

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil



**CONCENTRACIONES Y DISTRIBUCIONES DE METALES EN SUELOS DE LA
COMUNA DE TALCAHUANO**

MANUEL ALVAREZ MALDONADO

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

Dr. PEDRO TUME ZAPATA

Profesor Informante

Dr. ROBERT KING

RESUMEN

Talcahuano es una ciudad situada en la provincia de Concepción, Chile, donde se obtuvieron un total de 140 muestras para distintas profundidades de suelo 0-10 cm, 10-20 cm y 150 cm que se recolectaron para investigar la concentración espacial de los elementos, Cromo (Cr), Níquel (Ni), Li (Litio) y Hierro (Fe). El tipo de suelo se determinó mediante un análisis textural de suelos, el que determinó que mayoritariamente se está en presencia de un suelo Arenoso y Areno Francoso.

Utilizando un tratamiento estadístico de los datos se determinaron medias, medianas y valores máximos para cada elemento, además de identificar valores anómalos utilizando la gráfica de box plot.

Para determinar los lugares considerados sospechosamente contaminados se calculó la línea base a partir de 6 modelos diferentes. Un lugar se dice contaminado cuando se incorporan en él agentes contaminantes, tóxicos o infecciosos que, al exceder los límites tolerables causan directa o indirectamente una pérdida reversible o irreversible de las condiciones normales del medio y de sus componentes.

Con los valores de concentración y sus respectivas ubicaciones geográficas se procedió al análisis geoestadístico, el cual fue apoyado por los softwares Microsoft Excel 2007-2013, IBM SSPS 19, Vesper 1.6, y ArcGis 10.1, para generar el modelo de predicción geoestadística.

ABSTRACT

Talcahuano is a city located in the province of Concepción, Chile, where a total of 140 samples for different soil depths 0-10 cm, 10-20 cm and 150 cm were collected to investigate the spatial concentration were obtained elements, Cr, Ni, Li and Fe, soil type was determined by a soil textural analysis, which found that the majority are in the presence of an Sandy soil and Sandy loamy.

Using a statistical treatment of the data mean, median and maximum values for each element were determined, and identify outliers using the box plot graph.

To identify contaminated sites suspiciously considered the baseline from 6 different models. A said contaminated place when incorporated therein pollutants, toxic or infectious agents that exceed tolerable limits to directly or indirectly cause a reversible loss or calculated irreversible normal environmental conditions and its components.

With the concentration values and their respective geographic locations proceeded to geostatistical analysis, which was supported by Microsoft Excel 2007-2013, IBM SPSS 19, Vesper 1.6 and ArcGIS 10.1 software to generate geostatistical model prediction.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, mi abuela, mi padre, mis hermanos, a **FONDECYT** y a todos los que me apoyaron de alguna u otra forma.

INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCION	1
1.1 Objetivo Generales.....	3
1.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Área de estudio.....	4
1.4 Geología.....	5
1.5 Clima.....	6
1.6 Muestras.....	6
1.7 Zona de toma de muestras.....	7
1.8 Toma de muestras, almacenamiento y tratamiento.	8
CAPITULO 2: MARCO TEORICO	9
2.1 Estadística Descriptiva.....	9
2.1.1 Medidas de tendencia central.....	9
2.1.2 Medidas de dispersión.....	10
2.1.3 Box Plot.....	10
2.2 Otros Parámetros Estadísticos	12
2.3 Correlaciones	12
2.4 Background Values. (Valores de fondo).....	13
2.4.1 Métodos para determinar valores de fondo.....	14
2.5 Análisis Textural de las muestras	17
2.5.1 Textura - Análisis de Campo.....	18
2.6 Geoestadística.....	19
2.6.1 Hipótesis de la Geoestadística.....	20
2.7 Variograma.....	20
2.7.1 Efecto pepita (Nugget) (Co).....	21
2.7.2 Meseta (Sill) (C).....	21
2.7.3 Rango.....	21
2.7.4 Modelos Teóricos más importantes.....	21
2.7.5 Análisis de anisotropía.	22
2.8 Kriging.....	22
2.9 Herramientas para el Análisis.....	23
CAPITULO 3: METODOLOGÍA.....	25
3.1 Procedimiento de Análisis	25
3.2 Análisis exploratorio de Base de Datos	25
3.3 Análisis Textural de las muestras	25

3.4	Análisis Estadístico	25
3.5	Análisis Geoestadístico con ArcGIS versión 10.1 (Módulo Geostatistical Analyst)	26
3.6	Selección de Variograma	26
CAPITULO 4: RESULTADOS		28
4.1	Resultados	28
4.2	Análisis Textural del Suelo	28
4.3	Gráficos Estadísticos Carbono Total. (Ct)	31
4.4	Gráficos Estadísticos pH	33
4.5	Gráficos Estadísticos Capacidad de intercambio Catiónico (CIC)	35
4.6	Gráficos Estadísticos Carbono Orgánico (O.C)	37
4.7	Estadística Descriptiva propiedades del suelo	39
4.8	Gráficos estadísticos Cromo (Cr)	44
4.9	Gráficos estadísticos de Níquel (Ni)	46
4.10	Gráficos estadísticos de Litio (Li)	48
4.11	Gráficos estadísticos de Hierro (Fe)	50
4.12	Estadística Descriptiva de los metales	52
4.13	Valores de Fondo	54
4.14	Uso de Suelo	57
4.15	Distribución Espacial de los elementos	70
4.15.1	Análisis de ajuste de distribución	70
4.15.2	Selección de Variograma	72
4.15.3	Análisis de Tendencia	75
4.15.4	Mapa de distribución espacial	77
CAPITULO: 5 DISCUSIONES		83
CAPITULO: 6 CONCLUSIONES		94
BIBLIOGRAFIA		95
ANEXOS		98
Geoestadística con programa ArcGis 10.1		108
•	Archivo de entrada	108
•	Seleccionar coordenadas del proyecto	109
•	Cargar shape	110
•	Cargar estaciones desde el archivo Excel	112
•	Accionar el Módulo de Geoestadística	114
•	Cargar los datos para ser analizados	114
•	Análisis datos en el Histograma	114
•	Exploración de Trend Analysis	116

- **Análisis Geoestadístico de los datos**..... 117
- **Elección Modelo Variograma**..... 127

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PRINCIPALES COMPONENTES DEL SUELO (TARBUCK, 2005)	1
FIGURA 2: MAPA DE UBICACIÓN DE LA COMUNA DE TALCAHUANO.....	4
FIGURA 3: GEOLOGÍA DE SUPERFICIE DEL GRAN CONCEPCIÓN MODIFICADO DE GALLI (1967) Y GAJARDO (1981)	5
FIGURA 4: ROSA DE LOS VIENTOS PROMEDIO ANUAL DE LA CIUDAD DE TALCAHUANO (DEPT. GEOFISICA UDEC.).....	6
FIGURA 5: MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE MUESTRAS A ANALIZAR EN TALCAHUANO. 7	
FIGURA 6: DIAGRAMA EXPLICATIVO DE UN BOX PLOT. (Q1, Q2, Q3, LÍMITE INFERIOR Y SUPERIOR)	11
FIGURA 7: TRIANGULO TEXTURAL DEL SUELO, SEGÚN USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE).....	18
FIGURA 8: ELEMENTOS DEL VARIOGRAMA.	20
FIGURA 9: COMPARACIÓN MODELOS EXPONENCIAL, ESFÉRICO Y GAUSSIANO.....	22
FIGURA 10: DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA METODOLOGÍA UTILIZADA PARA VALORES DE FONDO.....	27
FIGURA 11: DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LOS MAPAS DE PREDICCIÓN	27
FIGURA 12: TRIANGULO TEXTURAL DE SUELO, CON LAS 140 MUESTRAS DE TALCAHUANO EN EL ESTRATO TOP SOIL..	28
FIGURA 13: TRIANGULO TEXTURAL DE SUELO, CON LAS 140 MUESTRAS DE TALCAHUANO EN EL ESTRATO SUB SOIL..	29
FIGURA 14: TRIANGULO TEXTURAL DE SUELO, CON LAS 140 MUESTRAS DE TALCAHUANO EN EL ESTRATO DEEP SOIL	29
FIGURA 15: TRIANGULO TEXTURAL DE SUELO, CON LAS 420 MUESTRAS DE TALCAHUANO EN EL ESTRATO ALL SOIL..	30
FIGURA 16: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CARBONO TOTAL EN TOP SOIL.....	31
FIGURA 17: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CARBONO TOTAL EN SUB SOIL.....	31
FIGURA 18: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CARBONO TOTAL EN DEEP SOIL.	32
FIGURA 19: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CARBONO TOTAL EN ALL SOIL.	32
FIGURA 20: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA PH EN TOP SOIL.....	33
FIGURA 21: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA PH EN SUB SOIL.	33
FIGURA 22: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA PH EN DEEP SOIL.....	34
FIGURA 23: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA PH EN ALL SOIL	34
FIGURA 24: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CIC EN TOP SOIL.....	35
FIGURA 25: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CIC EN SUB SOIL.....	35
FIGURA 26: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CIC EN DEEP SOIL.....	36
FIGURA 27: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CIC EN ALL SOIL.....	36
FIGURA 28: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA O.C EN TOP SOIL.....	37
FIGURA 29: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA O.C EN SUB SOIL.....	37
FIGURA 30: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA O.C EN DEEP SOIL.....	38
FIGURA 31: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA O.C EN ALL SOIL.....	38
FIGURA 32: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CR EN TOP SOIL.	44
FIGURA 33: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CR EN SUB SOIL.....	44

FIGURA 34: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CR EN DEEP SOIL.....	45
FIGURA 35: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA CR EN ALL SOIL.....	45
FIGURA 36: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA NI EN TOP SOIL.....	46
FIGURA 37: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA NI EN SUB SOIL.....	46
FIGURA 38: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA NI EN DEEP SOIL.....	47
FIGURA 39: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA NI EN ALL SOIL.....	47
FIGURA 40: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA LI EN TOP SOIL.....	48
FIGURA 41: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA LI EN SUB SOIL.....	48
FIGURA 42: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA LI EN DEEP SOIL.....	49
FIGURA 43: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA LI EN ALL SOIL.....	49
FIGURA 44: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA FE EN TOP SOIL.....	50
FIGURA 45: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA FE EN SUB SOIL.....	50
FIGURA 46: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA FE EN DEEP SOIL.....	51
FIGURA 47: A) HISTOGRAMA B) BOX PLOT C) PORCENTAJE ACUMULADO; PARA FE EN ALL SOIL.....	51
FIGURA 48: MAPA DE DISTRIBUCIÓN SEGÚN USO DE SUELO.....	57
FIGURA 49: GRADOS DE POLUCIÓN SEGÚN ZHANG ET AL. (2011).....	62
FIGURA 50: UBICACIÓN MUESTRAS POTENCIALMENTE PELIGROSAS EN TOP SOIL.....	66
FIGURA 51: UBICACIÓN MUESTRAS POTENCIALMENTE PELIGROSAS EN SUB SOIL.....	67
FIGURA 52: UBICACIÓN MUESTRAS POTENCIALMENTE PELIGROSAS EN DEEP SOIL.....	68
FIGURA 53: UBICACIÓN MUESTRAS POTENCIALMENTE PELIGROSAS ALL SOIL.....	69
FIGURA 54: RESUMEN DE LA DISTRIBUCIÓN DE AJUSTE PARA CADA ELEMENTO EN TOP SOIL.....	70
FIGURA 55: RESUMEN DE LA DISTRIBUCIÓN DE AJUSTE PARA CADA ELEMENTO EN SUB SOIL.....	71
FIGURA 56: RESUMEN DE LA DISTRIBUCIÓN DE AJUSTE PARA CADA ELEMENTO EN DEEP SOIL.....	71
FIGURA 57: GRÁFICOS DE TENDENCIA TOP SOIL.....	75
FIGURA 58: GRÁFICOS DE TENDENCIA SUB SOIL.....	76
FIGURA 59: GRÁFICOS DE TENDENCIA DEEP SOIL.....	76
FIGURA 60: MAPA PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL CROMO TOP SOIL.....	77
FIGURA 61: MAPA PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL CROMO SUB SOIL.....	77
FIGURA 62: MAPA PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL CROMO DEEP SOIL.....	78
FIGURA 63: MAPA PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL NÍQUEL TOP SOIL.....	78
FIGURA 64: MAPA PREDICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL NÍQUEL SUB SOIL.....	79
FIGURA 65: MAPA PREDICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL NÍQUEL DEEP SOIL.....	79
FIGURA 66: MAPA PREDICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LITIO TOP SOIL.....	80
FIGURA 67: MAPA PREDICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LITIO SUB SOIL.....	80
FIGURA 68: MAPA PREDICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LITIO DEEP SOIL.....	81
FIGURA 69: MAPA PREDICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL HIERRO TOP SOIL.....	81
FIGURA 70: MAPA PREDICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL HIERRO SUB SOIL.....	82
FIGURA 71: MAPA PREDICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL HIERRO DEEP SOIL.....	82
FIGURA 72: MAPA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL CR PARA TOP (IZQ.), SUB (DER.) Y DEEP SOIL (ABAJO).....	89

FIGURA 73: MAPA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LI PARA TOP (IZQ.), SUB (DER.) Y DEEP SOIL (ABAJO).....	90
FIGURA 74: MAPA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL FE PARA TOP (IZQ.), SUB (DER.) Y DEEP SOIL (ABAJO).....	91
FIGURA 75: MAPA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL NI PARA TOP (IZQ.), SUB (DER.) Y DEEP SOIL (ABAJO).....	92
FIGURA 76: ABRIENDO IBM SPSS.....	98
FIGURA 77: SELECCIÓN DE PLANILLA CON DATOS.....	98
FIGURA 78: SELECCIÓN DE ELEMENTOS A ANALIZAR.....	99
FIGURA 79: DATOS CARGADOS EN SPSS.....	99
FIGURA 80: SELECCIÓN DEL TIPO DE VARIABLE.....	100
FIGURA 81: ANÁLISIS DE FRECUENCIA.....	100
FIGURA 82: SELECCIÓN DE ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS.....	101
FIGURA 83: ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS E HISTOGRAMA.....	101
FIGURA 84: VARIABLE A ELEGIR PARA GENERAR GRAFICO BOX PLOT.....	102
FIGURA 85. GRAFICO BOX PLOT.....	102
FIGURA 86: GENERADOR DE GRÁFICOS.....	103
FIGURA 87: GENERAR GRÁFICO DE DISPERSIÓN SIMPLE.....	103
FIGURA 88: GRAFICO PORCENTAJE ACUMULADO.....	104
FIGURA 89: DATOS A INGRESAR PARA DETERMINA LA CORRELACIÓN.....	104
FIGURA 90: SELECCIONAR TIPO DE PRUEBA.....	105
FIGURA 91: RESULTADOS ARROJADOS POR EL PROGRAMA.....	105
FIGURA 92: DATOS A INGRESAR PARA LA PRUEBA DE WILCOXON.....	106
FIGURA 93: SELECCIONAR PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS, 2 MUESTRAS RELACIONADAS.....	106
FIGURA 94: INGRESAR VARIABLES A RELACIONAR.....	107
FIGURA 95: RESULTADOS ARROJADOS POR EL PROGRAMA.....	107
FIGURA 96: TABLA CON DATOS A INGRESAR A ARCMAP.....	108
FIGURA 97: RUTA PARA ENCONTRAR MÓDULO DE ARCGIS, ARCMAP.....	108
FIGURA 98: PROPIEDADES DEL MARCO DE DATOS.....	109
FIGURA 99: ELEGIR SISTEMA DE COORDENADAS.....	109
FIGURA 100: SELECCIÓN DE EXTENSIONES.....	110
FIGURA 101: CARGAR SHAPE.....	110
FIGURA 102: SELECCIÓN DE SHAPE.....	111
FIGURA 103: SHAPE CARGADO DE LA COMUNA DE TALCAHUANO.....	111
FIGURA 104: CARGAR ARCHIVO GEORREFERENCIADO.....	112
FIGURA 105: BUSCAR ARCHIVO CON PUNTOS.....	112
FIGURA 106: CONFIGURAR COORDENADAS DE LOS PUNTOS.....	112
FIGURA 107: SELECCIONAR DATO Y HUSO HORARIO.....	113
FIGURA 108: DATOS CARGADOS EN ARCMAP.....	113
FIGURA 109: CARPETAS CARGADAS.....	114
FIGURA 110: CARGAR HISTOGRAMA.....	114
FIGURA 111: HISTOGRAMA DE PUNTOS TLH.....	115

