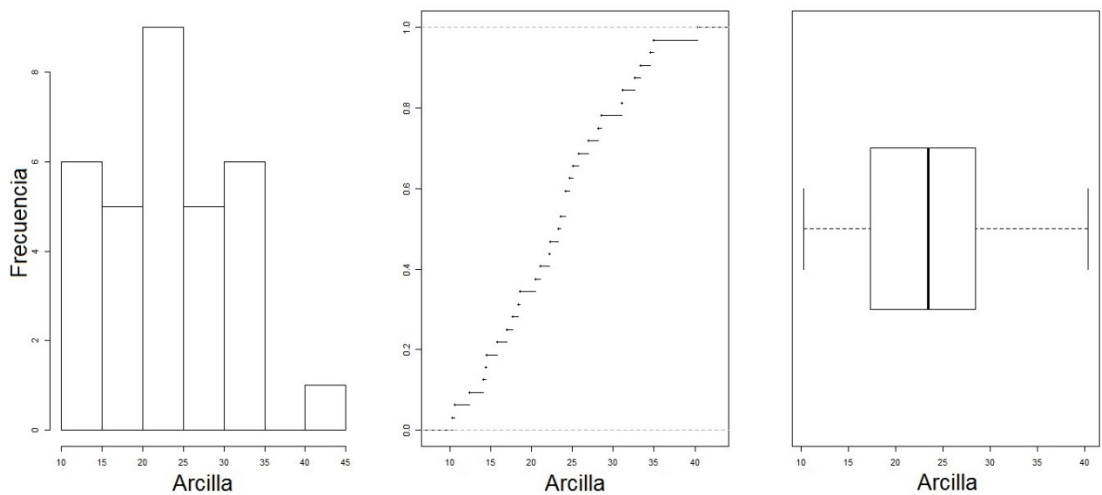


Figura 96. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).

4.4.2. Análisis univariado de la Región del Maule.

En el respectivo análisis univariado para la Región del Maule, las variables en estudio que representan propiedades de los suelos como las concentraciones totales de ETM, fueron considerados por separado para el análisis en referencia.

4.4.2.1. Propiedades de los suelos.

En la **Tabla 43**, se presentan los estadísticos descriptivos de los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de arena, limo y arcilla, determinados de las muestras de suelo extraídas de la Región del Maule. Los parámetros porcentajes de tamaño de partículas, en la tabla se

puede observar que existe un predominio del porcentaje de arena, con un 53% de las muestras que contienen mayor porcentaje de arena que de limo y arcilla. Conforme a la clasificación propuesta por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, USDA (Soil Survey Division Staff, 1993), los suelos en estudio eran generalmente de textura franco arcillosa o franca. Profundizando en esto, el 38% de los suelos fueron de textura moderadamente fina y un 47% de textura media.

Con respecto a las unidades de pH medidas, estas se pueden clasificar en diferentes categorías dependiendo de su valor (Soil Survey Division Staff, 1993). A continuación, los porcentajes de muestras en cada una de las categorías se presentan de la siguiente manera: 9% de las muestras corresponden a fuertemente ácido (pH entre 5.1 y 5.5), 34% a moderadamente ácido (pH entre 5.6 y 6.0), 53% de estas son ligeramente ácidas (pH entre 6.1 y 6.5) y 3% a neutro (pH entre 6.6 y 7.3). De los estadísticos se puede destacar la cercanía entre los valores de la media y la mediana, además de una baja dispersión y muy bajo valor de CV, cercano a 0, con lo cual se puede inferir la homogeneidad del conjunto de datos de pH. Cabe agregar que al ver las unidades de pH de las regiones predecesoras, se puede ver claramente una evidente tendencia a la reducción del pH hacia el sur del país, lo que es consistente con la condición de mayor lavado por la incidencia anual de mayores volúmenes de agua de precipitación.

El parámetro de conductividad eléctrica, a partir de la mediana y SD se puede deducir que una gran cantidad de muestras presentan valores de CE menores a 2 mSgr^{-1} , con lo que se puede concluir que en las muestras de esta región existe una gran cantidad de los suelos que son no salinos, de acuerdo con la clasificación propuesta por el USDA (Soil Survey Division Staff, 1993). Profundizando en este punto, todos los datos de esta región corresponden a muestras no salinas. Por esto, no existen muestras que fueron superiores al valor de 4 mS gr^{-1} , con lo que se puede aseverar que en ninguna de las muestras reflejan problemas de salinidad del suelo, según los criterios del USDA.

Del total de datos del parámetro materia orgánica, para cada una de las categorías de clasificación según el tipo orden de taxonomía de suelos, se tiene que un 34% de las muestras tiene muy bajo contenido de MO y un 16% corresponde a bajo contenido de esta.

Estos porcentajes de bajos contenidos de MO son consecuencia de un uso intensivo de los suelos en estudio.

De la tabla se puede apreciar que la mediana y la media poseen valores muy distantes entre sí. Por último, mediante el parámetro capacidad de intercambio catiónico es posible determinar la clase de fertilidad de los suelos (Fernández et al., 2006). Mediante esto se puede aseverar que un 6% de las muestras tiene una fertilidad muy alta. 31% alta fertilidad y un 31% corresponden a la clase fertilidad media. Además, es importante mencionar que ninguna de las muestras presentan una baja capacidad de almacenamiento de nutrientes (CIC <10 Cmol (+) kg⁻¹) (Fernández et al., 2006).

Tabla 43. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región del Maule.

Estadísticos	pH	CE	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Descriptivos		(mS gr ⁻¹)	(% bs)	(Cmol (+) kg ⁻¹)	(%)	(%)	(%)
Media	6.1	0.36	3.6	22.3	39.1	37.1	23.2
SD ^a	0.38	0.22	2.0	9.4	11.3	7.5	7.7
Mediana	6.2	0.29	2.8	18.4	38.1	37.3	23.5
Mínimo	5.3	0.10	1.3	11.4	17.7	22.4	10.3
Máximo	7.2	0.92	7.1	40.6	63.2	51.1	40.3
Rango	2.0	0.82	5.8	29.2	45.5	28.7	30.0
CV (%) ^b	6.3	60.2	55.1	41.9	28.9	20.3	33.0

^a Desviación Estándar

^b Coeficiente de Variación

4.4.2.2. Concentraciones totales de ETM.

En la **Tabla 44**, se puede observar que para la Región del Maule se extrajeron un total de 32 muestras. En la misma tabla, se puede apreciar que existen altas concentraciones en promedio de los elementos Cu y Zn en comparación con los restantes elementos (31.5 y 64.4 mgkg⁻¹, respectivamente). Además, estos mismos elementos presentan las mayores desviaciones en comparación con los demás elementos (13.9 y 23.8 mgkg⁻¹, respectivamente). Los restantes elementos presentan baja variabilidad, no superando los 5.3 mgkg⁻¹, lo que nos indica que los datos se encuentran cerca de su media.

Tabla 44. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg^{-1}) de las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn, obtenidos de las muestras de la Región del Maule.

Estadísticos Descriptivos		As	Cu	Ni	Pb	Zn
Número de Muestras		32	32	32	32	32
Media		7.7	31.5	8.6	9.9	64.4
SD ^a		3.3	13.9	5.3	2.9	23.8
Mediana		7.8	29.2	8.4	9.0	66.4
MAD ^b		2.0	7.5	3.6	2.0	16.8
Sesgo		0.46	1.4	0.49	0.78	0.12
Curtosis		0.36	2.6	-0.44	-0.44	-0.62
Rango		13.4	59.9	18.1	10.0	88.7
Mínimo		2.8	13.7	1.8	6.3	23.4
Máximo		16.1	73.6	19.8	16.3	112
CV (%) ^c		43.0	44.2	61.5	29.0	36.9
5		2.8	14.4	1.8	6.6	26.5
25		5.5	21.4	4.4	7.4	44.1
Percentiles	50	7.8	29.2	8.4	9.0	66.4
	75	9.8	37.3	11.8	12.1	78.8
	95	15.3	70.6	19.8	15.9	108

^a Desviación Estándar

^b Desviación Absoluta de la Mediana

^c Coeficiente de Variación

A continuación, enfocando el análisis en el coeficiente de asimetría o sesgo, se puede observar que todos los ETM presentan un valor positivo de este coeficiente, es decir, gran parte de las concentraciones de cada elemento se encuentran sobre la media. En el caso del elemento Zn se tiene un valor muy cercano a 0, de lo cual podemos asegurar que los datos de este elemento se distribuyen de forma uniforme alrededor de la media. Además es importante señalar que el elemento Cu presenta un valor mayor a 1, infiriéndose que este se encuentra fuertemente sesgado. El valor de asimetría más alto de todos, ocurre en el elemento Cu, con un coeficiente de asimetría de 1.4. Coeficientes de asimetría no tan altos son comunes para los metales pesados, debido a que por lo general tienen bajas concentraciones en el ambiente, por lo que la presencia de una fuente puntual de contaminación puede causar un fuerte aumento de la concentración local y por esto presentar un valor alto de coeficiente de asimetría, de esto se puede inferir que tal situación

ocurre en las concentraciones de Cu en esta región. Cabe agregar que la curtosis de los elementos As y Cu son valores positivos, con lo cual nos indica que la distribución es más apuntada que la distribución normal. Para el caso de los elementos Ni, Pb y Zn, donde la curtosis tiene valor negativo, con esto nos permite aseverar que los datos tienen una distribución más achatada que la normal.

Asimismo, en la tabla se puede apreciar que el coeficiente de variación de todos los ETM tiene un valor menor a 1, con lo cual podemos concluir que sus datos son homogéneos. Por otro lado, los elementos Cu y Zn presentan una gran amplitud de datos (59.9 y 88.7 mgkg⁻¹, respectivamente), haciendo presumir la presencia de suelos contaminados con este metal. Con respecto a las muestras que presentan concentraciones de ETM inferiores al límite de detección, en esta región se sabe que el elemento Ni presenta un 19% del total de muestras que no superan tal límite. En cambio el Cd y Se tienen un 94 y 72%, respectivamente, de datos que no superan el límite, por lo que estos elementos han sido descartados para todos los análisis hechos en esta región.

Para terminar, de lo analizado anteriormente se puede concluir que para la Región del Maule ninguno de los ETM y parámetros en estudio, excepto el As, Ni, Zn, arena, limo y arcilla, tiende a una distribución normal.

4.4.3. Análisis multivariado de la Región del Maule.

Debemos entender que en el comportamiento de los ETM con los parámetros considerados y las relaciones entre elementos, los cuales fueron alcanzados mediante el siguiente tratamiento multivariado de los datos determinados de la Región del Maule. Para esto se realizaron los análisis de correlación de Spearman entre ETM, correlación de Spearman entre ETM y parámetros, análisis de componentes principales (ACP) y análisis Cluster.

4.4.3.1. Correlación de Spearman entre ETM de la Región del Maule.

Para comprender las relaciones que pueden existir entre los elementos traza metálicos de la región en estudio, se realizó un análisis de correlación de Spearman entre dichas variables. Las medidas de correlación de este análisis se obtuvieron mediante el software IBM SPSS, y las cuales son entregadas en la **Tabla 45**.

Tabla 45. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn de la Región del Maule.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1.0				
Cu	0.63**	1.0			
Ni	0.60**	0.80**	1.0		
Pb	0.09	0.42*	0.21	1.0	
Zn	0.56**	0.79**	0.78**	0.32	1.0

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 46**, se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos.

Tabla 46. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región del Maule.

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Ni/Cu	0.80**
2	Zn/Cu	0.79**
3	Zn/Ni	0.78**
4	Cu/As	0.63**
5	Ni/As	0.60**
6	Zn/As	0.56**
7	Pb/Cu	0.42*
8	Zn/Pb	0.32
9	Pb/Ni	0.21
10	Pb/As	0.09

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Con respecto a la tabla anterior, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre los elementos Ni y Cu, lo que mostraría una correlación bastante fuerte entre estos ETM. Esta gran correlación podría ser evidencia de un origen similar de estos ETM, posiblemente de actividades antrópicas. También se observaron correlaciones igual de altas que las anteriores, esto ocurre entre Zn/Cu y Zn/Ni, lo que mostraría una correlación bastante fuerte entre estos haciendo inferir que estos ETM tienen un origen similar.

Correlaciones moderadas entre Cu/As, Ni/As y Zn/As, posiblemente indicando la adición de estos ETM de diferentes fuentes. Estas correlaciones significativamente positiva entre ETM sugieren una fuente en común (Al-Khashman & Shawabkeh, 2006). Sin embargo, las correlaciones significativas no siempre representan que sea una fuente en común (Hani & Pazira, 2011). Esto implica que el análisis de correlación por sí solo no es suficiente para poder identificar una posible fuente de contaminación de metales pesados, si no debe ser llevado a cabo junto con otras herramientas de análisis. Por otro lado, es posible notar que la relación Pb/As presenta correlación relativamente escasa entre estos con medidas de correlación menores a 0.20. También es necesario destacar, el Pb presenta una escasa correlación con elementos que mayoritariamente tienen origen geogénico como es el caso del Ni o puede ser debido a que proviene de fuentes diferentes a este último. Asimismo, la fuerte correlación que existe entre el Cu y el As, Ni y Zn, todo esto sugiere un origen antropogénico de estos debido a que el elemento Cu generalmente está más relacionado a procedencia de actividades humanas (Micó, 2005).

4.4.3.2. Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región del Maule.

Para poder apreciar las relaciones que pueden existir entre los ETM y parámetros de propiedades del suelo, fue necesario realizar un análisis de correlación de Spearman. En la **Tabla 47**, se presentan los coeficientes de correlación de Spearman de las variables anteriormente mencionadas de la Región del Maule.

Tabla 47. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región del Maule.

	pH	CE	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
As	0.29	-0.06	0.43*	0.39*	0.06	0.04	-0.17
Cu	0.43*	0.36*	0.52**	0.57**	-0.25	0.29	0.08
Ni	0.53**	0.18	0.61**	0.58**	0.05	0.11	-0.31
Pb	0.16	0.22	0.10	0.32	-0.50**	0.37*	0.51**
Zn	0.34	0.11	0.52**	0.52**	-0.22	0.27	0.08

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 48** y **Tabla 49** se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos.

Tabla 48. *Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Maule.*

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Ni/MO	0.61**
2	Ni/CIC	0.58**
3	Cu/CIC	0.57**
4	Ni/pH	0.53**
5	Cu/MO	0.52**
6	Zn/MO	0.52**
7	Zn/CIC	0.52**
8	Pb/Arcilla	0.51**
9	Pb/Arena	-0.50
10	Cu/pH	0.43*
11	As/MO	0.43*
12	As/CIC	0.39*
13	Pb/Limo	0.37*
14	Cu/CE	0.36*
15	Zn/pH	0.34
16	Pb/CIC	0.32
17	Ni/Arcilla	-0.31
18	As/pH	0.29
19	Cu/Limo	0.29
20	Zn/Limo	0.27
21	Cu/Arena	-0.25
22	Pb/CE	0.22
23	Zn/Arena	-0.22
24	Ni/CE	0.18
25	As/Arcilla	-0.17
26	Pb/pH	0.16
27	Ni/Limo	0.11
28	Zn/CE	0.11

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Tabla 49. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Maule. (Continuación)

Posición	Combinación	Coefficiente
29	Pb/MO	0.10
30	Zn/Arcilla	0.08
31	Cu/Arcilla	0.08
32	As/CE	-0.06
33	As/Arena	0.06
34	Ni/Arena	0.05
35	As/Limo	0.04

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

En la tablas anteriores, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre el elemento Ni y el parámetro MO, lo que mostraría una correlación bastante fuerte entre estos. Existen correlaciones significativamente positivas entre el contenido de todos los ETM y la CIC del suelo, además de los elementos As, Cu, Ni, Zn con los parámetros MO o pH, esto nos permite inferir que los parámetros CIC, MO y pH, tienen una influencia sustancial en el contenido total de los ETM anteriormente mencionados. También es posible observar que las concentraciones de Cu, Pb, Zn y el contenido de limo muestran una correlación positiva pero débil. Todas estas correlaciones significativamente positivas entre ETM y parámetros, mencionadas anteriormente, pueden indicar que estos últimos tienen influencia sustancial en el contenido total de estos metales en los suelos. Se encontraron correlaciones relativamente débiles o casi nulas entre los parámetros CE, arena, arcilla, y los ETM. La falta de una correlación significativa entre las propiedades del suelo y los metales pesados se puede atribuir a una entrada continua de metales pesados o la presencia de varias fuentes de contaminación (Chen et al., 2008), ya que la liberación y transporte de metales pesados corresponden a complejos procesos (Grant & Sheppard, 2008). Otra posible explicación es que puede haber variaciones en el tipo de suelo, el uso de fertilizantes y el sistema de cultivo dentro del área de muestreo (Grant & Sheppard, 2008).

4.4.3.3. Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región del Maule.

Para poder identificar posibles fuentes de contaminación de ETM, se hace necesario realizar un análisis de componentes principales a las variables anteriormente mencionadas, con lo que se lograría revelar relaciones entre estas. En la **Tabla 50**, se entregan los resultados del ACP con rotación varimax para la Región del Maule.

Tabla 50. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parámetros de la Región del Maule

ETM y Parámetros	Componentes Principales		
	CP 1	CP 2	CP 3
As	0.72	-0.12	-0.03
Cu	0.83	0.35	0.21
Ni	0.89	-0.02	0.24
Pb	0.31	0.72	0.12
Zn	0.84	0.27	0.18
pH	0.19	0.00	0.82
CE	0.11	0.53	0.09
MO	0.59	-0.10	0.60
CIC	0.52	0.27	0.66
Arena	-0.01	-0.88	0.34
Limo	0.28	0.56	-0.59
Arcilla	-0.31	0.83	0.00
Porcentaje Varianza Explicada (%)	37.4	24.2	10.0
Porcentaje Varianza Explicada Acumulada (%)	37.4	61.6	71.6

En la **Tabla 50**, se puede apreciar que se extrajeron 3 componentes principales que explican el 71.6% de la varianza total de los datos, aplicando el criterio Kaiser para la selección del número de factores o componentes. Esto último se puede apreciar en la **Tabla 70** del Anexo II, en este se encuentra información adicional del ACP. En la **Figura 97**, se presenta una representación gráfica de los patrones de componentes de los ETM y parámetros en estudio para esta región.

El primer componente (CP1) explica un 37.4% de la varianza total. Este factor lo componen los elementos As, Cu, Ni y Zn, con factores de carga superiores o iguales a 0.72. Los ETM de esta componente poseen un porcentaje promedio del 10% de las muestras, que superan los valores de fondo de cada uno de estos elementos. Considerando que el elemento Cu generalmente está más relacionado a procedencia de actividades humanas (Micó, 2005), además de la fuerte correlación que existe entre este con el As, Ni y Zn, todo esto sugiriendo un origen antropogénico de estos. Por lo anterior, este factor se podría asociar a un origen antrópico.

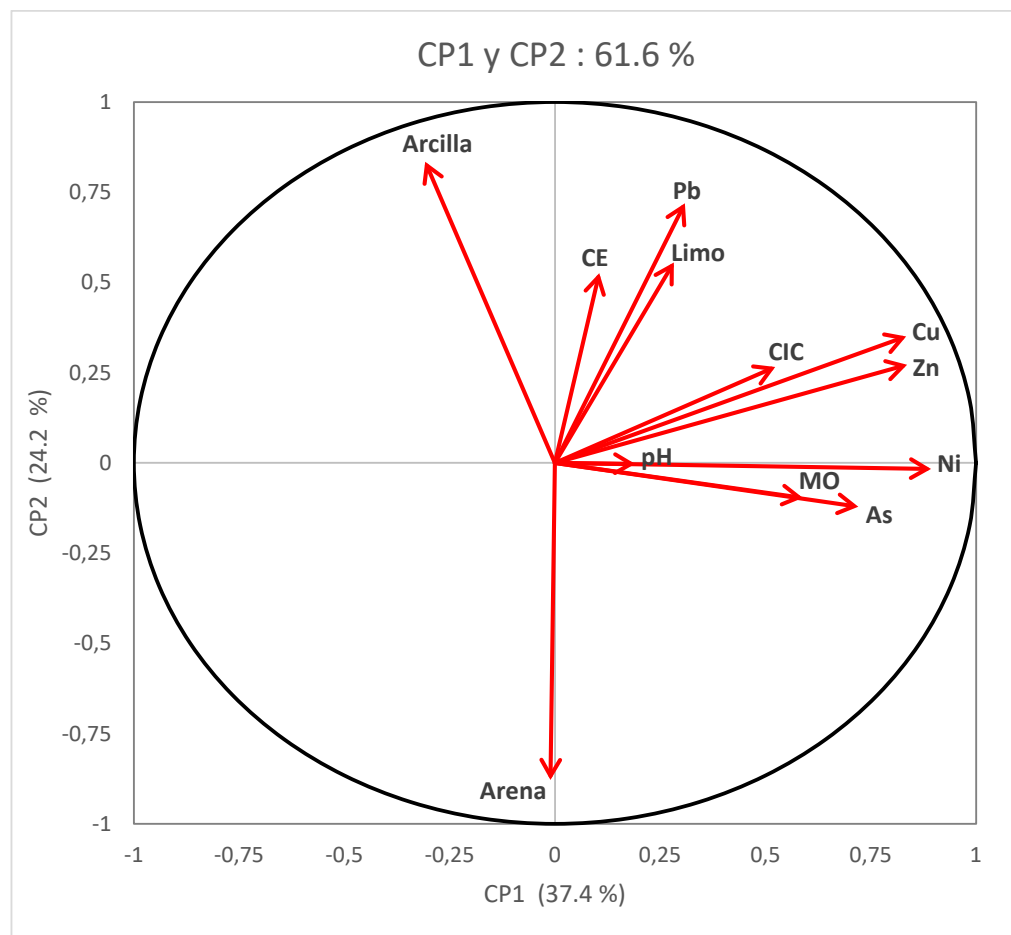


Figura 97. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región del Maule.

La segunda componente (CP2) explica un 24.2% de la varianza total. Donde los mayores coeficientes de carga son aportados por el elemento Pb y los parámetros CE y porcentaje de

arena y arcilla, con factores de carga iguales a 0.72, 0.53, -0.88 y 0.83, respectivamente. Por varios estudios, el elemento Pb está asociado a fuentes antropogénicas o geogénicas (Romic & Romic, 2003), es decir, se sugiere que pudieron haber sido afectados por las actividades humanas, además del contenido natural de origen geogénico. Por último, es importante agregar que un porcentaje relativamente significativo del 16% de estas muestras contiene concentraciones mayores a los valores de fondo. Todo esto parece evidenciar que tanto el material originario como la actividad antrópica influirían en la concentración alcanzada de este elemento.

La tercera componente (CP3) explica un 9.4% de la varianza total. Este factor lo componen los parámetros pH, MO, CIC y limo, con factores de carga iguales a 0.82, 0.60, 0.66 y -0.59, respectivamente. El parámetro porcentaje de limo posee un factor de carga negativo, el cual contrapone el peso de las otras variables. Todo lo anterior, es consistente con lo realizado en el análisis de correlación de Spearman.

4.4.3.4. Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región del Maule.

Con el propósito de poder clasificar e identificar fuentes antrópicas o geogénicas de ETM, fue utilizado el análisis Cluster. El resultado de esta metodología, dendograma, es presentado en la **Figura 98** del presente estudio.

En la figura anterior, es posible inferir que existen dos grupos de elementos y parámetros. El primer grupo los componen 4 propiedades edáficas, las cuales son los porcentajes de arena, limo, arcilla y la CE, estos tienen una escasa asociación con todos los ETM. Esto ayuda a ratificar lo afirmado en el análisis de correlación de Spearman, ya que todos los parámetros tienen débil correlación con casi todos los ETM.

El segundo grupo lo componen los elementos As, Cu, Ni, Pb y Zn. Este grupo corresponde a elementos que provienen de actividades antrópicas, debido a que presentan una cantidad relativamente significativa de muestras con concentraciones mayores a los valores de fondo de esta región. Asimismo, es posible apreciar que existe una gran asociación entre los elementos Cu, Ni y Zn, pudiéndose inferir que estos provienen de una misma fuente. Se observa que los elementos As y Pb, claramente parecen desligarse del resto de ETM que

componen el grupo. Debido a esto, existe un distanciamiento entre estos 2 elementos y el resto del grupo, a lo que también se podrían tener cierta relación con los parámetros que componen el segundo grupo. Todos estos elementos están relacionados entre sí debido a su origen antropogénico, pero parece razonable que estos tienen varias fuentes y al menos una fuente en común. Todo esto corroborando las conclusiones obtenidas mediante el análisis de correlación de Spearman y componentes principales. Cabe señalar que formar este grupo no excluye completamente la influencia de procesos antropogénicos. La identificación de grupos se basa en la influencia dominante.

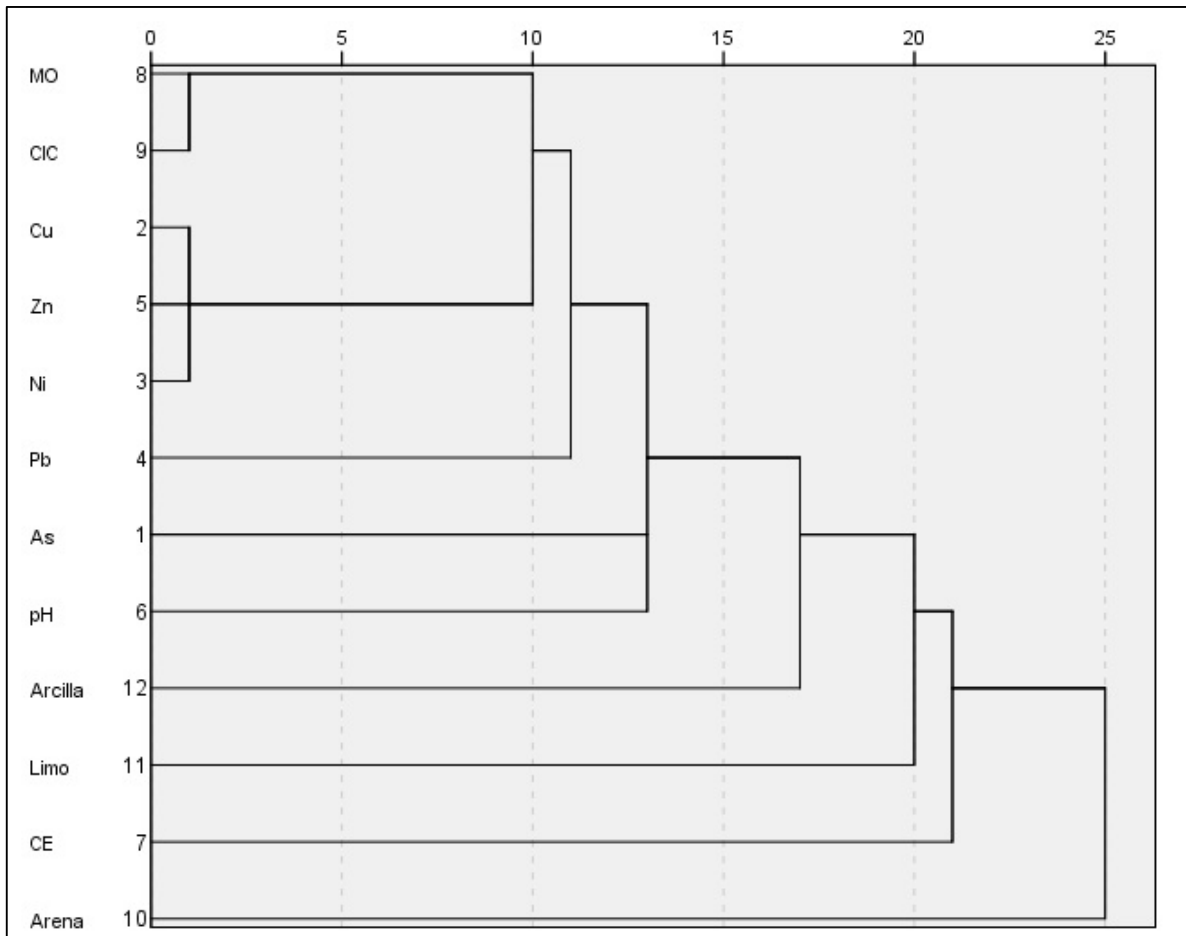


Figura 98. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región del Maule.

4.4.4. Background Values de los ETM de la Región del Maule.

Una de las tareas importantes en un estudio de contaminación de suelos es la detección de valores anormalmente grandes en el conjunto de datos, para esto se usaron diferentes técnicas estadísticas, así como metodologías propuestas y valores citados por el SAG. En la **Tabla 51**, se presentan los valores umbrales obtenidos mediante los diferentes métodos utilizados en este estudio y asimismo, en la **Tabla 52** se entregan los porcentajes de muestras de la región en referencia que exceden tales concentraciones límite.

Tabla 51. *Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región del Maule.*

Técnica Estadística	ETM (mgkg ⁻¹)					
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	
Boxplot	16.1	61.1	22.8	19.1	131	
Método [Median+2 MAD]	11.8	44.2	15.5	12.9	100	
Método iterative 2 σ -technique	12.5	45.9	15.1	12.8	108	
Target Value	25.7	31.1	33.2	76.8	125	
Intervention Value	48.8	164	199	479	643	
Concentración Máxima Permitida	pH > 5	10.0	75.0	30.0	50.0	175

En la **Tabla 51** y **Tabla 52**, se puede apreciar que el método Iterative 2 σ -technique presenta valores umbrales inferiores a los otros métodos utilizados para los elemento Ni y Pb. Por consiguiente, tal método presenta un mayor número de muestras consideradas como contaminadas debido a que exceden tal límite superior, tales proporciones de muestras serian inferiores a 15.6%. Además, el método [Median+2 MAD] posee el límite superior más bajo para el elemento Zn comparando con todos los métodos o concentraciones propuestas, esto ocurre para un valor igual a 100 mgkg⁻¹ con un 9.4% de muestras que sobrepasan dicho umbral. Cabe agregar que los métodos [Median+2 MAD] e Iterative 2 σ -technique poseen valores umbrales para todos los elementos muy cercanos entre sí.

El valor objetivo obtenido a partir de la fórmula de corrección del tipo de suelo de la guía holandesa, presenta gran porcentaje de muestras contaminadas para el elemento Cu, con proporción de muestras contaminadas del 46.9% y valor umbral igual a 31.1 mgkg⁻¹.

Asimismo, considerando el valor de intervención es posible observar que para ningún elemento se presentan muestras que exceden dicho límite.

Con respecto a los valores umbrales propuestos por el SAG, el límite superior para el As para muestras con pH mayor a 5, presentaría el valor más bajo con respecto a los demás métodos. Este valor permitiría establecer que un 21.9% de las muestras estarían contaminadas considerando el límite superior de 10.0 mgkg⁻¹ entregado en la Norma Chilena para la macrozona en que se ubica el área de estudio (INN, 2004).

Tabla 52. *Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región del Maule.*

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Boxplot	3.1	6.3	0	0	0
Método [Median+2 MAD]	6.3	12.5	12.5	15.6	9.4
Método iterativo 2 σ -technique	6.3	9.4	12.5	15.6	3.1
Target Value	0	46.9	0	0	0
Intervention Value	0	0	0	0	0
Concentración Máxima Permitida pH > 5	21.9	0	0	0	0

Los valores umbrales propuestos por el SAG son los más altos para los elementos Cu y Zn, con respecto a los demás métodos. Por esto se tiene un menor porcentaje de muestras que superan los límites superiores de dichos elementos, en los cuales no se presentan muestras contaminadas considerando estos umbrales. Asimismo, los valores obtenidos para los elementos As, Ni y Pb, mediante el método basado en la Dutch Guidelines (VROM, 2000), presentarían los umbrales más altos comparado con los demás métodos. En los cuales no se presentarían muestras que sobrepasen a tales límites.

4.4.5. Interpolación IDW de la Región del Maule.

Para ello, se presenta el análisis de predicciones geoestadísticas mediante el método Distancia Inversa Ponderada (IDW) para la Región del Maule. Antes, las agroindustrias frutícolas cercanas a sitios con concentraciones de consideración de ETM, fueron

localizadas mediante el mapa de catastro frutícola del Ministerio de Agricultura de Chile⁵. Cabe indicar, en la **Figura 6** es presentada la ubicación geográfica de las muestras recolectadas en la región en estudio.