FIGURA 112: HISTOGRAMA PUNTOS TLH TRANSFORMADOS LOG	115
FIGURA 113: CARGAR TREND ANALYSIS	116
FIGURA 114: VENTANA DEL TREND ANALYSIS	116
FIGURA 115: CARGAR GEOSTATISTICAL WIZARD.....	117
FIGURA 116: PARÁMETROS A ELEGIR.....	117
FIGURA 117: PARÁMETROS A ELEGIR.....	118
FIGURA 118: GRAFICO DE ANISOTROPÍA DIRECCIONAL.....	119
FIGURA 119: PARÁMETROS A ELEGIR EN VARIOGRAMA.....	119
FIGURA 120: VENTANA DE SEARCHING NEIGHBORHOOD.....	120
FIGURA 121: VALIDACIÓN CRUZADA.....	121
FIGURA 122: RESUMEN DE PARÁMETROS SELECCIONADOS.....	121
FIGURA 123: RESULTADO DEL MAPA PREDICCIÓN “PUNTOS TLH” POR KRIGING SIMPLE, ESFÉRICO.....	122
FIGURA 124: EXTRAPOLAR MAPA.....	122
FIGURA 125: EXTENDER MAPA.....	123
FIGURA 126: TRANSPARENCIA DEL GRÁFICO.....	123
FIGURA 127: PROPIEDADES DE LOS COLORES.....	124
FIGURA 128: RESUMEN DEL MODELO KRIGING SIMPLE.....	124
FIGURA 129: PROPIEDADES DE LOS LAYERS.....	125
FIGURA 130: DATA FRAME PROPERTIES.....	125
FIGURA 131: DATA FRAME CLIPPING.....	126
FIGURA 132: RESULTADO DEL RECORTE DE CAPAS.....	126
FIGURA 133: PROGRAMA VESPER.....	127
FIGURA 134: MÓDULO VARIOGRAMA PROGRAMA VESPER.....	128
FIGURA 135: SELECCIÓN DATOS PARA VARIOGRAMAS.....	128
FIGURA 136: SELECCIÓN DE ELEMENTO A EVALUAR.....	129
FIGURA 137: VARIOGRAMA GENERADO.....	129
FIGURA 138: VARIOGRAMA OPTIMIZADO.....	130

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: PARÁMETROS DE LAS PROPIEDADES ESTADÍSTICAS DEL SUELO TOP SOIL.....	39
TABLA 2: PARÁMETROS DE LAS PROPIEDADES ESTADÍSTICAS DEL SUELO SUB SOIL.....	39
TABLA 3: PARÁMETROS DE LAS PROPIEDADES ESTADÍSTICAS DEL SUELO DEEP SOIL.....	39
TABLA 4: PARÁMETROS DE LAS PROPIEDADES ESTADÍSTICAS DEL SUELO ALL SOIL.....	39
TABLA 5: TABLA DE CLASIFICACIÓN DE PH PARA TODAS LAS PROFUNDIDADES.....	40
TABLA 6: ESTADÍSTICA SIMPLE DE LAS MUESTRAS DE TOP SOIL.....	41
TABLA 7: ESTADÍSTICA SIMPLE DE LAS MUESTRAS DE SUB SOIL.....	41

TABLA 8: ESTADÍSTICA SIMPLE DE LAS MUESTRAS DE DEEP SOIL.....	41
TABLA 9: ESTADÍSTICA SIMPLE DE LAS MUESTRAS DE ALL SOIL.....	41
TABLA 10: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA Ct, PH, CIC Y O.C EN TOP SOIL.....	42
TABLA 11: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA Ct, PH, CIC Y O.C EN SUB SOIL.....	42
TABLA 12: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA Ct, PH, CIC Y O.C EN DEEP SOIL.....	42
TABLA 13: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA Ct, PH, CIC Y O.C EN ALL SOIL.....	42
TABLA 14: PRUEBA DE WILCOXON PARA Ct, PH, CIC Y O.C	43
TABLA 15: ESTADÍSTICA SIMPLE PARA LAS MUESTRAS DE TOP SOIL	52
TABLA 16: ESTADÍSTICA SIMPLE PARA LAS MUESTRAS DE SUB SOIL.....	52
TABLA 17: ESTADÍSTICA SIMPLE PARA LAS MUESTRAS DE DEEP SOIL.....	52
TABLA 18: ESTADÍSTICA SIMPLE PARA LAS MUESTRAS DE ALL SOIL.....	52
TABLA 19: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA CR, NI, LI Y FE EN TOP SOIL.....	53
TABLA 20: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA CR, NI, LI Y FE EN SUB SOIL.....	53
TABLA 21: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA CR, NI, LI Y FE EN DEEP SOIL.....	53
TABLA 22: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA CR, NI, LI Y FE EN ALL SOIL	53
TABLA 23: PRUEBA DE WILCOXON.....	54
TABLA 24: VALORES DE FONDO PARA CROMO (Nº= NÚMERO DE MUESTRAS QUE ESTÁN SOBREVALORES DE FONDO)..	54
TABLA 25: VALORES DE FONDO PARA NÍQUEL (Nº= NÚMERO DE MUESTRAS QUE ESTÁN SOBREVALORES DE FONDO)..	55
TABLA 26: VALORES DE FONDO PARA LITIO (Nº= NÚMERO DE MUESTRAS QUE ESTÁN SOBREVALORES DE FONDO).....	55
TABLA 27: VALORES DE FONDO PARA HIERRO (Nº= NÚMERO DE MUESTRAS QUE ESTÁN SOBREVALORES DE FONDO)..	55
TABLA 28: RESUMEN DE % DE MUESTRAS SOBRE VALORES DE FONDO SEGÚN MÉTODO, PARA TODOS LOS SUELOS.	56
TABLA 29: USO DE SUELO DE LAS MUESTRAS TOMADAS.....	57
TABLA 30: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA SEGÚN USO DE SUELO PARA TOP SOIL.....	58
TABLA 31: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA SEGÚN USO DE SUELO PARA SUB SOIL.....	58
TABLA 32: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA SEGÚN USO DE SUELO PARA DEEP SOIL.....	58
TABLA 33: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA USO DE SUELO COMERCIAL ENTRE TOP, SUB Y DEEP SOIL.....	59
TABLA 34: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA USO DE SUELO INDUSTRIAL ENTRE TOP, SUB Y DEEP SOIL.....	59
TABLA 35: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA USO DE SUELO RESIDENCIAL ENTRE TOP, SUB Y DEEP SOIL.....	59
TABLA 36: PRUEBA DE WILCOXON PARA USO DE SUELO.....	60
TABLA 37: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA ELEMENTOS EN USO DE SUELO COMERCIAL	61
TABLA 38: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA ELEMENTOS EN USO DE SUELO INDUSTRIAL	61
TABLA 39: CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA ELEMENTOS EN USO DE SUELO RESIDENCIAL.....	61
TABLA 40: FACTOR DE CONTAMINACIÓN PARA TOP Y SUB SOIL	63
TABLA 41: FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO PARA TOP Y SUB SOIL.	63
TABLA 42: % DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO EL ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN PARA TOP, SUB Y DEEP SOIL	64
TABLA 43: PORCENTAJES DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO EL PLI PARA TOP, SUB Y DEEP SOIL	64
TABLA 44 RESUMEN DE LAS MUESTRAS QUE SOBRE PASAN LA LÍNEA BASE.	65
TABLA 45: RESUMEN DE ERRORES PARA DIFERENTES MODELOS DE VARIOGRAMA EN VESPER PARA TOP SOIL.....	72
TABLA 46: RESUMEN DE ERRORES PARA DIFERENTES MODELOS DE VARIOGRAMA EN VESPER PARA SUB SOIL.....	72

TABLA 47: RESUMEN DE ERRORES PARA DIFERENTES MODELOS DE VARIOGRAMA EN VESPER PARA DEEP SOIL.....	72
TABLA 48: RESUMEN DE LOS MODELOS SELECCIONADO PARA LOS DIFERENTES SUELOS CON VESPER.	72
TABLA 49: RESUMEN DE ERRORES PARA DIFERENTES MODELOS DE VARIOGRAMA EN ARCGIS PARA TOP SOIL.....	73
TABLA 50: RESUMEN DE ERRORES PARA DIFERENTES MODELOS DE VARIOGRAMA EN ARCGIS PARA SUB SOIL.....	73
TABLA 51: RESUMEN DE ERRORES PARA DIFERENTES MODELOS DE VARIOGRAMA EN ARCGIS PARA DEEP SOIL.	73
TABLA 52: RESUMEN DE LOS MODELOS SELECCIONADO PARA LOS DIFERENTES SUELOS CON ARCGIS.	73
TABLA 53: RESUMEN DE LOS MODELOS SELECCIONADO.....	73
TABLA 54: TABLA EFECTO PEPITA TOP SOIL.....	74
TABLA 55: TABLA EFECTO PEPITA SUB SOIL.....	74
TABLA 56: TABLA EFECTO PEPITA DEEP SOIL.....	75
TABLA 57: ESTADÍSTICOS PRINCIPALES PARÁMETROS DEL SUELO.....	83
TABLA 58: ESTADÍSTICOS PRINCIPALES PARA LOS ELEMENTOS.....	84
TABLA 59: MEDIANA DE LAS CONCENTRACIONES (MGKG-1) EN CIUDADES PUERTOS DEL MUNDO.....	85
TABLA 60: VALORES UMBRALES DE CONCENTRACIONES EN SUELOS DE TALCAHUANO.....	85
TABLA 61: (%) DE MUESTRAS POR ENCIMA DEL LÍMITE DE CONCENTRACIONES EN SUELOS DE TALCAHUANO.....	86
TABLA 62: VALORES MEDIOS SEGÚN USO DE SUELO PARA LOS ELEMENTOS.....	86
TABLA 63: ÍNDICES DE CARGA CONTAMINANTE PARA CADA PROFUNDIDAD.	87
TABLA 64: ÍNDICE DE GEOACUMULACION PARA LOS ELEMENTOS EN LAS DISTINTAS PROFUNDIDADES.	88

ECUACIONES

ECUACIÓN 1.....	13
ECUACIÓN 2.....	13
ECUACIÓN 3.....	15
ECUACIÓN 4.....	15
ECUACIÓN 5.....	16
ECUACIÓN 6.....	16
ECUACIÓN 7.....	16
ECUACIÓN 8.....	17

CAPITULO 1: INTRODUCCION

El suelo es un componente esencial del medio ambiente en el que se desarrolla la vida, es frágil, de difícil y larga recuperación (tarda desde miles a cientos de miles de años en formarse), y de extensión limitada. Un uso inadecuado puede provocar su pérdida irreparable en tan sólo algunos años. (Carta Mundial de los Suelos., Nairobi 1977)

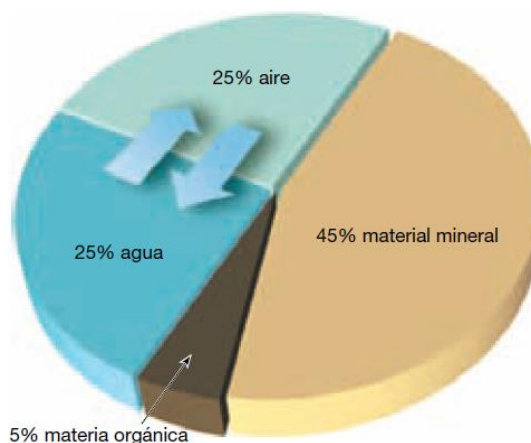


Figura 1: Principales componentes del suelo (Tarbuck, 2005)

Los suelos constan de cuatro grandes componentes: materia mineral, materia orgánica, agua y aire, así como lo muestra la Figura 1. Los constituyentes minerales (inorgánicos) de los suelos normalmente están compuestos de pequeños fragmentos de roca y minerales de varias clases. Las cuatro clases más importantes de partículas inorgánicas son: grava, arena, limo y arcilla. La materia orgánica del suelo representa la acumulación de las plantas destruidas y de los residuos animales. (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS))

El aumento continuo de la población, su concentración progresiva en grandes centros urbanos, el desarrollo industrial y agrícola ocasionan, día a día, la contaminación de los suelos. Se habla de contaminación del suelo cuando a este se introducen sustancias o elementos de tipo sólido, líquido o gaseoso que ocasionan que se afecten a las plantas, la vida animal y la salud humana. Para la salud humana su riesgo es primariamente de salud, de forma directa y al entrar en contacto con fuentes de agua potable.

Algunos de estos sitios en donde se aprecia mejor la contaminación de suelos son los parques industriales, los basureros municipales, las zonas urbanas muy pobladas y los depósitos de químicos, combustibles y aceites, etc., sin dejar de mencionar las zonas agrícolas donde se utilizan los fertilizantes o pesticidas de manera excesiva. (Crnkovic et al. 2006)

El contenido y distribución de elementos químicos en los suelos contaminados depende de: Tipo de suelo, la composición de las rocas, el clima y uso de la topografía. Por lo que existe una gran variabilidad en los valores de referencia globales y locales de un lugar.

La precisión con la que pueden conocerse las propiedades del suelo en cualquier punto depende en buena medida del grado de variación del área elegida para el muestreo, es decir de la heterogeneidad de la misma. Por lo tanto, conforme aumenta la heterogeneidad del suelo, la precisión con que pueden conocerse sus propiedades y el comportamiento del mismo tiende a decrecer. (Ulloa Guitián et al, 2003).

Por otra parte, el número de observaciones que se puede efectuar en el área de muestreo es limitado, por lo que frecuentemente es necesario extrapolar las propiedades de puntos en que son conocidas a otros en que se desconocen, y ello está críticamente condicionado por la variabilidad en la unidad representativa.

Geoestadística

Es una técnica que combina la estadística y la geografía y que conjuntamente con el uso de técnicas informáticas buscan realizar análisis en base a estimaciones, predicciones de variables y simulaciones de su comportamiento en el espacio (Myers, 1987). La modelación espacial indica la dependencia entre las medidas de diferentes sitios, dicha modelación concierne con la predicción espacial en la que se realizan tres procesos básicos: el análisis exploratorio de datos, el análisis estructural y la predicción espacial. (Cressie, 1989)

Análisis exploratorio de datos

Realizadas las observaciones se procede al análisis en base a gráficos (histogramas y diagramas de caja) y medidas estadísticas descriptivas (de tendencia central y de dispersión) donde se identifican valores atípicos de las observaciones, relaciones entre las variables y la tendencia.

Análisis estructural de datos

Es la fase donde se determina la correlación o dependencia espacial, y la estructura del conjunto de datos medidos de una variable regionalizada. Para este fin se acude a la herramienta conocida como semivariograma la cual representa de manera gráfica todas las varianzas en función de las distancias entre las muestras (Wackernagel, 1995). Los parámetros del semivariograma son el efecto pepita, la meseta y el rango (David, 1977). Posterior al cálculo del semivariograma experimental se escoge el modelo que más se ajuste a la función calculada; el modelo puede ser de tipo esférico, exponencial, gaussiano o potencia. (Warrick et al., 1986). Estos determinarán el modelo teórico al que tendrá que ser ajustado el semivariograma y sus respectivos parámetros.

Predicción espacial

Corresponde a la operación de calcular el valor de la variable en cualquier otro punto que no haya sido medido, para lo cual se requiere encontrar la distribución conjunta de las variables aleatorias y el predictor que más se ajuste. El Kriging es el interpolador geoestadístico más utilizado ya que su principal objetivo es el de disminuir el error cuadrático medio de predicción, permitiendo al analista contar con un modelo fiable. (Myers, 1991)

1.1 Objetivo Generales

- Medir la concentración y estimar la distribución espacial de Cr, Ni, Li y Fe en suelos de la comuna de Talcahuano. (8° Región, Chile).