4.4.4.1. Distribución del Arsénico.

En la **Figura 99**, se presenta la distribución espacial de As en las muestras extraídas de la Región del Maule. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 15.4 mgkg^{-1} . Los niveles de As tienden a aumentar hacia zonas puntuales, principalmente a 2 sitios al suroeste de Curicó, partiendo de territorios donde las concentraciones están entre 2.8 y 5.5 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 15.4 mgkg^{-1} de arsénico. Además, la zona de color naranja oscuro, donde las concentraciones predichas están entre 11.2 y 15.4 mgkg^{-1} , presenta niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 51**.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de As tiende a aumentar su estimación hacia 2 zonas puntuales, por lo esto daría a entender que estos sitios reciben aportes de actividades antrópicas. Estos corresponden a zonas de cultivos anuales, frutales y viñas. Con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido al uso de fertilizantes fosfatados y abonos orgánicos (Hani & Pazira, 2011), e incluso al de uso de pulverizaciones. El caso del sitio cercano a Curicó, puede estar recibiendo aportes más grandes debido a que en él existe la presencia de 2 viñas y una agroindustria frutícola. Por otro lado, el área de los sitios de color amarillo hacia las zonas verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 9.8 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por arsénico. Cabe recordar que la concentración máxima permitida corresponde a 10 mgkg^{-1} para suelos con pH mayor a 5, este valor corresponde para la macrozona sur y la cual fue citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005). Las concentraciones mayores a 9.8 mgkg^{-1} (zonas de color naranja y naranja oscuro) tendrían niveles que sobrepasarían dicho umbral. Considerando el Target Value del As igual a 25.7 mgkg^{-1} (ver

⁵<http://ide2.minagri.gob.cl/publico/>

Tabla 51) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que todas las zonas del área en estudio, cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de toda el área de estudio presentaron niveles inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

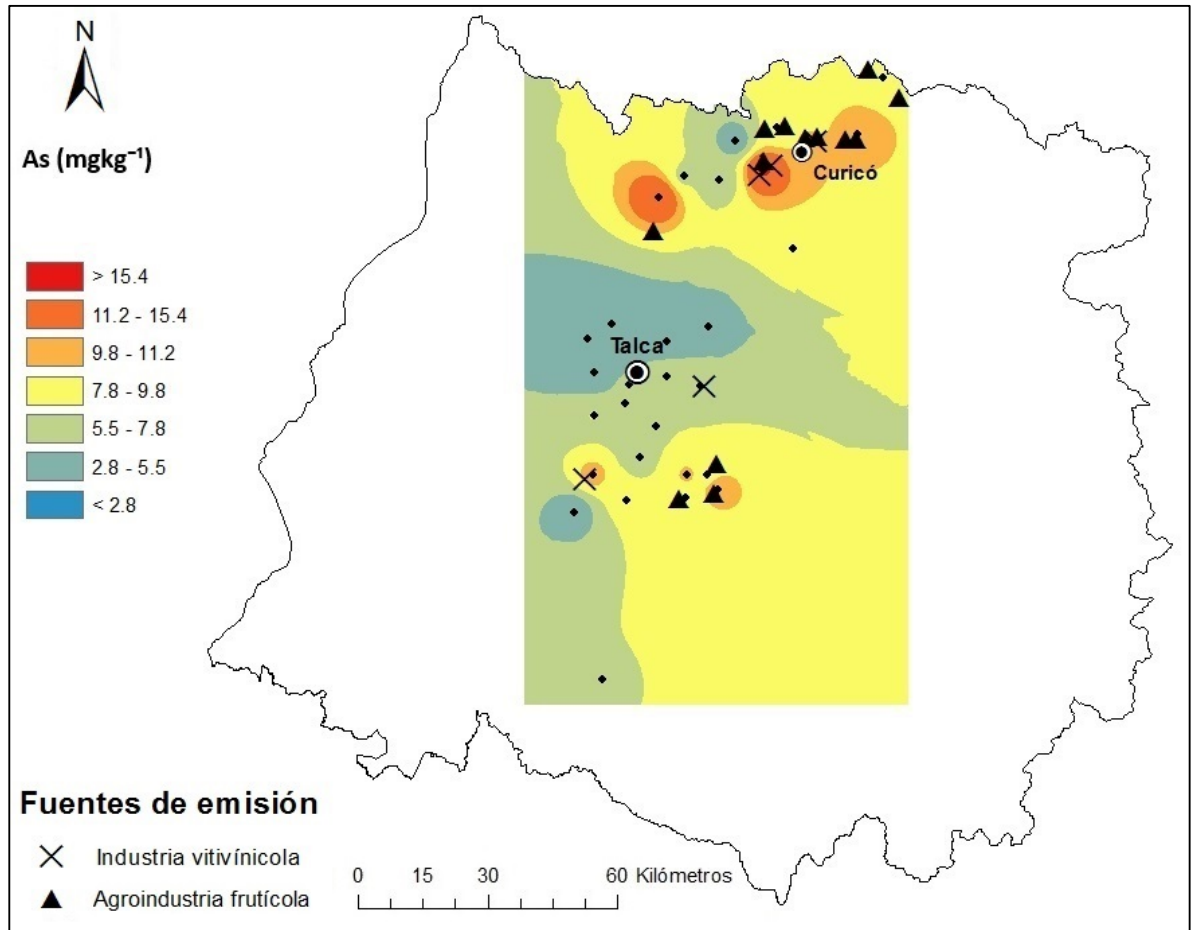


Figura 99. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región del Maule.

4.4.4.2. Distribución del Cobre.

En la **Figura 100**, se presenta la distribución espacial de Cu en las muestras extraídas de la Región del Maule. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 70.7 mgkg^{-1} . Los niveles de Cu tienden a aumentar hacia la zona noreste del área en estudio, donde los niveles pueden alcanzar los 70.7 mgkg^{-1} de cobre. Para agregar, la zona que tiene concentraciones entre 47.8 y 70.7 mgkg^{-1}

(franja de color naranja oscuro), presentarían niveles que son superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 51**.

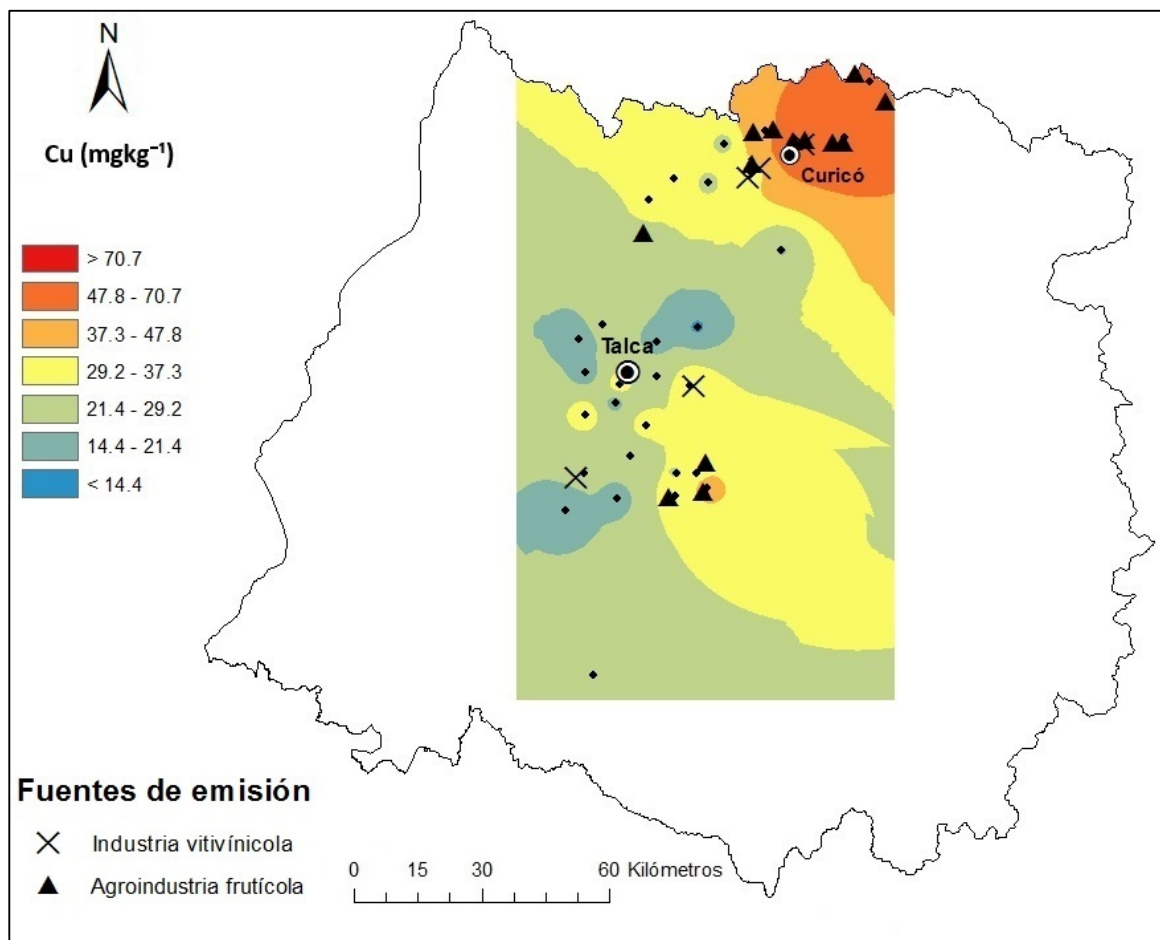


Figura 100. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región del Maule.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Cu tiende a aumentar su estimación hacia el noreste, por lo que se podría inferir que existen aportes de actividades antrópicas y por esto no se encontraría con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos suelos corresponden principalmente a zonas de cultivos anuales, frutales y viñas, además de la presencia de varias agroindustrias, con lo que se podría atribuir a estas actividades con los niveles alcanzados debido a la utilización de productos agroquímicos que contienen Cu en forma de impurezas, como los fertilizantes fosfatados (Kabata-Pendias & Pendias, 2011) y la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et

al., 2003). Reiterando la presencia de centros frutícolas en el noreste de Curicó y los cuales pueden entregar aportes de As a los suelos debido al manejo no adecuado de sus RILes. Por otro lado, el área de la franja amarilla hacia las zonas de color verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 37.3 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por cobre. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur y la cual fue citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), correspondería a 75 mgkg^{-1} . Por lo que se puede apreciar de la figura este umbral no estaría dentro de ninguna zona y por esto los suelos tendrían niveles inferiores a dicho valor. Considerando el Target Value del Cu igual a 31.1 mgkg^{-1} (ver **Tabla 51**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos de las zonas naranja y naranja oscuro (equivalente a concentraciones entre 37.3 y 70.7 mgkg^{-1}) y parte de la zona amarilla, no cumplirían con los estándares holandeses. . Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de Cu inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.4.4.3. Distribución del Níquel.

En la **Figura 101**, se presenta la distribución espacial de Ni en las muestras extraídas de la Región del Maule. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 19.8 mgkg^{-1} . Los niveles de Ni tienden a aumentar hacia el noreste, partiendo de suelos con concentraciones mínimas de 1.8 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 19.8 mgkg^{-1} de níquel. Por otro lado, los sitios ubicados en la zona de color naranja oscuro (concentraciones entre 17.0 y 19.8 mgkg^{-1}) presentarían niveles superiores a los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos utilizados (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 51**. Esto último permitiría inferir que la zona estaría siendo afectada por actividades antrópicas. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales y cultivos anuales, además de la presencia de agroindustrias frutícolas, por lo que se podría atribuir a los niveles alcanzados debido a la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al.2003).

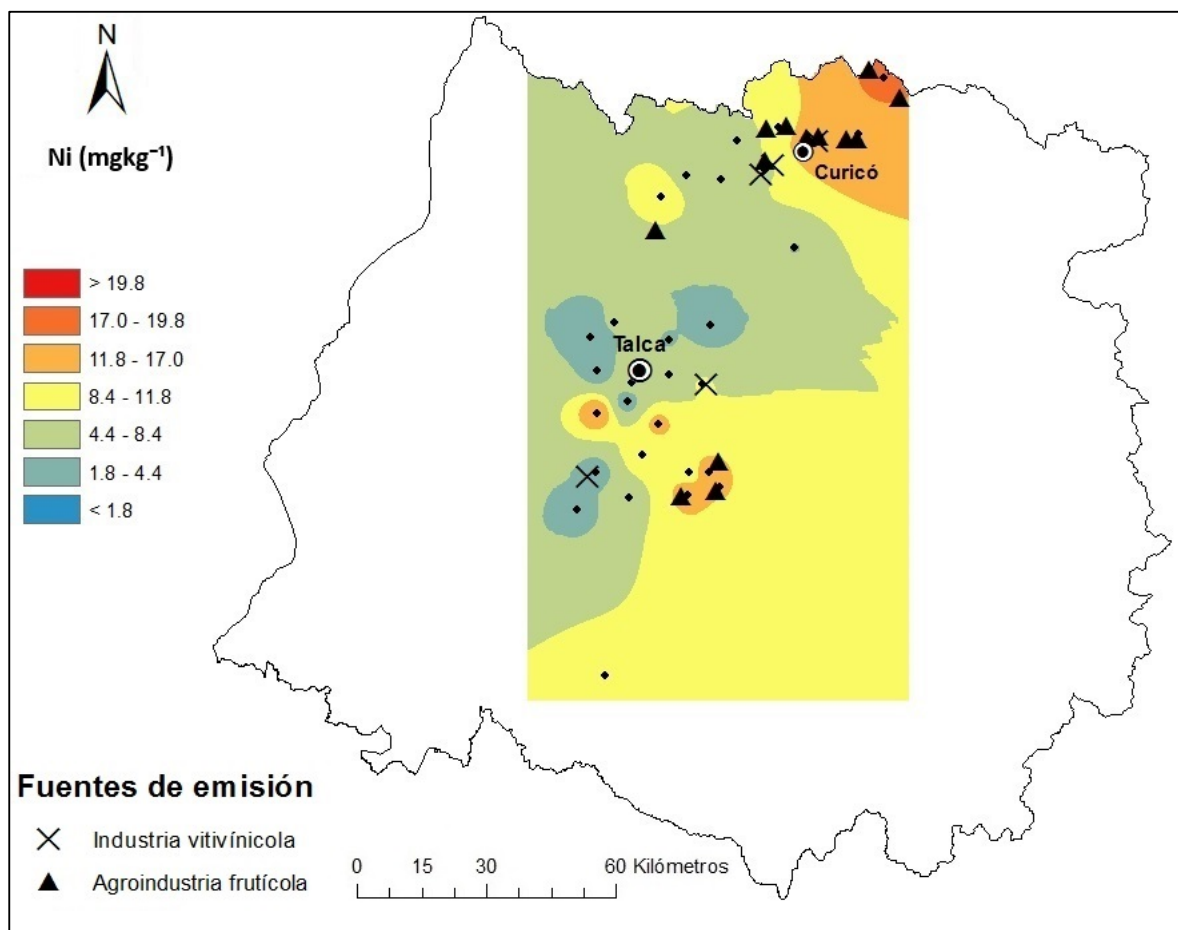


Figura 101. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región del Maule.

Por otro lado, se puede asegurar que el área comprendida entre la zona amarilla y las zonas de color verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 11.8 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por níquel. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur y la cual fue citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), correspondería a 30 mgkg^{-1} . En la figura se puede apreciar que todos los suelos tendrían niveles inferiores a dicho umbral. Considerando el Target Value del Ni igual a 33.2 mgkg^{-1} (ver **Tabla 51**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que todos los suelos en estudio cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de Ni inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.4.4.4. Distribución del Plomo.

En la **Figura 102**, se presenta la distribución espacial de Pb en las muestras extraídas de la Región del Maule. En la figura se puede apreciar que existe una zona puntual con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 15.9 mgkg^{-1} , esta es producto de alguna fuente puntual de contaminación cercana. Esta zona corresponde principalmente a frutales y cultivos anuales, además de la cercanía a un centro frutícola, del que evidentemente estaría recibiendo aportes contaminantes producto de la realización de esta actividad. Los niveles de Pb tienden a aumentar hacia el noreste del área en estudio, partiendo de suelos con concentraciones mínimas de 7.4 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles superan los 15.9 mgkg^{-1} de plomo.

Asimismo, los valores de fondo obtenidos mediante 2 métodos (Median+2 MAD, Iterative 2σ -technique), ver **Tabla 51**, estarían dentro del intervalo naranja. Por lo que es posible inferir que gran parte de estos sitios, además de los suelos de color naranja oscuro y rojo (equivalente a concentraciones mayores a 14.7 mgkg^{-1}) no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales y cultivos anuales, con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido al uso de productos agroquímicos que contienen trazas de Pb (Alloway & Ayres, 1993). Por otro lado, se puede asegurar que el área comprendida entre la franja amarilla y las zonas de color verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 12.1 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por plomo. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur y la cual fue citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), corresponde a 50 mgkg^{-1} . De esto es posible asegurar que todas las zonas del área en estudio tendrían niveles inferiores a dicho umbral. Considerando el Target Value del Pb igual a 76.8 mgkg^{-1} (ver **Tabla 51**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos de todas las zonas del área en estudio cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de Pb inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

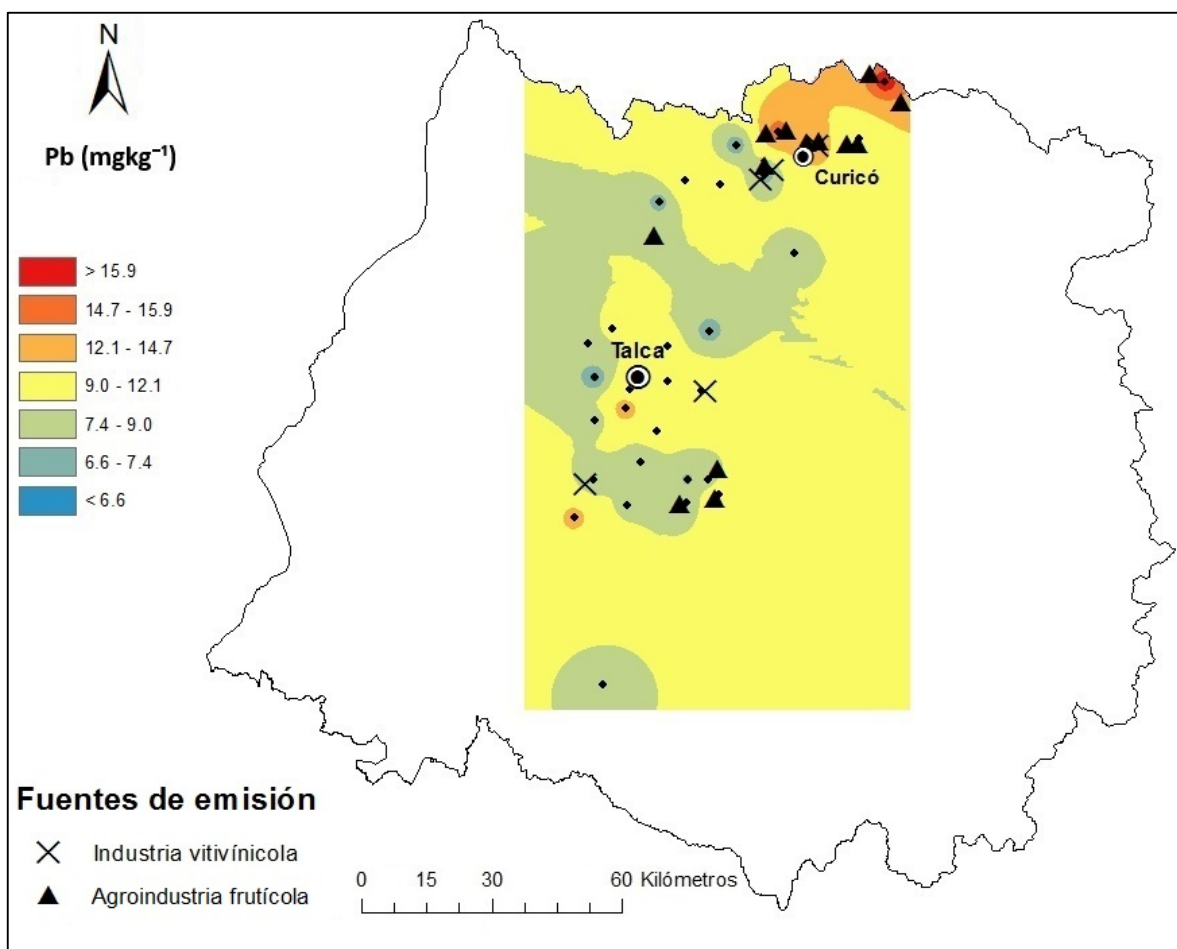


Figura 102. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región del Maule.

4.4.4.5. Distribución del Zinc.

En la **Figura 103**, se presenta la distribución espacial de Zn en las muestras extraídas de la Región del Maule. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 108 mgkg^{-1} . Los niveles de Zn tienden a aumentar hacia el noreste del área en estudio, partiendo de suelos donde las concentraciones son inferiores a 26.5 mgkg^{-1} hasta zonas donde los niveles alcanzan los 108 mgkg^{-1} de zinc. Para agregar, el sitio de color naranja oscuro (concentraciones predichas entre 102 y 108 mgkg^{-1}) ubicado al noreste de Curicó, presenta niveles que son superiores al valor de fondo obtenido mediante el método Median+2 MAD, ver **Tabla 51**. Para los 2 métodos restantes no existen zonas que superen a sus respectivos valores de fondo.

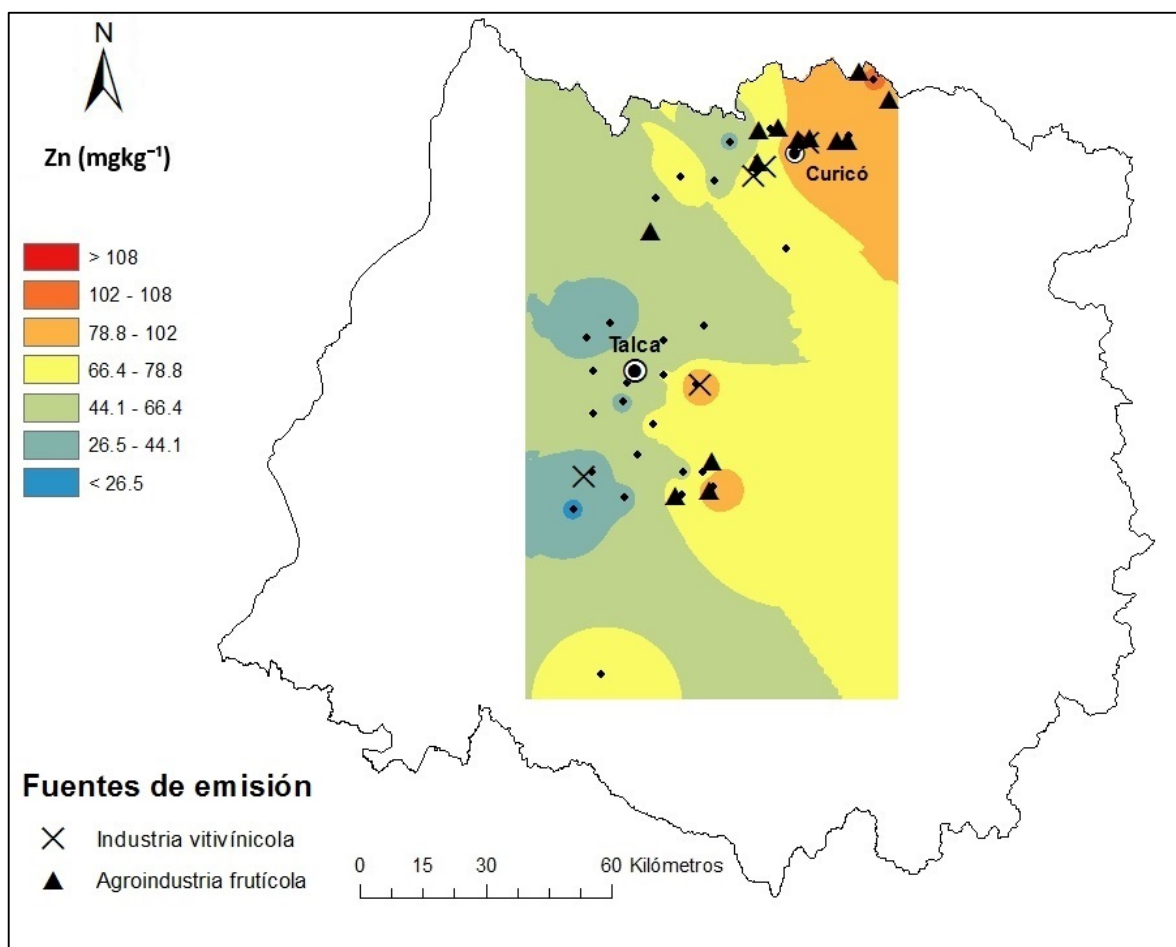


Figura 103. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región del Maule.

Como se dijo anteriormente, en esta región las concentraciones de Zn tiende a aumentar su estimación hacia el noreste, de alguna manera estos mostrarían que existen aportes de actividades antrópicas a dicha zona. Por esto, la zona de color naranja oscuro y los 2 sitios en el centro del área en estudio, no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales, cultivos anuales y viñas. Con lo cual se podría atribuir a que los niveles alcanzados son debido a la práctica agrícola (Kabata-Pendias & Pendias, 2011) y la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al. 2003). Con respecto al sitio de color naranja oscuro, es posible inferir que podría estar siendo afectado por la presencia del centro frutícola de Unifrutti cercano a este. El área de la franja amarilla hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 78.8 mgkg⁻¹), correspondería a suelos que están libres de contaminación por zinc. Cabe

recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur y la cual fue citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), corresponde a 175 mgkg^{-1} . Por lo anterior, todos los suelos del área en estudio tendrían niveles inferiores a dicho umbral. Considerando el Target Value del Zn igual a 125 mgkg^{-1} (ver **Tabla 51**), obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que todos los suelos del área en estudio cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de Zn inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.4.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región del Maule.

Las muestras de suelo recolectadas de la Región del Maule fueron evaluadas mediante Índice de Geoacumulación (I_{geo}), Factor de Contaminación (C_f), Grado de Contaminación (C_{deg}) e Índice Integrado de Contaminación (IPI) (Yaylalı-Abanuz, 2011). Los valores de fondo utilizados en dichos índices corresponden al menor valor de entre los 3 métodos estadísticos utilizados en la región en referencia. Los valores de fondo de los elementos As, Cu y Zn, fueron los obtenidos a través del método *Median + 2 MAD*, y en relación a los ETM restantes, fueron los valores de la técnica Iterative 2σ -technique. Los valores de fondo empleados para los elementos As, Cu, Ni, Pb y Zn corresponden a 11.8, 44.2, 15.1, 12.8 y 100 mgkg^{-1} , respectivamente.

4.4.6.1. Índice de Geoacumulación (I_{geo}).

Los resultados de los valores obtenidos del índice de geoacumulación para cada ETM son presentados en la **Figura 104**. En esta figura es posible apreciar que el elemento Cu presentó suelos entre no contaminados hasta moderadamente contaminados, valores de I_{geo} entre -0.8 a 0.2. Además, la mayoría los suelos de esta región, 94% de las muestras, presentan nula contaminación con respecto al cobre (valores de I_{geo} menor a 0). Asimismo, un 6% de las muestras presentaron contaminación moderada por este elemento ($0 < I_{geo} \leq 1$). Con respecto al resto de elementos (As, Ni, Pb y Zn), todas de las muestras de suelo

están dentro de la categoría sin contaminación por estos elementos, valores de I_{geo} menores 0 (Prácticamente sin contaminación).

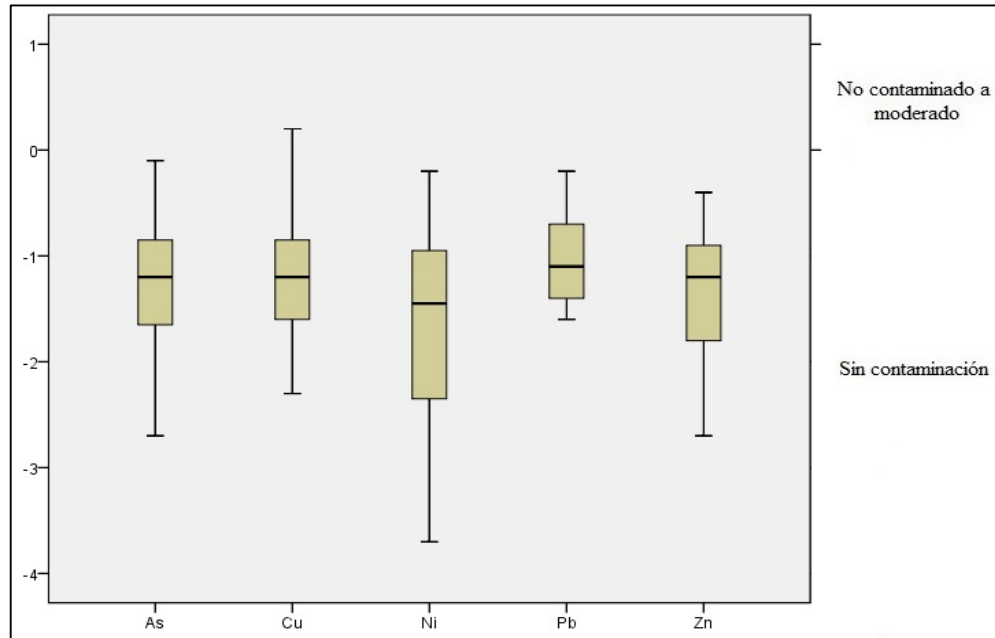


Figura 104. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Maule.

4.4.6.2. Factor de Contaminación (C_f), Grado de Contaminación (C_{deg}) e Índice Integrado de Polución (IPI).

Los resultados de los valores obtenidos del factor de contaminación para cada ETM son presentados en la **Figura 105** y **Figura 106**, además en la **Tabla 53** se entregan algunos parámetros estadísticos de cada elemento para contribuir a la interpretación de los resultados.

Tabla 53. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región del Maule.

Metales	Mínimo	Máximo	Media	SD ^a	Mediana
As	0.24	1.4	0.65	0.28	0.66
Cu	0.31	1.7	0.71	0.31	0.66
Ni	0.12	1.3	0.57	0.35	0.56
Pb	0.49	1.3	0.77	0.22	0.70
Zn	0.23	1.1	0.64	0.24	0.66

^a Desviación Estándar

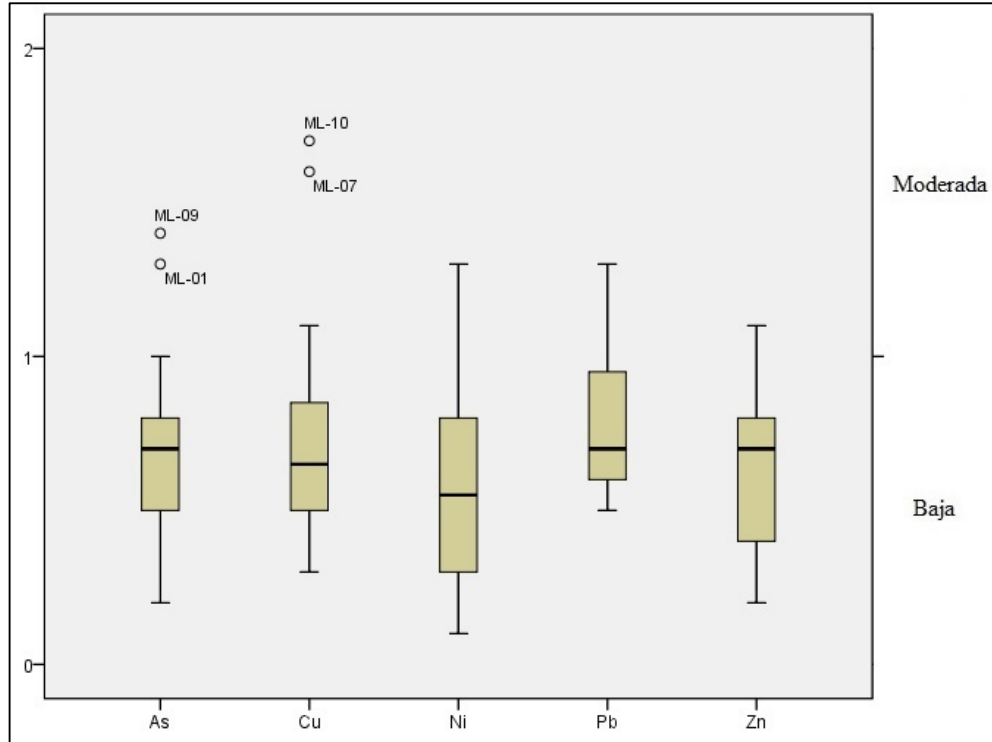


Figura 105. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Maule.

En las figuras es posible apreciar que el elemento Pb presenta porcentajes de suelos que están dentro de las categorías de contaminación moderada (13% del total) por este elemento. A pesar de esto, la mayoría de las muestras de suelo (84% de los sitios muestreados) están dentro de la categoría baja contaminación con respecto a este elemento, con valores menores a 1. Con respecto al resto de ETM (As, Cu, Ni y Zn), gran parte de las muestras de suelo tienen baja contaminación por estos elementos, sobre el 88% de los sitios, y un pequeño porcentaje de estas están dentro de la categoría contaminación moderada ($1 \leq C_f < 3$). Finalmente, de la tabla se puede inferir que los suelos de esta región tienen contaminación baja con respecto a todos los elementos.

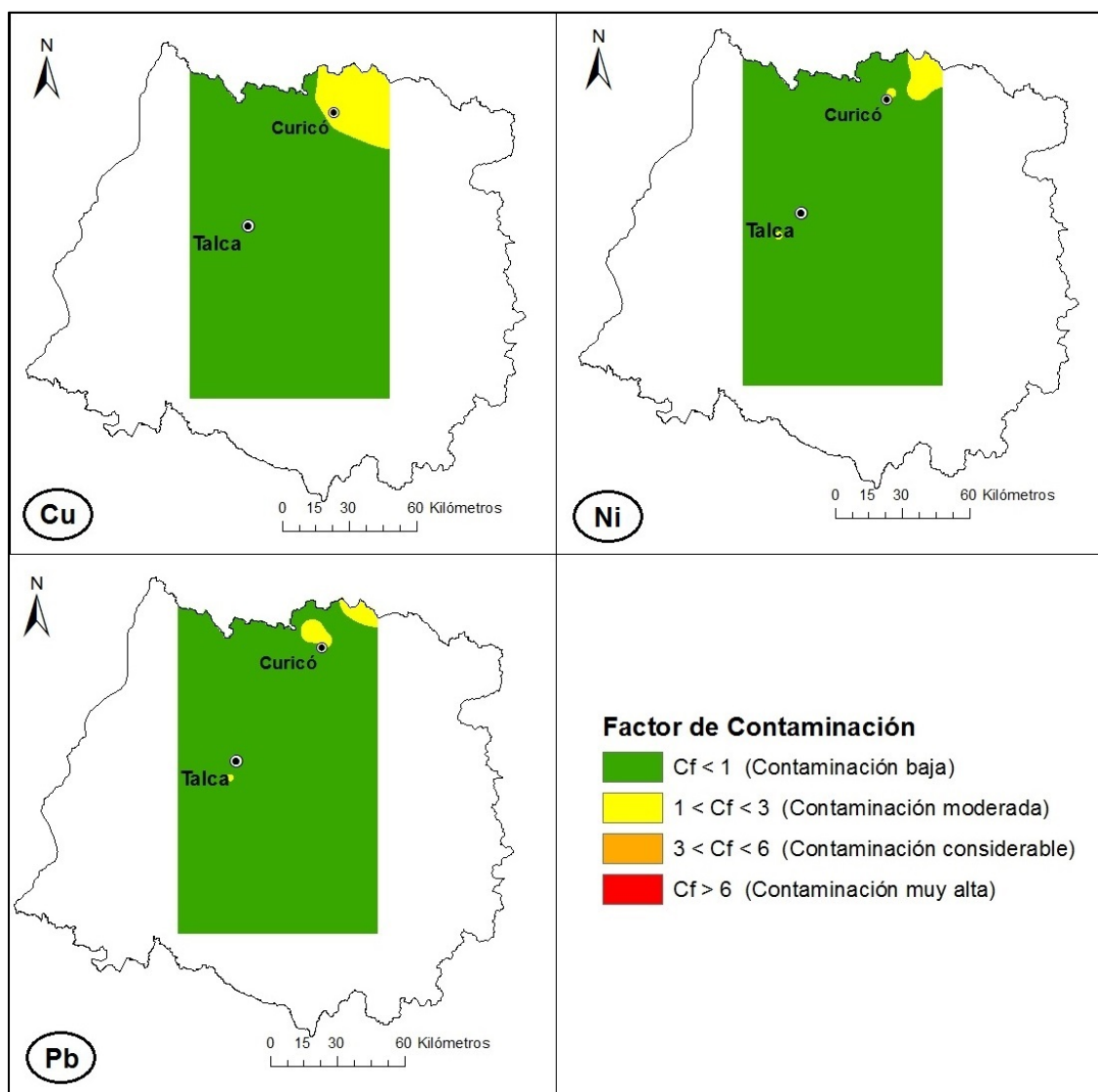


Figura 106. Distribución espacial de los factores de contaminación (C_f) de los elementos Cu, Ni y Pb de la Región del Maule.

En la **Figura 107**, se presenta la distribución espacial de los grados de contaminación de las muestras recolectadas en la Región del Maule. Pero antes es necesario establecer la clasificación de estos valores, para esto fueron reclasificados según Håkanson (1980) y de acuerdo al número de ETM (5 elementos) que se utilizaron para esta región (Albanese et al., 2013), ver página 45. En la figura se puede apreciar que existe un alto porcentaje, aproximadamente un 91%, de muestras que están dentro de la categoría bajo grado de contaminación (valores de C_{deg} menores a 5). En los sitios de las muestras restantes (9%

del total) presentarían moderado grado de contaminación con respecto a los ETM en estudio, todos estos ubicados en la zona noreste de la región. Esto último indica que en estos sitios están moderadamente afectados por actividades antrópicas y por esto, tendrían contaminación moderada por los elementos en estudio.

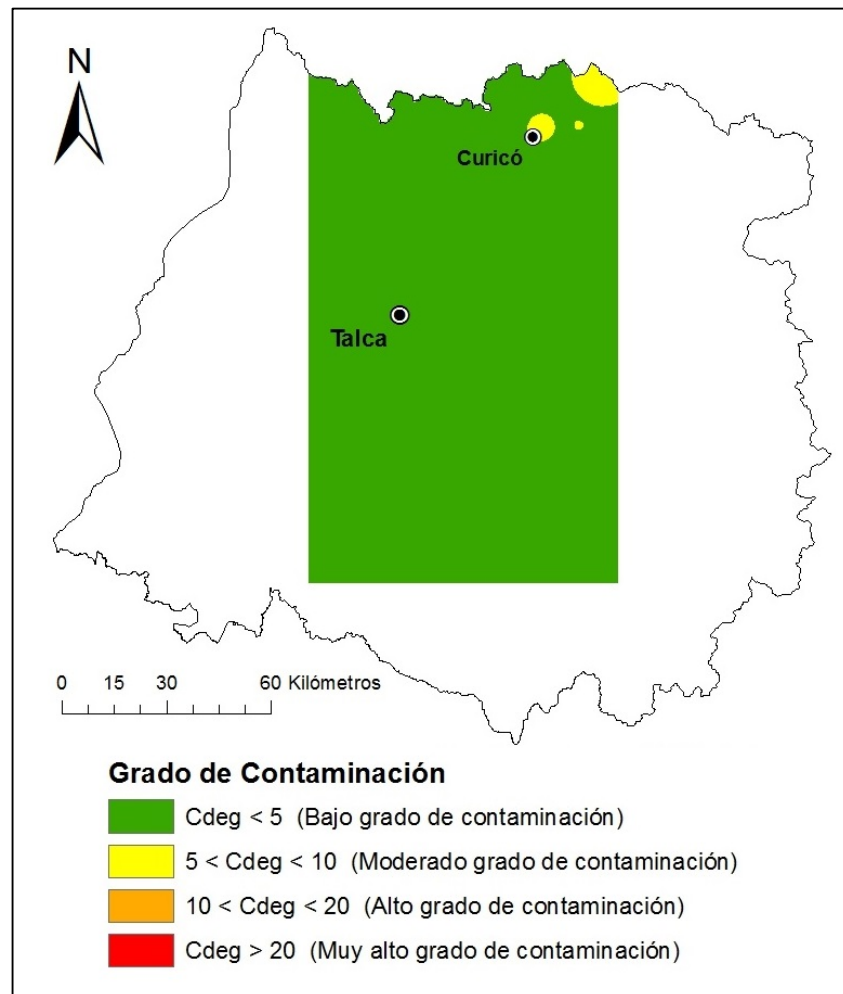


Figura 107. Distribución espacial de los grados de contaminación (C_{deg}) de la Región del Maule.

Finalmente, el índice integrado de polución es presentado mediante la **Figura 108**. En la distribución espacial presentada en la figura se puede observar que existe un alto porcentaje de muestras, 91% del total, con nivel bajo de contaminación ($IPI \leq 1$). Asimismo, existe un 9% de las muestras que tienen un nivel moderado de contaminación, todas estas ubicadas en el noreste de la región en estudio. Esto indica que estos sitios están

moderadamente afectado por actividades antrópicas y por esto, tendría un nivel moderado de contaminación por los ETM. Pero en general los suelos de esta región tienen un nivel bajo de contaminación por los elementos en estudio.

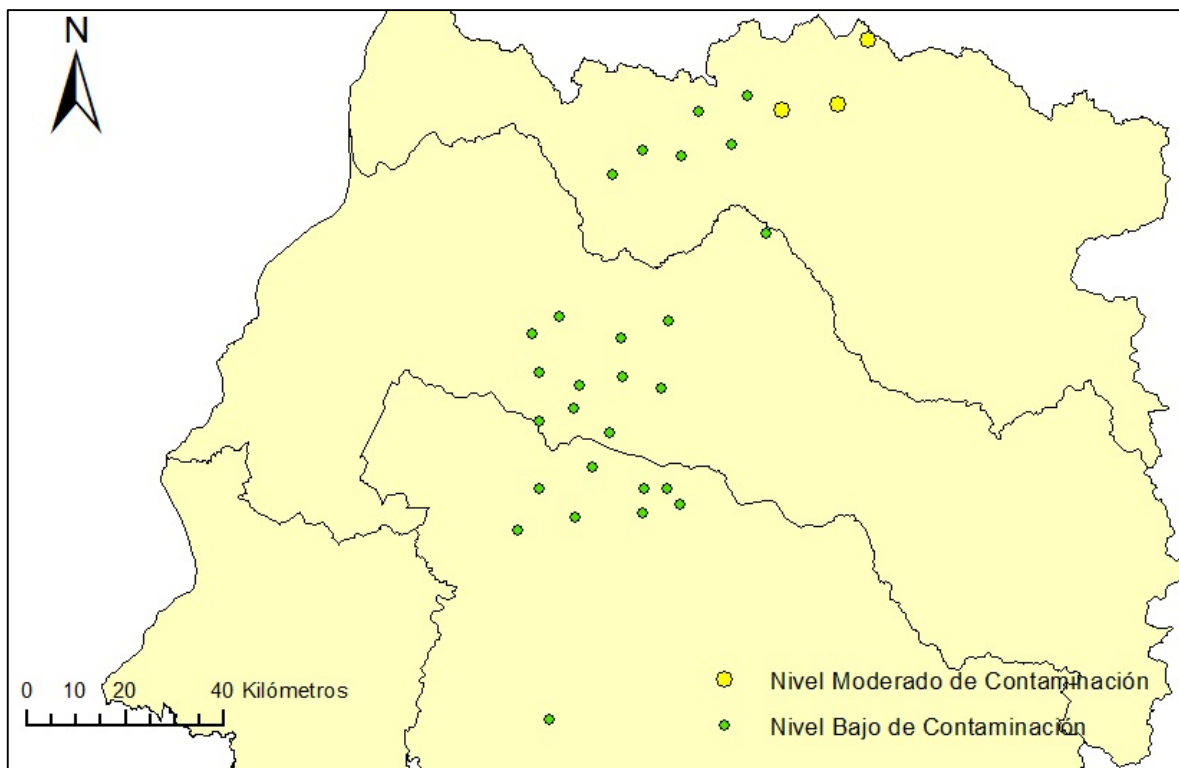


Figura 108. Ubicación geográfica de los índices integrados de contaminación (*IPI*) de la Región del Maule.

4.5. Región del Bío Bío

Antes de analizar y discutir los resultados, es necesario establecer que los ETM utilizados en la Región del Bío Bío fueron los elementos As, Cu, Ni, Pb y Zn, y el considerar solo estos elementos es producto de lo establecido en el CAPÍTULO III, punto 3.1.

4.5.1. Análisis exploratorio de datos de la Región del Bío Bío.

A continuación, se presentará el análisis exploratorio de datos realizado para la Región del Bío Bío, considerando los ETM y propiedades edáficas utilizadas. En la **Figura 109**, se presentan los gráficos utilizados para el AED del elemento arsénico presente en la región en

referencia. En el histograma de la figura, es posible distinguir que este grafico tiene de alguna manera la forma necesaria para poder inferir que tiende a seguir una distribución normal. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que tiende a tener la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se puede observar que en el box plot existe algún grado de simetría entre los bigotes y cuartiles, se puede apreciar un diagrama de caja simétrico. Por lo anterior, se puede concluir que los datos de este elemento siguen una distribución normal.

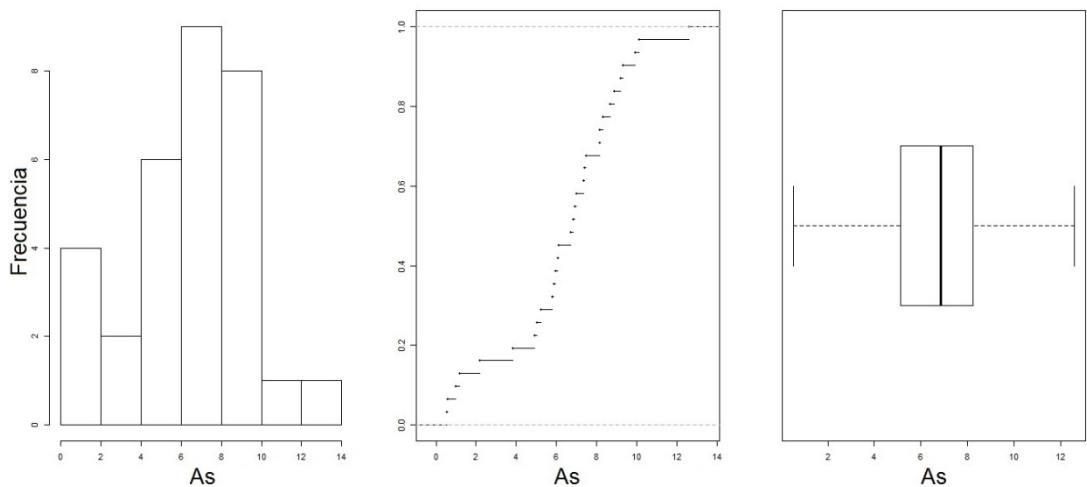


Figura 109. Representaciones gráficas del AED del elemento As, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 110**, se puede observar que la distribución del elemento cobre tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha, lo que se puede inferir que la media es mayor a la mediana. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar claramente que esta no cumple con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que el box plot de la figura no tiene la simetría necesaria para poder afirmar que los datos siguen la distribución normal. De los tres gráficos analizados anteriormente, se puede llegar a concluir que los datos del elemento cobre de esta región no siguen la distribución normal.

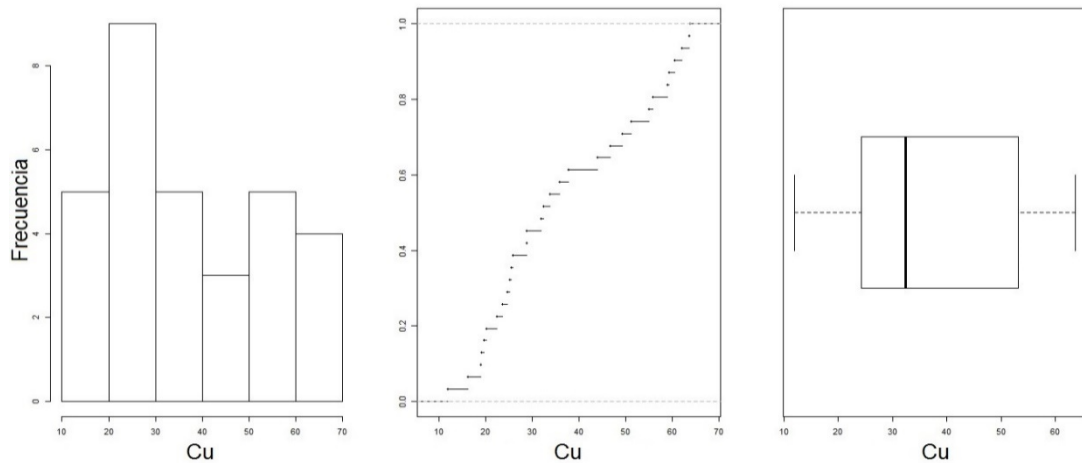


Figura 110. Representaciones gráficas del AED del elemento Cu, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el primer gráfico de la **Figura 111**, se puede observar una inclinación de la cola hacia la derecha del conjunto de datos del elemento Ni, es decir, esta posee sesgo positivo pudiéndose inferir que la media es mayor a la mediana de estos. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este elemento no tiende a comportarse como una distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que existe un mayor distanciamiento entre el tercer cuartil y el bigote superior, lo que demostraría que los datos se encuentran más dispersos entre los 20 y 30 mgkg^{-1} . De todo este análisis se puede concluir que los datos no siguen la distribución normal.

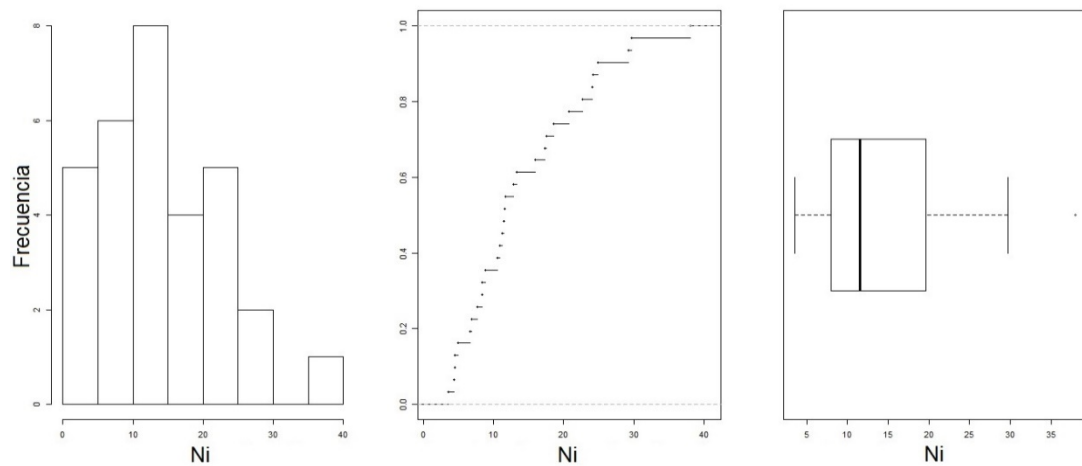


Figura 111. Representaciones gráficas del AED del elemento Ni, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de la **Figura 112**, se puede apreciar que la distribución del elemento plomo tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la izquierda, por lo que se puede inferir que la media es inferior a la mediana de los datos. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que la curva no tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel, se puede observar que existen tres muestras que son inferiores al bigote inferior. Finalmente, por todo lo anterior, se puede aseverar que este elemento no tiende a comportarse como la distribución normal.

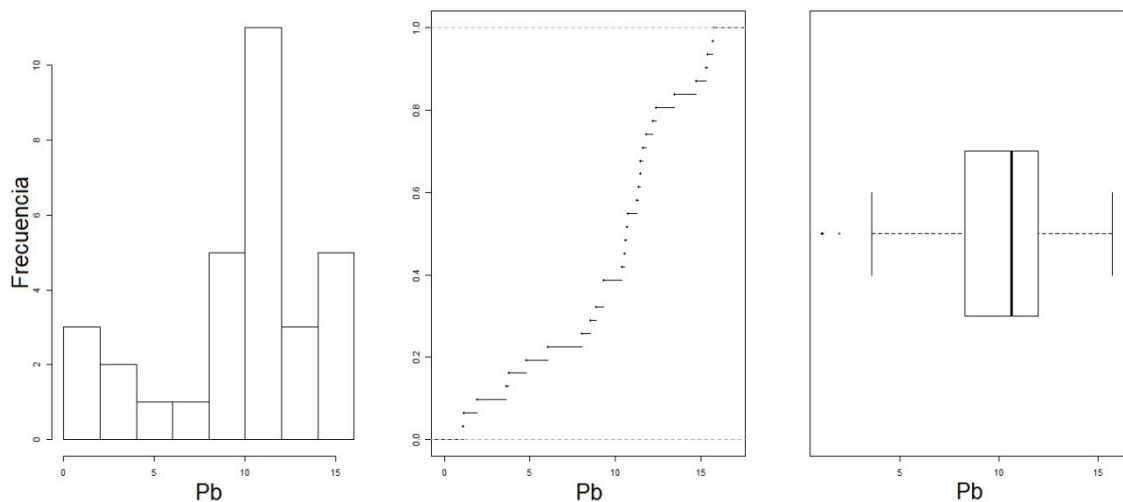


Figura 112. Representaciones gráficas del AED del elemento Pb, con respecto a las concentraciones (mgkg^{-1}).

En el histograma de las concentraciones de zinc en la **Figura 113**, se puede apreciar que los datos de este elemento se distribuyen con un leve sesgo negativo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que presenta algunas irregularidades en la curva, pero a pesar de esta el gráfico tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el tercer gráfico del panel se puede observar que existe una leve inclinación hacia el bigote inferior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último. Por todo lo dicho anteriormente, es posible concluir que este elemento tiende a seguir una distribución normal.

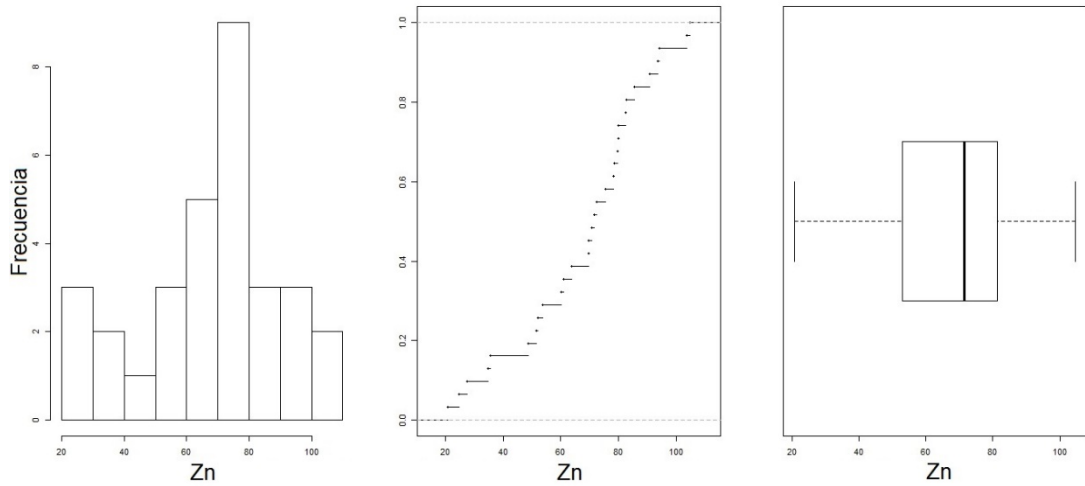


Figura 113. Representaciones gráficas del AED del elemento Zn, con respecto a las concentraciones (mgkg⁻¹).

En el histograma de la **Figura 114**, se puede observar que existe un cierto grado de simetría, como para ser considerada la posibilidad de que los datos de pH sigan una distribución normal. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta presenta la asimetría requerida para comportarse como una distribución normal. Continuando con el tercer grafico del panel, en este se puede distinguir la simetría del gráfico, pero con una leve inclinación hacia el bigote inferior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último. Por lo dicho anteriormente, se puede inferir que los datos de este parámetro siguen una distribución normal.

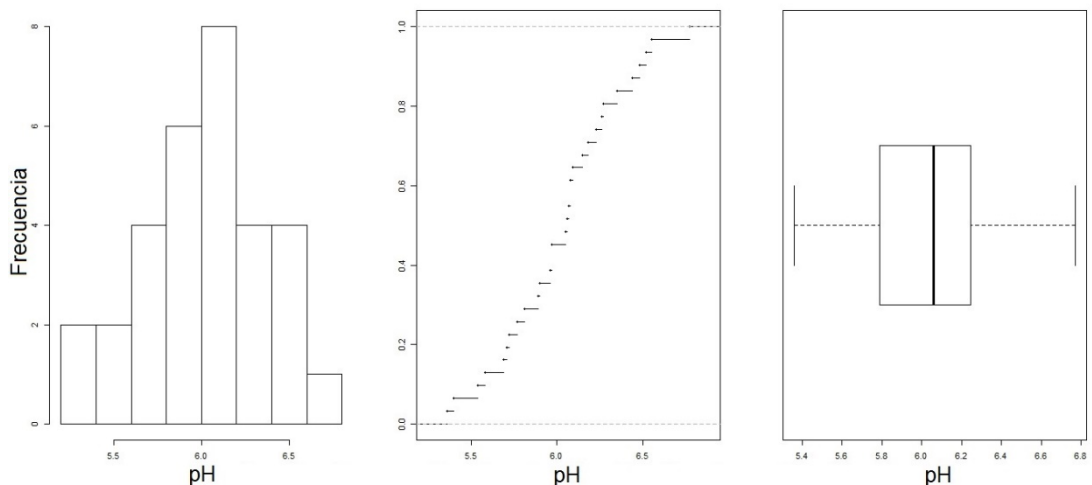


Figura 114. Representaciones gráficas del AED del parámetro pH.

En el histograma de la **Figura 115**, la distribución de los datos del parámetro CE es asimétrica con sesgo positivo. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta no tiene la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existen dos valores atípicos por encima del bigote superior. De lo anterior, se puede inferir que los datos de este parámetro no presentan la forma requerida para que estos sigan una distribución normal.

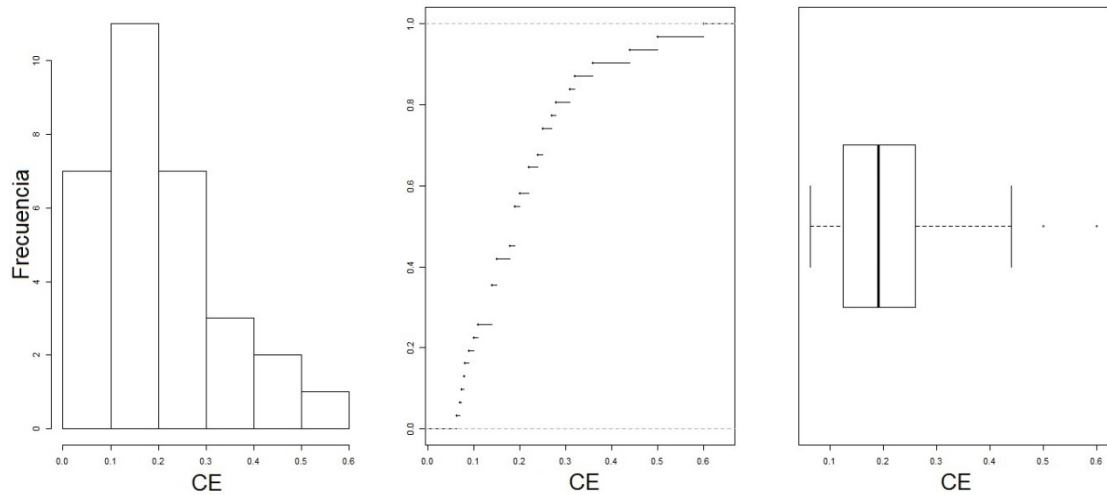


Figura 115. Representaciones gráficas del AED del parámetro CE, con respecto a la unidad de medida $mS\ gr^{-1}$.

En el histograma de la **Figura 116**, se puede observar que el gráfico tiende a tener concentrados una gran cantidad de datos del parámetro materia orgánica en la parte central de este. Continuando con el análisis, en el segundo gráfico del panel se puede apreciar que los datos cumplen de alguna manera con la asimetría necesaria con forma de S típica para poder afirmar su tendencia a distribución normal. Para terminar, se está en evidencia que en el box plot existe una leve inclinación hacia el bigote superior, pero no alcanzando a tener valores por encima de este último. De los tres gráficos analizados anteriormente, se puede llegar a concluir que los datos del parámetro materia orgánica de esta región siguen la distribución normal.

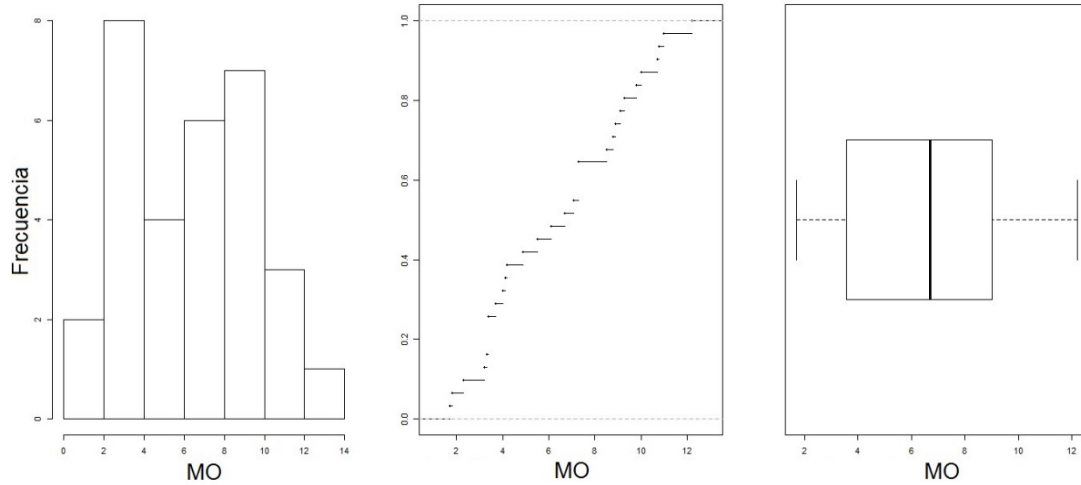


Figura 116. Representaciones gráficas del AED del parámetro MO, con respecto a la unidad de medida % bs.

En el primer gráfico de la **Figura 117**, es posible apreciar que el histograma de los datos de CIC es asimétrico con leve sesgo positivo. Al observar el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que este parámetro tiende a tener la forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que los datos están sesgados hacia la derecha. De todo el análisis descrito anteriormente, se puede concluir que los datos siguen la distribución normal.

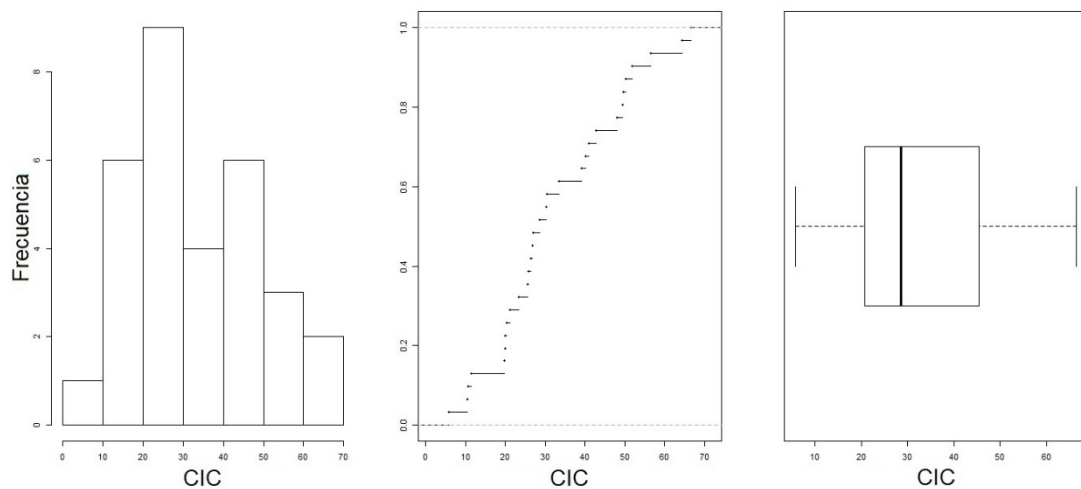


Figura 117. Representaciones gráficas del AED del parámetro CIC, con respecto a la unidad de medida Cmol(+) kg^{-1} .

En la **Figura 118**, se presentan los gráficos utilizados para el AED del porcentaje de arena determinado de las muestras recolectadas en la región en referencia. En el histograma de la figura, se puede apreciar que la distribución de este parámetro tiene una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta curva no tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. En el box plot del panel se puede observar que existe una gran inclinación hacia el bigote superior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último. Finalmente, por todo lo anterior, se puede aseverar que este parámetro no tiende a comportarse como la distribución normal.

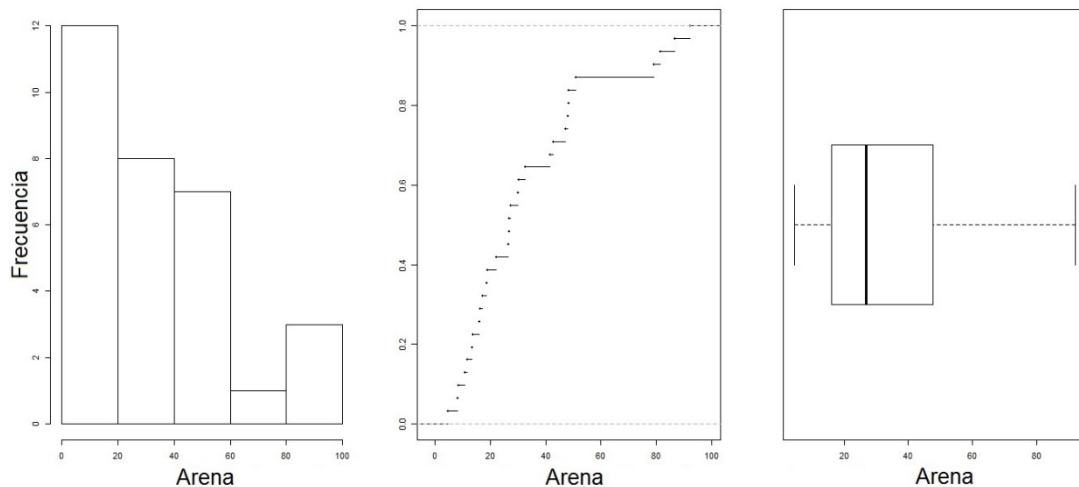


Figura 118. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arena, con respecto a porcentajes (%).

En el histograma de la **Figura 119**, se puede apreciar que la distribución del parámetro porcentaje de limo presenta de alguna manera la forma requerida para que este siga una distribución normal. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar que esta cumple con la asimetría necesaria con forma de S típica de la distribución normal. Para terminar, en el box plot se puede observar que existe una marcada inclinación hacia el bigote inferior, pero no alcanzando a tener valores que estén fuera de este último. Por lo anterior, se puede concluir que el parámetro porcentaje de limo de esta región sigue una distribución normal.