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la línea de base del Cr, Ni, Li y Fe en suelos de la comuna de Talcahuano
- Determinar la relación entre las propiedades del suelo y los elementos.
- Confeccionar mapas de la distribución espacial para los elementos usando Kriging ordinario.

1.3 Área de estudio

Talcahuano es una comuna de la 8° Región, ubicada a 600 Km. al sur de la capital Santiago, con una superficie de 148,2 km² y 47,04 km² de superficie urbana; la población estimada es de 177 752 habitantes, 100% considerada urbana. (Municipalidad Talcahuano, 2012)

La comuna de Talcahuano es parte del Concepción metropolitano, que es la capital regional de la 8° región de Chile y se encuentra en la zona central de Chile continental como muestra la Figura 2.



Figura 2: Mapa de ubicación de la comuna de Talcahuano.

El parque industrial de la región abarca industrias metalúrgicas, pesqueras, petroquímicas, fábricas de cemento, el astillero naval ASMAR y otras. La mayoría de ellas se encuentra cerca de áreas habitadas.

1.4 Geología

En el área amplia de Concepción Metropolitana, dentro de la cual la ciudad de Talcahuano está localizada, la geología general consiste en rocas metamórficas, ígneas intrusivos, sedimentarias clásticas y depósitos fluviales inconsolidados. Las rocas más antiguas de la zona, corresponde a rocas metamórficas y ígneas intrusivas agrupadas dentro de una unidad denominada el "Basamento Cristalino". La unidad tiene una edad del Carbonífero Superior. Sobre el basamento en forma discordante, son rocas sedimentarias clásticas de la Formación Quiriquina (Superior Cretáceo) y la Formación Curanilahue (Eoceno). Sobre las formaciones Quiriquina y Curanilahue de forma discordante son las unidades de conglomerados y areniscas de la Formación Andalién (Plio-Pleistoceno). La mayor parte del área superficial de Concepción Metropolitana y Talcahuano está localizada en el fondo del valle Mochita, que forma una llanura geomorfológica intensa en la región. Esta llanura es principalmente formada de material arenoso (hasta 150 m de espesor en ciertos sitios), proporcionado por los ríos Bio Bio y Andalien. La intensa ocupación humana en gran parte del espacio físico que abarca la zona, ha traído como consecuencia, la transformación total del paisaje natural. La llanura del Valle Mochita ha sido el foco principal de la ocupación humana y desarrollado urbano.

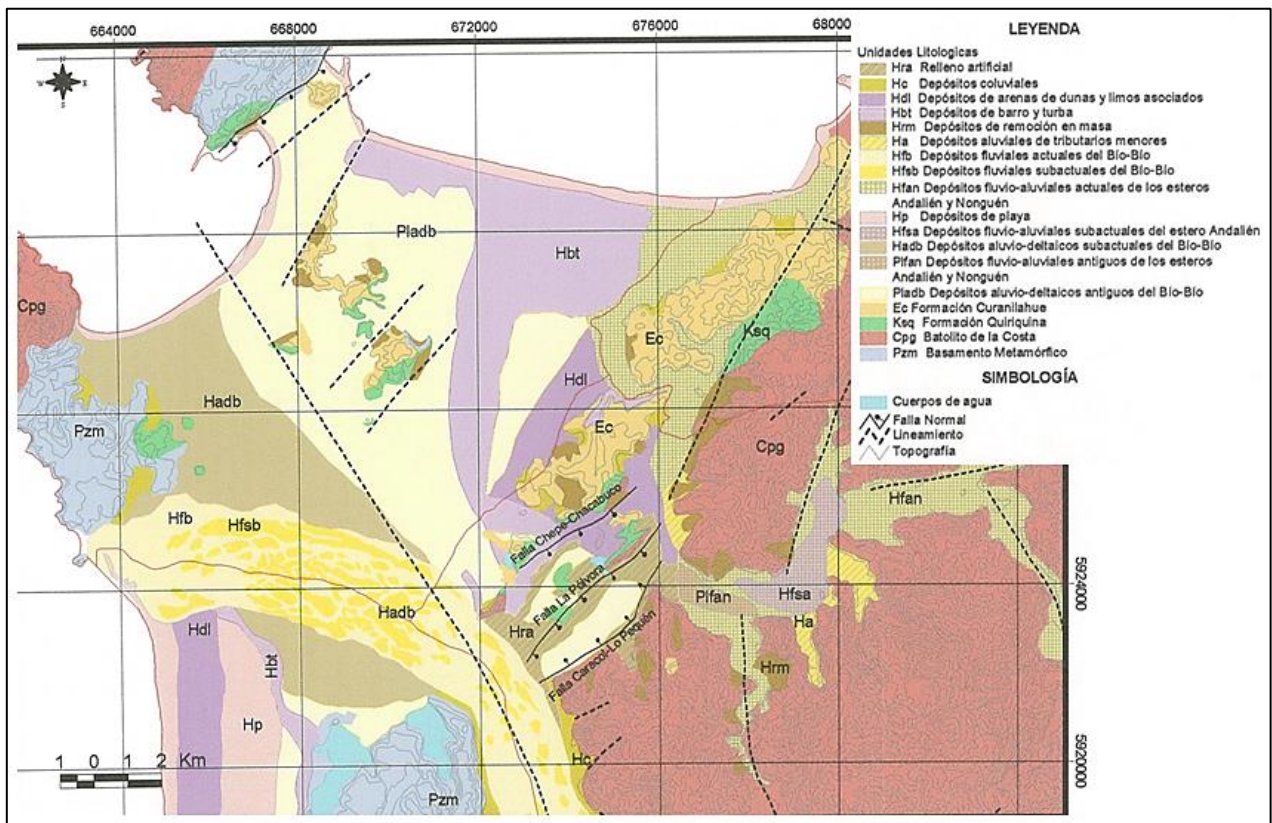


Figura 3: Geología de superficie del Gran Concepción modificado de Galli (1967) y Gajardo (1981)

1.5 Clima

Con base en los datos proporcionados por el Dirección Meteorológica de Chile, la precipitación media anual en la región es del orden de 1.130 mm. por año. El mes más cálido es enero con una máxima promedio de 22.1 °C y el más fresco es julio con una baja promedio de 5,9 °C. La máxima temperatura registrada en verano es 33,2 °C y la temperatura más baja ha sido -6,0 °C. En el período de seis meses entre mayo y octubre, el área recibe aproximadamente el 83 % de su precipitación anual total. (Dirección Meteorológica de Chile, 2012).

Los vientos predominantes en la comuna de Talcahuano son del suroeste (Ver Figura 4) y cuando cambia su dirección a viento norte indica la aproximación de un sistema frontal con bajas presiones.

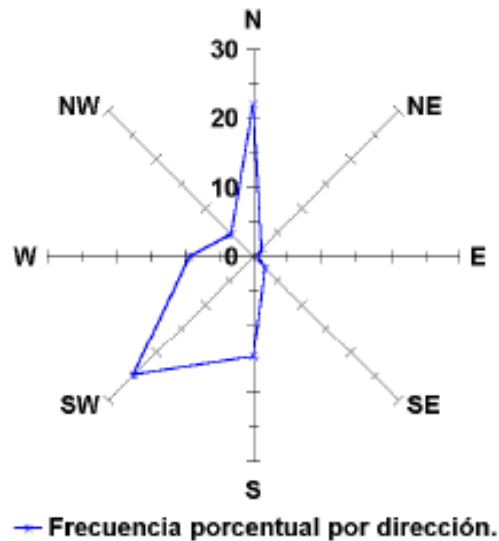


Figura 4: Rosa de los vientos promedio anual de la ciudad de Talcahuano (Dept.Geofisica Udec.)

1.6 Muestras

Definición de Metales pesados

Un metal se considera pesado si está a concentraciones inferiores al 0,1 %, es decir inferior a 1000 mg/Kg de suelo. (Adriano 1986).

En este caso estudiaremos los siguientes metales pesados: Cr, Ni, Li y Fe, que son los disponibles por el momento.

1.7 Zona de toma de muestras.

La figura 5 muestra la distribución de puntos de extracción, en donde se tomaron en cuenta factores como: espaciamiento, uso de suelo y zonificación. Se recogieron muestras de todas las zonas más representativas de la comuna, así como también en establecimientos educacionales (Colegios, institutos, etc.), zonas de recreación y áreas verdes.

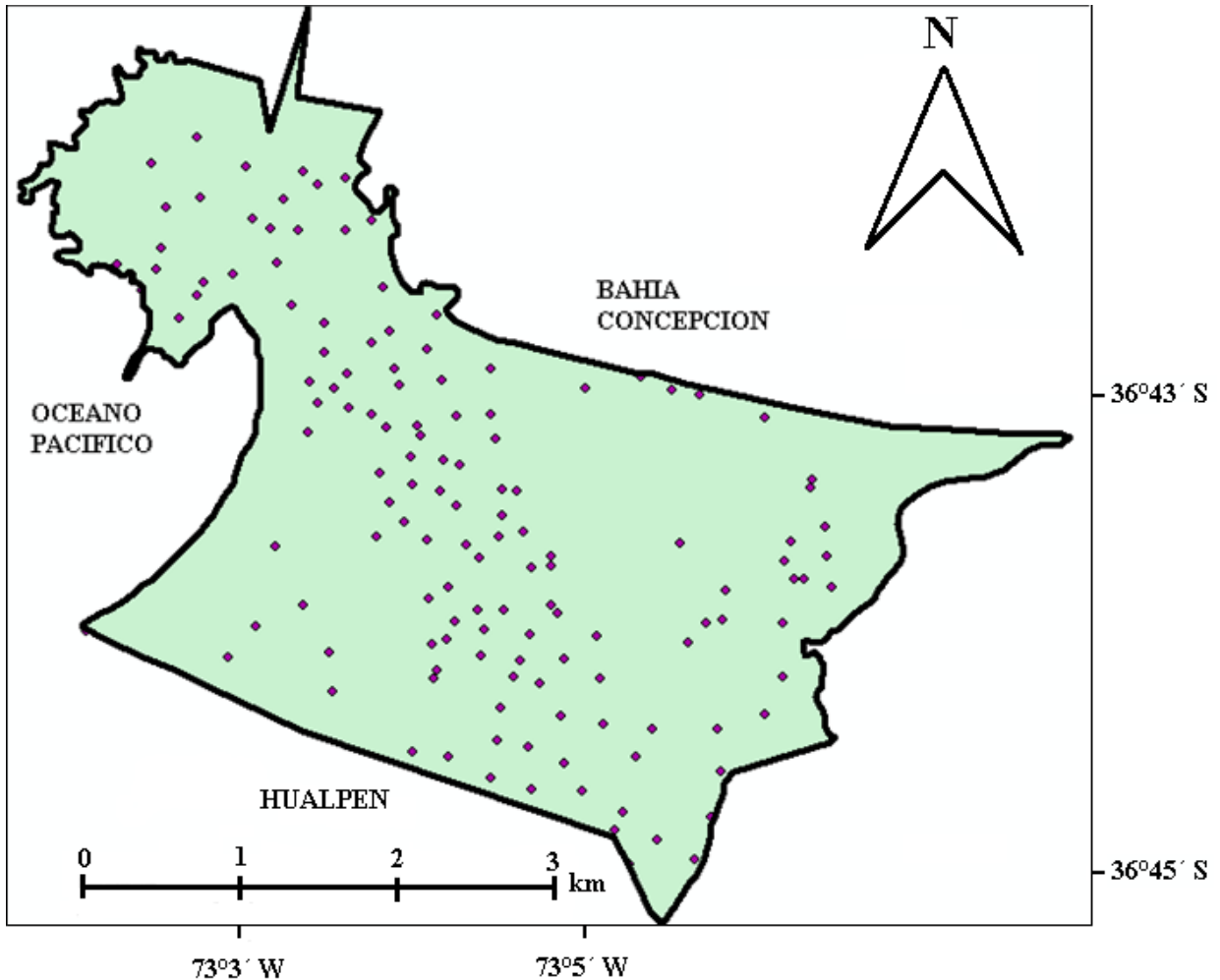


Figura 5: Mapa de la distribución de los puntos de extracción de muestras a analizar en Talcahuano.

1.8 Toma de muestras, almacenamiento y tratamiento.

Se tomaron 140 muestras en triplicado de estratos de suelo, de 0 a 10 cm (Top Soil), 10 a 20 cm. (Sub Soil) y de 150 cm. (Deep Soil) entre 2013 y 2014. Las muestras se secaron a temperatura ambiente, tamizaron en un tamiz de acero inoxidable de 2 mm y posteriormente se almacenaron en bolsas de plástico.

Las muestras almacenadas se utilizaron en la determinación de los elementos traza, con la fracción fina, (material menor a 2 mm), se determinan los siguiente parámetros; porcentaje arena, arcilla y limos, Carbono Orgánico, Carbonatos totales, pH en agua, capacidad de intercambio catiónico CIC. Todos estos procesos se realizaron en los laboratorios de la facultad de Ciencias de la UCSC.

Las muestras de suelo fueron secadas en estufa durante al menos 24 h a 40°C y manualmente tamizadas a través de un tamiz de nylon de 2 mm antes del análisis. La distribución de tamaño de partículas se determinó por el método de la pipeta, el pH se midió en agua usando una relación Agua-Suelo de dispersión de 1: 2,5 (MAPA, 1994)

La materia orgánica (OM) contenida del suelo se determinó por el método Walkley-Black (Burt, 2004). La Capacidad de intercambio catiónico (CIC) se estimó utilizando el método de la saturación con NH_4Cl 0,2 M (Reeve y Sumner, 1971).

CAPITULO 2: MARCO TEORICO

Para el desarrollo de esta investigación se recurrió al estudio estadístico y Geoestadístico, utilizando los contenidos que se describen a continuación:

2.1 Estadística Descriptiva

La estadística descriptiva es un conjunto de procedimientos que tienen por objeto presentar grupos de datos por medio de tablas, gráficos y/o medidas de resumen. De acuerdo a lo anterior, la estadística descriptiva es la primera etapa a desarrollar en un análisis de información.

Una vez recogidos los valores que toman las variables de nuestro estudio (datos), se procederá al análisis descriptivo de los mismos.

Dentro de la estadística descriptiva determinaremos las medidas de tendencia central, y de dispersión.

2.1.1 Medidas de tendencia central

Corresponden a valores que generalmente se ubican en la parte central de un conjunto de datos que nos ayudan a resumir la información en un sólo número dentro de las cuales encontramos la Media, Moda, Mediana y Media Geométrica.

Media: También llamada promedio de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

Moda: Es el valor con una mayor frecuencia en una distribución de datos.

Mediana: Representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados.

Media Geométrica: Es la raíz N -ésima del producto de los N elementos.

2.1.2 Medidas de dispersión

Conocidas como medidas de variabilidad, muestran la variabilidad de una distribución, indicando por medio de un número, si las diferentes puntuaciones de una variable están muy alejadas de la mediana o media. Cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad, cuanto menor sea, más homogénea será a la mediana o media.

Desviación típica (S): Es una medida que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.

Coefficiente de Variación (CV): permite comparar la dispersión entre dos poblaciones distintas e incluso, comparar la variación producto de dos variables.

Percentiles: Los Percentiles son 99 valores que dividen en cien partes iguales el conjunto de datos ordenados. En este estudio se usaron solo los percentiles 5, 25, 50, 75, 95.

Histograma: Un histograma es un resumen gráfico de la variación de un conjunto de datos. Se usaron los histogramas con curva de normalidad para apreciar mejor su tendencia.

MAD: Es la mediana de la diferencia entre el valor de la muestra y la mediana de la población.