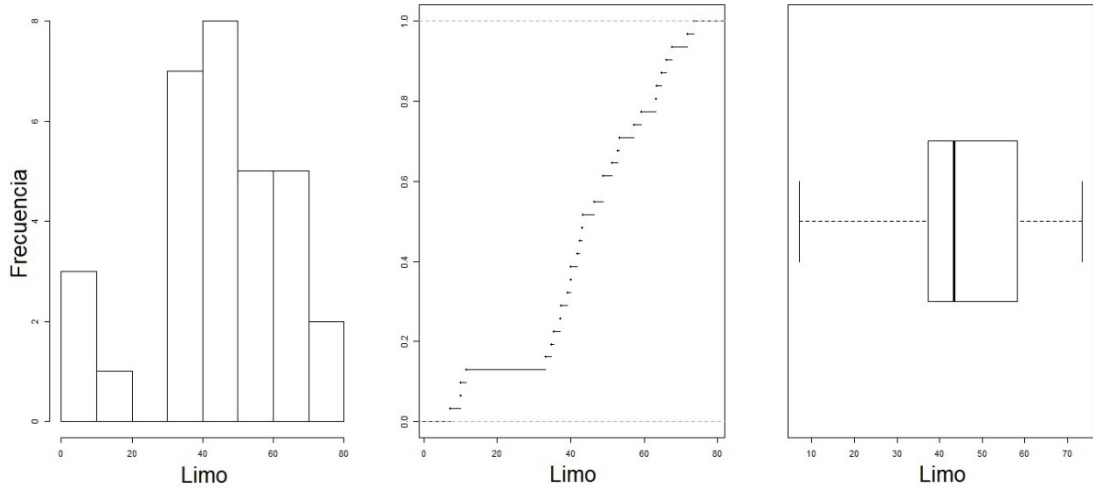


Figura 119. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de limo, con respecto a porcentajes (%).

En el primer gráfico de la **Figura 120**, se puede apreciar que los datos del porcentaje de arcilla se distribuyen con una asimetría de sesgo positivo hacia la derecha. En el gráfico de frecuencia acumulada se puede apreciar de manera evidente que esta curva no tiende a tener la forma de S típica de distribución normal. Por último, en el tercer gráfico del panel donde se muestra el box plot se puede ver que existe una leve inclinación hacia el bigote superior, pero no alcanzando a tener valores que estén por encima de este último. Por todo lo dicho anteriormente, es posible concluir que este parámetro no tiende a seguir una distribución normal.

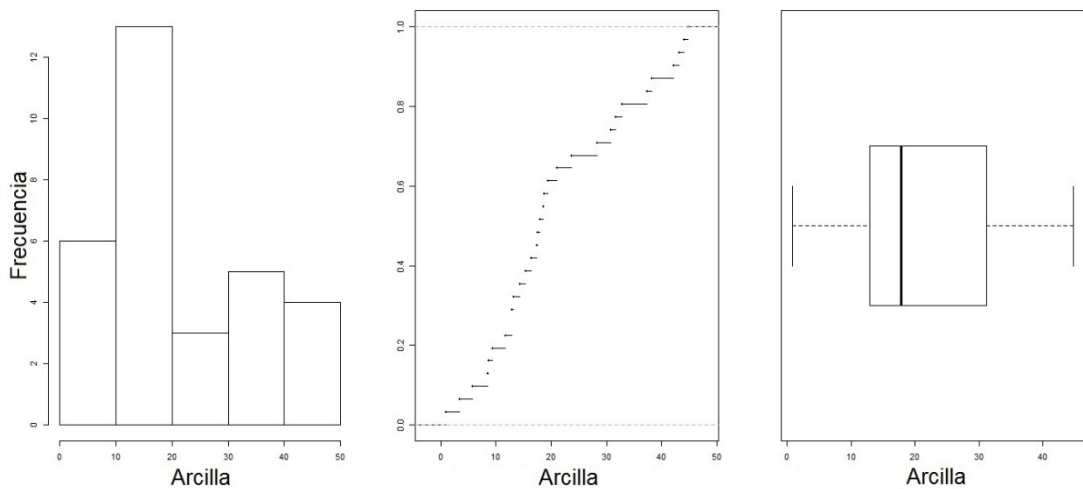


Figura 120. Representaciones gráficas del AED del parámetro porcentaje de arcilla, con respecto a porcentajes (%).

4.5.2. Análisis univariado de la Región del Bío Bío.

El análisis univariado para la Región del Bío Bío, como se ha hecho en las regiones anteriores, se debieron tratar por separado a las variables de parámetros edáficos y por otro lado, a las concentraciones totales de ETM.

4.5.2.1. Propiedades de los suelos.

En la **Tabla 54**, se presentan los estadísticos descriptivos de los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de arena, limo y arcilla, determinados de las muestras de suelo recolectados en la Región del Bío Bío. Considerando los porcentajes de tamaño de partículas, se puede apreciar que existe predominio absoluto de la fracción de limo. También es posible notar que tanto la arena como la arcilla, poseen porcentajes promedio distantes entre sí, además estos poseen coeficientes de variación menores a 1, con lo cual se puede inferir que estos tienen una distribución homogénea. Según la clasificación propuesta por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, USDA (Soil Survey Division Staff, 1993), los suelos en estudio eran generalmente de textura franco limosa o franca. Profundizando en esto, el 13% de los suelos fueron de textura fina, un 19% moderadamente fina y un 52% de textura media.

Con respecto a los valores de pH medidos, estos se pueden clasificar en diferentes categorías dependiendo de su valor (Soil Survey Division Staff, 1993). A continuación, los porcentajes de muestras en cada una de las categorías se presentan de la siguiente manera: 13% de las muestras corresponden a fuertemente ácido (pH entre 5.1 y 5.5), 52% a moderadamente ácido (pH entre 5.6 y 6.0), 32% a neutro (pH entre 6.6 y 7.3) y 3% a ligeramente alcalino (pH entre 7.4 y 7.8). De los estadísticos se puede destacar la cercanía entre los valores de la media y la mediana, además de una baja dispersión y muy bajo valor de CV, cercano a 0, con lo cual se puede inferir la homogeneidad del conjunto de datos de pH. Cabe agregar que al ver las unidades de pH de las regiones predecesoras, se puede ver claramente una evidente tendencia a la reducción del pH hacia el sur del país, lo que es consistente con la condición de mayor lavado por la incidencia anual de mayores volúmenes de agua de precipitación.

Analizando el parámetro de conductividad eléctrica, a partir de la mediana y SD se puede deducir que una gran cantidad de muestras presentan valores de CE menores a 2 mSgr^{-1} , con lo que se puede concluir que en las muestras de esta región predominan los suelos no salinos, de acuerdo con la clasificación propuesta por el USDA (Soil Survey Division Staff, 1993). Ahondando en este punto, el 100% de los datos corresponden a muestras no salinas. Por esto, ninguna muestra refleja problemas de salinidad en el suelo, según los criterios del USDA (valor superior a 4 mS gr^{-1}).

Del total de datos del parámetro materia orgánica, para cada una de las categorías de clasificación según el tipo orden de taxonomía de suelos, se tiene que un 16% de las muestras tiene muy bajo contenido de MO y un 6% corresponde a bajo contenido de esta. Estos porcentajes de bajos contenidos de MO son consecuencia de un uso intensivo de los suelos en estudio, por lo tanto, en esta región existe un porcentaje bajo de muestras con problemas de materia orgánica.

Tabla 54. Estadísticos descriptivos para los parámetros pH, CE, MO, CIC y porcentajes de tamaño de partículas de arena, limo y arcilla determinados de las muestras de la Región del Bío Bío.

Estadísticos	pH	CE	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Descriptivos		(mS gr^{-1})	(% bs)	(Cmol (+) kg^{-1})	(%)	(%)	(%)
Media	6.0	0.21	6.4	32.8	33.7	45.0	21.3
SD ^a	0.34	0.13	3.1	16.0	24.1	17.9	12.7
Mediana	6.1	0.19	6.7	28.6	26.8	43.4	17.9
Mínimo	5.4	0.06	1.7	5.8	4.6	7.1	0.90
Máximo	6.8	0.60	12.2	66.5	92.0	73.4	44.7
Rango	1.4	0.54	10.5	60.7	87.4	66.3	43.8
CV (%) ^b	5.7	60.9	47.9	48.9	71.5	39.9	59.5

^a Desviación Estándar

^b Coeficiente de Variación

De la tabla se puede apreciar que la mediana y la media poseen valores muy distantes entre sí, pero debido a la mediana se puede deducir que más del 50% de las muestras superan los $25 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, por lo tanto se puede asegurar que este porcentaje de muestras poseen alta fertilidad. Por último, mediante el parámetro capacidad de intercambio catiónico es

posible determinar la clase de fertilidad de los suelos (Fernández et al., 2006). Mediante esto se puede aseverar que un 35% de las muestras tiene una fertilidad muy alta, un 32% corresponden a la clase fertilidad alta y un 19% de muestras con fertilidad media. Además, es importante mencionar que un 3% de las muestras presentan una baja capacidad de almacenamiento de nutrientes ($CIC < 10 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$) (Fernández et al., 2006).

4.5.2.2. Concentraciones totales de ETM.

En la **Tabla 55**, se puede observar que el número de muestras es de 31 para la Región del Bío-Bío. En esta también es posible observar las altas concentraciones en promedio que presentan los elementos Cu y Zn (37.2 y 67.7 mgkg^{-1} , respectivamente) con respecto a los otros elementos en los suelos muestreados. Además, se puede ver la gran desviación de las concentraciones de los elementos Cu y Zn (16.5 y 22.4 mgkg^{-1} , respectivamente), de esto se puede aseverar que existe una gran dispersión en las concentraciones de Cu sobre la media de las muestras extraídas. Los elementos restantes presentan baja variabilidad de las concentraciones, no sobrepasando los 8.7 mgkg^{-1} , lo que nos indica que los datos se encuentran cerca de su media.

Mediante el coeficiente de asimetría o sesgo es posible identificar si los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor de la media. Para este estudio los elementos Cu y Ni presentan un valor positivo, es decir, gran parte de las concentraciones de cada elemento se encuentran sobre la media. Por el contrario, para el caso de los elementos As, Pb y Zn, en los cuales se tiene un valor negativo, esto representa que gran parte de los datos de cada uno se encuentran bajo la media. El valor de asimetría más alto de todos, ocurre en el elemento Ni, con un coeficiente de asimetría de 0.92. Asimismo considerando la medida de curtosis se puede indicar que los elementos As y Ni y presentan una distribución más puntiaguda que la distribución normal. Esto mismo no ocurre para los elementos Cu, Pb y Zn ya que presentan una curtosis negativa, indicándonos que los datos tienen una distribución más achatada que la normal.

Por otro lado, de la **Tabla 55**, se puede apreciar que el coeficiente de variación de todos los elementos tiene un valor menor a 1, con lo cual podemos concluir que sus datos son homogéneos.

También es importante señalar que para los elementos Cu y Zn existe un gran rango de concentraciones (51.8 y 83.8 mgkg⁻¹, respectivamente), esta gran amplitud de datos refleja contaminación en algunos de los suelos muestreados. Con respecto a las muestras que presentan concentraciones de ETM inferiores al límite de detección, en esta región se sabe que el Ni no tiene muestras con contenidos de elementos menores a tal límite. Sin embargo el Cd y Se tienen un 81 y 35%, respectivamente, de datos que no superan el límite, por lo que estos elementos han sido descartados para todos los análisis hechos en esta región.

Tabla 55. Estadísticos descriptivos para las concentraciones totales (mgkg⁻¹) de las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn, obtenidos de las muestras de la Región del Bío Bío.

Estadísticos Descriptivos	As	Cu	Ni	Pb	Zn	
Número de Muestras	31	31	31	31	31	
Media	6.4	37.2	14.4	9.8	67.7	
SD ^a	3.0	16.5	8.7	4.2	22.4	
Mediana	6.8	32.5	11.6	10.7	71.5	
MAD ^b	1.6	12.7	5.8	1.8	11.4	
Sesgo	-0.47	0.34	0.92	-0.67	-0.53	
Curtosis	0.04	-1.4	0.29	-0.25	-0.35	
Rango	12.1	51.8	34.4	14.6	83.8	
Mínimo	0.53	11.9	3.6	1.1	20.8	
Máximo	12.6	63.7	38.0	15.7	105	
CV (%) ^c	46.4	44.3	60.9	43.2	33.1	
Percentiles	5	0.56	14.6	4.1	1.1	23.2
	25	5.0	23.7	7.7	8.0	52.1
	50	6.8	32.5	11.6	10.7	71.5
	75	8.3	55.1	20.7	12.2	82.5
	95	11.1	63.7	33.0	15.7	104

^a Desviación Estándar

^b Desviación Absoluta de la Mediana

^c Coeficiente de Variación

Finalmente, por lo anterior se puede concluir que todos los elementos y parámetros en estudio, excepto el As, Zn, pH, MO, CIC y limo, para la Región del Bío-Bío no cumplen con la condiciones necesarias que permiten asegurar que siguen una distribución normal.

4.5.3. Análisis multivariado de la Región del Bío Bío.

En el comportamiento de los ETM con los parámetros considerados, y las relaciones entre elementos se realizó el siguiente tratamiento multivariado a los datos determinados de las muestras de la región en referencia. Para esto se efectuaron los análisis de correlación de Spearman entre ETM, correlación de Spearman entre ETM y parámetros, análisis de componentes principales (ACP) y análisis Cluster.

4.5.3.1. Correlación de Spearman entre ETM de la Región del Bío Bío.

Para mayor comprensión de las relaciones que pueden existir entre los ETM considerados en este estudio, se realizó el respectivo análisis de correlación de Spearman. Las medidas de correlación del análisis empleado para los datos de la región en consideración, se obtuvieron mediante el software IBM SPSS. En la **Tabla 56**, se presentan dichos coeficientes de correlación.

Tabla 56. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables As, Cu, Ni, Pb y Zn de la Región del Bío Bío.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1.0				
Cu	0.40*	1.0			
Ni	-0.46	0.08	1.0		
Pb	0.76**	0.70**	-0.27	1.0	
Zn	0.38*	0.76**	-0.04	0.48**	1.0

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 57**, se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos.

Con respecto a la tabla, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre los elementos Pb/As y Zn/Cu, lo que mostraría una correlación bastante fuerte entre estos ETM. Esta gran correlación podría ser evidencia de un origen similar de estos ETM, posiblemente de actividades antrópicas. También se observaron correlaciones moderadas entre Pb/Cu y Zn/Pb, posiblemente indicando la adición de estos ETM de diferentes fuentes. Estas correlaciones significativamente positiva entre ETM sugieren una fuente en común (Al-Khashman & Shawabkeh, 2006). Sin embargo, las correlaciones significativas no siempre representan que sea una fuente en común (Hani & Pazira, 2011). Esto implica que el análisis de correlación por sí solo no es suficiente para poder identificar una posible fuente de contaminación de metales pesados, si no debe ser llevado a cabo junto con otras herramientas de análisis.

Tabla 57. Jerarquía de las correlaciones entre ETM de la Región del Bío Bío.

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Pb/As	0.76**
2	Zn/Cu	0.76**
3	Pb/Cu	0.70**
4	Zn/Pb	0.48**
5	Ni/As	-0.46
6	Cu/As	0.40*
7	Zn/As	0.38*
8	Pb/Ni	-0.27
9	Ni/Cu	0.08
10	Zn/Ni	-0.04

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Es posible notar que la relación entre Ni/Cu presenta un valor cercano a 0, con lo cual se asegura que la correlación entre estos elementos es casi nula. También es necesario destacar, el Pb presenta una correlación fuerte con un elemento que principalmente proviene de actividades antropogénicas como lo es el Cu y este último presenta una fuerte correlación con el Zn. Otro punto a destacar es lo que sucede con el Ni, este presenta escasas correlaciones con la mayoría de los ETM, a excepción del As que presenta una

correlación negativa. Esto permite inferir que este elemento es de origen geogénico o de fuentes totalmente diferentes a los demás ETM.

4.5.3.2. Correlación de Spearman entre ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.

Para la mejor comprensión de las relaciones que pueden existir entre los ETM y parámetros edáficos, se realizó el respectivo análisis de correlación de Spearman. Las medidas de correlación de este análisis, entre ETM y propiedades del suelo, son presentadas en la **Tabla 58**. Para poder ver de manera más simple y ordenada los coeficientes de correlación de Spearman, se procedió a ordenar estos valores de mayor a menor. En la **Tabla 59** y **Tabla 60**, se presentan los resultados de la jerarquización de los valores obtenidos.

Tabla 58. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.

	pH	CE	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
As	-0.01	-0.37*	0.29	0.44*	-0.32	0.23	0.43*
Cu	-0.42*	-0.32	0.36*	0.46**	-0.63**	0.54**	0.39*
Ni	0.16	0.08	-0.50**	-0.46*	0.44*	-0.43*	-0.42*
Pb	-0.25	-0.49**	0.16	0.27	-0.56**	0.31	0.59**
Zn	-0.46**	-0.34	0.58**	0.63**	-0.49**	0.67**	0.15

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Tabla 59. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.

Posición	Combinación	Coefficiente
1	Zn/Limo	0.67**
2	Zn/CIC	0.63**
3	Cu/Arena	-0.63
4	Pb/Arcilla	0.59**
5	Zn/MO	0.58**
6	Pb/Arena	-0.56
7	Cu/Limo	0.54**

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

Tabla 60. Jerarquía de las correlaciones entre ETM y parámetros de la Región del Bío Bío. (Continuación)

Posición	Combinación	Coefficiente
8	Ni/MO	-0.50
9	Pb/CE	-0.49
10	Zn/Arena	-0.49
11	Cu/CIC	0.46**
12	Zn/pH	-0.46
13	Ni/CIC	-0.46
14	As/CIC	0.44*
15	Ni/Arena	0.44*
16	As/Arcilla	0.43*
17	Ni/Limo	-0.43
18	Cu/pH	-0.42
19	Ni/Arcilla	-0.42
20	Cu/Arcilla	0.39*
21	As/CE	-0.37
22	Cu/MO	0.36*
23	Zn/CE	-0.34
24	As/Arena	-0.32
25	Cu/CE	-0.32
26	Pb/Limo	0.31
27	As/MO	0.29
28	Pb/CIC	0.27
29	Pb/pH	-0.25
30	As/Limo	0.23
31	Ni/pH	0.16
32	Pb/MO	0.16
33	Zn/Arcilla	0.15
34	Ni/CE	0.08
35	As/pH	-0.01

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

En las tablas anteriores, se puede apreciar que la correlación más alta se encuentra entre el elemento Zn y el parámetro limo, lo que mostraría una correlación muy fuerte entre estos. Existen correlaciones significativamente positivas entre el contenido As, Cu, Zn, y los

parámetros CIC, MO y porcentaje de limo. También es posible observar que las concentraciones de As, Cu, Pb y el contenido de arcilla muestran una correlación significativamente positiva. Todas estas correlaciones significativamente positivas entre ETM y parámetros, mencionadas anteriormente, pueden indicar que estos últimos tienen influencia sustancial en el contenido total de estos metales en los suelos. Por otro lado, se encontró una correlación relativamente débil o casi nula entre el elemento Zn y el porcentaje de arcilla, y además entre los elementos Ni, As, y el parámetro pH. La falta de una correlación significativa entre las propiedades del suelo y los metales pesados se puede atribuir a una entrada continua de metales pesados o la presencia de varias fuentes de contaminación (Chen et al., 2008), ya que la liberación y transporte de metales pesados corresponden a complejos procesos (Grant & Sheppard, 2008). Otra posible explicación es que puede haber variaciones en el tipo de suelo, el uso de fertilizantes y el sistema de cultivo dentro del área de muestreo (Grant & Sheppard, 2008).

4.5.3.3. Análisis de componentes principales de ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.

Al tener presente el análisis de componentes principales (ACP) permitió poder identificar posibles fuentes de contaminación de ETM en los suelos superficiales de la Región del Bío Bío. Los resultados de dicho análisis con rotación varimax, factores de carga y varianza explicada, son presentados en la **Tabla 61**.

En la **Tabla 61**, se puede apreciar que se extrajeron 4 componentes principales que explican el 87.4% de la varianza total de los datos, aplicando el criterio Kaiser para la selección del número de factores o componentes. Esto último se puede apreciar en la **Tabla 71** del Anexo II, en este se encuentra información adicional del ACP. En la **Figura 121**, se presenta una representación gráfica de los patrones de componentes de los ETM y parámetros en estudio para esta región.

La primera componente (CP1) explica un 48.7% de la varianza total. Donde los mayores coeficientes de carga son aportados por los parámetros MO, CIC y porcentaje de limo, con factores de carga iguales a 0.95, 0.92 y 0.78, respectivamente. Esta componente principal representa a propiedades del suelo.

Tabla 61. Factores de carga y porcentaje varianza explicada de ETM y parametros de la Región del Bío Bío

ETM y Parámetros	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	0.34	0.53	0.14	0.61
Cu	0.12	0.06	0.82	0.44
Ni	-0.66	-0.69	0.15	-0.01
Pb	0.19	0.61	0.39	0.59
Zn	0.50	0.14	0.66	0.42
pH	-0.15	-0.37	-0.78	0.23
CE	-0.13	-0.07	-0.07	-0.83
MO	0.95	-0.04	0.17	0.06
CIC	0.92	0.04	0.13	0.25
Arena	-0.47	-0.65	-0.45	-0.24
Limo	0.78	0.26	0.43	0.23
Arcilla	-0.21	0.88	0.26	0.13
Porcentaje Varianza Explicada (%)	52.8	15.6	10.0	9.0
Porcentaje Varianza Explicada Acumulada (%)	52.8	68.3	78.4	87.4

La segunda componente (CP2) explica un 15.3% de la varianza total. Este factor lo componen los elementos Ni, Pb, y los parámetros arena y arcilla, con factores de carga iguales a -0.69, 0.61, -0.65 y 0.88. El Ni posee un factor de carga negativo, el cual contrapone el peso de las demás variables y presenta relación inversa con los restantes elementos y parámetros del factor. Además este elemento posee un factor de carga importante en la primera componente y asimismo el plomo con la CP4, lo que evidenciaría que el Pb estaría recibiendo aportes de dos fuentes distintas. Están los elementos Ni y Pb, los cuales poseen un porcentaje relativamente significativo de muestras con niveles superiores a sus respectivos valores de fondo. Por lo anterior, todo esto parece evidenciar que tanto el material originario como la actividad antrópica influirían en la concentración alcanzada de estos metales en los suelos estudiados. Es importante mencionar lo que ocurre con el Ni, este presenta cargas negativas con casi todos los factores y esto permitiría inferir

que este elemento es de origen geogénico o antrópico pero de fuentes muy diferentes a los demás ETM.

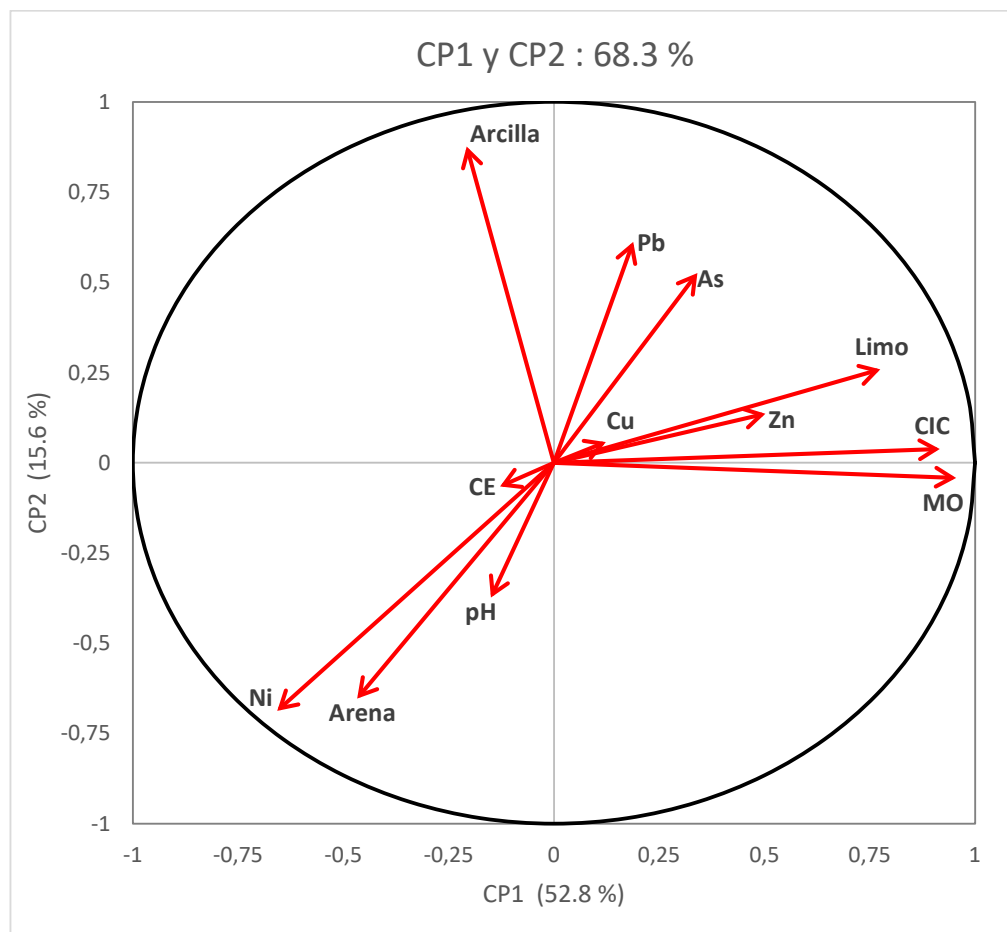


Figura 121. Patrones de componentes de ETM y parámetros en Región del Bío Bío.

La tercera componente (CP3) explica un 10.4% de la varianza total. Este factor lo componen los elementos Cu, Zn y el parámetro pH, con factores de carga iguales a 0.82, 0.66 y -0.78, respectivamente. Al analizar al elemento Cu, se puede observar que aproximadamente un 19% de las muestras superan al valor de fondo de esta región. Cabe agregar, este elemento además de poseer un porcentaje relativamente significativo de muestras con niveles superiores al valor de fondo, también posee la carga más alta de esta componente, comparada con las otras variables. Esta alta carga que posee este elemento, además de las muestras que posiblemente podrían estar contaminadas, da a entender el

origen antropogénico de esta componente. Además, considerando que el elemento Cu generalmente está más relacionado a procedencia de actividades humanas (Micó, 2005), asimismo la fuerte correlación que existe entre este con el Zn, todo esto sugiriendo un origen antropogénico de esta componente. Por lo anterior, este factor se podría asociar a un origen antropogénico, probablemente de fuentes diferentes a la CP2, debido a sus bajos factores de carga de sus elementos en componentes opuestas.

La cuarta componente (CP4) explica un 9.0% de la varianza total. Este factor lo componen el elemento As y el parámetro CE, con factores de carga iguales a 0.61 y -0.83, respectivamente. Al analizar al elemento As, se puede observar que aproximadamente un 6% de las muestras superan al valor de fondo de esta región. Agregando, la fuerte correlación existente entre este elemento y el Pb, y este último presenta una fuerte correlación con un elemento de origen antrópico como lo es el Cu. Por lo que la concentración alcanzada del As se vería influenciada tanto por el material originario como por la actividad antrópica. Antes cabe destacar que el arsénico tiene cargas considerables tanto en la CP2 como en CP4, por lo que esto indicaría que este elemento recibiría aportes de dos fuentes distintas. Todo lo anterior, es consistente con lo realizado en el análisis de correlación de Spearman.

4.5.3.4. Análisis Cluster de ETM y parámetros de la Región del Bío Bío.

En el análisis Cluster realizado a los datos de la Región del Bío Bío, fue posible clasificar e identificar probables fuentes de ETM (origen antrópico o natural). En la **Figura 122**, es presentado el dendograma de este análisis.

En la figura, es posible apreciar un grupo conformado por los parámetros porcentaje de arena, CE, pH, y el elemento Ni, estos tienen una nula asociación con todos los ETM restantes formando un grupo independiente del resto de las variables. Con respecto al Ni, este posee un porcentaje relativamente significativo de muestras con niveles superiores a su valor de fondo, con lo que se puede inferir que este procede de actividades humanas pero de fuentes totalmente diferentes a los demás ETM. Esto último es debido a que presenta correlaciones casi nulas y negativas con los demás elementos y a su vez presenta un factor de carga bajo en la componente de origen antrópico de otros ETM (PC1) del ACP.

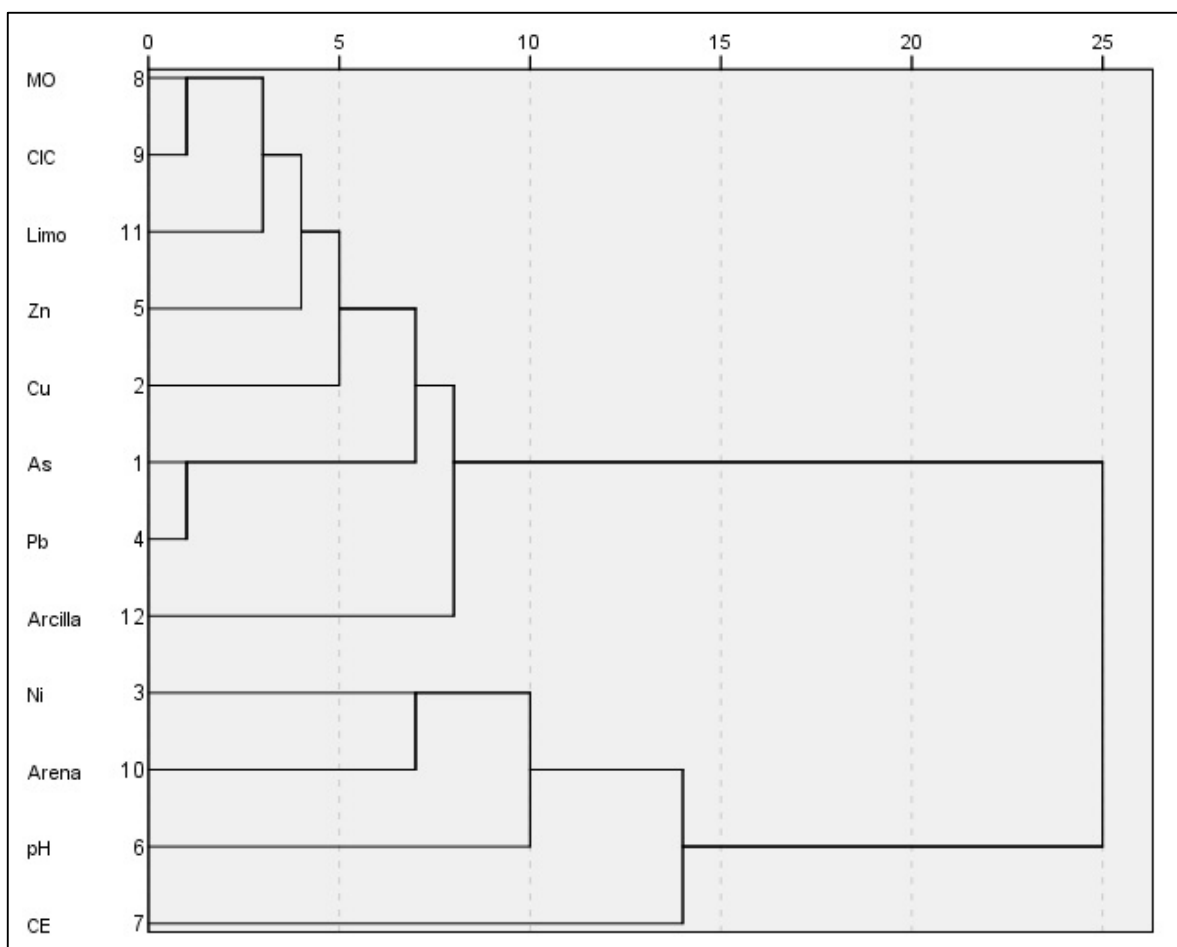


Figura 122. Dendrograma obtenido del análisis Cluster jerárquico para ETM y parámetros en muestras de suelo extraídas de la Región del Bío Bío.

El segundo grupo lo componen los elementos As, Cu, Pb y Zn. Este grupo corresponde a elementos que provienen de actividades antrópicas, debido a que presentan una cantidad relativamente significativa de muestras con concentraciones mayores a los valores de fondo. También es posible apreciar que existe una gran asociación entre los elementos As y Pb, pudiéndose inferir que estos provienen de una misma fuente. Lo anterior también es aplicable a la buena asociación que tienen los elementos Cu y Zn. Estos elementos están relacionados entre sí debido a su origen antropogénico, pero parece razonable que estos tienen varias fuentes o al menos una fuente en común.

4.5.4. Background Values de los ETM de la Región del Bío Bío.

Se tiene presente, para poder detectar valores atípicos o anormalmente grandes en el conjunto de datos se usaron diferentes metodologías establecidas en el capítulo anterior, entre los puntos 3.6 y 3.8. Dichos valores umbrales utilizados y conseguidos mediante los diferentes métodos anteriormente mencionados, son presentados en la **Tabla 62**. Igualmente, la proporción de muestras de la Región del Bío Bío que exceden dichos valores son entregadas en la **Tabla 63**.

Tabla 62. Valores umbrales obtenidos mediante diferentes métodos para la Región del Bío Bío.

Técnica Estadística	ETM (mgkg ⁻¹)					
	As	Cu	Ni	Pb	Zn	
Boxplot	13.2	102	40.4	18.5	128	
Método [Median+2 MAD]	10.1	57.9	23.1	14.2	94.2	
Método iterativo 2 σ -technique	10.4	70.2	25.6	16.3	106	
Target Value	26.1	31.7	31.3	77.8	124	
Intervention Value	49.5	167	188	485	636	
Concentración Máxima Permitida	pH > 5	10.0	75.0	30.0	50.0	175

En la **Tabla 62** y **Tabla 63**, se puede apreciar que el método [Median+2 MAD] presenta valores umbrales inferiores a los otros métodos utilizados para los elementos Ni, Pb y Zn. Por consiguiente, tal método presenta un mayor número de muestras consideradas como contaminadas debido a que exceden tal límite superior, tales proporciones de muestras estarían entre el 6.5 y 19.4%. Al momento de comparar todos los métodos o concentraciones propuestas, es posible observar que el método [Median+2 MAD] e Iterative 2 σ -technique son los que poseen los límites superiores con valores más bajos, a excepción del As y Cu.

Cabe destacar, el valor objetivo obtenido a partir de la fórmula de corrección del tipo de suelo de la guía holandesa presenta gran porcentaje de muestras contaminadas para el elemento Cu, con proporción de muestras contaminadas del 54.8% y valor umbral igual a 31.7 mgkg⁻¹. Asimismo, considerando el valor de intervención es posible observar que para ningún elemento se presentan muestras que exceden dicho valor.

Con respecto a los valores umbrales propuestos por el SAG, el límite superior para el As para muestras con pH mayor a 5, presentaría el valor más bajo con respecto a los demás métodos con umbral igual a 10.0 mgkg⁻¹. Estos valores permitirían establecer que un 6.5% de las muestras estarían contaminadas considerando el límite superior entregado en la Norma Chilena para esta macrozona (INN, 2004).

Tabla 63. Porcentajes (%) de muestras que sobrepasan los valores umbrales de los diferentes métodos para la Región del Bío Bío.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Boxplot	0	0	0	0	0
Método [Median+2 MAD]	6.5	19.4	19.4	16.1	6.5
Método iterative 2σ-technique	3.2	0	9.7	0	0
Target Value	0	54.8	3.2	0	0
Intervention Value	0	0	0	0	0
Concentración Máxima Permitida pH > 5	6.5	0	3.2	0	0

Los valores umbrales propuestos por el SAG son los más altos para el elemento Zn con respecto a los demás métodos. Por esto se tiene un menor porcentaje de muestras que superan el límite superior de dicho elemento, en el cual no se presentan muestras contaminadas considerando este umbral. Asimismo, los valores obtenidos mediante la técnica Boxplot y metodología holandesa, presentarían los umbrales más altos comparado con los demás métodos para los elementos Cu, Ni y As, Pb, respectivamente, en los cuales no presentarían muestras que sobrepasen a tales límites superiores.

4.5.5. Interpolación IDW de la Región del Bío Bío.

En los apartados siguientes, se presenta el análisis de los mapas de distribución de concentraciones de ETM, obtenidos mediante el método IDW para la Región del Bío Bío, donde ubicación de muestras es entregado en la **Figura 7**. Para esto, se utilizó el mapa de catastro frutícola del Ministerio de Agricultura de Chile⁶, para localizar agroindustrias cercanas a puntos con posible contaminación antrópica de ETM.

⁶<http://ide2.minagri.gob.cl/publico/>

4.5.4.1. Distribución del Arsénico.

En la **Figura 123**, se presenta la distribución espacial de As en las muestras extraídas de la Región del Bío Bío. En la figura se puede apreciar que existe una zona con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 11.1 mgkg^{-1} , lo cual puede ser un indicio de que en ese sitio se manipula este elemento. Los niveles de As tienden a aumentar hacia sitios puntuales en el centro del área en estudio, desde suelos con concentraciones mínimas de 0.56 mgkg^{-1} hasta concentraciones superiores de 11.1 mgkg^{-1} de arsénico. Por otro lado, los valores de fondo obtenidos mediante los métodos Median+2MAD e Iterative 2σ -technique (ver **Tabla 62**) se encontrarían dentro de la zona de color naranja oscuro, donde las concentraciones predichas están entre 9.8 y 11.1 mgkg^{-1} . Por lo tanto, gran parte de esta zona y la de color rojo, presentan niveles que son superiores a los valores de fondo anteriormente mencionados y esto daría a entender que estas reciben aportes de actividades antrópicas. Estos sitios cercanos a la localidad de Coihueco corresponden principalmente a zonas de frutales y cultivos anuales, además es importante mencionar que cerca de estos sitios no existe la presencia de actividades industriales que puedan afectarlos, con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido a prácticas agrícolas como el uso de fertilizantes fosfatados y abonos orgánicos (Hani & Pazira, 2011). Además, cabe mencionar que el sitio cercano a la costa puede estar siendo afectado por la presencia de 2 instalaciones industriales cercanas al lugar, estas son la Planta Vidrios Lirquén y la Planta 1 Penco de Fanaloza. Asimismo, el área de los sitios de color amarillo hacia las zonas verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 8.3 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por arsénico. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur y que fue citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), es de 10 mgkg^{-1} para suelos con pH mayor a 5. Para estos sitios es posible asegurar que las zonas con concentraciones mayores a 9.8 mgkg^{-1} (zonas de color naranja oscuro y rojo) tendrían niveles que sobrepasarían tal umbral. Considerando el Target Value del As igual a 26.1 mgkg^{-1} (ver **Tabla 62**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que todas las zonas del área en estudio, cumplirían con los estándares de Holanda.

Finalmente, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de As inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

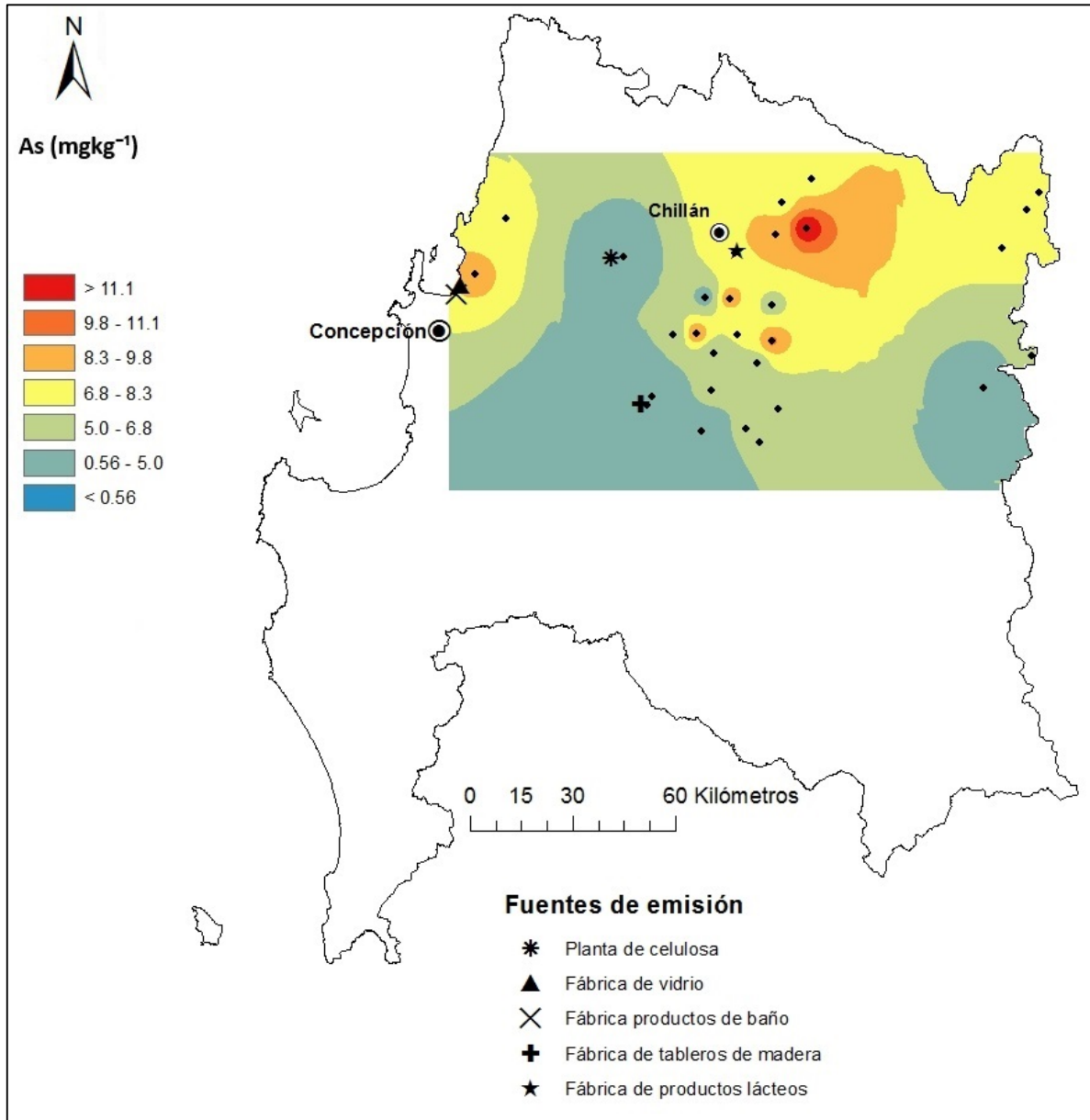


Figura 123. Distribución de contenidos de As en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.

4.5.4.2. Distribución del Cobre.

En la **Figura 124**, se presenta la distribución espacial de Cu en las muestras extraídas de la Región del Bío Bío. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con

concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 63.7 mgkg^{-1} . Además, es posible apreciar los extensos territorios que cubren las zonas de color amarillo y verde (equivalente a concentraciones entre 23.7 y 55.1 mgkg^{-1}), pudiéndose apreciar la existencia de 5 sitios con niveles superiores a los suelos que están a su alrededor, permitiendo inferir la posible influencia de actividades humanas en sus concentraciones. Para agregar, el valor de fondo obtenido mediante el método Median+2MAD (ver **Tabla 62**) estaría dentro de la zona con concentraciones entre 55.1 y 61.8 mgkg^{-1} (franja de color naranja), y por esto tal zona presentaría niveles superiores al valor de fondo anteriormente mencionado y por lo tanto, estarían recibiendo aportes de actividades antrópicas. Estos suelos corresponden principalmente a zonas de frutales y cultivos anuales, además es importante mencionar que cerca de estos sitios no existe la presencia de actividades industriales que puedan afectarlos, con lo cual se podría atribuir a que los niveles alcanzados son debido a la utilización de productos agroquímicos que contienen Cu en forma de impurezas, como los fertilizantes fosfatados (Kabata-Pendias & Pendias, 2011); a la posible aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003). Por otro lado, el área de la franja amarilla hacia las zonas de color verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 55.1 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por cobre. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), corresponde a 75 mgkg^{-1} para pH mayor a 5. Para estos suelos se puede determinar que este umbral no estaría dentro de ninguna zona y por esto todas las zonas tendrían niveles inferiores a dicho umbral. Considerando el Target Value del Cu igual a 31.7 mgkg^{-1} (ver **Tabla 62**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos de las zonas amarilla y naranja (equivalente a concentraciones entre 32.5 y 61.8 mgkg^{-1}), no cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de Cu inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

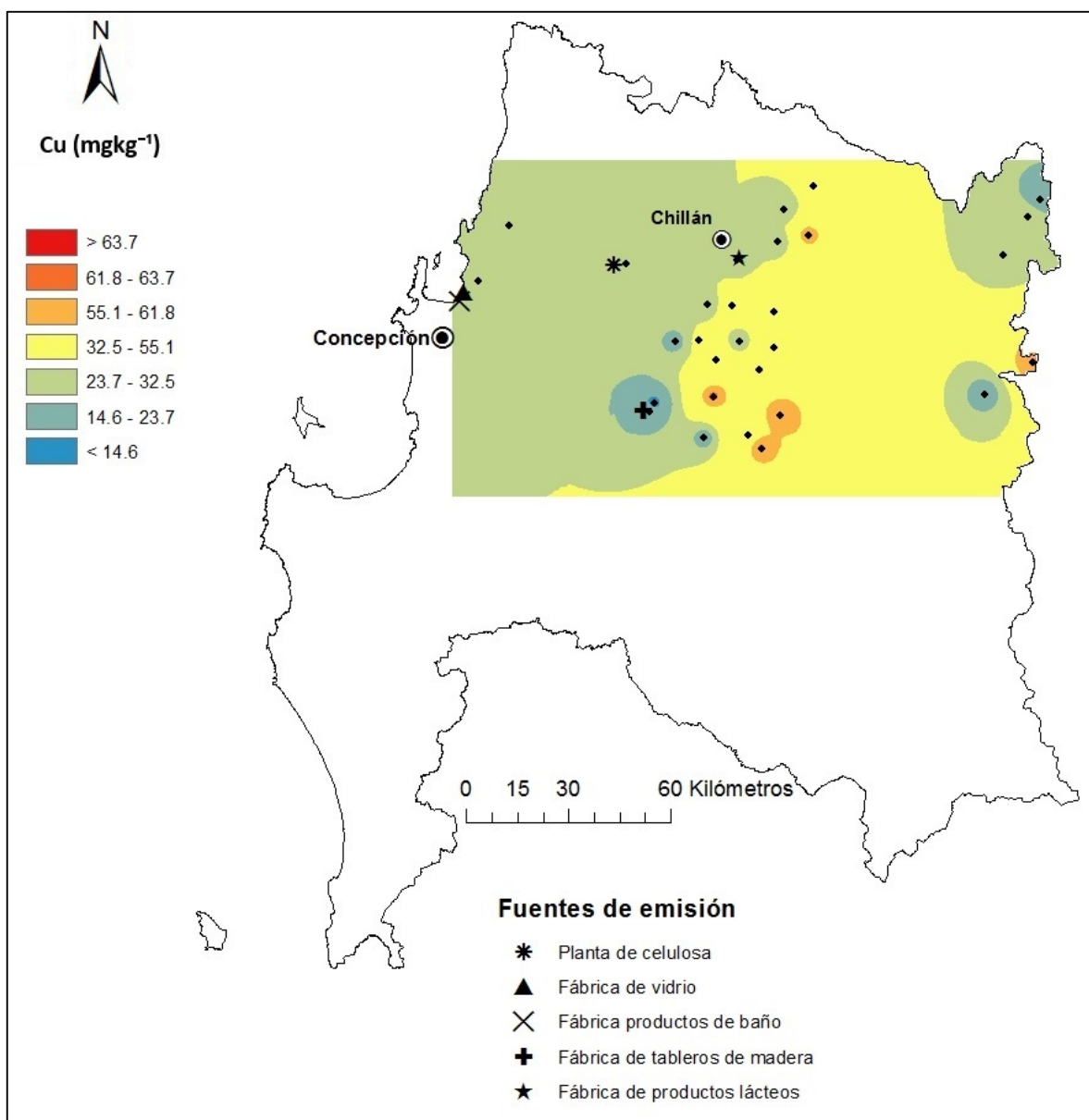


Figura 124. Distribución de contenidos de Cu en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.

4.5.4.3. Distribución del Níquel.

En la **Figura 125**, se presenta la distribución espacial de Ni en las muestras extraídas de la Región del Bío Bío. En la figura se puede apreciar que existe un sitio con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 33.0 mgkg⁻¹, lo cual puede ser un indicio de que en ese sitio se manipula este elemento. Además, es posible apreciar el extenso territorio que cubre la zona de color amarillo (concentraciones entre 11.6 y 20.8 mgkg⁻¹), pudiéndose

observar la existencia de 3 sitios con niveles superiores a los suelos que están a su alrededor, permitiendo inferir la posible influencia de actividades humanas en sus concentraciones.

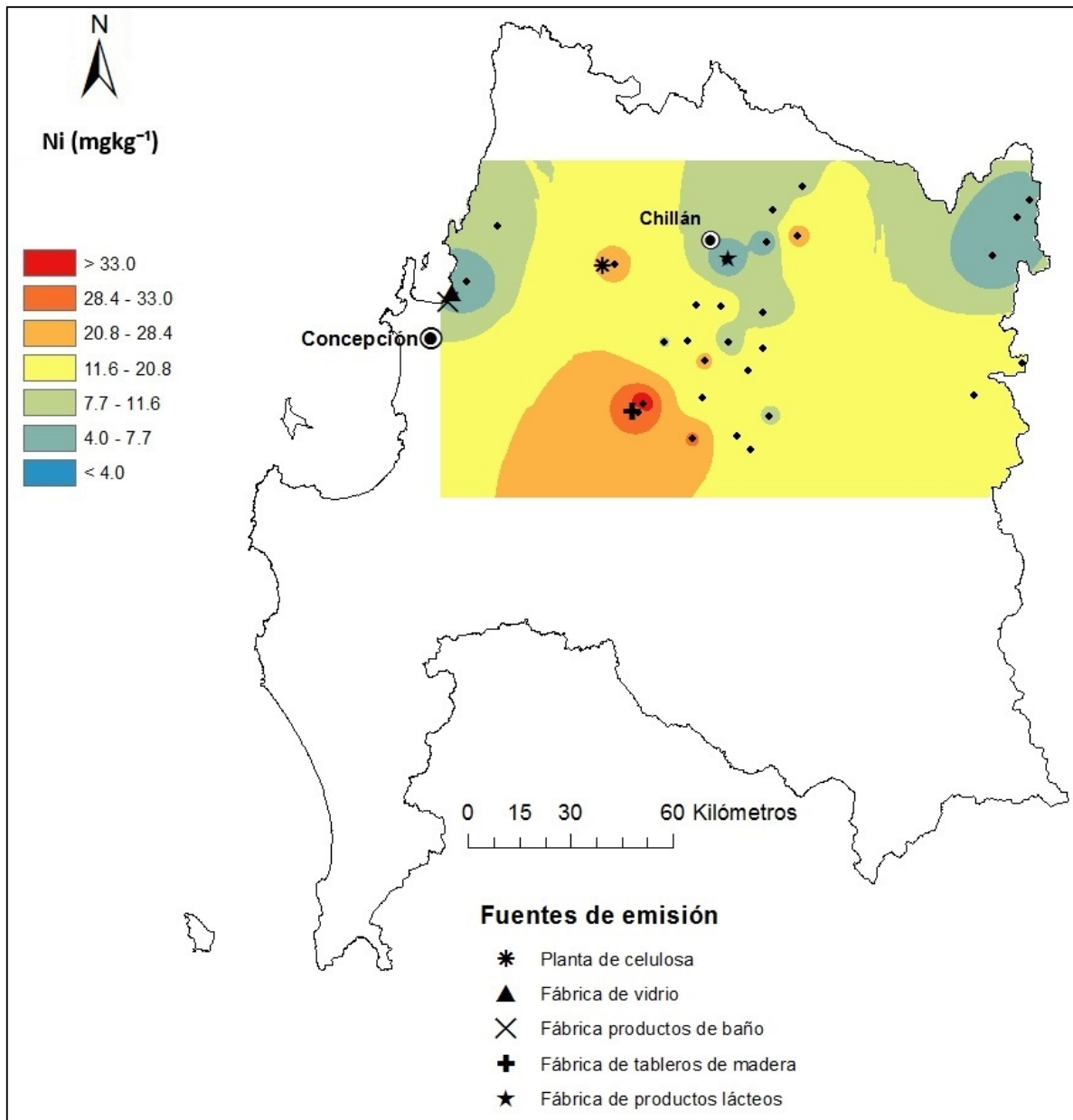


Figura 125. Distribución de contenidos de Ni en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.

Para agregar, los valores de fondo obtenidos mediante los métodos Median+2MAD e Iterative 2 σ -technique (ver **Tabla 62**), estarían dentro de la zona con concentraciones entre

20.8 y 28.4 mgkg⁻¹ (franja de color naranja), y por esto parte de esta zona y de niveles superiores (concentraciones superiores a 28.4 mgkg⁻¹), presentarían contenidos superiores a los valores de fondo anteriormente mencionados y por esto, estarían recibiendo aportes de actividades antrópicas. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales y cultivos anuales, por lo que se podría atribuir a estas actividades los niveles alcanzados debido a la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003). Además, en los sitios al oeste de Chillán existe la presencia de dos plantas industriales, una corresponde a la planta Nueva Aldea de Celulosa Arauco y la otra, más al sur, a planta Cabrero de Masisa, ambas podrían estar afectando a los suelos cercanos a ellas mediante aportes de este elemento. Asimismo, ambos sitios también se encuentran muy cercanos a carreteras muy transitadas, como lo son la Autopista del Itata y la Ruta 5 Sur, por lo que estos suelos pudieron haber recibido incrementos a sus contenidos debido a la combustión de bencina (Romic & Romic, 2003). Por otro lado, se puede asegurar que el área comprendida entre la zona amarilla y los sitios de color verde oscuro (niveles inferiores a 20.8 mgkg⁻¹), correspondería a suelos que están libres de contaminación por níquel. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur y citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), corresponde a 30.0 mgkg⁻¹. En la figura se puede apreciar que los suelos en las zonas de color rojo y parte de la zona naranja oscuro (equivalente a concentraciones mayores a 28.4 mgkg⁻¹), tendrían niveles que sobrepasarían tal umbral. Considerando el Target Value del Ni igual a 31.3 mgkg⁻¹ (ver **Tabla 62**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos de la zona de color rojo y parte de la zona naranja oscuro, no cumplirían con los estándares holandeses. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de Ni inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.5.4.4. Distribución del Plomo.

En la **Figura 126**, se presenta la distribución espacial de Pb en las muestras extraídas de la Región del Bío Bío. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 15.4 mgkg⁻¹. Además, es posible apreciar la existencia de 4 sitios con niveles superiores a los suelos que están a su

alrededor, permitiendo inferir la posible influencia de actividades humanas en sus concentraciones.

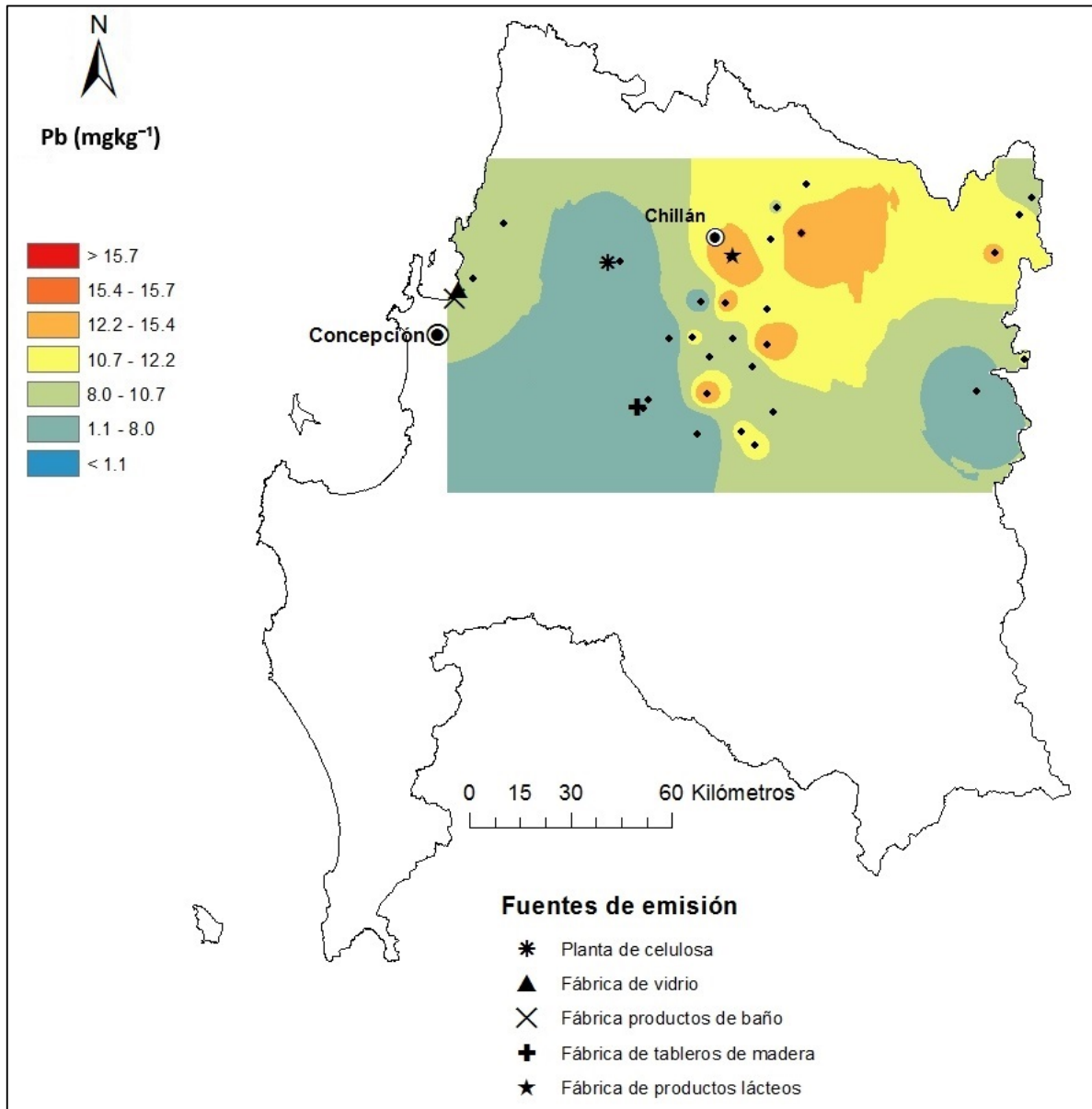


Figura 126. Distribución de contenidos de Pb en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.

Para agregar, el valor de fondo obtenido mediante el método Median+2MAD (ver **Tabla 62**), estaría dentro de la zona con concentraciones entre 12.2 y 15.4 mgkg⁻¹ (franja de color naranja) y por esto, parte de esta zona presentaría niveles superiores al valor de fondo

anteriormente mencionado. Por lo anterior, estos sitios estarían recibiendo aportes de actividades antrópicas, por lo que no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales y cultivos anuales, con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido al uso de productos agroquímicos que contienen trazas de Pb (Alloway & Ayres, 1993). Además, Con respecto a la zona cercana a Chillán, en ella existe la presencia de la Planta Ganadera Golfo de Arauco, la cual podría estar realizando aportes de este elemento a estos y posiblemente debido a la presencia de este elemento en sus RILes (residuos industriales líquidos). Por otro lado, se puede asegurar que el área comprendida entre la franja amarilla y las zonas de color verde oscuro (equivalente a niveles inferiores a 12.2 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por plomo. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur y citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), corresponde a 50 mgkg^{-1} para pH mayor a 5. Por conocimiento del pH de las muestras, es posible asegurar que todas las zonas tendrían niveles inferiores a dicho umbral. Considerando el Target Value del Pb igual a 77.8 mgkg^{-1} (ver **Tabla 62**) obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que los suelos de todas las zonas del área en estudio cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de Pb inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.5.4.5. Distribución del Zinc.

En la **Figura 127**, se presenta la distribución espacial de Zn en las muestras extraídas de la Región del Bío Bío. En la figura se puede apreciar que no existen zonas con concentraciones estimadas críticas, niveles mayores a 104 mgkg^{-1} . Además, es posible apreciar la existencia de 2 zonas con niveles superiores a los suelos que están a su alrededor, permitiendo inferir la posible influencia de actividades humanas en sus concentraciones. Para agregar, el valor de fondo obtenido mediante el método Median+2MAD (ver **Tabla 62**), estaría dentro de la zona con concentraciones entre 94.0 y 104 mgkg^{-1} (franja de color naranja oscuro), y por esto tal zona presentaría niveles superiores al valor de fondo anteriormente mencionado. Por lo anterior, estos sitios estarían

recibiendo aportes de actividades antrópicas y por ende, no se encontrarían con toda su capacidad funcional debido a contaminación. Estos sitios corresponden principalmente a zonas de frutales y cultivos anuales, con lo cual se podría atribuir a que estos niveles son alcanzados debido a la práctica agrícola (Kabata-Pendias & Pendias, 2011) y la aplicación frecuente de plaguicidas (Nicholson et al., 2003).

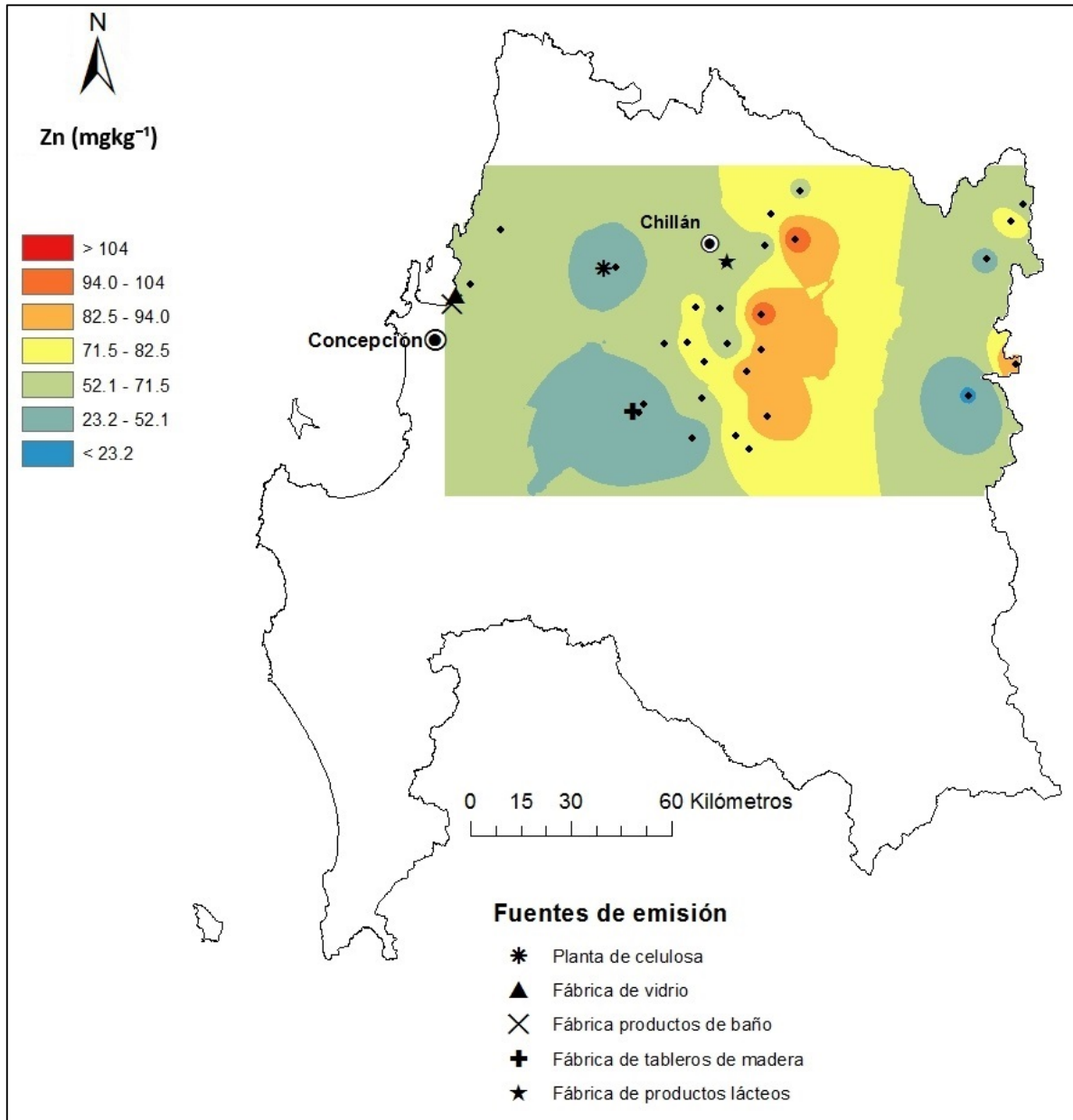


Figura 127. Distribución de contenidos de Zn en suelos recolectados de la Región del Bío Bío.

Por otro lado, el área de las zonas amarilla hacia las zonas de color azul (equivalente a niveles inferiores a 82.5 mgkg^{-1}), correspondería a suelos que están libres de contaminación por zinc. Cabe recordar que la concentración máxima permitida para la macrozona sur y la cual es citada por el SAG para suelos agrícolas (SAG, 2005), corresponde a 175 mgkg^{-1} . De la figura es posible inferir que todos los suelos del área en estudio tendrían niveles inferiores a tal umbral. Considerando el Target Value del Zn igual a 124 mgkg^{-1} (ver **Tabla 62**), obtenido mediante la metodología holandesa, se tiene que todos los suelos del área en estudio cumplirían con los estándares de Holanda. Asimismo, los suelos de todas las zonas presentaron niveles de Zn inferiores a los valores de intervención obtenidos mediante la metodología de los Países Bajos.

4.5.6. Evaluación del riesgo potencial ecológico de los ETM de la Región del Bío Bío.

A continuación se presenta la evaluación de riesgo ecológico de la Región del Bío Bío, todo esto a través de los diferentes factores utilizados para cada ETM o muestra, según corresponda (ver metodología del punto 3.11.). Con respecto a estos factores de evaluación, los valores de fondo de todos los ETM corresponden a los obtenidos mediante el método *Median + 2 MAD* y estos son As (10.1 mgkg^{-1}), Cu (57.9 mgkg^{-1}), Ni (23.1 mgkg^{-1}), Pb (14.2 mgkg^{-1}) y Zn (94.2 mgkg^{-1}).

4.5.6.1. Índice de Geoacumulación (I_{geo}).

Los resultados de los valores obtenidos del índice de geoacumulación para cada ETM son presentados en la **Figura 128**.