2.1.3 Box Plot

Es un gráfico representativo de las distribuciones de un conjunto de datos (ver Figura 6), presenta información sobre la tendencia central, dispersión y simetría de estos, además de identificar los valores atípicos. En su construcción se usan cinco medidas descriptivas: mediana, primer cuartil, tercer cuartil, valor máximo y valor mínimo.

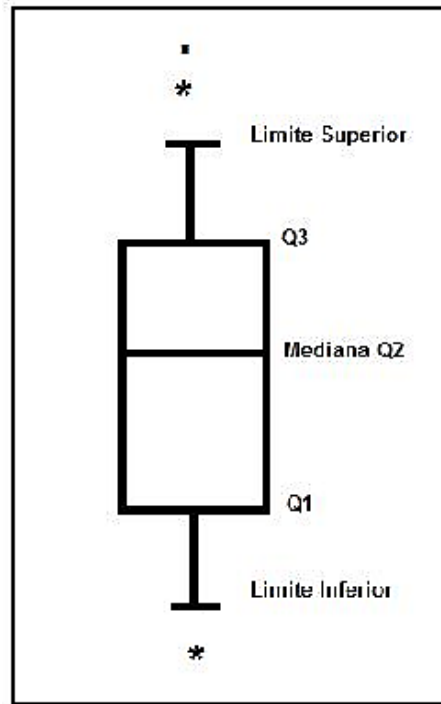


Figura 6: Diagrama explicativo de un Box Plot. (Q1, Q2, Q3, límite inferior y superior)

Límite superior: Es el extremo superior del bigote. Valores por encima de este límite se consideran atípicos.

Tercer cuartil (Q3): Por debajo de este valor se encuentran como máximo el 75% de los datos.

Mediana: Coincide con el segundo cuartil ver figura 2. Divide a la distribución en dos partes iguales.

Primer cuartil (Q1): Por debajo de este valor se encuentra como máximo el 25% de los datos.

Límite inferior: Es el extremo inferior del gráfico. Los datos por debajo de este valor se consideran atípicos.

Valores atípicos (*): En la Figura 2 son los registros que están apartados del cuerpo principal de datos. Pueden representar efectos de errores de medición o registro.

2.2 Otros Parámetros Estadísticos

Rango: Corresponde a la longitud que existe entre los valores máximo y mínimo de los datos en estudio.

Asimetría: También se denomina sesgo, cuyo coeficiente mide la asimetría de una distribución y corresponde al tercer momento en torno a la media, así:

$C_s = 0 \rightarrow$ Distribución simétrica.

$C_s > 0 \rightarrow$ Sesgo (+), la función de densidad muestra una cola larga hacia la derecha.

$C_s < 0 \rightarrow$ Sesgo (-), la función de densidad muestra una cola larga hacia la Izquierda.

Curtosis: Este parámetro permite identificar la forma de la curvatura de la distribución, así:

$C_s = 0 \rightarrow$ Distribución normal.

$C_s > 0 \rightarrow$ Distribución más puntiaguda que la normal.

$C_s < 0 \rightarrow$ Distribución menos puntiaguda que la normal.

2.3 Correlaciones

Correlación: Es la medida del grado de relación entre dos o más variables, puede ser directa (+), inversa (-) o nula.

Prueba de Wilcoxon: Esta prueba compara las distribuciones de dos variables relacionadas mediante el cálculo de las diferencias para todos los casos y clasifica las diferencias como positivas, negativas o empatadas. Si dichas variables tienen una distribución similar, el número de diferencias positivas y negativas no difiere de forma significativa. Si $Z_t > 0,05$ se dice que hay relación entre las variables. (Frank Wilcoxon, 1945)(Ecuación 1)

$$Z_t = \frac{T * \bar{X}_T}{\sigma_T} \quad \bar{X}_T = \frac{N(N+1)}{4} \quad \sigma_T = \frac{\sqrt{N(N+1)(2*N+1)}}{24} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

Z_t = valor Z de la T de Wilcoxon.

T = valor estadístico de Wilcoxon.

\bar{X}_T = promedio de la T de Wilcoxon

σ_T = desviación estándar de la T de Wilcoxon

N = Tamaño de Muestra

Correlación de Spearman: Cuando las variables no tienen una distribución semejante a la de la curva normal el coeficiente idóneo para evaluar la intensidad de la asociación es el descrito por Spearman. (Siegel Sidney, 1972)(Ver Ecuación 2)

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2-1)} \quad t = \frac{\rho}{\sqrt{(1-\rho^2)/(n-2)}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde D es la diferencia entre los (x - y) y N es el número de parejas.

- Cuando el coeficiente t es cercano a +1 las variables se asocian directamente.
- Cuando el coeficiente t es cercano a -1 las variables se asocian inversamente.
- Cuando t es cercano a 0 amabas variables no se asociación.

2.4 Background Values. (Valores de fondo)

De acuerdo con la definición de contaminación de ISO (2005) "La contaminación no es más que una sustancia presente en o por encima de los valores de fondo". El nivel de fondo o contenido de un elemento químico es la suma de geoquímica natural y procesos pedogenéticos incluyendo la entrada de fuente difusa moderada (ISO, 2005).

Los Valores de referencia Regulados (RRV) para evaluar la contaminación del suelo son un enfoque diferente en la contaminación del suelo. El RRV introduce la noción de toxicidad. Ellos se basan generalmente en valores de fondo en combinación con los niveles de toxicidad (Desaules, 2012). Como siempre y cuando los contaminantes en el suelo permanecen por debajo de los valores objetivos establecidos, el suelo se considera que es apto para el uso de la tierra.

Una vez que el suelo alcanza los valores de intervención, su funcionalidad para los seres humanos, las plantas y / o animales está en peligro o limitados; cuando se superan estos valores, la contaminación se dice que es grave.

2.4.1 Métodos para determinar valores de fondo

En Redon et al (2013) y Tume et al (2014), se presentan varios métodos para determinar la línea base de diversos medios ambientes las cuales se dividen en: Background Values ($Media+2\sigma$, Mediana+2MAD, Dutch Guideline Target) y Polluted Values (Upper Whisker, Enrichment Factor, Dutch Guideline Intervention).

Background Values : Método Media + 2σ

Después de la eliminación de los valores atípicos (valores $>$ upperwhisker), se calculó la concentración media y la desviación estándar para establecer los niveles de referencia utilizando Media + 2SD (Gil et al. 2004; Micó et al, 2007).

Background Values : Mediana + 2MAD

La mediana y la desviación Absoluta respecto de la mediana (Median Absolute Deviation) se calculan a partir del conjunto de datos original. Todos los valores dentro de la mediana + 2MAD están permitidos. (Reimann y Garrett, 2005)

Background Values : Dutch Guideline Target e Intervention

Las normas Holandeses son uno de los valores de referencia de contaminantes del medio ambiente (es decir, las concentraciones en el medio ambiente) que se utilizan en la remediación ambiental, investigación y limpieza. Los valores objetivo, los valores de intervención y niveles indicativos para los metales dependen del contenido de arcilla y / o el contenido de materia orgánica.

En la evaluación de la calidad del suelo los valores para un suelo estándar se convierten a valores que se aplican a la tierra real preocupados sobre la base de la materia orgánica medida y el

contenido de arcilla. Los valores convertidos se pueden comparar con la medida concentraciones en el suelo. (Dutch Target and Intervention Values, 2000) (Ver ecuación 3)

$$(SW, IW)_b = (SW, IW)_{sb} * \frac{[A + (B * \%Clay) + (C * \%O.M)]}{[A + (B * 25) + (C * 10)]}$$

Ecuación 3

Dónde:

$(SW, IW)_b$ = Valor objetivo o valor de intervención que el terreno a evaluar.

$(SW, IW)_{sb}$ = Valor objetivo o valor de intervención del suelo estándar.

$\%Clay$ = % de arcilla presente en la muestra.

$\%O.M$ = % de materia orgánica presente en la muestra.

A, B, C = Valores constantes según elemento (Ver a continuación)

Elemento	A	B	C
Cromo	50	2	0
Níquel	10	1	0

Elemento	Valor Objetivo Estándar	Valor Intervención Estándar
Cromo	100	380
Níquel	35	210

Polluted Values: Upper Whisker

El diagrama de cajas o boxplot es un método gráfico para representar la distribución de una muestra univariada unimodal. Sintetiza información sobre la posición, dispersión y forma de la distribución a través de cinco estadísticos descriptivos: la mediana, el primer y tercer cuartil y la mínima y máxima observación, llamada también límite superior o Upper Whisker es el extremo superior. Valores por encima de este límite se consideran atípicos.

Se calcula según Ecuación 4:

$$UW = Q_3 + 1,5 * IQR$$

Ecuación 4

Dónde:

Q_3 = 3° Cuartil

IQR = Distancia inter cuartil ($Q_3 - Q_1$)

Polluted Values: Enrichment Factor

El factor de enriquecimiento E.F (Chester y Stoner, 1973; Hernández et al., 2003) se utilizó para evaluar la contribución antropogénica al contenido Metales pesados en la colección de suelo compuesto. El EF se define como la relación de concentración de un elemento traza considerado (X) a un elemento de referencia (Y) en una muestra dada, dividido por la misma relación en un material de referencia (Ecuación 5). La referencia elegida como elemento (Y) fue el Hierro, ya que es el elemento más conservador de los estudiados.

Se define como lo siguiente:

$$EF = ([Metal]/[Normalizador])_{Muestra} / ([Metal]/[Normalizador])_{Valor\ de\ fondo}$$

Ecuación 5

The pollution load index

El índice de carga contaminante (PLI), (Tomlinson et al. 1980) es la media geométrica del factor de concentración (CF) (Ecuación 6), que estandariza la concentración observada de metales con su concentración de fondo. El PLI (Ecuación 7) es una medida para el nivel general de todos los metales combinado en un sitio dado. Se calcula de la siguiente manera:

$$CF = \frac{\text{Concentracion de Metales observada}}{\text{Concentracion de valores de fondo del mismo metal}}$$

Ecuación 6

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 * CF_2 \dots \dots * CF_n}$$

Ecuación 7

Donde CF es el factor de contaminación y n es el número de parámetros

The index of geoaccumulation

El índice de geoacumulación (Ecuación 8) mide el grado de contaminación de sustancias orgánicas e inorgánicas en un suelo. Permite informar de un valor numérico que presenta un intervalo donde el suelo puede considerarse contaminado por sustancias orgánicas e inorgánicas (Loska et al., 1997; Moreira y Boaventura, 2003).

$$I_{\text{Geo}} = \log_2 \left(\frac{C_n}{0.2 * B_n} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde C_n es la concentración del metal en estudio y B_n es el valor de referencia, 0,2 sirve para minimizar el efecto de las posibles variaciones en los niveles base, los cuales se pueden deber a las variaciones litológicas en el suelo.

Los valores de referencia vienen dados por Taylor (1964), no se encontraron valores de referencia para el Litio.

Cr = 100 (mg/kg) Ni = 75 (mg/kg) Fe = 56,3 (mg/kg)

2.5 Análisis Textural de las muestras

La textura del suelo es la proporción en la que se encuentran distribuidas variadas partículas elementales que pueden conformar un sustrato. Según sea el tamaño, porosidad o absorción del agua en la partícula del suelo o sustrato, puede clasificarse en 3 grupos básicos que son: la arena, el limo y las arcillas.

Los triángulos texturales son gráficos que facilitan la interpretación de la granulometría del suelo (Ver Figura 7). El triángulo utilizado en Chile, es el diseñado por el USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos)

Habitualmente la textura del suelo se puede representar en un diagrama ternario, en el cual se emplean 31 reglas trigonométricas para representar en el plano coordenadas tridimensionales que se refieren a distintas combinaciones de clases granulométricas cuya suma es constante 100. La textura se puede dividir en grupos más amplios como suelos de texturas livianas, texturas medias y texturas pesadas. (Soil Survey Staff, 1975)

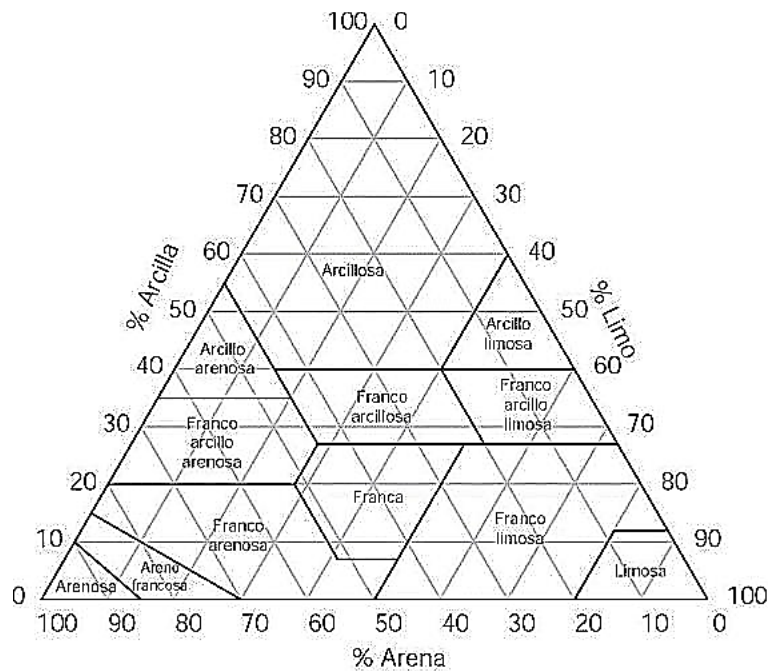


Figura 7: Triángulo textural del suelo, según USDA (United States Department of Agriculture)

Texturas Livianas: Arenosa, areno franco, franco arenosa, franco arenosa fina.

Texturas Medias: Franco arenosa muy fina, franco, franco limoso, franco arcillo limoso.

Texturas Pesadas: Franco arcillosos, arcilloso arenoso, arcilloso limoso, arcilloso.

2.5.1 Textura - Análisis de Campo

Es la proporción de las distintas partículas-arena, limo y arcilla - bajo la dimensión de 2 mm. Se puede medir por medio de métodos de laboratorio y de campo. En este caso se verá el método de campo. Consiste en tomar una muestra de suelo, humedecerla hasta capacidad de campo y restregarla entre los dedos pulgar, índice y mayor y sentir su suavidad, además que otras características se separan la muestra entre sí.

Los suelos de Talcahuano son de tipo Arenoso, Areno Francosa, Franco Arenoso, Franco, Franco Limosa

Arenosa: La arena es suelta de granos simple.

Arenoso francosa: Es un suelo que tiene bastante arena pero también cuenta con suficiente cantidad de arcilla y limo.

Franco arenoso: La proporción de arcilla y limo aumenta lo que le da mucha más cohesión.

Franco: Corresponde a la mejor textura, tiene proporciones adecuadas de arena, limo y arcilla, que le da al suelo una excelente condición para el uso para plantas.

Franco limoso: En estas texturas empieza a mostrarse la suavidad del limo. El suelo presenta más consistencia y es más suave entre los dedos.

2.6 Geoestadística

Geoestadística es una ciencia que comprende un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que está distribuida en el espacio de una forma continua, es conocida también como estadística espacial. La aplicación de la geoestadística está orientada a los Sistemas de Información Geográfica SIG (Conjunto de programas informáticos que sirven para captar, almacenar, recuperar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos espaciales), por esto se la puede definir también como estadística relacionada con datos geográficos.

Para realiza un trabajo estadístico es necesario llevar a cabo los pasos siguientes:

- **Análisis Exploratorio de los datos:** Básicamente es una etapa de aplicación de la estadística, se estudian los datos puros sin tener en cuenta su distribución geográfica en el espacio. Se verifica la normalidad de los datos y se aplica la transformada de los datos si fuera necesario, para conseguir que los datos se ajusten a una distribución normal.
- **Análisis Estructural:** Se estudia la continuidad espacial, es indispensable conocer la distribución geográfica de las variables para realizar esta etapa del estudio. Se calculan los variogramas que expliquen la variabilidad espacial y se ajustan a un variograma teórico.
- **Kriging:** Estima la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales. (Véliz Morán, 2006).