En esta figura es posible apreciar que el elemento Ni presenta suelos no contaminados hasta la categoría sin contaminación a moderadamente contaminado, valores de I_{geo} entre -3.3 a 0.1. Además, la mayoría los suelos de esta región, 97% de las muestras, presentan nula contaminación con respecto al níquel (valores de I_{geo} menor a 0). Asimismo, un 3% de las muestras estarían dentro de la categoría nula a moderada contaminación por este elemento ($0 < I_{geo} \leq 1$). Con respecto al resto de elementos (As, Cu, Pb y Zn), todas las muestras de suelo están dentro de la categoría sin contaminación, valores menores 0.

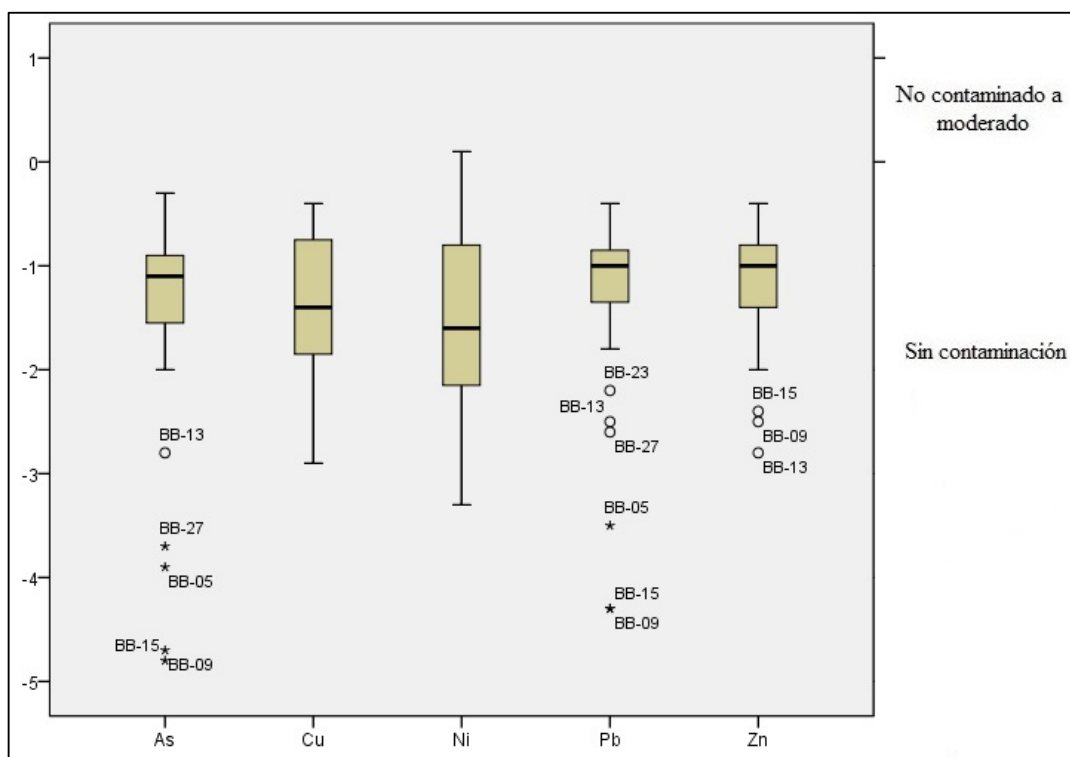


Figura 128. Índice de geoacumulación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Bío Bío.

4.5.6.2. Factor de Contaminación (C_f), Grado de Contaminación (C_{deg}) e Índice Integrado de Polución (IPI).

Los resultados de los valores obtenidos del factor de contaminación para cada ETM son presentados en la **Figura 129** y **Figura 130**, además en la **Tabla 64** se entregan algunos parámetros estadísticos de cada elemento para contribuir a la interpretación de los resultados.

Tabla 64. Factor de contaminación de ETM de los suelos de la Región del Bío Bío.

Metales	Mínimo	Máximo	Media	SD ^a	Mediana
As	0.05	1.2	0.63	0.29	0.68
Cu	0.21	1.1	0.64	0.29	0.56
Ni	0.15	1.6	0.62	0.38	0.50
Pb	0.08	1.1	0.69	0.30	0.75
Zn	0.22	1.1	0.72	0.24	0.76

^a Desviación Estándar

En la figura es posible apreciar que el elemento cobre y níquel presentan porcentajes de suelos que están dentro de la categoría contaminación moderada (19% del total) por este elemento. A pesar de esto, la mayoría de las muestras de suelo (81% de los sitios) están dentro de la categoría baja contaminación con respecto a estos elementos, con valores menores a 1. Con respecto al resto de ETM (As, Pb y Zn), gran parte de las muestras de suelo tienen baja contaminación por estos elementos, sobre el 84% de los sitios, y un porcentaje no despreciable de estas están dentro de la categoría contaminación moderada ($1 \leq C_f < 3$). Finalmente, de la tabla se puede inferir que los suelos de esta región tienen contaminación baja con respecto a todos los elementos en estudio.

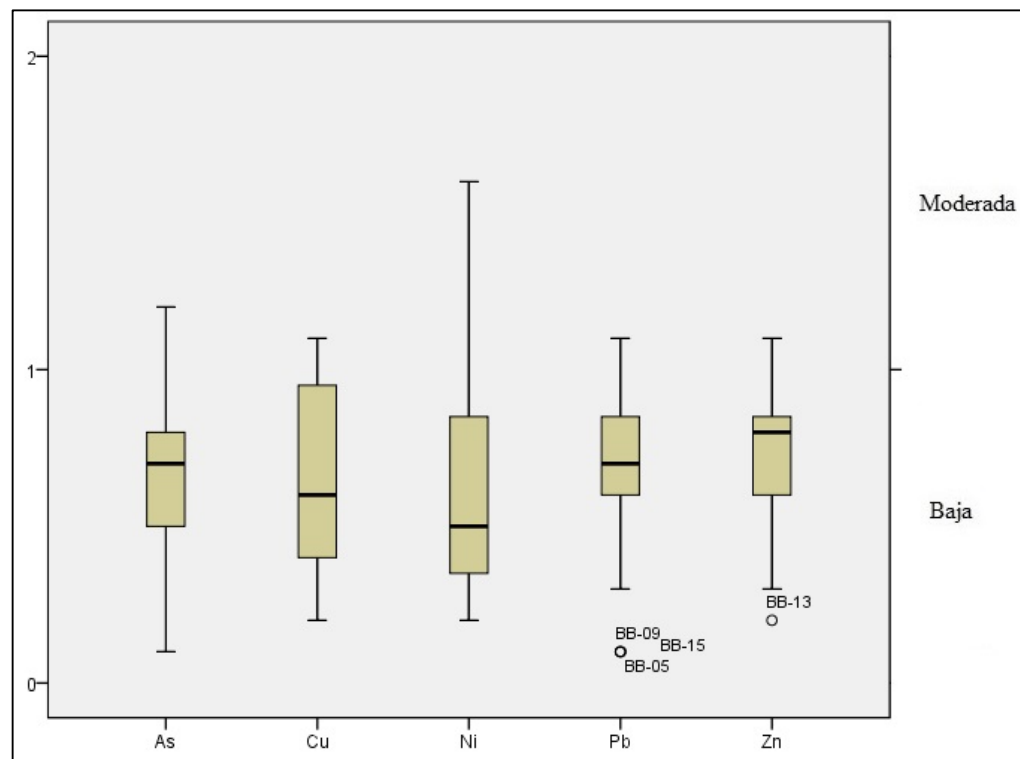


Figura 129. Factor de contaminación de ETM de las muestras extraídas de la Región del Bío Bío.

En la **Figura 131**, se presenta la distribución espacial de los grados de contaminación de las muestras recolectadas en la Región del Bío Bío. Pero antes es necesario establecer la clasificación de estos valores, para esto fueron reclasificados según Håkanson (1980) y de acuerdo al número de ETM (5 elementos) que se utilizaron para esta región (Albanese et

al., 2013), ver página 45. En la figura se puede apreciar que existe un porcentaje muy alto de muestras, aproximadamente un 97%, que están dentro de la categoría bajo grado de contaminación (valores de C_{deg} menores a 5). Por lo tanto, en el sitio de la muestra restante (3% del total de muestras) presentaría moderado grado de contaminación con respecto a los ETM en estudio. Este sitio está ubicado en la zona norte de la región, cerca de Chillán, y todo indica que está moderadamente afectado por actividades agrícolas y por esto, tendría contaminación moderada por todos los elementos anteriormente mencionados.

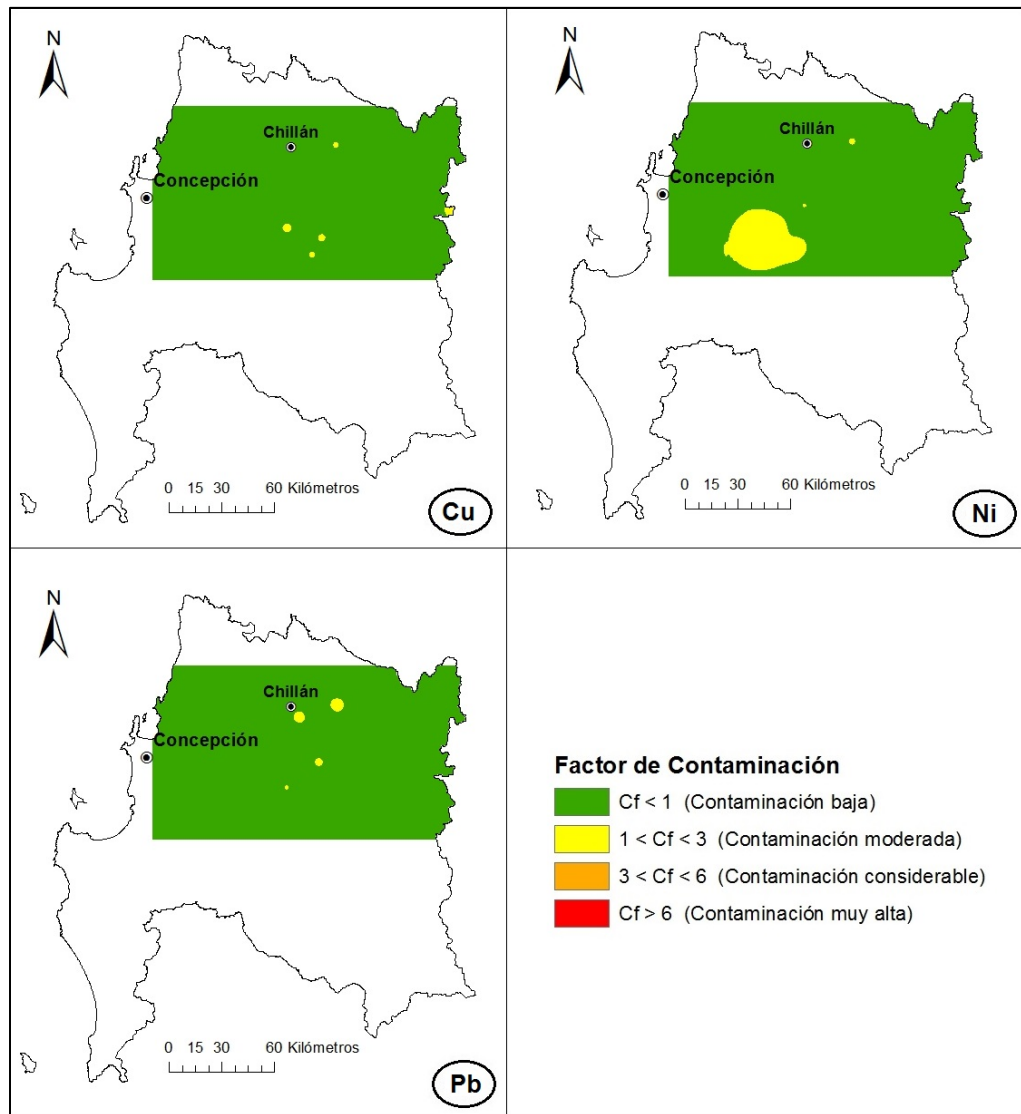


Figura 130. Distribución espacial de los factores de contaminación (C_f) de los elementos Cu, Ni y Pb de la Región del Bío Bío.

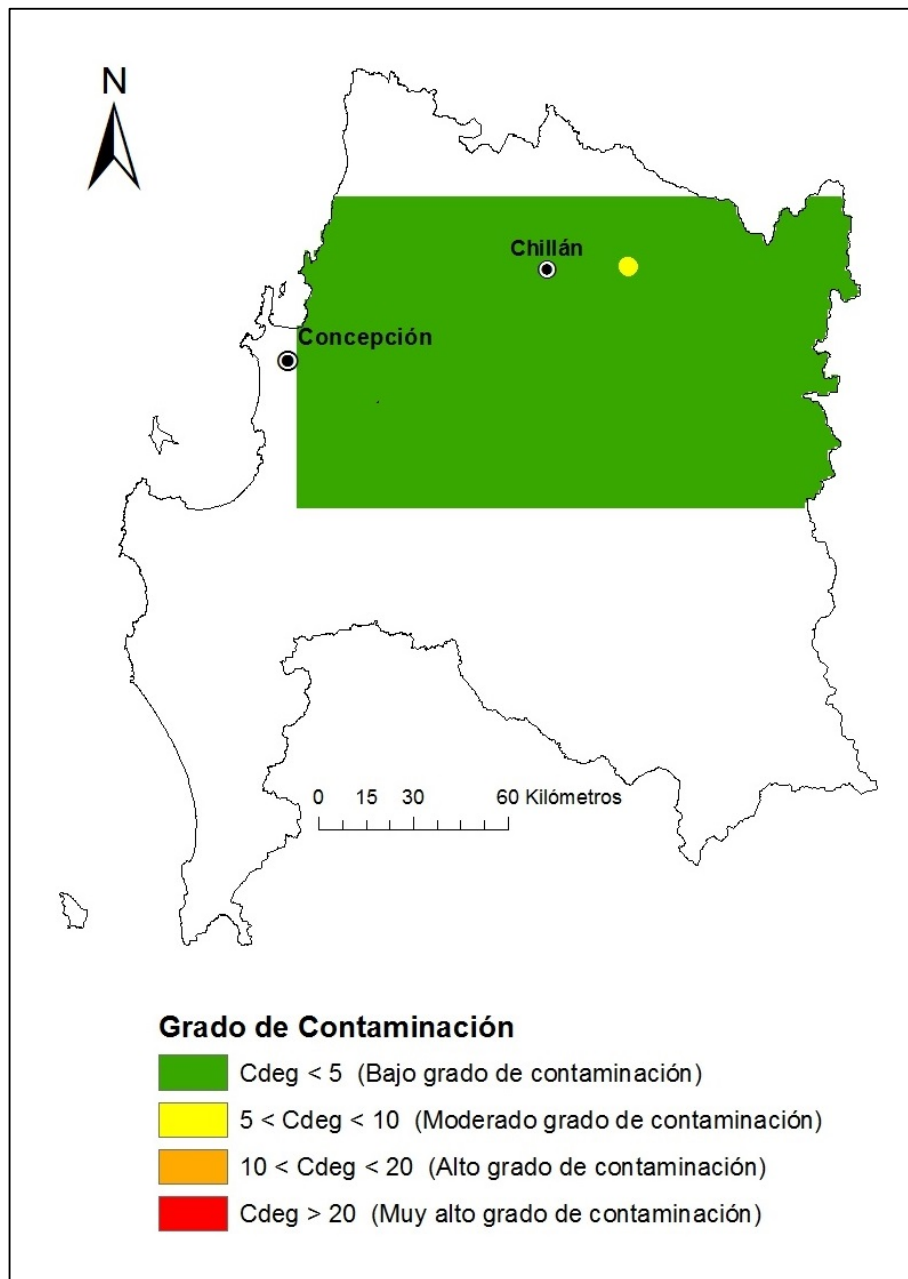


Figura 131. Distribución espacial de los grados de contaminación (C_{deg}) de la Región del Bío Bío.

Finalmente, el índice integrado de polución es presentado mediante la **Figura 132**. En la distribución espacial presentada en la figura se puede observar que existe un alto porcentaje de muestras, 97% del total, con nivel bajo de contaminación ($IPI \leq 1$). Asimismo, existe un 3% de las muestras que tuvieron un nivel moderado de contaminación. Esto indica que

este sitio está moderadamente afectado por actividades agrícolas y por ende, tendría un nivel moderado de contaminación por todos los ETM en estudio.

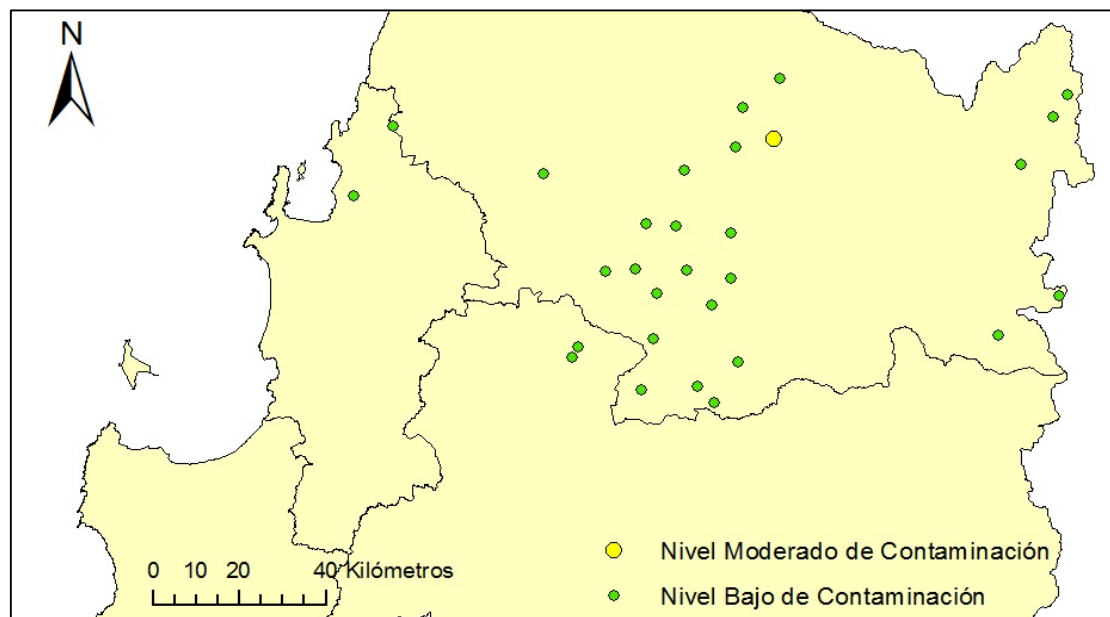


Figura 132. Ubicación geográfica de los índices integrados de contaminación (*IPI*) de la Región del Bío Bío.

4.6. Comparación con datos publicados de suelos agrícolas.

En la **Tabla 65**, se presentan las concentraciones promedio de suelos agrícolas de diferentes trabajos, tanto de suelos chilenos como de otros lugares del mundo, incluyendo los contenidos de ETM de este estudio. En la tabla se puede apreciar que en la literatura registrada no hay muchos estudios del elemento As, a pesar de esto se puede observar que los suelos de las 3 primeras regiones del presente estudio (Región de Valparaíso, Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins) poseen concentraciones promedio de arsénico mayores que los contenidos de este mismo elemento pero en los suelos de Alemania y en la zona de Huanghuai Plain en China. Asimismo, los niveles de As de las muestras de suelo del presente estudio son inferiores a los obtenidos en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en Ahumada et al. (2004). Por otro lado, los suelos de la Región del Bío Bío presentaron la menor concentración promedio de arsénico (6.4 mgkg^{-1}) de entre todos lugares, muy parecido a lo obtenido en Alemania en

Manz et al. (1999) y el mayor contenido de este elemento se presentó en la Carretera del Cobre obtenido en Ahumada et al. (2004).

Tabla 65. Comparación concentraciones promedio (mgkg^{-1}) de suelos agrícolas de diferentes ciudades de Chile y del mundo.

País / Región	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Se	Zn	Referencia
China / Xuzhou	--	--	--	--	--	0.57	--	Shunsheng et al., 2009
España / Alicante	--	0.38	21.6	23.7	19.6	--	57.8	Micó et al., 2006
Croacia / Zagreb	--	0.66	20.8	49.5	25.9	--	77.9	Romic and Romic, 2003
Alemania / Leipzig-Halle-Bitterfeld	6.9	--	27.9	20.9	40.0	--	75.0	Manz et al., 1999
Italia / Piamonte	--	--	58.3	83.2	16.1	--	62.7	Facchinelli et al., 2001
China / Huanghuai Plain	11.8	0.17	--	35.3	25.3	--	73.8	Zhou et al., 2013
China / Pearl River Delta	--	0.58	33.0	21.2	40.0	--	84.7	Wong et al., 2002
Chile / Valle Aconcagua	--	0.30	128	--	56.0	--	29.0	INIA, 1990
Chile / Valle Puchuncaví	--	0.91	543	--	53.0	--	95.0	INIA, 1990
Chile / Valle Maipo	--	0.45	72.0	--	24.0	--	107	INIA, 1990
Chile / Valle Cachapoal	--	< 5.0	427	--	26.0	--	136	INIA, 1990
Chile / Valle Limarí	--	< 2.5	65.0	--	33.0	--	92.0	INIA, 1990
Chile / VI Región	--	0.32	450	--	48.0	--	145	Badilla-Ohlbaum et al., 2001
Chile / Carretera del Cobre	71.3	--	175	--	34.5	--	--	Ahumada et al., 2004
Chile / Carretera Panamericana	36.5	--	290	--	36.3	--	--	Ahumada et al., 2004
Chile / Graneros	38.8	--	757	--	31.3	--	--	Ahumada et al., 2004
Chile / V Región	19.3	0.40	200	8.7	23.5	--	143	Estudio actual
Chile / RM	20.3	--	85.3	10.8	15.1	0.62	95.6	Estudio actual
Chile / VI Región	21.1	--	176	9.1	15.1	--	92.9	Estudio actual
Chile / VII Región	7.7	--	31.5	8.6	9.9	--	64.4	Estudio actual
Chile / VIII Región	6.4	--	37.2	14.4	9.8	--	67.7	Estudio actual

-- No disponible

Con respecto al cadmio, en la Región de Valparaíso, este nivel es muy parecido al de los suelos de Alicante en España pero ambos teniendo valores intermedios comparados con los demás lugares, ya que las mayores concentraciones se dieron en el Valle de Puchuncaví, Chile (0.91 mgkg^{-1}). Por otro lado, el menor nivel de Cd ocurrió en la zona de Huanghuai Plain en China.

Analizando el elemento cobre es posible apreciar que las mayores concentraciones se dan en Chile comparando con los demás lugares del mundo, específicamente en la comuna de Graneros (Ahumada et al., 2004), con un valor de 757 mgkg^{-1} y luego le sigue el Valle de Puchuncaví (INIA, 1990) con 543 mgkg^{-1} de Cu, ambos pertenecientes a las Regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y de Valparaíso, respectivamente. Esto último coincide con los valores, también altos, de las mismas regiones pero del presente estudio (176 y 200 mgkg^{-1} , respectivamente), con lo cual es posible inferir el pasado minero de las regiones anteriormente mencionadas, concordando con los análisis precedentes. Las regiones del Maule y del Bío Bío presentaron concentraciones relativamente bajas, solo superando levemente a los valores obtenidos en Zagreb (Croacia), Alicante (España) y zonas Leipzig-Halle-Bitterfeld (Alemania), de los trabajos realizados en Romic y Romic (2003), Micó et al. (2006) y Manz et al. (1999), respectivamente.

Prosiguiendo con el níquel, en los suelos agrícolas de la zona central de Chile del presente estudio se obtuvieron las concentraciones más bajas de este elemento comparado con los restantes lugares del mundo, en especial en las regiones de Valparaíso y del Maule (8.7 y 8.6 mgkg^{-1} , respectivamente). El mayor valor se observó en Piamonte, Italia 83.2 mgkg^{-1} y el mayor valor en Chile ocurre en la Región del Bío Bío (14.4 mgkg^{-1}).

Las mayores concentraciones de Pb se encuentran en los valles del Puchuncaví y del Aconcagua obtenidos del INIA, 1990 (53.0 y 56.0 mgkg^{-1} , respectivamente). En cambio, los suelos agrícolas de todas las regiones del presente estudio presentaron los niveles promedio de plomo más bajos entre todos los lugares del mundo, agregando a estos los valores medidos en Piamonte de Italia. Sobre esto, la Región del Maule y del Bío Bío presentaron las concentraciones más bajas comparando con los restantes trabajos. Valores

altos también se encontraron en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en Badilla-Ohlbaum et al. (2001), con contenido de Pb igual a 48.0 mgkg^{-1} .

Con respecto al selenio es importante mencionar que no existen los registros suficientes de estudio de este elemento en suelos agrícolas. A pesar de esto, comparando con el estudio realizado a suelos de Xuzhou en China (Shunsheng et al., 2009), es posible ver la cercanía entre ambos valores promedio pero siendo mayor la concentración de Se obtenida en la Región Metropolitana de Santiago del presente estudio.

Por último, considerando el elemento zinc, de la tabla es posible observar que la mayor concentración de este elemento se presentó en la Región de Valparaíso del presente estudio y en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en el trabajo de Badilla-Ohlbaum et al. (2001), con valor igual a 143 y 145 mgkg^{-1} . El menor valor (29.0 mgkg^{-1}) se encontró en el Valle del Aconcagua del trabajo INIA (1990). Con respecto al presente estudio, la Región Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins presentaron contenidos de Zn mayores que los obtenidos en estudios de otros países, pero de valores cercanos a los medidos en el Valle de Puchuncaví y del Limarí (INIA, 1990). En cambio, en la Región del Maule y del Bío Bío se obtuvieron concentraciones promedio cercanas a los conseguidos en los estudios realizados en Piamonte (Italia) y Huanghuai Plain (China), niveles entre 62.7 y 73.8 mgkg^{-1} .

CAPITULO V. CONCLUSIÓN

5.1. Conclusión

El presente trabajo tuvo como objetivo, la distribución de los elementos As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se y Zn, según corresponda, y la evaluación de contaminación de estos mismos para suelos agrícolas de la zona central de Chile, entre la Región de Valparaíso y la Región del Bío Bío. Para lo cual se efectuó una caracterización de los datos, identificación de muestras contaminadas por ETM, su distribución espacial y posteriormente se realizó una evaluación de riesgo potencial de contaminación de suelos por tales elementos.

De todos los análisis realizados a la Región de Valparaíso, es posible concluir que, el 82% de las muestras de estos suelos presentan bajo grado de contaminación por los 6 ETM en estudio. Por el contrario, existen zonas donde el grado de contaminación es moderado o alto por tales elementos, especialmente por cobre. Estos sitios se ubican en zonas cercanas a las comunas de Catemu y Rinconada, en donde las posibles fuentes de contaminación son la Planta Catemu de extracción de cobre de la Minera Amalia (Comuna Catemu), y la cercanía de agroindustrias frutícolas o el riego con aguas en que posiblemente se le podría estar en algún grado descargando material de desechos mineros del cobre (aguas arriba de estas por División Andina de Codelco), tales corresponden a las aguas del Estero Pocuro (Comuna Rinconada).

En los suelos de la Región Metropolitana de Santiago, un 92% de las muestras presentaron bajo grado de contaminación por ETM. Un bajo porcentaje de suelos contienen moderado o muy alto grado de contaminación por cobre y selenio. Estos sitios corresponden a suelos ubicados en las localidades de El Monte y Naltagua, ambas de la comuna de Talagante. En la primera localidad existe un nivel extremadamente alto de contaminación por selenio (superando en 31 veces el valor de fondo de Se), lo cual se relaciona con los aportes antrópicos de fuentes cercanas. Las posibles fuentes de contaminación son las diversas agroindustrias cercanas a la zona, desde criaderos de animales (cerdos y aves), agroindustria vitivinícola y frutícolas. Con respecto a la localidad de Naltagua, esta zona presenta niveles de contaminación alta por cobre, esto posiblemente ocasionado por la

cercanía a una antigua mina de cobre que operaba en el siglo XX (Donoso D., 2015), la cual es una posible fuente de contaminación por cobre del lugar.

En la Región de Libertador General Bernardo O'Higgins es posible concluir que existe un 38% de muestras con moderado o alto grado de contaminación por los 5 ETM en estudio, especialmente en las zonas cercanas a la ciudad de Rancagua. De igual forma, también es posible establecer que el 24% de las muestras presentan índices de contaminación importantes por cobre. Estos en su mayoría corresponden a sitios que se encuentran cercanos a una gran cantidad de agroindustrias frutícolas, lo que tal situación estaría afectando a los suelos anteriormente mencionados. A estos, se sumarían los aportes que estaría entregando la actividad metalúrgica del cobre de esta zona, en especial la Fundición Caletones y División El Teniente de Codelco. En consecuencia, los suelos de la Cuenca de Rancagua están siendo afectados tanto por actividades de agricultura intensiva como por actividades mineras del cobre.

En lo que concierne a lo realizado a la Región del Maule, es posible concluir que aproximadamente un 91% de las muestras se encuentran con bajo grado de contaminación por ETM. Se han encontrado grados de contaminación moderado, especialmente por cobre, níquel y plomo. Los sitios con niveles relativamente importantes de contaminación se ubican en las zonas cercanas a la comuna de Curicó, en donde se identifican principalmente zonas de frutales y cultivos anuales, con un importante aporte antrópico relacionado a prácticas agrícolas en los suelos (uso de fertilizantes, agroquímicos, etc.).

Por último, la Región del Bío Bío, presenta similitudes a la región anterior, con un alto porcentaje de muestras (97%) con niveles bajos de contaminación. En zonas cercanas a la localidad de Coihueco, solo fueron encontrados niveles moderados de contaminación por ETM, y que corresponden principalmente a suelos destinados a cultivos anuales y frutales. Por tanto, los aportes antrópicos que están recibiendo estos suelos provienen principalmente de las actividades agrícolas que se realizan en esta zona. Cabe mencionar, la existencia de 2 sitios con niveles moderados de contaminación por Ni, en comparación a zonas próximas a estos, los que se estarían viendo afectados por actividades industriales cercanas (planta Cabrero de Masisa y Nueva Aldea de Celulosa Arauco).

Definitivamente se determinó que gran parte de los suelos agrícolas de la zona central presentan un bajo o escaso grado de contaminación por ETM, en donde en general se ven levemente afectados por lo que conlleva el uso de estos (prácticas agrícolas). Sin embargo, existen excepciones, en especial en las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins, en donde los suelos están siendo afectados por el uso intensivo para tal actividad, principalmente a la presencia de agroindustrias, y producto de la actividad minera cercana. Estos casos se encuentran en determinados sitios en donde los niveles de contaminación por ETM son muy altos, en especial por cobre y selenio, este último solo se presenta en la Región Metropolitana de Santiago, y los que claramente pueden ser perjudiciales para la salud de los seres vivos. Me permito señalar además que, es posible apreciar las grandes concentraciones de cobre de los suelos estudiados en comparación con suelos agrícolas de otros lugares del mundo. De todo lo dicho anteriormente, se ha podido concluir que las actividades mineras y agroindustriales han contaminado en cierto grado los suelos anteriormente mencionados.

BIBLIOGRAFÍA

- Adriano, D. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments* (2 ed.). New York: Springer-Verlag .
- Ahumada, I., Escudero, P., Ascar, L., Mendoza, J., & Richter, P. (2004). Extractability of arsenic, cooper, and lead in soils of a mining and agricultural zone in central Chile. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 35, 1615-1634.
- Albanese, S., Iavazzo, P., Adamo, P., Lima, A., & De Vivo, B. (2013). Assessment of the environmental conditions of the Sarno river basin (south Italy): a stream sediment approach. *Environmental Geochemistry and Health*, 35, 283–297.
- Al-Khashman, O., & Shawabkeh, R. (2006). Metals distribution in soils around the cement factory in southern Jordan. *Environmental Pollution*, 140, 387–394.
- Alloway, B. (1990). *Heavy metals in soils*. Londres: Blackie & Son Ltd.
- Alloway, B., & Ayres, D. (1993). Inorganic pollutants. En B. Alloway, & D. Ayres, *Chemical Principles of Environmental Pollution* (págs. 109-195). Glasgow: Blackie Academic & Professional.
- Ambisat Ingeniería Ambiental. (2004). *Estudio de la prevención de la contaminación de lodos de depuración por actividades industriales*. Autor.
- Badilla-Ohlbaum, R., Ginocchio, R., Rodríguez, P., Céspedes, A., González, S., & Allen, H. (2001). Relationships between soil copper content and cooper content of selected crop plants in central Chile. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(12), 2749–2757.
- Bermudez, G., Jasan, R., Plá, R., & Pignata, M. (2012). Heavy metals and trace elements in atmospheric fall-out Their relationship with topsoil and wheat element composition. *Journal of hazardous materials*, 447-456.
- Börgel, R. (1983). *Geografía de Chile: Geomorfología* (Vol. 2). Instituto geografico militar.

- Chen, T., Liu, X., Zhu, M., Zhao, K., Wu, J., Xu, J., & Huang, P. (2008). Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban–rural transitional area of Hangzhou, China. *Environmental Pollution*, 151, 67-78.
- Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. (1999). *Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestra y análisis para su investigación*. Autor.
- Cooperativa.cl. (24 de Agosto de 2016). Obtenido de <http://www.cooperativa.cl/noticias/pais/medioambiente/contaminacion/codelco-provoco-nuevo-derrame-de-concentrado-de-cobre-en-los-andes/2016-08-24/163051.html>
- Cuadras, C. (1981). *Métodos de Análisis Multivariante*. Barcelona: Ed. EUB.
- Da Silva, E. Z. (2004). Hazard assessment on arsenic and lead in soils of Castromil gold mining area, Portugal. *Applied Geochemistry*, 19, 887-898.
- De Gregori, I., Fuentes, E., Rojas, M., Pinochet, H., & Potin-Gautier, M. (2003). Monitoreo de los niveles de cobre, arsénico y antimonio en los suelos agrícolas afectadas y no afectadas por las actividades mineras, de tres regiones de Chile. *Journal of Environmental Monitoring*, 287–295.
- Devore, J. (2005). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Mexico, D.F.: Cengage Learning Editores.
- Díaz, M. (2002). *Geoestadística Aplicada*. Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba.
- Dirección Meteorológica de Chile. (2001). *Climatología Regional*. Autor.
- Donoso D., D. (2015). Memoria y Olvido. Minera San Antonio de Naltagua y los procesos de construcción de una memoria colectiva en la comuna El Monte (Tesis de pregrado). Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

- educarchile. (2007). Principales estructuras geomorfológicas del relieve del país. Obtenido de <http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?id=133292>
- Facchinelli, A., Sacchi, E., & Mallen, L. (2001). Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution, 114*, 313-324.
- Fernández, L., Rojas, N., Roldán, T., Ramírez, M., Zegarra, H., Uribe, R., . . . Arce, J. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Mexico, D. F.: Instituto Mexicano del Petróleo.
- Fuenzalida, M., Buzai, G., Moreno Jiménez, A., & García de León, A. (2015). *Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones*. Santiago de Chile: Editorial Triángulo.
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la geoestadística*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gorgas, J., Cardiel, N., & Zamorano, J. (2009). *Estadística básica para estudiantes de ciencias*. Madrid: Universidad Complutense.
- Grant, C., & Sheppard, S. C. (2008). Fertilizer impacts on cadmium availability in agricultural soils and crops. *Human and Ecological Risk Assessment, 14*, 210–228.
- Håkanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research, 975–1000*.
- Hani, A., & Pazira, E. (2011). Heavy metals assessment and identification of their sources in agricultural soils of Southern Tehran, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment, 176*, 677-691.
- Herrera, T. (2011). *La contaminación con cadmio en suelos agrícolas*. Maracay: Universidad Central de Venezuela.
- INE. (2014). *Compendio Estadístico*. Santiago de Chile: Dirección Nacional; Departamento de Comunicaciones e Imagen Corporativa; subdepartamento de RR.PP. y Ediciones.

- INE. (2016). Encuesta de Cosecha de Cultivos Anuales 2015/2016. Santiago de Chile: Autor.
- INIA. (1990). *Fuentes de contaminación con residuos de plaguicidas organoclorados y metales pesados en sectores agrícolas, regiones IV a XI. Informe Final*. Proyecto FIA1/86.
- INIA. (2008). *Estudio ambiental sobre contaminación de suelos*. Santiago: Autor.
- INN. (2004). Norma Uso de Lodos y Norma chilena Compost - Clasificación y requisitos.
- Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- Jennings, A. (2013). Analysis of worldwide Regulatory Guidance Values for less frequently regulated elemental surface soil contaminants. *Journal of Environmental Management*, 561-585.
- Jinadasa, K., Milham, P., Hawkins, C., Cornish, P., Williams, P., Kaldor, C., & Conroy, J. (1997). Survey of cadmium levels in vegetables and soils of greater Sydney, Australia. *Journal of Environmental Quality*, 26, 924-933.
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2011). *Trace elements in soils and plants* (Tercera ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y., Huang, Y., & Zhu, Y. (2008). Health Risks of Heavy Metals in Contaminated Soils and Food Crops Irrigated with Wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 686-692.
- Loska, K., Wiechula, D., & Korus, I. (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environ. Int.*, 159-165.
- Mair, A., & Fares, A. (2011). Comparison of Rainfall Interpolation Methods in a Mountainous Region of a Tropical Island. *Journal of Hydrologic Engineering*, 371-383.

- Mamat, Z., Yimit, H., Ji, R. Z., & Mamattursun, E. (2014). Source identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Yanqi basin, northwest China. *Science of the Total Environment*, 493, 1098-1111.
- Manz, M., Weissflog, L., Kühne, R., & Schüürmann, G. (1999). Ecotoxicological Hazard and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Agricultural Soils of Central Germany. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 42, 191-201.
- Markus, J., & McBratney, A. (2001). A review of the contamination of soil with lead II. Spatial distribution and risk assessment of soil lead. *Environment International*, 27, 399-411.
- Matschullat, O. R. (2000). Geochemical background—can we calculate it? *Environ Geol*, 990-1000.
- Micó, C. (2005). *Estudio de metales pesados en suelos agrícolas con cultivos hortícolas de la provincia de Alicante (Tesis Doctoral)*. Valencia: Universitat de Valencia.
- Molinero, L. (Julio de 2003). *¿Y si los datos no siguen una distribución normal?... Bondad de ajuste a una normal. Transformaciones. Pruebas no paramétricas*. SEH-LELHA. Obtenido de SEH-LELHA: <http://www.seh-lelha.org/noparame.htm>
- Montgomery, D., & Runger, G. (2002). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. Limusa Wiley.
- Moreno, A., Pérez, L., & González, J. (1993). Soil parameters contributing to heavy metal dynamics in perimetropolitan farmland areas. *Geomicrobiology Journal*, 325-332.
- Myers, J., & Thorbjornsen, K. (2004). Identifying Metals Contamination in Soil: A Geochemical Approach. *Soil & Sediment Contamination*, 13, 1-16.
- Nicholson, F., Smith, S., Alloway, B., Carlton-Smith, C., & Chambers, B. (2003). An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Sci Total Environ*, 205-219.

- Nordberg, G. (1998). Metales: Propiedades Químicas y Toxicidad. En OIT (Organización Internacional del Trabajo), *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo* (págs. 63.2-63.75). CHANTAL DUFRESNE, BA.
- ODEPA - INE. (2007). *VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal*. Santiago de Chile: Autor.
- ODEPA. (2005). *Agricultura Chilena 2014: una perspectiva de mediano plazo*. Santiago de Chile: Autor.
- Pérez Mínguez, I. (2015). *Ecotoxicología del Arsénico en Suelos de la Comunidad de Madrid (Tesis de pregrado)*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Peris, M. (2006). *Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la Provincia de Castellón (Tesis Doctoral)*. Valencia: Universitat de Valencia.
- Redon, P. B. (2013). Modelling trace metal background to evaluate anthropogenic contamination in arable soils of south-western France. *Geoderma*, 206, 112-122.
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R. (2005). Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 346, 1-16.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R., & Dutter, R. (2011). *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Romic, M., & Romic, D. (2003). Heavy metals distribution in agricultural topsoils in urban area. *Environmental Geology*, 43, 795-805.
- Rubio, R. (Abril de 2015). *Concentración y Distribución de Ba, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn en suelos urbanos de Arica (Tesis de pregrado)*. Concepción, Chile: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Ruiz Sch., R. (1984). Diagnóstico y estrategia para el control de problemas salinos. *IPA La Platina N° 23*, 49-53.
- SAG (Servicio Agrícola y Ganadero) (2005). *Criterios de calidad de suelo agrícola*. Chile: Servicio Agrícola y Ganadero.

- Sánchez, A., & Morales, R. (1993). *Las regiones de Chile: espacio físico y humano-económico*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- Sanz, N. (2001). Arsenic levels in drinking water supplies from underground sources in the Autonomous Community of Madrid. *Revista Española de Salud*, 421–432.
- SERNAGEOMIN. (2002). Mapa Geológico de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 751 mapa en tres hojas, escala 1:1.000.000. Santiago: Autor.
- Shunsheng, H., Ming, H., Jinshun, F., Xinyong, Z., Yang, J., Baiwan, Z., & Hua, L. (2009). Assessment of selenium pollution in agricultural soils in the Xuzhou District, Northwest Jiangsu, China. *Journal of Environmental Sciences*, 481-487.
- Singh, B. R. (1994). Trace element availability to plants in agricultural soils, with special emphasis on fertilizer inputs. *Environmental reviews NRC Can*, 133-146.
- Soil Survey Division Staff. (1993). Chapter 3: Examination and Description of Soils. En Soil Survey Division Staff, *Soil survey manual*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Sposito, G. (2008). *The Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press.
- Streets, D., Hao, J., Wu, Y., Jiang, J., Chan, M., Tian, H., & Feng, X. (2005). Anthropogenic mercury emissions in China. *Atmospheric Environment*, 7789–7806.
- Toledo, X., & Zapater, E. (1991). *Geografía General y Regional de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- Townend, J. (2002). *Practical Statistics for Environmental and Biological Scientists*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Tukey, J. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- Tume, P., King, R., González, E., Bustamante, G., Reverter, F., Roca, N., & Bech, J. (2014). Trace element concentrations in schoolyard soils from the port city of Talcahuano, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, 229-236.

- Vilà, R., Rubio, M., Berlanga, V., & Torrado, M. (2014). Cómo aplicar un cluster jerárquico en SPSS. *REIRE, Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 113-127.
- VROM. (2000). *Circular on target values and intervention values for soil remediation* (Vol. Annex A). La Haya, Países Bajos: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM).
- Wang, X.-S., & Qin, Y. (2007). Some characteristics of the distribution of heavy metals in urban topsoil of Xuzhou, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 29, 11–19. Obtenido de <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10653-006-9052-2>
- Webster, R., & Oliver, M. (2001). *Geostatistics for environmental scientist*. Toronto: Wiley.
- Wei, B., & Yang, L. (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 99–107.
- Wong, S., Li, X., Zhang, G., Qi, S., & Min, Y. (2002). Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*, 119, 33–44.
- Yaylalı-Abanuz, G. (2011). Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey. *Microchemical Journal*, 99, 82-92.
- Zhang, C. (2006). Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environ. Pollut.*, 501–511.
- Zhao, F. J., Ma, J., Meharg, A. A., & Mcgrath, S. P. (2009). Arsenic uptake and metabolism in plants. *New Phytologist*, 777–794.
- Zhao, Y., Wang, Z., Sun, W., Huang, B., Shi, X., & Ji, J. (2010). Spatial interrelations and multiscale sources of soil heavy metal variability in a typical urban–rural transition area in Yangtze River Delta region of China. *Geoderma*, 156, 216-227.
- Zhou, L., Yang, B., Seip, H., Xue, N., Li, F., Cong, X., . . . Li, H. (2013). Ecological risks and potential sources of heavy metals in agricultural soils from Huanghuai Plain, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 1360-1369.

Zona central de Chile, (s. f). En Wikipedia. Recuperado el 24 de Septiembre de 2016 de https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_central_de_Chile.

ANEXOS

Anexo I

Resultados relleno de datos granulométricos faltantes

Tabla 66. *Datos faltantes de parámetros fisicoquímicos de las regiones en estudio.*

Identificación Muestra	Región	Análisis Físico de Suelos		
		Arena	Limo	Arcilla
AC-04	V	31.9	39.4	28.7
MUESTRA DE SACOS V REGION	V	31.9	39.4	28.7
R.M. 01	RM	26.3	40.4	31.1
BIO CC	VI	32.7	39.4	27.9
BIO 2.CC	VI	32.7	39.4	27.9
BIO 3.CC	VI	32.7	39.4	27.9
SERIE RANCAGUA. MOLINOS QUEMADOS	VI	32.7	39.4	27.9
INIA RAYENTUE VI REGION	VI	32.7	39.4	27.9
PARCELA EL GALLO-VI REGION RENGO	VI	32.7	39.4	27.9

Anexo II

Información adicional del Análisis de componentes principales

Región de Valparaíso

Tabla 67. *Autovalores y varianza explicada de la Región de Valparaíso.*

Componente	Autovalor	% Varianza	% Varianza Acumulada
1	3.8	29.6	29.6
2	2.4	18.7	48.3
3	1.6	12.0	60.3
4	1.4	10.7	70.9
5	1.1	8.6	79.6
6	0.75	5.8	85.4
7	0.62	4.8	90.1
8	0.56	4.3	94.4
9	0.27	2.0	96.5
10	0.21	1.6	98.1
11	0.13	1.0	99.1
12	0.11	0.88	99.9
13	0.00	0.00	100

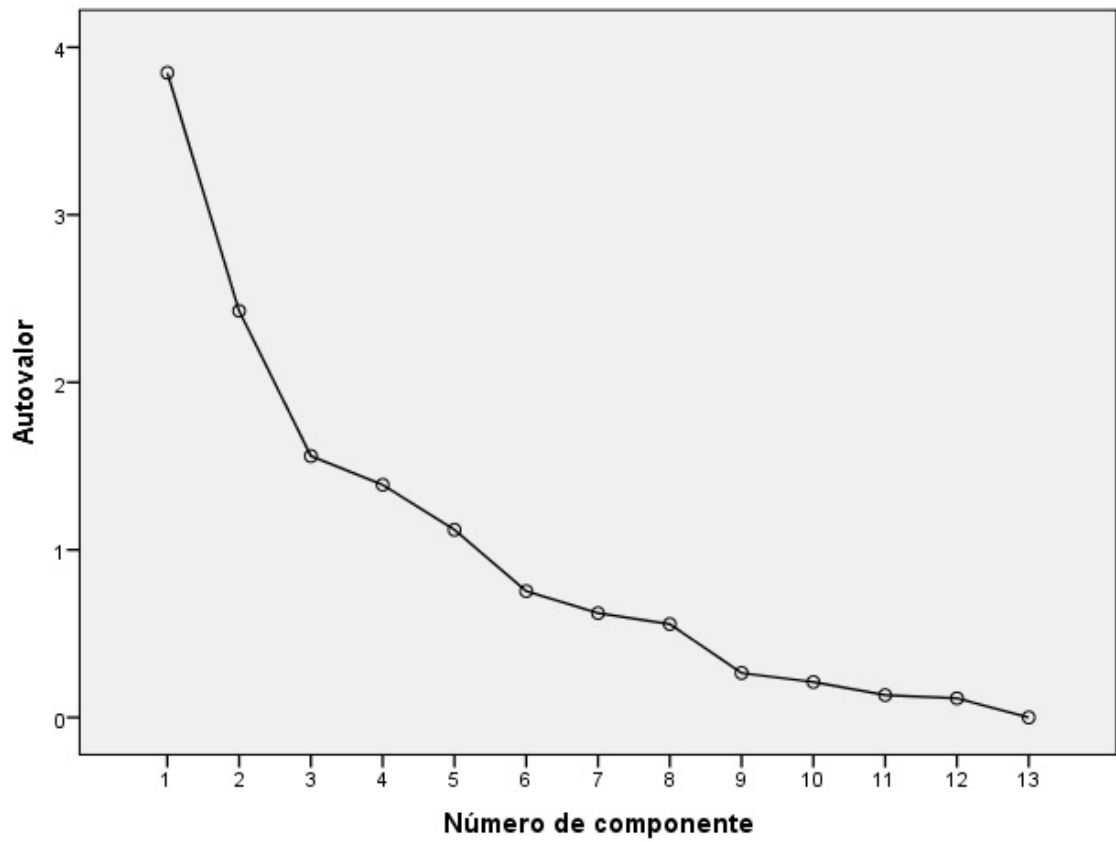


Figura 133. Gráfico de sedimentación.

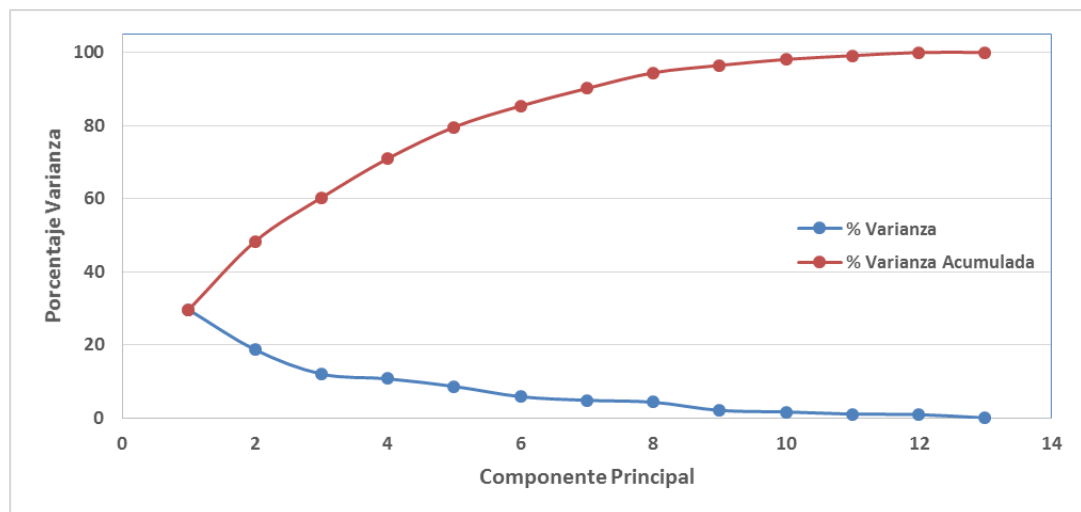


Figura 134. Gráfico varianza acumulada.

Región Metropolitana de Santiago

Tabla 68. *Autovalores y varianza explicada de la Región Metropolitana de Santiago.*

Componente	Autovalor	% Varianza	% Varianza Acumulada
1	4.2	32.4	32.4
2	3.7	28.3	60.7
3	1.9	14.9	75.6
4	0.94	7.2	82.8
5	0.75	5.8	88.6
6	0.53	4.1	92.7
7	0.36	2.8	95.4
8	0.25	1.9	97.4
9	0.17	1.3	98.6
10	0.12	0.90	99.5
11	0.04	0.28	99.8
12	0.01	0.09	99.9
13	0.01	0.09	100

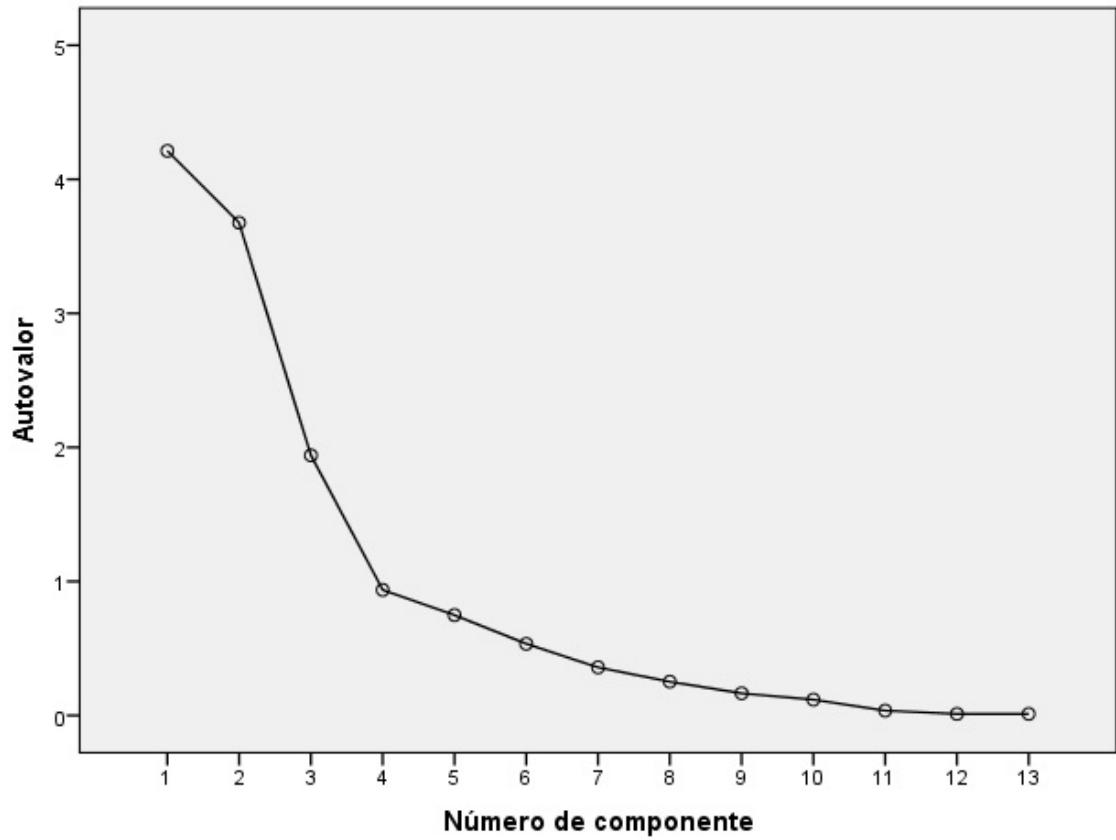


Figura 135. Gráfico de sedimentación.

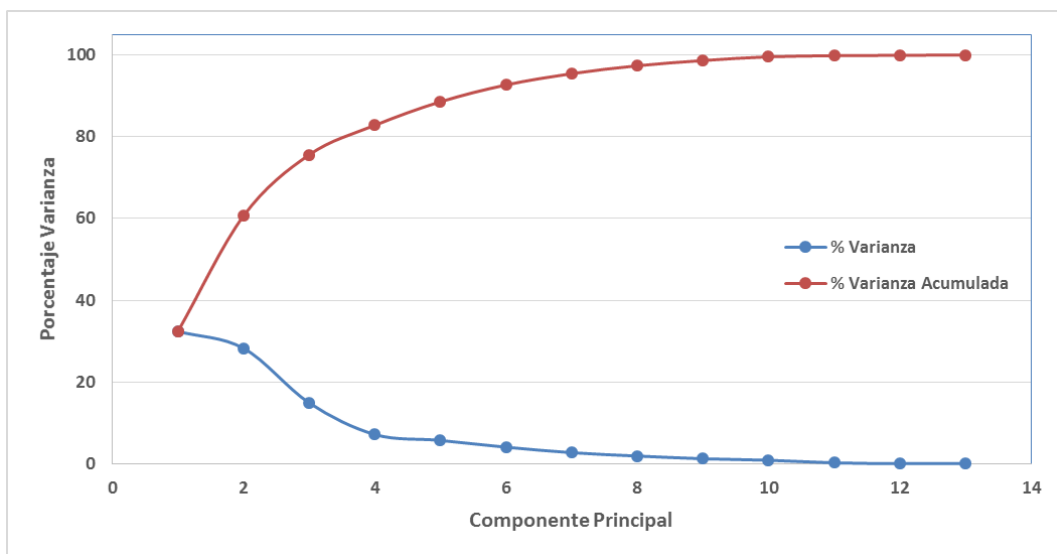


Figura 136. Gráfico varianza acumulada.

Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

Tabla 69. Autovalores y varianza explicada de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Componente	Autovalor	% Varianza	% Varianza Acumulada
1	4.0	33.6	33.6
2	2.7	22.5	56.1
3	1.8	14.7	70.7
4	1.1	9.3	80.0
5	0.74	6.2	86.2
6	0.60	5.0	91.2
7	0.34	2.8	94.0
8	0.23	1.9	95.9
9	0.21	1.7	97.7
10	0.19	1.5	99.2
11	0.09	0.77	99.9
12	0.00	0.00	100

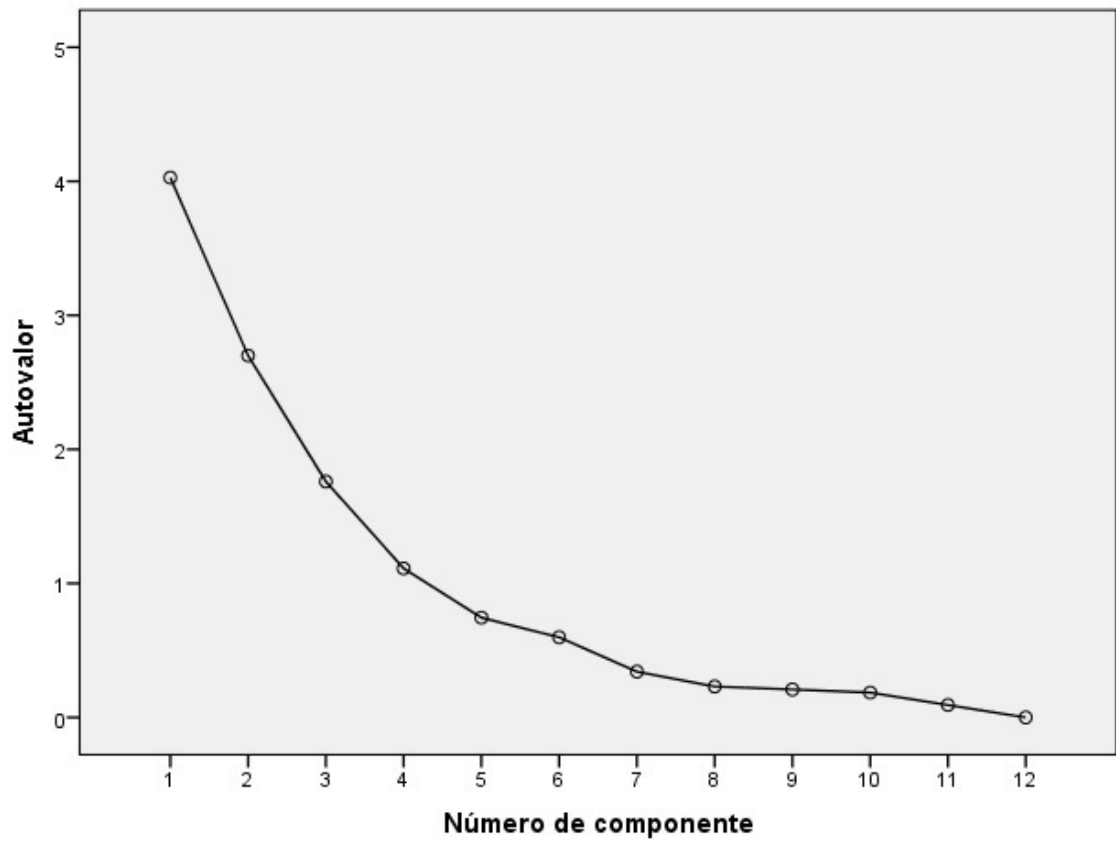


Figura 137. Gráfico de sedimentación.

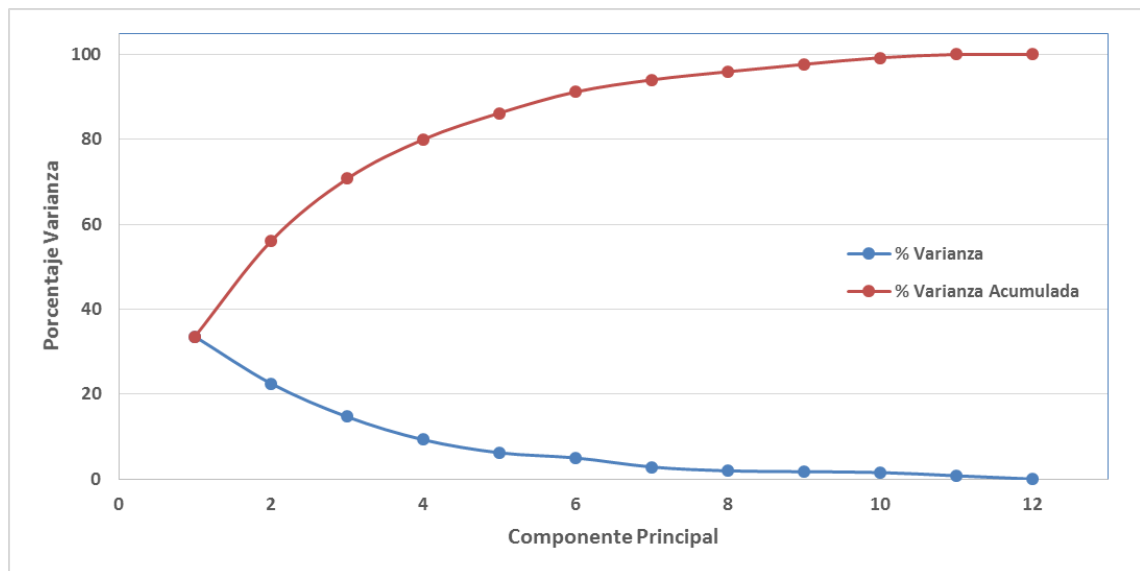


Figura 138. Gráfico varianza acumulada.

Región del Maule

Tabla 70. Autovalores y varianza explicada de la Región del Maule.

Componente	Autovalor	% Varianza	% Varianza Acumulada
1	4.5	37.4	37.4
2	2.9	24.2	61.6
3	1.2	10.0	71.6
4	0.94	7.8	79.4
5	0.76	6.3	85.7
6	0.62	5.2	90.9
7	0.42	3.5	94.3
8	0.36	3.0	97.3
9	0.13	1.1	98.4
10	0.09	0.78	99.2
11	0.06	0.49	99.7
12	0.04	0.33	100

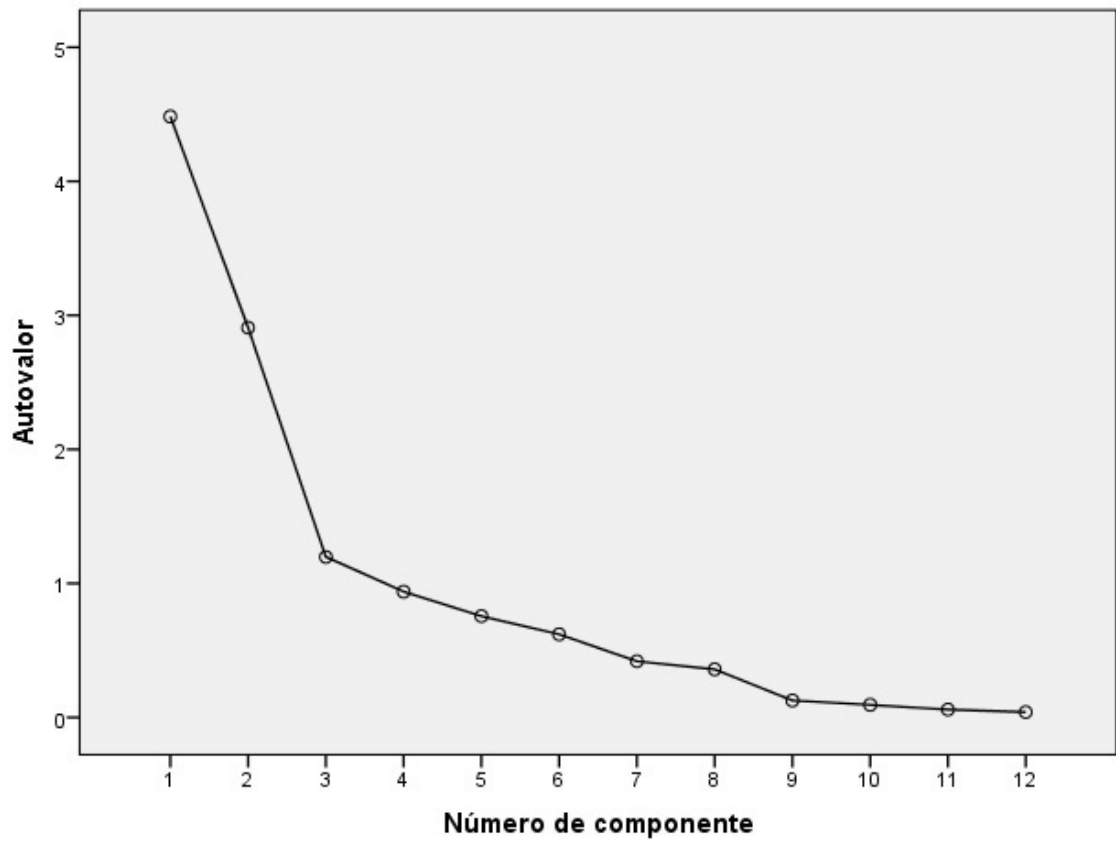


Figura 139. Gráfico de sedimentación.

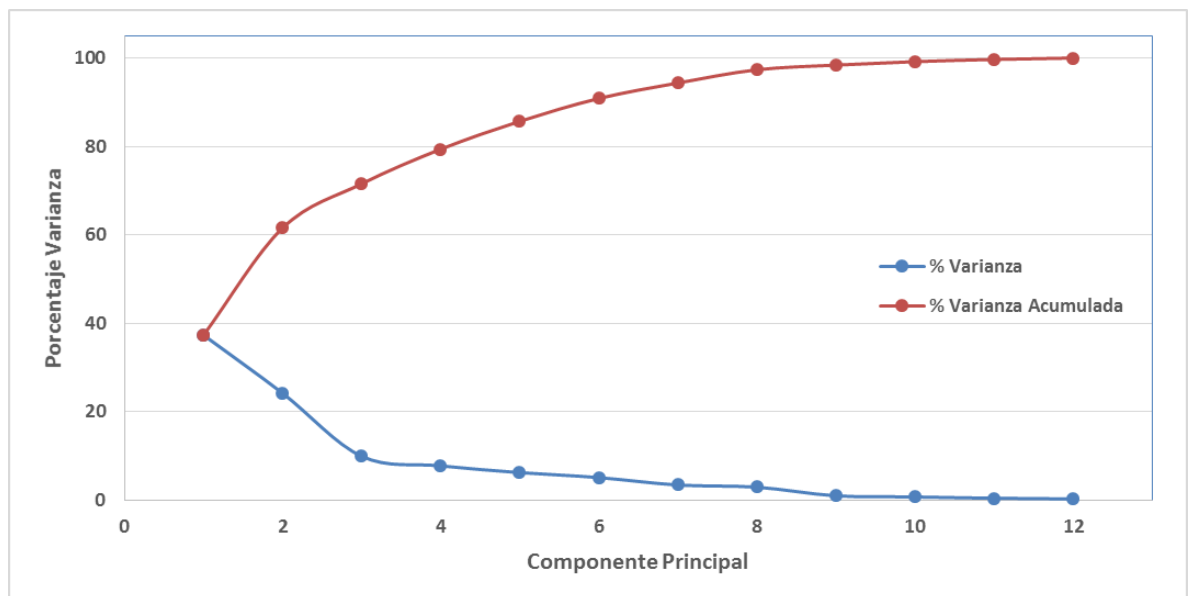


Figura 140. Gráfico varianza acumulada.