Cuando el objetivo es hacer predicción, la geoestadística opera básicamente en dos etapas. La primera es el análisis estructural y la segunda fase por medio de la técnica kriging.

Este es un proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales. Los pesos asignados a los valores muestrales son apropiadamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de muestreo (Petitgas, 1996).

2.6.1 Hipótesis de la Geoestadística.

Debido a que la forma en que se presenta la información inicial es muy diversa, según Alfonso (1989b), aspecto que analiza Journel y Huijbregts (1978), para aplicar la geoestadística es necesario aceptar el cumplimiento de ciertas hipótesis:

- Estacionalidad Estricta.
- Estacionalidad de Segundo Orden.
- Hipótesis Intrínseca.
- Procesos Cuasiestacionarios.

2.7 Variograma.

El variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre una zona dada y modela como dos valores en el espacio se ponen en correlación. El variograma está relacionado con la dirección y la distancia (h), posee una meseta, efecto pepita y tiene un rango como se aprecia en la Figura 8.

El variograma se ve limitado porque es un estadístico de dos puntos y además porque es extremadamente sensible a valores extremos. (Véliz Morán, 2006).

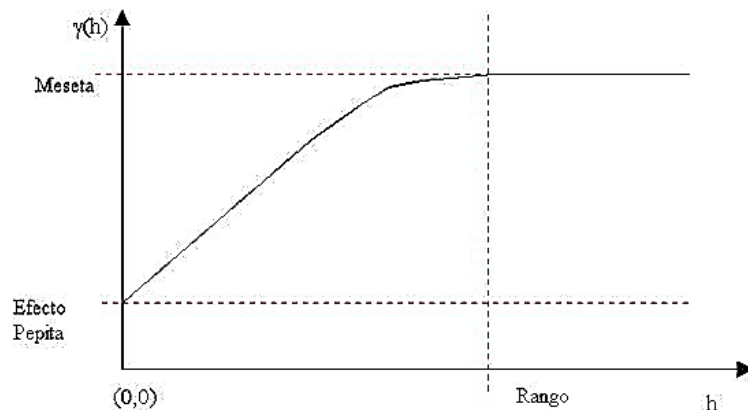


Figura 8: Elementos del Variograma.

2.7.1 Efecto pepita (Nugget) (Co).

Por lo general, el variograma no tiende a cero como lo hace la distancia h , el efecto nugget es una discontinuidad de salto en el origen conocido también como efecto Pepita, representa la discontinuidad en el semivariograma para distancias que sean menores que la menor distancia dada entre los puntos muestrales. (Véliz Morán, 2006).

2.7.2 Meseta (Sill) (C).

El Sill conocido también como La “Meseta” es el valor máximo que alcanza el semivariograma cuando la variable es estacionaria. (Véliz Morán, 2006).

2.7.3 Rango.

Conocido también como Alcance, el Rango es la distancia a la cual el variograma se estabiliza y las muestras se relacionan espacialmente. (Véliz Morán, 2006).

2.7.4 Modelos Teóricos más importantes.

Dos características importantes en el modelado de variogramas son:

- Su comportamiento en el origen, el cual puede ser lineal, parabólico y con efecto pepita
- La presencia o ausencia de meseta

Los modelos teóricos pueden ser clasificados según Krajewsky, (1993), Journel, (1978) y David, (1977) en:

Modelos con meseta, con comportamiento lineal en el origen.

- a) Esférico.
- b) Exponencial, con comportamiento parabólico en el origen
- c) Gaussiano.

La figura 9 muestra la comparación de los modelos Exponencial, Esférico y Gaussiano. La línea punteada vertical representa el rango en el caso del modelo esférico y el rango efectivo en el de los modelos exponencial y gaussiano. Este tiene un valor de 210 respecto a una escala simulada entre 0 y 300. El valor de la meseta es 30 y el de la pepita 0. El 95% de la meseta es igual a 28.5.

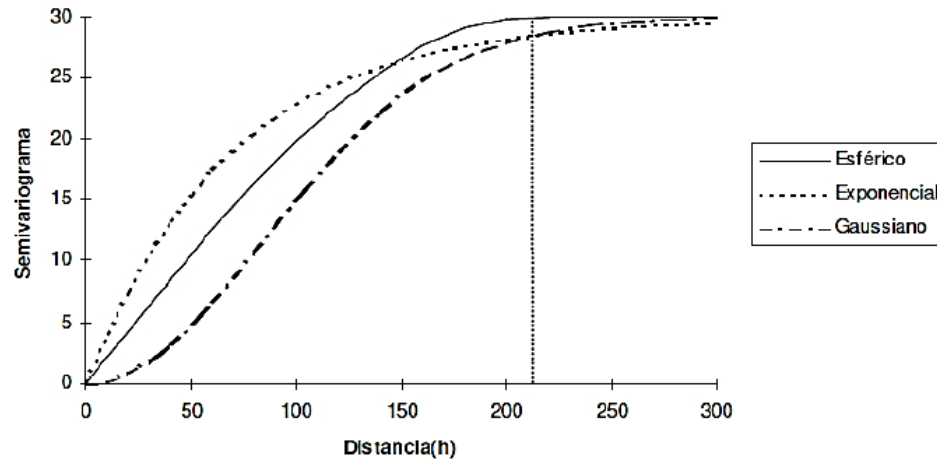


Figura 9: Comparación modelos Exponencial, Esférico y Gaussiano.

2.7.5 Análisis de anisotropía.

Como se conoce el variograma describe las características de la variable regionalizada en una dirección, pero estas características pueden variar en otras direcciones como se discute en Krajewsky, (1993), Journel, (1978) y David, (1977), haciéndose necesaria la aplicación de esta forma un análisis de anisotropía. Cuando el variograma calculado en diferentes direcciones (Norte-Sur, Este-Oeste, y en direcciones intermedias de 45°, con tolerancia de 22.5°, etc.), muestra similar comportamiento, se dice que es isotrópico. Cuando muestra diferentes comportamientos es anisotrópico (Krajewsky, 1993).

2.8 Kriging

La palabra Kriging procede del nombre del geólogo sudafricano D. G. Krige, cuyos trabajos en la predicción de reservas de oro, realizados en la década del cincuenta, suelen considerarse como pioneros en los métodos de interpolación espacial. Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción.

Existen varios tipos de Kriging. En este trabajo se utilizaron solo el Kriging Simple y ordinario.

- **Kriging simple:** En el kriging simple se supone que la media poblacional es nula o conocida, asume que las medias locales son relativamente constantes e iguales a la medida poblacional. La media poblacional es usada como un factor en cada estimación local, a lo largo con las muestras en la vecindad local.
- **Kriging ordinario:** Es el método más utilizado para situaciones ambientales, este método es la técnica más popular que elimina la necesidad de conocer el valor medio. Este método asume que las medias locales no son conocidas, por lo cual solo usa las muestra en la vecindad local para la estimación. La media varía suave y localmente.

2.9 Herramientas para el Análisis.

Se describen las características y ventajas que proporcionan los softwares que se utilizan para el desarrollo de un análisis Geoestadístico.

2.9.1 ArcGis 10.1 Software para el Análisis Geoestadístico.

ArcGis es un software geoestadístico para visualizar, crear, manipular y gestionar información geográfica.

Posee herramientas muy potentes, como lo son los módulos de Geostatistical Analyst en donde se pueden escoger determinados modelos de interpolación. Adicionalmente, posee una herramienta denominada Spatial Analyst, la cual es muy completa y de gran ayuda para llevar a cabo la exploración de los datos. Además, posee la opción de generar los mapas predictivos y de error de las predicciones.

2.9.2 Vesper 1.6 Software para generar variogramas.

Este software posee una herramienta muy potente para generar, editar y visualizar variogramas, el objetivo de utilizar este programa, es por su capacidad de poder tener un mejor control visual, lo cual ayuda enormemente en la calidad de la aproximación de los variogramas como también en los tiempos de generación.

En la investigación, solo se utilizara el módulo de Variograma que incluye dicho programa.

2.9.3 IBM SPSS Software para determinar la estadística descriptiva y gráficos

Es uno de los programas estadísticos más conocidos teniendo en cuenta su capacidad para trabajar con grandes bases de datos y un sencillo interface para la mayoría de los análisis. Aquí una pequeña lista de cosas que se pueden hacer mediante este programa:

- Estadística Descriptiva: Mediana, Media, Desviación Estándar, Percentiles, etc.
- Gráficos: Histograma, Box-Plot, Curva de frecuencia.
- Correlaciones: Prueba de Wilcoxon, Correlación de Spearman.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA.

3.1 Procedimiento de Análisis

El estudio se compone por una base de datos a utilizar la cual posee 420 muestras de suelo de la comuna de Talcahuano, a estas 420 muestras se les aplicaron: Análisis exploratorio, Análisis de Textura, Análisis Estadístico y Análisis Geoestadístico.

En el ANEXO se muestran los procedimientos paso a paso de los distintos análisis realizados.

3.2 Análisis exploratorio de Base de Datos

Se generaron Diagramas de caja, Histograma y Frecuencia Acumulada con el fin de entender el comportamiento gráfico de las variables a estudiar (Cromo, Níquel, Litio, Hierro y parámetros del suelo) y compararlos visualmente entre ellos.

Las figuras 75-87 (ANEXO) muestran como obtener Diagramas de caja, Histograma y Frecuencia Acumulada con los que se trabajó en este estudio

3.3 Análisis Textural de las muestras

Se clasifico de manera básica el suelo según el método del triángulo textural. El método del triángulo textural se basa en el sistema que aplica el USDA según el tamaño de las partículas, en el que se emplea la clasificación siguiente:

- Arena, todas las partículas cuyo tamaño varía entre 0,005-2 mm
- Limo, todas las partículas cuyo tamaño varía de 0,002 a 0,05 mm;
- Arcilla, todas las partículas de menos de 0,002 mm.

3.4 Análisis Estadístico

Para comenzar se realizará un análisis descriptivo en el software IBM SPSS v.19, del cual se obtendrá: histograma, porcentaje acumulado, box plot y correlaciones entre los elementos Cr, Ni, Li, Fe además de parámetros del suelo como Carbono total (Ct), Carbono Orgánico (C), pH, Capacidad de intercambio Catiónico (CIC).

También se analizara la estadística univariada en específica: Media, Media Geométrica, Mediana, Moda, Desviación Estándar, Asimetría, Curtosis, Coeficiente de Variación, Rango, Percentiles, MAD y Coeficiente de robustez. Con el fin de poder determinar los diferentes métodos para los valores background de cada elemento.

Las figuras 88-90 (ANEXO) muestran como determinar la correlación de Spearman y las Figuras 91-94 (ANEXO) como obtener la Prueba de Wilcoxon.

3.5 Análisis Geoestadístico con ArcGIS versión 10.1 (Módulo Geostatistical Analyst)

Mediante ArcGis se realizó un completo análisis de predicciones geoestadística mediante la técnica del Kriging Simple para cada uno de los metales en estudio de una manera más sencilla gracias a la interfaz que este posee. En forma complementaria se generaron mapas espaciales los cuales contienen éstas estimaciones mostrándolas en la respectiva zona geográfica de Talcahuano para su interpretación.

Las Figuras 95-131 (ANEXO) muestran el paso a paso para obtener los mapas de predicción espacial con los que se trabajaron.

3.6 Selección de Variograma

Se compararon los variogramas: **Exponencial y Esférico** escogiéndose aquél que poseyera menor error cuadrático medio (RMSE, en sus siglas en inglés) debidos a que son los más utilizados, a su vez que generan los menores errores comparados con los demás modelos. Se compararon resultados entre Arcgis y Vesper.

Las Figuras 132-137 (ANEXO) muestran la forma que se utilizó para seleccionar el modelo de Variograma que mejor se ajustara, con el programa Vesper 1.6.

A continuación se presenta el procedimiento adoptado para la elaboración de este proyecto, las Figuras 10 y 11 muestran los diagramas de flujo con los que se obtuvieron los resultados generados.

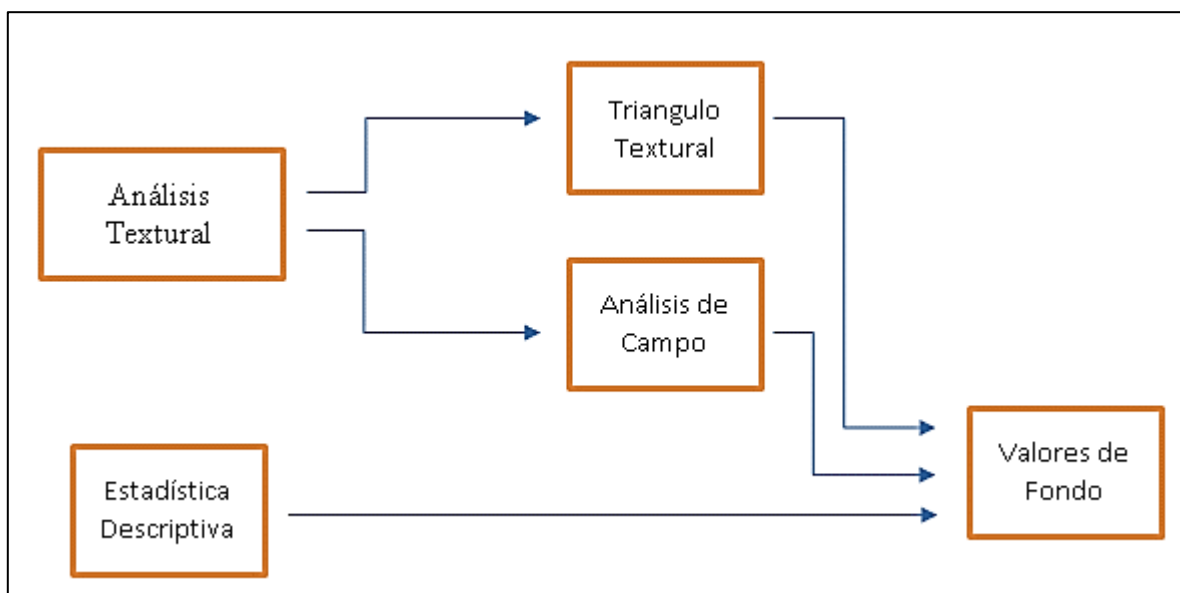


Figura 10: Diagrama de flujo para la metodología utilizada para valores de fondo.

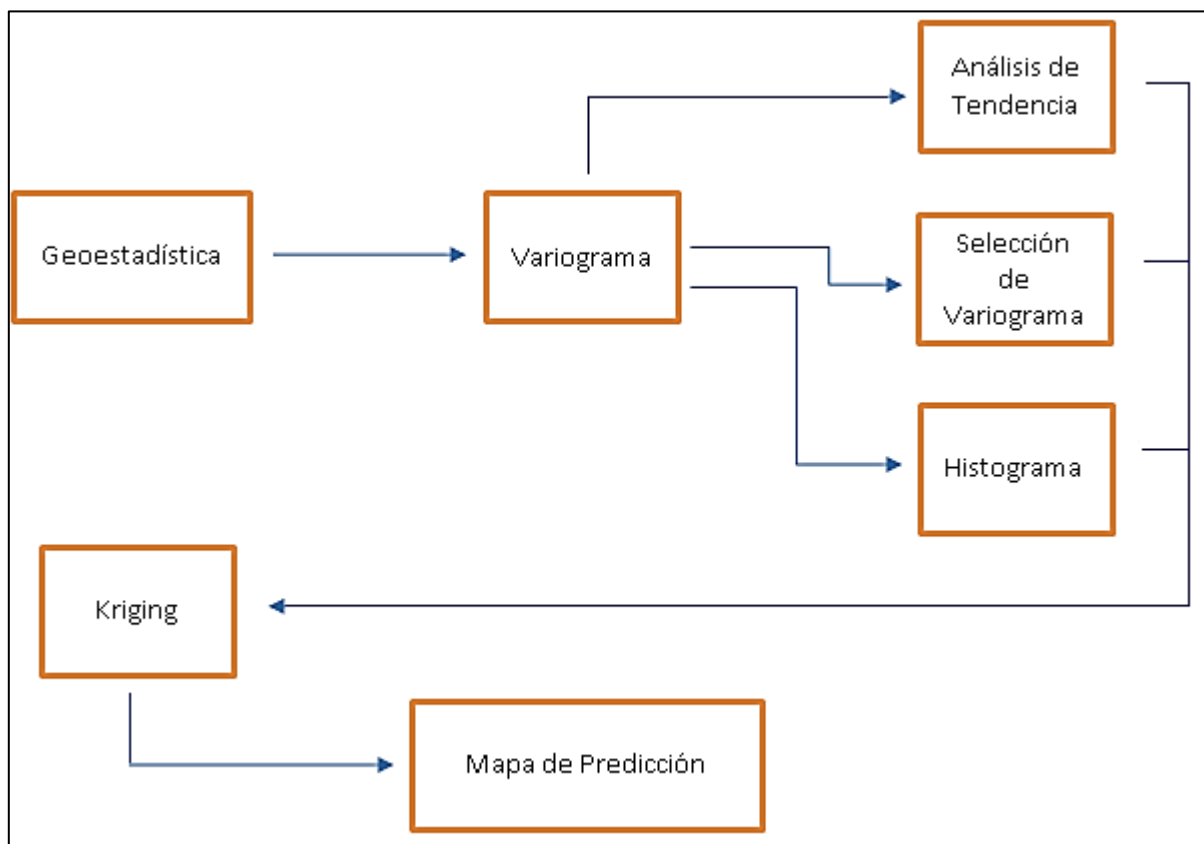


Figura 11: Diagrama de flujo para la metodología utilizada para los mapas de predicción

CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1 Resultados.

140 muestras de suelo en triplicado fueron tomados para diferentes profundidades (Top, Sub y Deep Soil) más una cuarta muestra que va de 0-150 cm. (All Soil), recogidas en diferentes sitios de la comuna de Talcahuano en donde se privilegiaron las zonas verdes y lugares eriazos. La selección de puntos se realizó al azar, pero tratando que los puntos no superaran los 500 m entre cada uno.

Dentro de estas 140 muestras en triplicado se estudiaron 4 elementos, registrando sus concentraciones. Para cada muestra se detalla el porcentaje de arena, limo y arcilla, además de su contenido de Carbono Total (Ct), pH, Capacidad de intercambio Catiónico (CIC) y Carbono Orgánico (O.C).

4.2 Análisis Textural del Suelo

El lugar presenta un suelo mayoritariamente del tipo “Arenoso” y “Areno Francosa”, para el Top Soil (0-10 cm) (Figura 12)

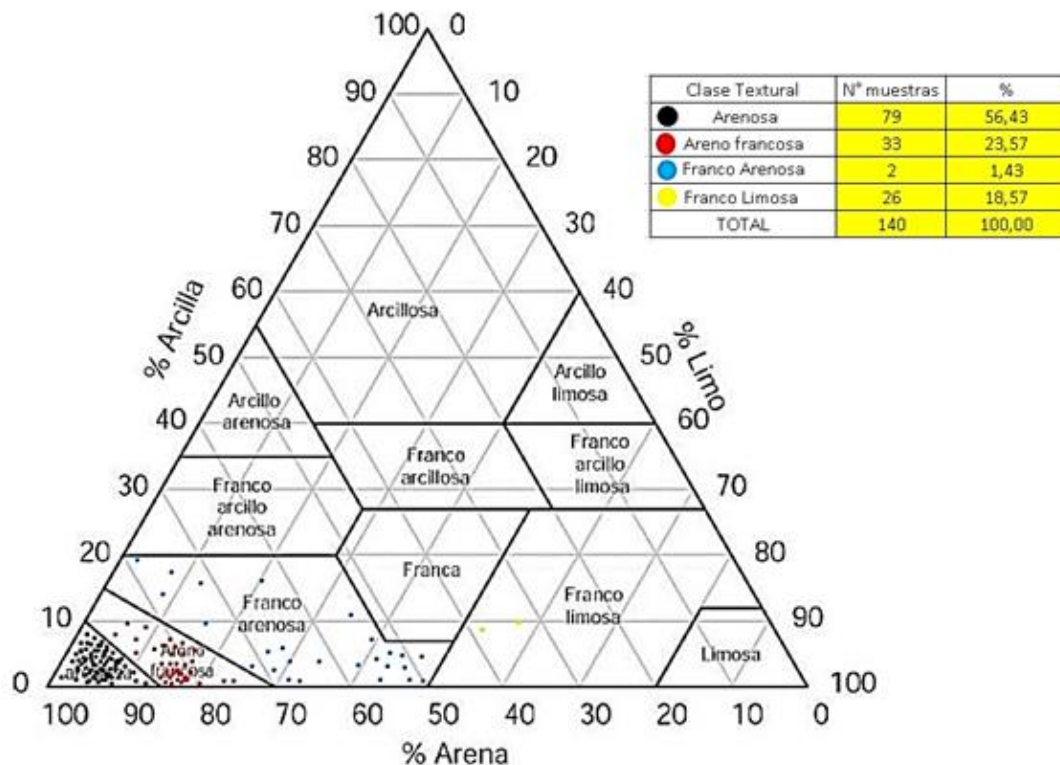


Figura 12: Triángulo textural de suelos, con las 140 muestras de Talcahuano en el estrato Top Soil

Para el Sub Soil se aprecia al igual que el estrato superficial una predominancia de suelo tipo Arenoso y Arenoso Francosa. (Figura 13)

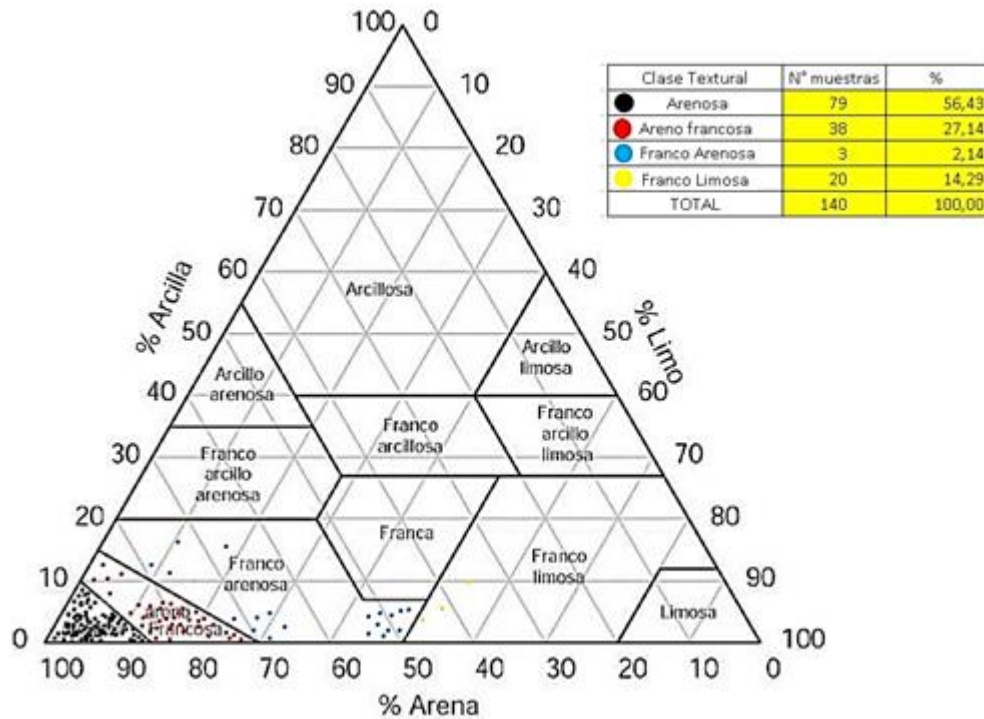


Figura 13: Triangulo textural de suelos, con las 140 muestras de Talcahuano en el estrato Sub Soil.

El Deep Soil, presenta un suelo mayoritariamente del tipo “Arenoso” y “Arenoso Francosa”. (Figura 14)

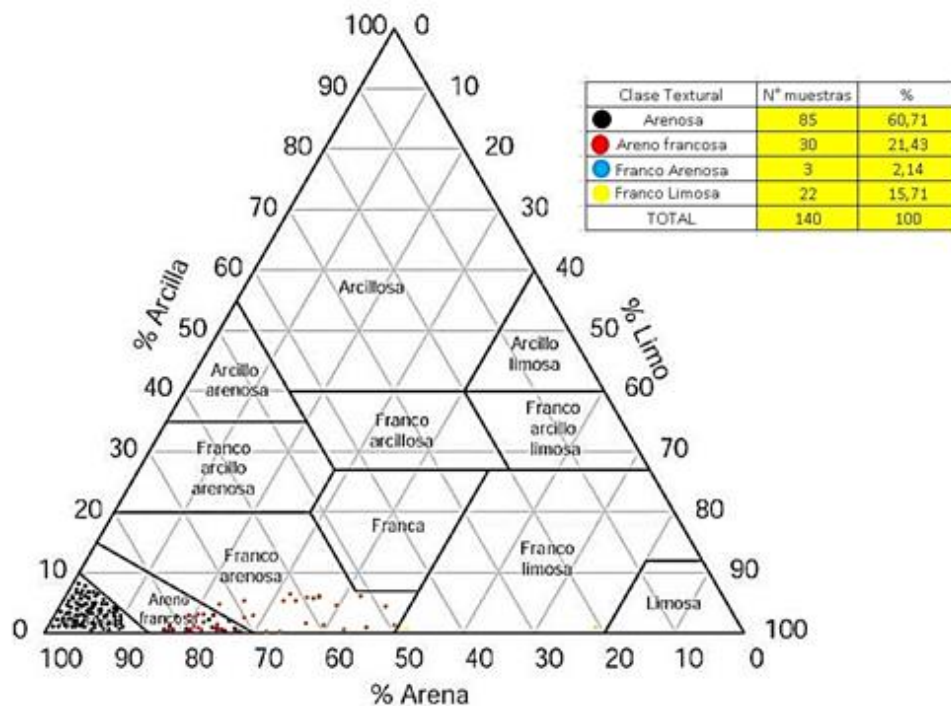


Figura 14: Triangulo textural de suelos, con las 140 muestras de Talcahuano en el estrato Deep Soil

Para el estrato All Soil se mantiene la presencia mayoritaria de Suelo tipo Arenosa (58%) y Areno Francosa (24%), como lo muestra la Figura 15.

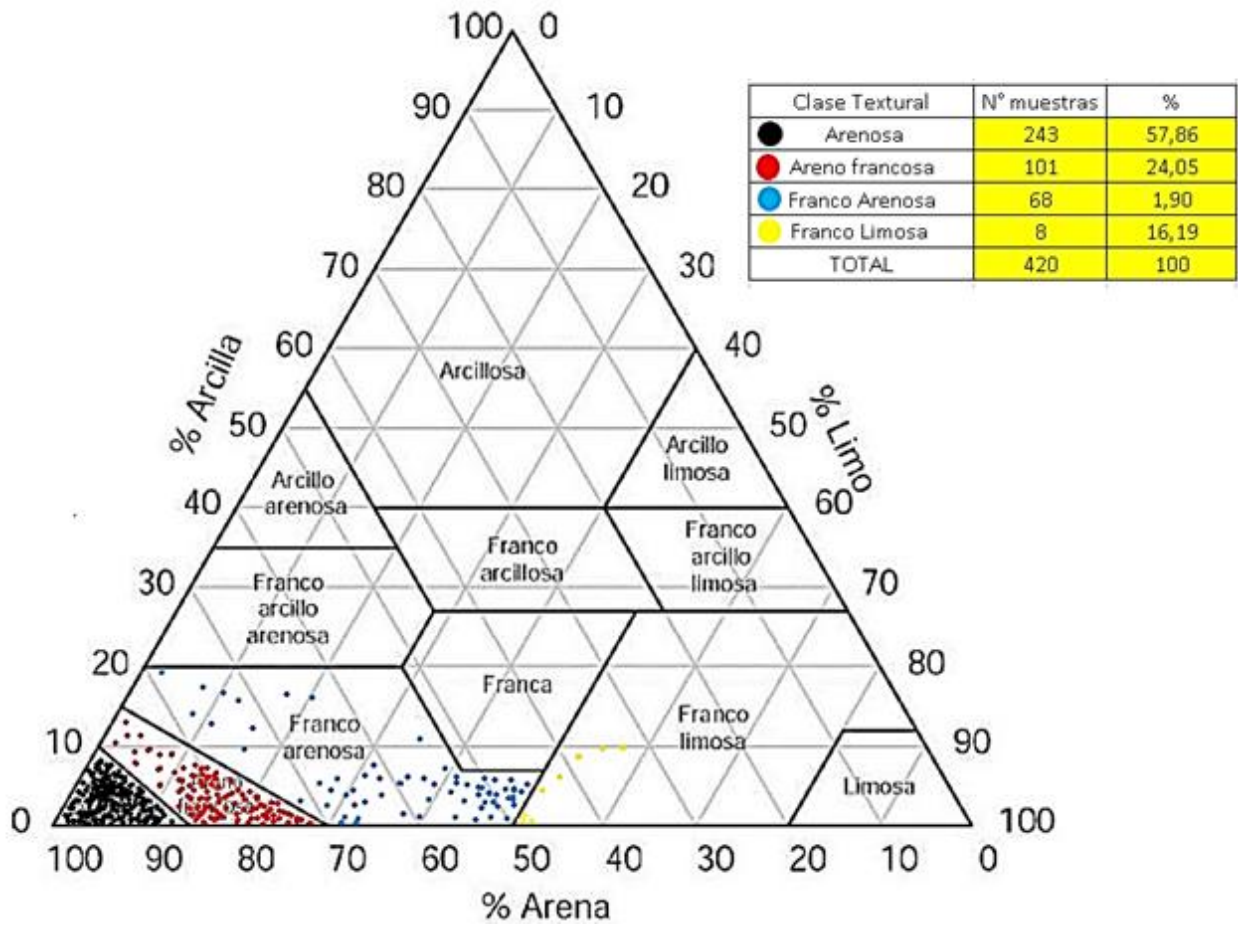


Figura 15: Triangulo textural de suelos, con las 420 muestras de Talcahuano en el estrato All Soil.

4.3 Gráficos Estadísticos Carbono Total. (Ct)

- **Top Soil.**

Se obtuvo mediante el software SPSS v19 como se explicó anteriormente, el histograma que se observa en la Figura 16a presenta un sesgo a la izquierda con un valor extremo de 30%, el box plot una mediana de 3,69%, y presencia de 6 valores atípicos superior como se aprecia en la Figura 16b. El 95% de las muestras tiene una concentración menor a 10% (Figura 16 c)

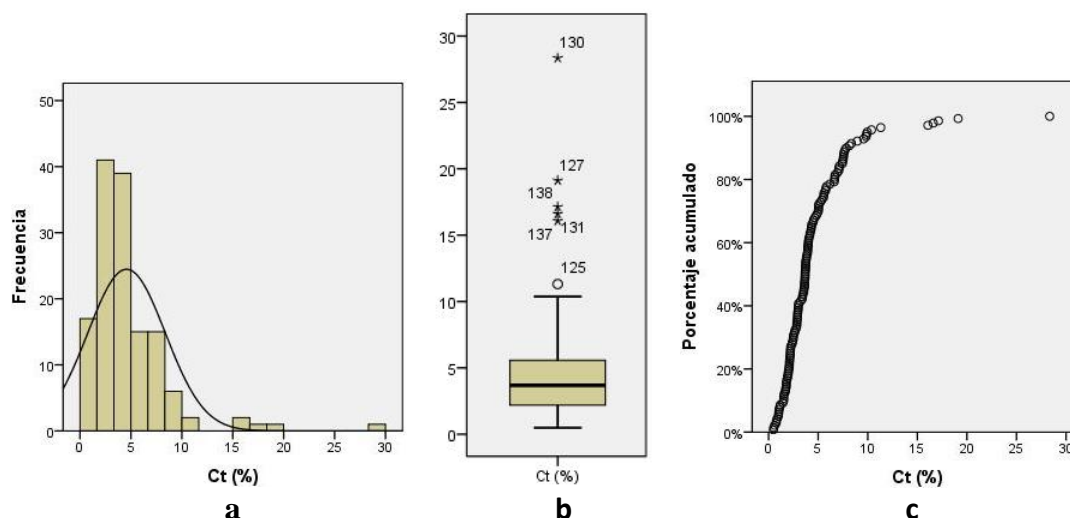


Figura 16: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Carbono Total en Top Soil.