Región del Bío Bío

Tabla 71. Autovalores y varianza explicada de la Región del Bío Bío.

Componente	Autovalor	% Varianza	% Varianza Acumulada
1	6.3	52.8	52.8
2	1.9	15.6	68.3
3	1.2	10.0	78.4
4	1.1	9.0	87.4
5	0.62	5.2	92.6
6	0.44	3.7	96.2
7	0.16	1.3	97.6
8	0.13	1.1	98.6
9	0.08	0.69	99.3
10	0.06	0.47	99.8
11	0.03	0.21	99.9
12	0.00	0.00	100

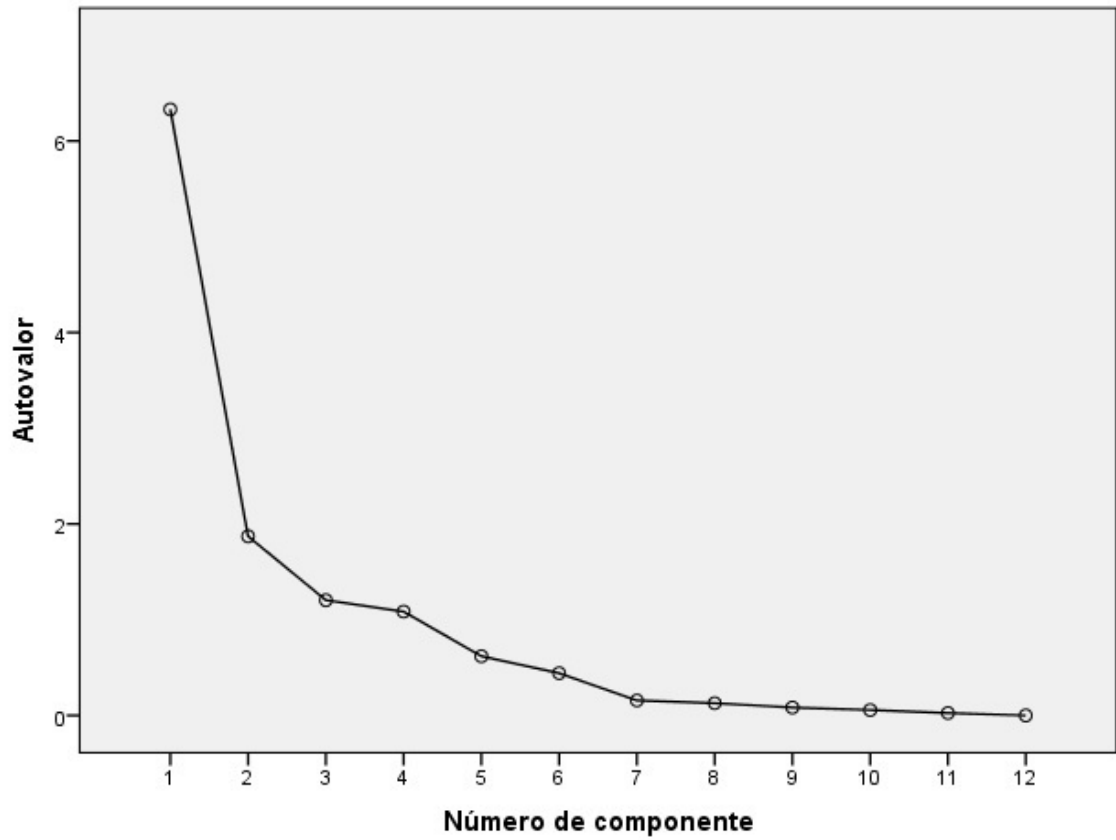


Figura 141. Gráfico de sedimentación.

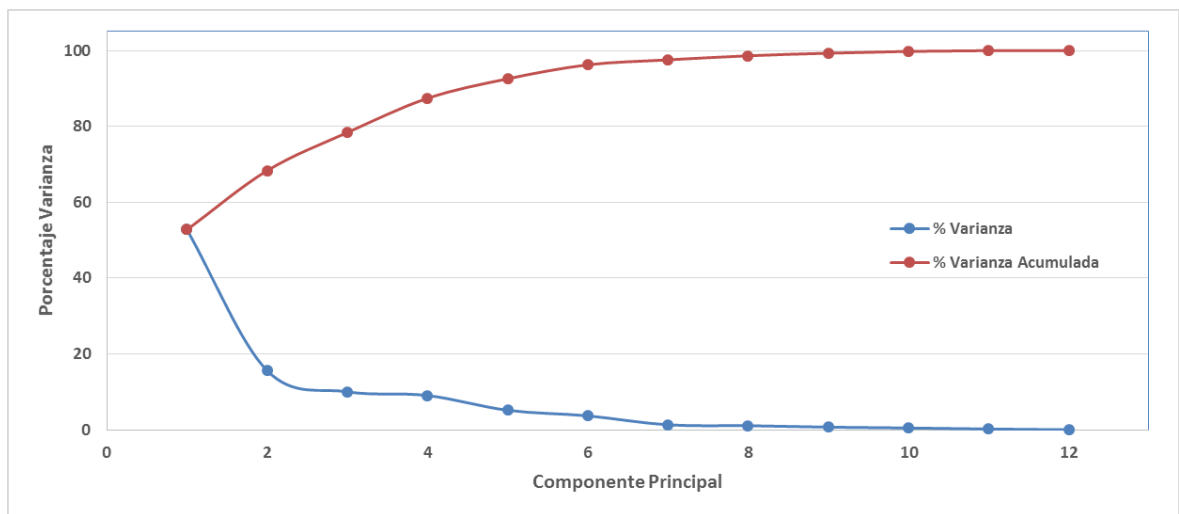


Figura 142. Gráfico varianza acumulada.

Anexo III

Información adicional de los Background Values

Región de Valparaíso

Tabla 72. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región de Valparaíso.

	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Q1	11.1	0.29	97.1	5.4	16.6	112
Q3	26.3	0.47	243	11.2	28.0	163
Rango Intercuartil (IQR)	15.2	0.18	146	5.8	11.4	50.9
Upper Inner Fence (UIF)	49.0	0.75	463	19.9	45.2	239

Tabla 73. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método $[\text{Median} \pm 2 \text{MAD}]$ para la Región de Valparaíso.

	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Mediana	19.3	0.38	129	8.3	21.3	139
MAD	7.7	0.09	40.4	2.8	4.9	24.7
$[\text{Median}+2 \text{MAD}]$	34.7	0.56	210	13.9	31.0	188

Tabla 74. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región de Valparaíso.

	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Media (mgkg^{-1})	19.3	0.35	104	7.8	21.7	133
Mediana (mgkg^{-1})	19.3	0.37	100	7.8	21.1	137
SD (mgkg^{-1})	8.4	0.13	20.8	3.4	7.7	25.7
Número (n)	50	44	28	46	47	42
Perdidos (%)	0	12	44	8	6	16
Upper Limit 2σ (mgkg^{-1})	36.1	0.60	145	14.6	37.2	185

Región Metropolitana de Santiago

Tabla 75. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región Metropolitana de Santiago.

	As	Cu	Ni	Pb	Se	Zn
Q1	8.3	55.4	7.8	9.4	0.19	74.0
Q3	27.0	86.6	13.5	18.9	0.36	112
Rango Inter cuartil (IQR)	18.7	31.2	5.7	9.5	0.17	38.1
Upper Inner Fence (UIF)	55.0	133	22.0	33.2	0.61	169

Tabla 76. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método $[\text{Median} \pm 2 \text{MAD}]$ para la Región Metropolitana de Santiago.

	As	Cu	Ni	Pb	Se	Zn
Mediana	20.0	67.7	11.8	15.4	0.27	99.6
MAD	8.4	14.1	1.9	4.8	0.08	20.5
$[\text{Median}+2 \text{MAD}]$	36.7	96.0	15.6	25.1	0.43	140

Tabla 77. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región Metropolitana de Santiago.

	As	Cu	Ni	Pb	Se	Zn
Media (mgkg^{-1})	18.2	66.0	11.7	14.5	0.24	95.3
Mediana (mgkg^{-1})	19.6	62.2	12.2	15.0	0.26	100
SD (mgkg^{-1})	8.9	13.1	2.5	5.8	0.10	21.4
Número (n)	37	29	33	37	33	34
Perdidos (%)	3	24	13	3	13	11
Upper Limit 2σ (mgkg^{-1})	36.0	92.1	16.6	26.1	0.44	138

Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

Tabla 78. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Q1	11.8	48.1	8.1	10.8	68.4
Q3	30.4	294	10.7	17.8	122
Rango Intercuartil (IQR)	18.6	245	2.6	7.0	53.1
Upper Inner Fence (UIF)	58.4	662	14.6	28.2	201

Tabla 79. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método [Median \pm 2 MAD] para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Mediana	17.1	86.3	9.6	13.5	88.1
MAD	8.4	47.8	1.3	2.8	22.0
[Median+2 MAD]	33.9	182	12.1	19.1	132

Tabla 80. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Media (mgkg^{-1})	18.5	56.3	9.8	13.7	89.1
Mediana (mgkg^{-1})	16.0	50.9	10.0	13.2	86.0
SD (mgkg^{-1})	9.7	21.4	1.4	3.3	27.0
Número (n)	46	29	42	44	45
Perdidos (%)	8	42	16	12	10
Upper Limit 2σ (mgkg^{-1})	38.0	99.0	12.5	20.4	143

Región del Maule

Tabla 81. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región del Maule.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Q1	5.5	21.4	4.4	7.4	44.1
Q3	9.8	37.3	11.8	12.1	78.8
Rango Intercuartil (IQR)	4.2	15.9	7.4	4.7	34.7
Upper Inner Fence (UIF)	16.1	61.1	22.8	19.1	131

Tabla 82. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método $[\text{Median} \pm 2 \text{MAD}]$ para la Región del Maule.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Mediana	7.8	29.2	8.4	9.0	66.4
MAD	2.0	7.5	3.6	2.0	16.8
$[\text{Median}+2 \text{MAD}]$	11.8	44.2	15.5	12.9	100

Tabla 83. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región del Maule.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Media (mgkg^{-1})	7.2	28.1	7.2	8.9	62.9
Mediana (mgkg^{-1})	7.7	27.8	6.8	8.4	66.4
SD (mgkg^{-1})	2.7	8.9	4.0	1.9	22.5
Número (n)	30	29	28	27	31
Perdidos (%)	6	9	13	16	3
Upper Limit 2σ (mgkg^{-1})	12.5	45.9	15.1	12.8	108

Región del Bío Bío

Tabla 84. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método Boxplot para la Región del Bío Bío.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Q1	5.0	23.7	7.7	8.0	52.1
Q3	8.3	55.1	20.7	12.2	82.5
Rango Inter cuartil (IQR)	3.3	31.4	13.1	4.2	30.4
Upper Inner Fence (UIF)	13.2	102	40.4	18.5	128

Tabla 85. Valores (mgkg^{-1}) necesarios para cálculo de Background Value mediante método [Median \pm 2 MAD] para la Región del Bío Bío.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Mediana	6.8	32.5	11.6	10.7	71.5
MAD	1.6	12.7	5.8	1.8	11.4
[Median+2 MAD]	10.1	57.9	23.1	14.2	94.2

Tabla 86. Valores necesarios para cálculo de Background Value mediante método Iterative 2σ -technique para la Región del Bío Bío.

	As	Cu	Ni	Pb	Zn
Media (mgkg^{-1})	7.3	37.2	12.4	11.7	75.2
Mediana (mgkg^{-1})	7.2	32.5	11.3	11.4	76.8
SD (mgkg^{-1})	1.5	16.5	6.6	2.3	15.3
Número (n)	24	31	28	24	26
Perdidos (%)	23	0	10	23	16
Upper Limit 2σ (mgkg^{-1})	10.4	70.2	25.6	16.3	106

Anexo IV

Evaluación de riesgo ecológico mediante grado de contaminación e índice integrado de polución

Región de Valparaíso

Tabla 87. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región de Valparaíso.

Identificación	C_{deg}	Categoría
AC-04	6.0	Contaminación baja
MUESTRA DE SACOS V REGION	6.5	Contaminación moderada
SERIE POCURO	6.8	Contaminación moderada
MUESTRA N° 1	2.7	Contaminación baja
AC-01	2.8	Contaminación baja
AC-02	6.2	Contaminación moderada
AC-03	6.0	Contaminación moderada
AC-05	5.4	Contaminación baja
AC-06	4.6	Contaminación baja
AC-09	4.5	Contaminación baja
AC-10	4.0	Contaminación baja
AC-12	5.6	Contaminación baja
AC-13	5.1	Contaminación baja
AC-15	5.0	Contaminación baja
AC-16	2.7	Contaminación baja
AC-04R	5.6	Contaminación baja
AC-11	4.8	Contaminación baja
AC-14	5.0	Contaminación baja
AC-17	3.5	Contaminación baja
AC-18	3.5	Contaminación baja
AC-19	4.2	Contaminación baja
AC-20	3.5	Contaminación baja
PUC-41	4.5	Contaminación baja
PUC-42	5.0	Contaminación baja
PUC-43	3.8	Contaminación baja
PUC-44	3.6	Contaminación baja
PUC-45	3.5	Contaminación baja
ACN-31	3.4	Contaminación baja
ACN-32	3.5	Contaminación baja
ACN-33	9.5	Contaminación moderada
ACN-34	3.3	Contaminación baja
ESCUELA PASCUAL BABURIZZA	3.1	Contaminación baja
AC-07	17.6	Contaminación considerable

Tabla 88. *Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región de Valparaíso.
(Continuación)*

Identificación	C_{deg}	Categoría
AC-08	5.4	Contaminación baja
AcC-21	6.5	Contaminación moderada
AcC-22	6.7	Contaminación moderada
AcC-23	4.5	Contaminación baja
AcC-24	4.3	Contaminación baja
AcC-25	4.4	Contaminación baja
AcC-26	3.2	Contaminación baja
AcC-27	6.6	Contaminación moderada
AcC-28	3.1	Contaminación baja
AcC-29	2.9	Contaminación baja
AcC-30	3.7	Contaminación baja
ACN-35	4.0	Contaminación baja
ACN-36	4.5	Contaminación baja
ACN-37	3.2	Contaminación baja
ACN-38	5.3	Contaminación baja
ACN-39	5.9	Contaminación baja
ACN-40	1.6	Contaminación baja

Tabla 89. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región de Valparaíso.

Identificación	IPI	Categoría
AC-04	1.0	Nivel bajo de contaminación
MUESTRA DE SACOS V REGION	1.1	Nivel moderado de contaminación
SERIE POCURO	1.1	Nivel moderado de contaminación
MUESTRA N° 1	0.46	Nivel bajo de contaminación
AC-01	0.47	Nivel bajo de contaminación
AC-02	1.0	Nivel moderado de contaminación
AC-03	1.0	Nivel moderado de contaminación
AC-05	0.90	Nivel bajo de contaminación
AC-06	0.77	Nivel bajo de contaminación
AC-09	0.75	Nivel bajo de contaminación
AC-10	0.67	Nivel bajo de contaminación
AC-12	0.94	Nivel bajo de contaminación
AC-13	0.85	Nivel bajo de contaminación
AC-15	0.84	Nivel bajo de contaminación
AC-16	0.45	Nivel bajo de contaminación
AC-04R	0.93	Nivel bajo de contaminación
AC-11	0.80	Nivel bajo de contaminación
AC-14	0.84	Nivel bajo de contaminación
AC-17	0.58	Nivel bajo de contaminación
AC-18	0.58	Nivel bajo de contaminación
AC-19	0.70	Nivel bajo de contaminación
AC-20	0.58	Nivel bajo de contaminación
PUC-41	0.75	Nivel bajo de contaminación
PUC-42	0.84	Nivel bajo de contaminación
PUC-43	0.64	Nivel bajo de contaminación
PUC-44	0.60	Nivel bajo de contaminación
PUC-45	0.59	Nivel bajo de contaminación
ACN-31	0.56	Nivel bajo de contaminación
ACN-32	0.58	Nivel bajo de contaminación
ACN-33	1.6	Nivel moderado de contaminación
ACN-34	0.55	Nivel bajo de contaminación
ESCUELA PASCUAL BABURIZZA	0.52	Nivel bajo de contaminación
AC-07	2.9	Nivel alto de contaminación

Tabla 90. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región de Valparaíso.
(Continuación)

Identificación	IPI	Categoría
AC-08	0.90	Nivel bajo de contaminación
AcC-21	1.1	Nivel moderado de contaminación
AcC-22	1.1	Nivel moderado de contaminación
AcC-23	0.75	Nivel bajo de contaminación
AcC-24	0.72	Nivel bajo de contaminación
AcC-25	0.73	Nivel bajo de contaminación
AcC-26	0.53	Nivel bajo de contaminación
AcC-27	1.1	Nivel moderado de contaminación
AcC-28	0.52	Nivel bajo de contaminación
AcC-29	0.49	Nivel bajo de contaminación
AcC-30	0.62	Nivel bajo de contaminación
ACN-35	0.67	Nivel bajo de contaminación
ACN-36	0.74	Nivel bajo de contaminación
ACN-37	0.53	Nivel bajo de contaminación
ACN-38	0.88	Nivel bajo de contaminación
ACN-39	0.98	Nivel bajo de contaminación
ACN-40	0.27	Nivel bajo de contaminación

Región Metropolitana de Santiago

Tabla 91. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.

Identificación	C_{deg}	Categoría
VICONTO R.M. 14_BIOENSAYOS	4.5	Contaminación baja
RM-24	4.9	Contaminación baja
RM-25	3.2	Contaminación baja
RM-26	4.2	Contaminación baja
RM-27	3.5	Contaminación baja
RM-28	3.2	Contaminación baja
RM-29	2.8	Contaminación baja
RM-30	3.2	Contaminación baja
RM-31 T	3.4	Contaminación baja
RM-32	3.0	Contaminación baja
RM-33 T	2.7	Contaminación baja
RM-34 T	7.3	Contaminación moderada
RM-17	4.4	Contaminación baja
RM-18	4.7	Contaminación baja
RM-19	5.0	Contaminación baja
RM-20	3.9	Contaminación baja
RM-22	5.1	Contaminación baja
RM-23	3.3	Contaminación baja
RM-31	4.0	Contaminación baja
RM-33	2.7	Contaminación baja
RM-05	4.0	Contaminación baja
RM-06	3.7	Contaminación baja
RM-08	4.2	Contaminación baja
RM-09	4.0	Contaminación baja
RM-01	3.8	Contaminación baja
RM-02	2.6	Contaminación baja
RM-03	35.8	Contaminación muy alta
RM-04	7.2	Contaminación moderada
RM-10	5.4	Contaminación baja
RM-11	1.3	Contaminación baja

Tabla 92. *Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.*
 (Continuación)

Identificación	C_{deg}	Categoría
RM-16	3.7	Contaminación baja
RM-12	5.0	Contaminación baja
RM-13	5.2	Contaminación baja
RM-14	5.6	Contaminación baja
RM-15	4.4	Contaminación baja
RM-34	4.7	Contaminación baja
RM-35	3.6	Contaminación baja
RM-35-A	4.2	Contaminación baja

Tabla 93. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago.

Identificación	IPI	Categoría
VICONTO R.M. 14_BIOENSAYOS	0.76	Nivel bajo de contaminación
RM-24	0.81	Nivel bajo de contaminación
RM-25	0.53	Nivel bajo de contaminación
RM-26	0.71	Nivel bajo de contaminación
RM-27	0.58	Nivel bajo de contaminación
RM-28	0.53	Nivel bajo de contaminación
RM-29	0.47	Nivel bajo de contaminación
RM-30	0.53	Nivel bajo de contaminación
RM-31 T	0.56	Nivel bajo de contaminación
RM-32	0.49	Nivel bajo de contaminación
RM-33 T	0.44	Nivel bajo de contaminación
RM-34 T	1.2	Nivel moderado de contaminación
RM-17	0.74	Nivel bajo de contaminación
RM-18	0.78	Nivel bajo de contaminación
RM-19	0.83	Nivel bajo de contaminación
RM-20	0.65	Nivel bajo de contaminación
RM-22	0.85	Nivel bajo de contaminación
RM-23	0.55	Nivel bajo de contaminación
RM-31	0.67	Nivel bajo de contaminación
RM-33	0.44	Nivel bajo de contaminación
RM-05	0.67	Nivel bajo de contaminación
RM-06	0.61	Nivel bajo de contaminación
RM-08	0.71	Nivel bajo de contaminación
RM-09	0.66	Nivel bajo de contaminación
RM-01	0.63	Nivel bajo de contaminación
RM-02	0.43	Nivel bajo de contaminación
RM-03	6.0	Nivel muy alto de contaminación
RM-04	1.2	Nivel moderado de contaminación
RM-10	0.89	Nivel bajo de contaminación
RM-11	0.21	Nivel bajo de contaminación

Tabla 94. *Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región Metropolitana de Santiago. (Continuación)*

Identificación	IPI	Categoría
RM-16	0.61	Nivel bajo de contaminación
RM-12	0.83	Nivel bajo de contaminación
RM-13	0.87	Nivel bajo de contaminación
RM-14	0.93	Nivel bajo de contaminación
RM-15	0.74	Nivel bajo de contaminación
RM-34	0.79	Nivel bajo de contaminación
RM-35	0.59	Nivel bajo de contaminación
RM-35-A	0.71	Nivel bajo de contaminación

Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

Tabla 95. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Identificación	C_{deg}	Categoría
BIO-CC	4.9	Contaminación baja
BIO2-CC	5.4	Contaminación moderada
BIO3-CC	9.1	Contaminación moderada
SERIE RANCAGUA. MOLINOS QUEMADOS	7.8	Contaminación moderada
MUESTRA DE SACOS VI REGION	2.7	Contaminación baja
INIA RAYENTUE VI REGION	8.5	Contaminación moderada
PARCELA EL GALLO-VI REGION RENGÓ	3.9	Contaminación baja
TG-01	3.7	Contaminación baja
TG-02	3.5	Contaminación baja
TG-03	2.6	Contaminación baja
TG-04	2.8	Contaminación baja
TG-05	2.4	Contaminación baja
TG-06	3.5	Contaminación baja
TG-07	2.2	Contaminación baja
TG-08	2.4	Contaminación baja
TG-09	3.0	Contaminación baja
TG-10	0.56	Contaminación baja
TG-11	1.6	Contaminación baja
TG-12	1.5	Contaminación baja
TG-13	2.5	Contaminación baja
TG-14	2.6	Contaminación baja
TG-15	2.3	Contaminación baja
TG-16	2.9	Contaminación baja
TG-17	2.2	Contaminación baja
TG-18	2.8	Contaminación baja
TG-19	3.5	Contaminación baja
TG-20	3.3	Contaminación baja
SERIE O'HIGGINS	3.8	Contaminación baja
CC-01	5.4	Contaminación moderada
CC-02	6.9	Contaminación moderada
CC-03	8.9	Contaminación moderada

Tabla 96. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. (Continuación)

Identificación	C_{deg}	Categoría
CC-04	8.3	Contaminación moderada
CC-05	10.7	Contaminación considerable
CC-06	6.7	Contaminación moderada
CC-07	3.4	Contaminación baja
CC-08	5.3	Contaminación moderada
CC-09	4.5	Contaminación baja
CC-10	2.3	Contaminación baja
CC-11	9.1	Contaminación moderada
CC-12	6.6	Contaminación moderada
CC-13	8.8	Contaminación moderada
CC-14	6.6	Contaminación moderada
CC-15	3.5	Contaminación baja
CC-16	3.8	Contaminación baja
CC-17	7.5	Contaminación moderada
CC-18	5.0	Contaminación moderada
CC-19	5.7	Contaminación moderada
CC-20	3.4	Contaminación baja
CC-21	2.2	Contaminación baja
CC-22	9.7	Contaminación moderada

Tabla 97. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Identificación	IPI	Categoría
BIO-CC	0.98	Nivel bajo de contaminación
BIO2-CC	1.1	Nivel moderado de contaminación
BIO3-CC	1.8	Nivel moderado de contaminación
SERIE RANCAGUA. MOLINOS QUEMADOS	1.6	Nivel moderado de contaminación
MUESTRA DE SACOS VI REGION	0.54	Nivel bajo de contaminación
INIA RAYENTUE VI REGION	1.7	Nivel moderado de contaminación
PARCELA EL GALLO-VI REGION RENGO	0.77	Nivel bajo de contaminación
TG-01	0.74	Nivel bajo de contaminación
TG-02	0.69	Nivel bajo de contaminación
TG-03	0.53	Nivel bajo de contaminación
TG-04	0.55	Nivel bajo de contaminación
TG-05	0.48	Nivel bajo de contaminación
TG-06	0.69	Nivel bajo de contaminación
TG-07	0.43	Nivel bajo de contaminación
TG-08	0.49	Nivel bajo de contaminación
TG-09	0.60	Nivel bajo de contaminación
TG-10	0.11	Nivel bajo de contaminación
TG-11	0.31	Nivel bajo de contaminación
TG-12	0.31	Nivel bajo de contaminación
TG-13	0.50	Nivel bajo de contaminación
TG-14	0.52	Nivel bajo de contaminación
TG-15	0.47	Nivel bajo de contaminación
TG-16	0.59	Nivel bajo de contaminación
TG-17	0.44	Nivel bajo de contaminación
TG-18	0.56	Nivel bajo de contaminación
TG-19	0.71	Nivel bajo de contaminación
TG-20	0.65	Nivel bajo de contaminación
SERIE O'HIGGINS	0.76	Nivel bajo de contaminación
CC-01	1.1	Nivel moderado de contaminación
CC-02	1.4	Nivel moderado de contaminación
CC-03	1.8	Nivel moderado de contaminación

Tabla 98. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. (Continuación)

Identificación	IPI	Categoría
CC-04	1.7	Nivel moderado de contaminación
CC-05	2.1	Nivel alto de contaminación
CC-06	1.3	Nivel moderado de contaminación
CC-07	0.68	Nivel bajo de contaminación
CC-08	1.1	Nivel moderado de contaminación
CC-09	0.90	Nivel bajo de contaminación
CC-10	0.46	Nivel bajo de contaminación
CC-11	1.8	Nivel moderado de contaminación
CC-12	1.3	Nivel moderado de contaminación
CC-13	1.8	Nivel moderado de contaminación
CC-14	1.3	Nivel moderado de contaminación
CC-15	0.71	Nivel bajo de contaminación
CC-16	0.76	Nivel bajo de contaminación
CC-17	1.5	Nivel moderado de contaminación
CC-18	1.0	Nivel moderado de contaminación
CC-19	1.1	Nivel moderado de contaminación
CC-20	0.67	Nivel bajo de contaminación
CC-21	0.45	Nivel bajo de contaminación
CC-22	1.9	Nivel moderado de contaminación

Región del Maule

Tabla 99. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región del Maule.

Identificación	C_{deg}	Categoría
MUESTRA MAULE	3.8	Contaminación baja
ML-01	3.8	Contaminación baja
ML-03	3.0	Contaminación baja
ML-04	5.5	Contaminación moderada
ML-05	2.2	Contaminación baja
ML-06	3.6	Contaminación baja
ML-07	5.6	Contaminación moderada
ML-08	4.2	Contaminación baja
ML-10	6.2	Contaminación moderada
ML-11	3.8	Contaminación baja
ML-13	2.2	Contaminación baja
ML-14	4.3	Contaminación baja
ML-16	3.7	Contaminación baja
ML-17	4.6	Contaminación baja
ML-18	3.4	Contaminación baja
ML-19	3.6	Contaminación baja
ML-23	3.1	Contaminación baja
ML-24	2.5	Contaminación baja
ML-25	3.9	Contaminación baja
ML-26	1.7	Contaminación baja
ML-27	1.7	Contaminación baja
ML-28	3.0	Contaminación baja
ML-29	2.2	Contaminación baja
ML-02	2.8	Contaminación baja
ML-09	4.0	Contaminación baja
ML-12	2.9	Contaminación baja
ML-15	3.9	Contaminación baja
ML-20	2.6	Contaminación baja
ML-21	1.9	Contaminación baja
ML-22	1.7	Contaminación baja
ML-30	2.5	Contaminación baja
ML-31	3.3	Contaminación baja

Tabla 100. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región del Maule.

Identificación	IPI	Categoría
MUESTRA MAULE	0.76	Nivel bajo de contaminación
ML-01	0.76	Nivel bajo de contaminación
ML-03	0.60	Nivel bajo de contaminación
ML-04	1.1	Nivel moderado de contaminación
ML-05	0.44	Nivel bajo de contaminación
ML-06	0.71	Nivel bajo de contaminación
ML-07	1.1	Nivel moderado de contaminación
ML-08	0.83	Nivel bajo de contaminación
ML-10	1.2	Nivel moderado de contaminación
ML-11	0.75	Nivel bajo de contaminación
ML-13	0.45	Nivel bajo de contaminación
ML-14	0.87	Nivel bajo de contaminación
ML-16	0.73	Nivel bajo de contaminación
ML-17	0.93	Nivel bajo de contaminación
ML-18	0.68	Nivel bajo de contaminación
ML-19	0.71	Nivel bajo de contaminación
ML-23	0.61	Nivel bajo de contaminación
ML-24	0.49	Nivel bajo de contaminación
ML-25	0.78	Nivel bajo de contaminación
ML-26	0.34	Nivel bajo de contaminación
ML-27	0.34	Nivel bajo de contaminación
ML-28	0.60	Nivel bajo de contaminación
ML-29	0.44	Nivel bajo de contaminación
ML-02	0.56	Nivel bajo de contaminación
ML-09	0.79	Nivel bajo de contaminación
ML-12	0.58	Nivel bajo de contaminación
ML-15	0.79	Nivel bajo de contaminación
ML-20	0.52	Nivel bajo de contaminación
ML-21	0.38	Nivel bajo de contaminación
ML-22	0.34	Nivel bajo de contaminación
ML-30	0.50	Nivel bajo de contaminación
ML-31	0.67	Nivel bajo de contaminación

Región del Bío Bío

Tabla 101. Grado de contaminación de muestras extraídas de la Región del Bío Bío.

Identificación	C_{deg}	Categoría
MUESTRA DE SACOS VIII REGION BIO BIO	5.6	Contaminación moderada
BB-01	3.8	Contaminación baja
BB-02	3.7	Contaminación baja
BB-03	2.6	Contaminación baja
BB-04	3.1	Contaminación baja
BB-05	2.2	Contaminación baja
BB-06	4.0	Contaminación baja
BB-07	4.1	Contaminación baja
BB-08	4.0	Contaminación baja
BB-09	2.0	Contaminación baja
BB-10	3.7	Contaminación baja
BB-11	2.8	Contaminación baja
BB-12	4.1	Contaminación baja
BB-13	1.9	Contaminación baja
BB-14	3.0	Contaminación baja
BB-15	2.3	Contaminación baja
BB-16	3.7	Contaminación baja
BB-17	5.0	Contaminación baja
BB-18	2.5	Contaminación baja
BB-19	3.6	Contaminación baja
BB-20	3.1	Contaminación baja
BB-21	2.9	Contaminación baja
BB-22	3.3	Contaminación baja
BB-23	2.2	Contaminación baja
BB-24	4.7	Contaminación baja
BB-25	2.8	Contaminación baja
BB-26	3.3	Contaminación baja
BB-27	2.1	Contaminación baja
BB-28	3.7	Contaminación baja
BB-29	3.1	Contaminación baja
BB-30	3.4	Contaminación baja

Tabla 102. Índice integrado de polución de muestras extraídas de la Región del Bío Bío.

Identificación	IPI	Categoría
MUESTRA DE SACOS VIII REGION BIO BIO	1.1	Nivel moderado de contaminación
BB-01	0.76	Nivel bajo de contaminación
BB-02	0.75	Nivel bajo de contaminación
BB-03	0.52	Nivel bajo de contaminación
BB-04	0.61	Nivel bajo de contaminación
BB-05	0.44	Nivel bajo de contaminación
BB-06	0.80	Nivel bajo de contaminación
BB-07	0.82	Nivel bajo de contaminación
BB-08	0.80	Nivel bajo de contaminación
BB-09	0.40	Nivel bajo de contaminación
BB-10	0.74	Nivel bajo de contaminación
BB-11	0.55	Nivel bajo de contaminación
BB-12	0.81	Nivel bajo de contaminación
BB-13	0.39	Nivel bajo de contaminación
BB-14	0.60	Nivel bajo de contaminación
BB-15	0.45	Nivel bajo de contaminación
BB-16	0.74	Nivel bajo de contaminación
BB-17	1.0	Nivel bajo de contaminación
BB-18	0.51	Nivel bajo de contaminación
BB-19	0.72	Nivel bajo de contaminación
BB-20	0.63	Nivel bajo de contaminación
BB-21	0.59	Nivel bajo de contaminación
BB-22	0.66	Nivel bajo de contaminación
BB-23	0.44	Nivel bajo de contaminación
BB-24	0.94	Nivel bajo de contaminación
BB-25	0.56	Nivel bajo de contaminación
BB-26	0.66	Nivel bajo de contaminación
BB-27	0.43	Nivel bajo de contaminación
BB-28	0.74	Nivel bajo de contaminación
BB-29	0.62	Nivel bajo de contaminación
BB-30	0.68	Nivel bajo de contaminación