- **Sub Soil.**

En el histograma (Figura 17a) se observa un sesgo a la izquierda y un valor aislado de 26%, en el grafico Box Plot existen 9 valor atípicos superior y una mediana de 3,26%. (Figura 17b). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 12%.(Figura 17c)

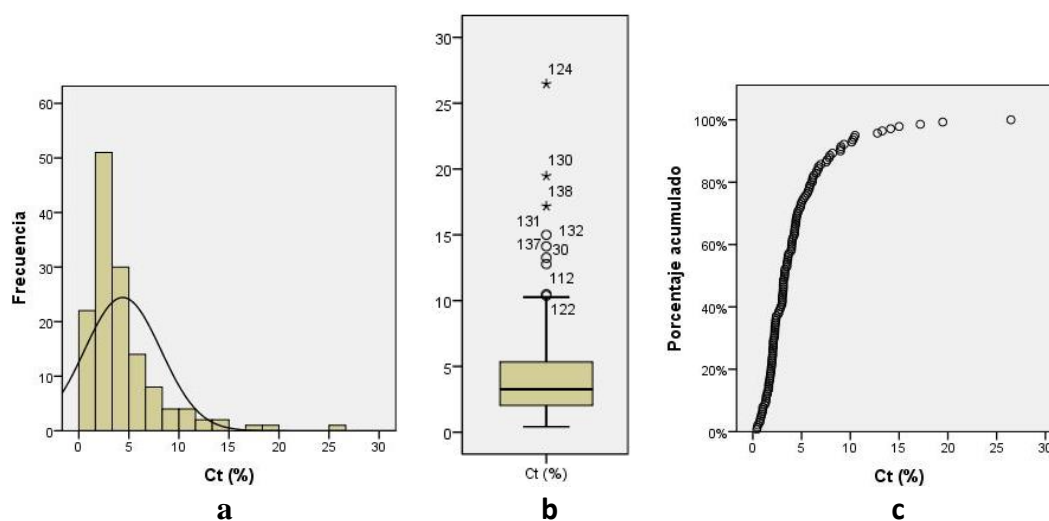


Figura 17: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Carbono Total en Sub Soil.

- **Deep Soil.**

En el histograma (Ver Figura 18a) del Ct se observa un valor extremo de 54%, en el grafico Box Plot (Figura 18b) existen 8 valor atípicos superior y una mediana de 2,28%. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 13%.(Figura 18c)

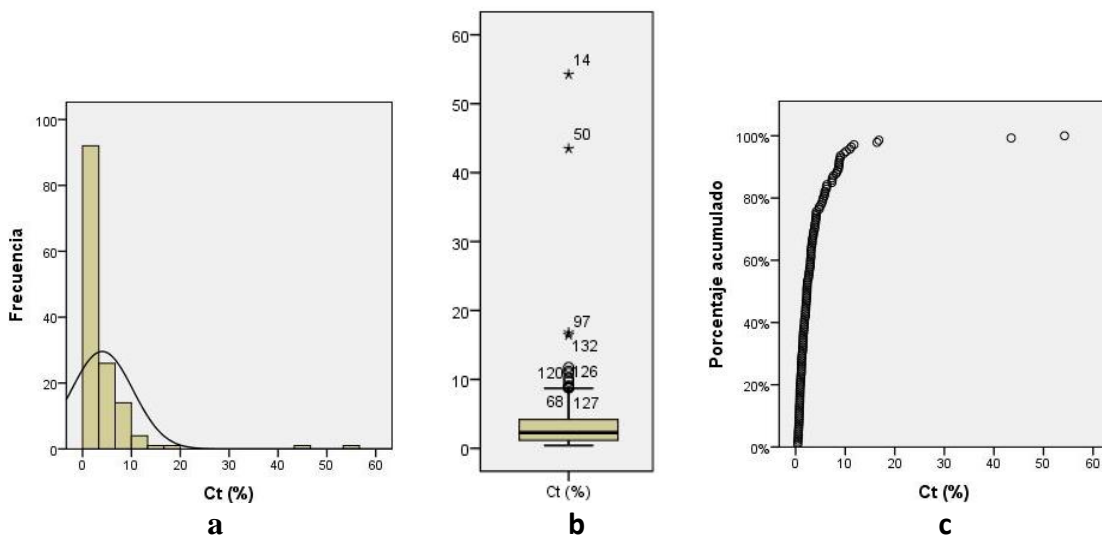


Figura 18: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Carbono Total en Deep Soil.

- **All Soil**

El histograma del Ct se observa en la Figura 19a, en el grafico Box Plot existen muchos valores atípicos superior (21) y una mediana de 3,12% (Figura 19b). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 15%.(Figura 19c)

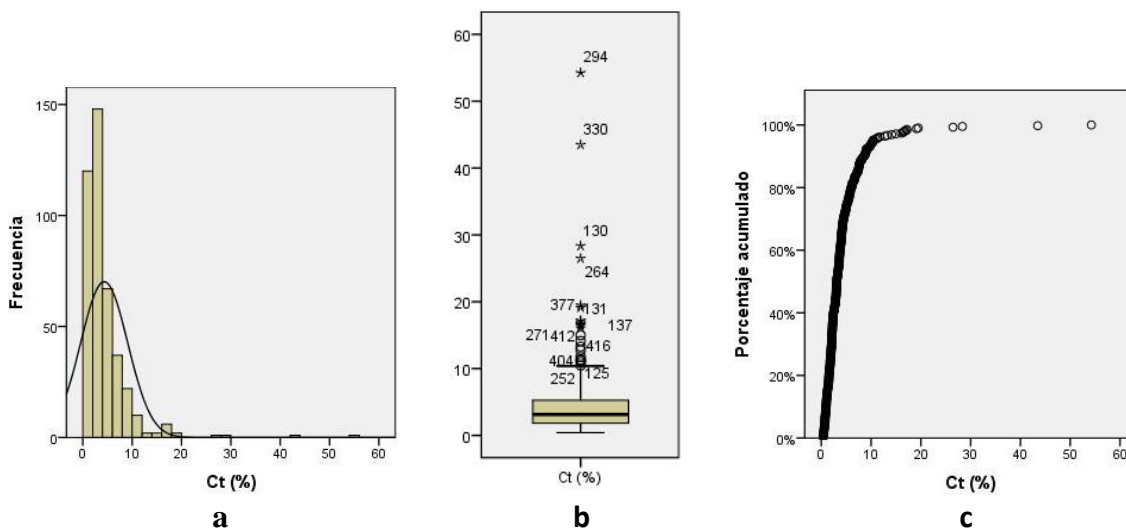


Figura 19: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Carbono Total en All Soil.

4.4 Gráficos Estadísticos pH

- **Top Soil.**

El histograma (Figura 20a) del pH se asemeja a una distribución normal, el gráfico Box Plot con mediana de 7,04 y 1 solo valor atípico superior (Muestra TLH 46), Figura 20b. El 95% de las muestras tiene valores menores a 8. (Figura 20c)

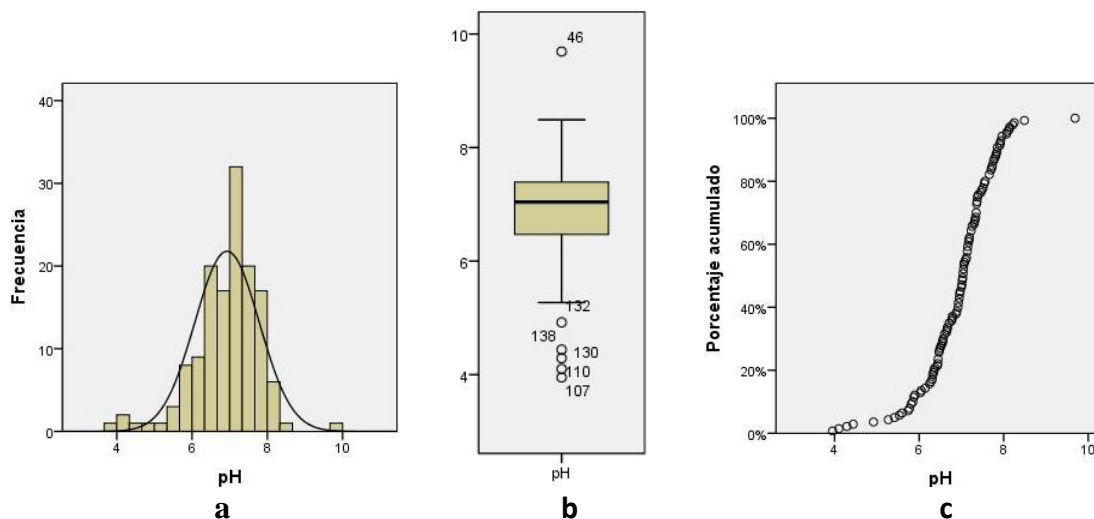


Figura 20: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para pH en Top Soil.

- **Sub Soil.**

En el histograma del pH (Figura 21a) se observa un sesgo ligeramente cargado a la derecha y una mediana de 7.04, en el gráfico Box Plot (Figura 21b) existe 3 valor atípico inferior (Muestras TLH 107, 130 y 138). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 8. (Figura 21c)

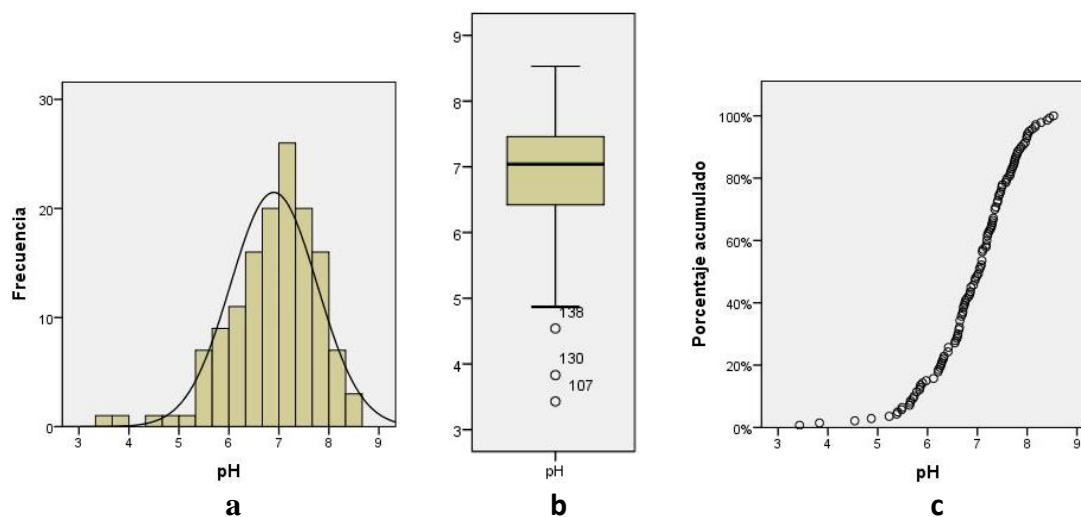


Figura 21: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para pH en Sub Soil.

- **Deep Soil.**

En el histograma del pH (Figura 22a) se observa una tendencia normal, en el grafico Box Plot existen 6 valores atípico superior y una mediana de 6,95. (Figura 22b). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 8. (Figura 22c)

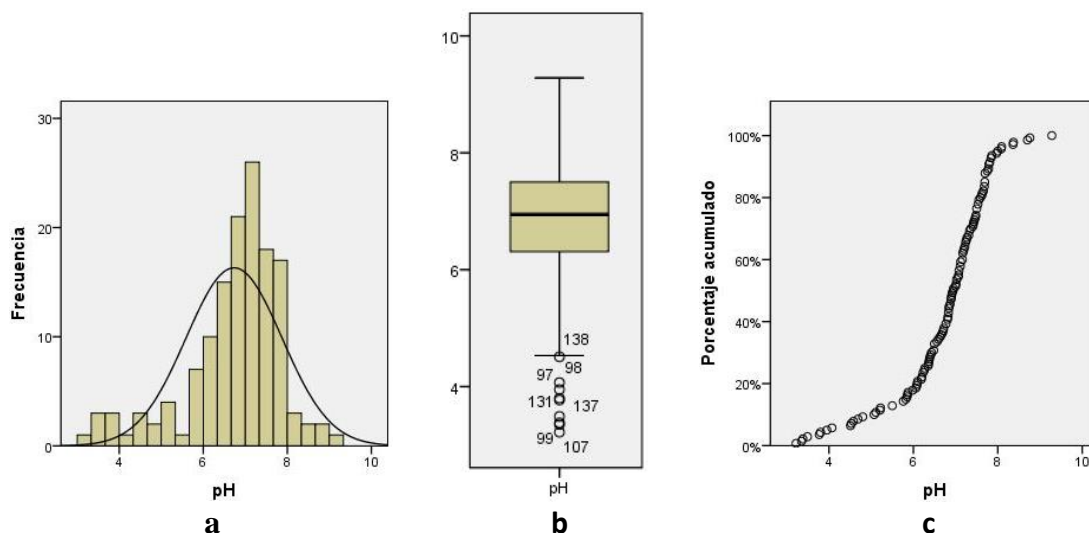


Figura 22: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para pH en Deep Soil.

- **All soil**

En el histograma del pH (Figura 23a) se observa tendencia a la normalidad, en el grafico Box Plot existen 2 valor atípicos superior (TLH 46 y 281) y 20 inferior y una mediana de 7,02. (Figura 23b). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 8. (Figura 23c)

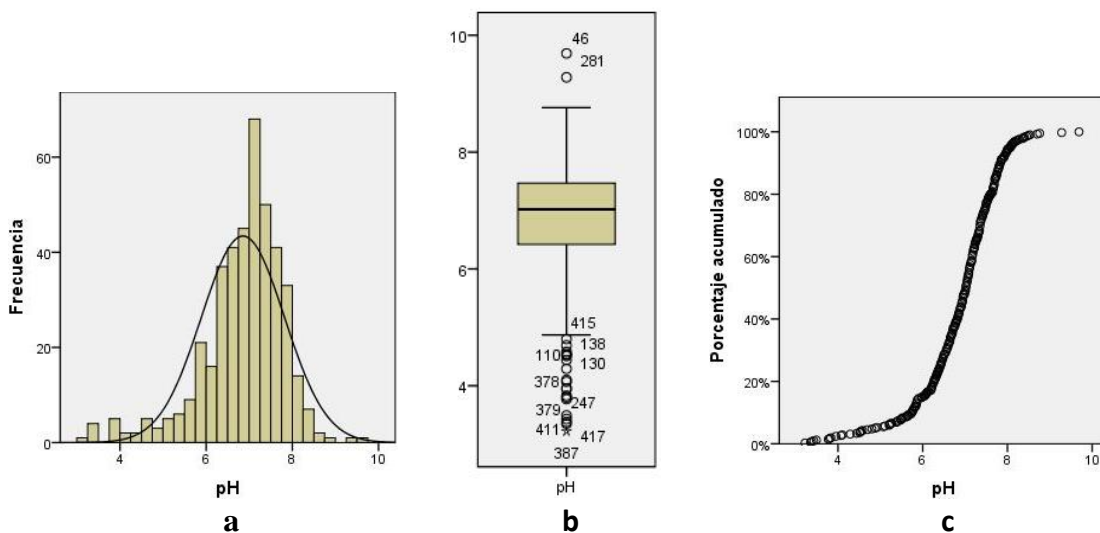


Figura 23: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para pH en All Soil.

4.5 Gráficos Estadísticos Capacidad de intercambio Catiónico (CIC)

- **Top Soil.**

En el histograma del CIC (Figura 24a) se aprecia un sesgo hacia la izquierda, el Grafico Box Plot muestra una mediana de 10,26 cmol kg^{-1} , y la existencia de 8 valores atípicos superior. (Figura 24b). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 30 cmol kg^{-1} . (Figura 24c)

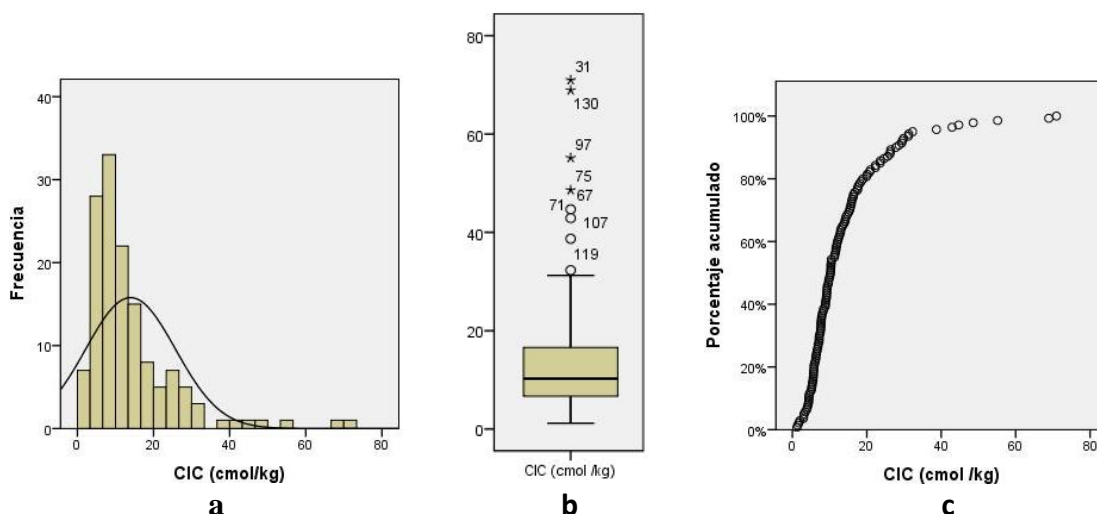


Figura 24: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para CIC en Top Soil.

- **Sub Soil.**

En el histograma del CIC (Figura 25a) se observa 2 valores extremos de 70 cmol kg^{-1} , en el grafico Box Plot (Figura 25b) existen 8 valor atípicos superior y una mediana de 9,37 cmol kg^{-1} . El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 30 cmol kg^{-1} . (Figura 25c)

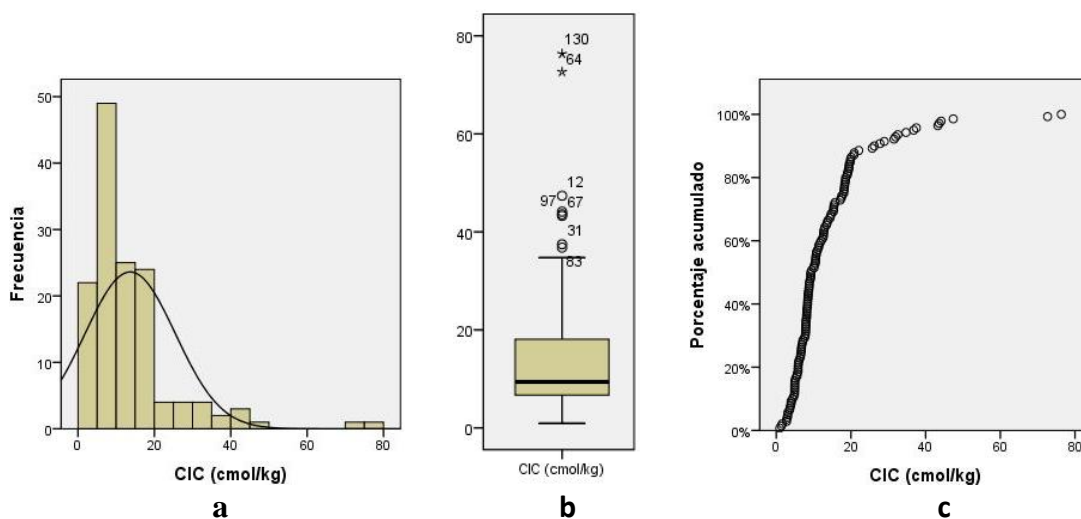


Figura 25: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para CIC en Sub Soil.

- **Deep Soil.**

En el histograma del CIC (Figura 26a) se observa sesgo hacia la izquierda, en el grafico Box Plot (Figura 26b) existen 6 valor atípicos superior y una mediana de 7,86 cmol kg⁻¹. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 30 cmol kg⁻¹. (Figura 26c)

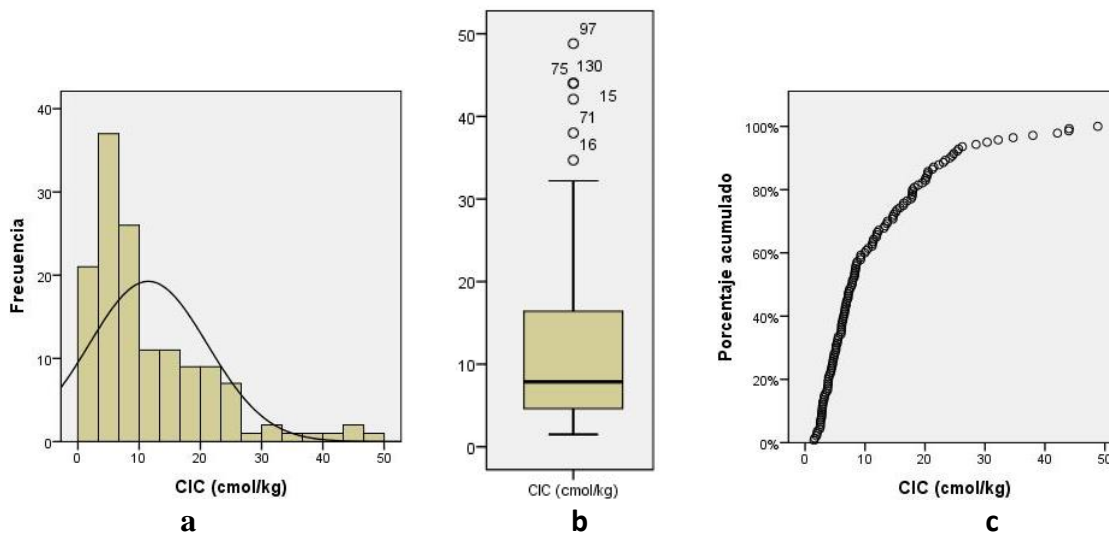


Figura 26: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para CIC en Deep Soil.

- **All Soil.**

En el histograma del CIC (Figura 27a) se observa un sesgo a la izquierda, en el grafico Box Plot (Figura 27b) existen 22 valores atípicos superior y una mediana de 9,24 cmol kg⁻¹. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 50 cmol kg⁻¹. (Figura 27c)

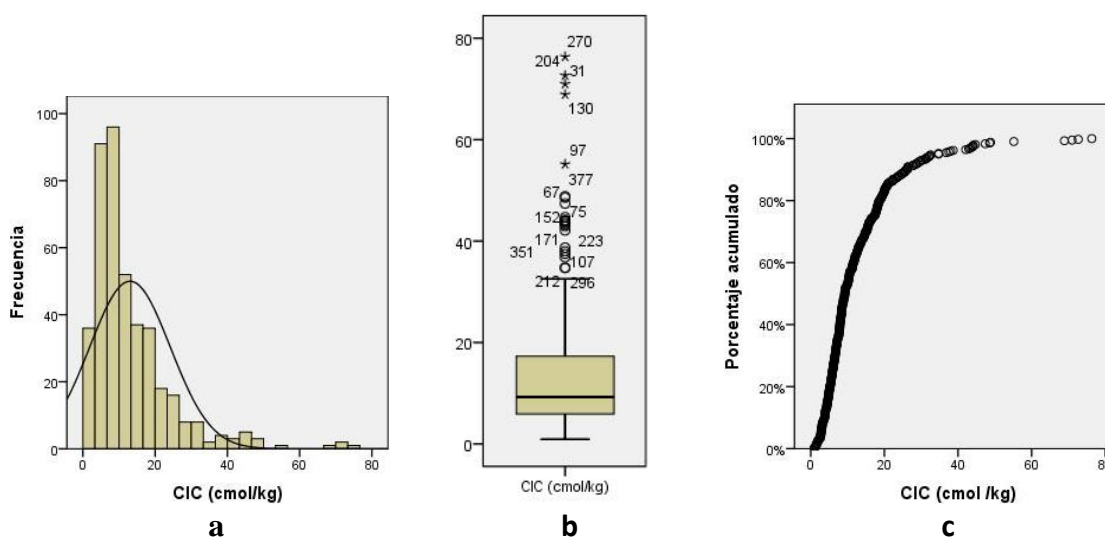


Figura 27: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para CIC en All Soil.

4.6 Gráficos Estadísticos Carbono Orgánico (O.C)

- **Top Soil.**

El histograma del O.C (Figura 28a) se observa un sesgo hacia la izquierda con una mediana de $1,21 \text{ g kg}^{-1}$, en el grafico Box Plot existen 5 valor atípicos superior (Figura 28b). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 4 g kg^{-1} . (Figura 28c)

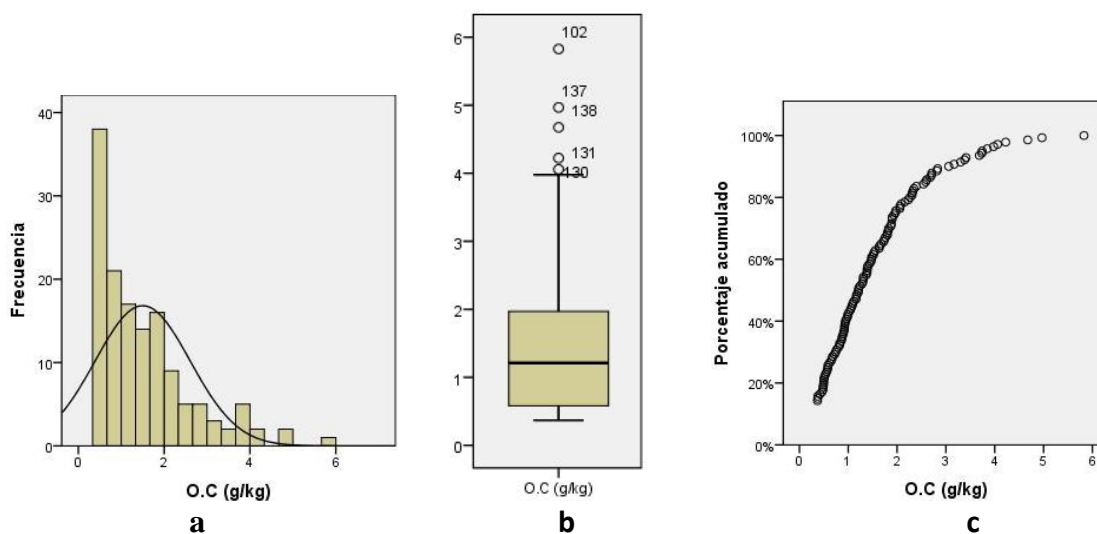


Figura 28: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para O.C en Top Soil.

- **Sub Soil.**

En el histograma del O.C (Figura 29a) se observa un sesgo hacia la izquierda y una mediana de 1 g kg^{-1} , en el grafico Box Plot (Figura 29b) existen 7 valor atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 3 g kg^{-1} . (Figura 29c)

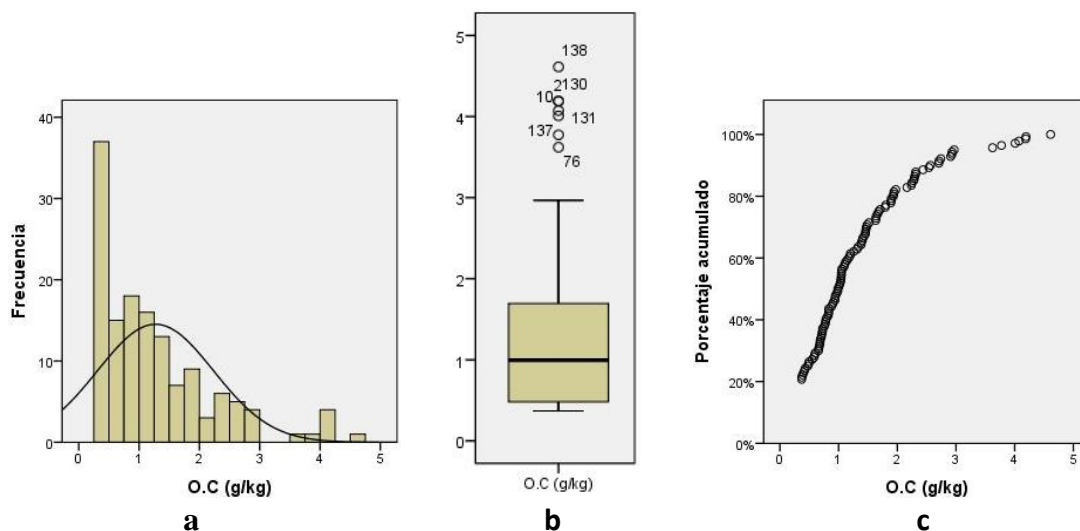


Figura 29: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para O.C en Sub Soil.

- **Deep Soil.**

En el histograma del O.C (Figura 30a) se observa un valor aislado de 6 g kg^{-1} y una mediana $0,54 \text{ mg kg}^{-1}$, en el grafico Box Plot (Figura 30b) existen 10 valores atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 2 g kg^{-1} . (Figura 30c)

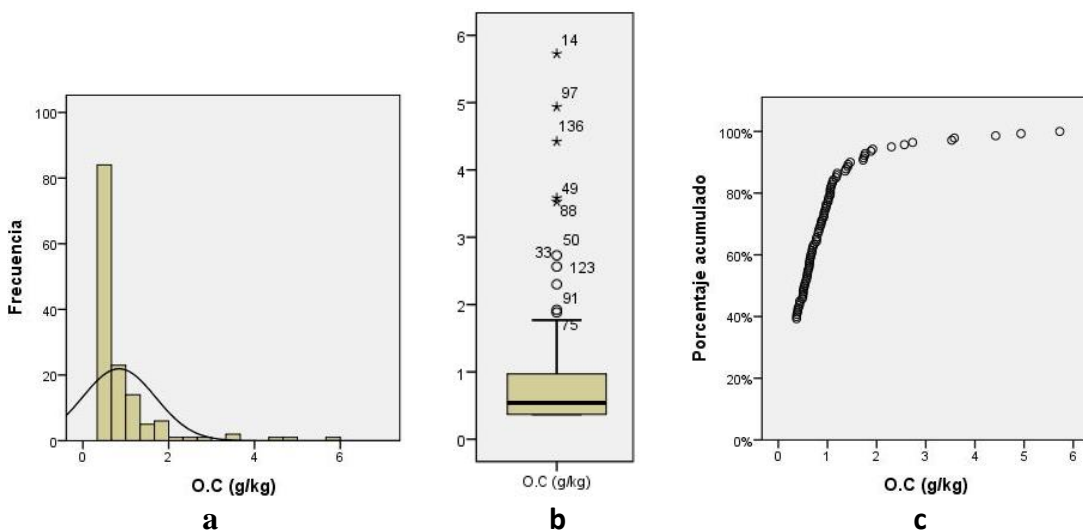


Figura 30: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para O.C en Deep Soil.

- **All Soil.**

En el histograma del O.C (Figura 31a) se observa un valor aislado de 6 g kg^{-1} y una mediana de $0,88 \text{ g kg}^{-1}$, en el grafico Box Plot (Figura 31b) existen 22 valores atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 4 g kg^{-1} . (Figura 31c)

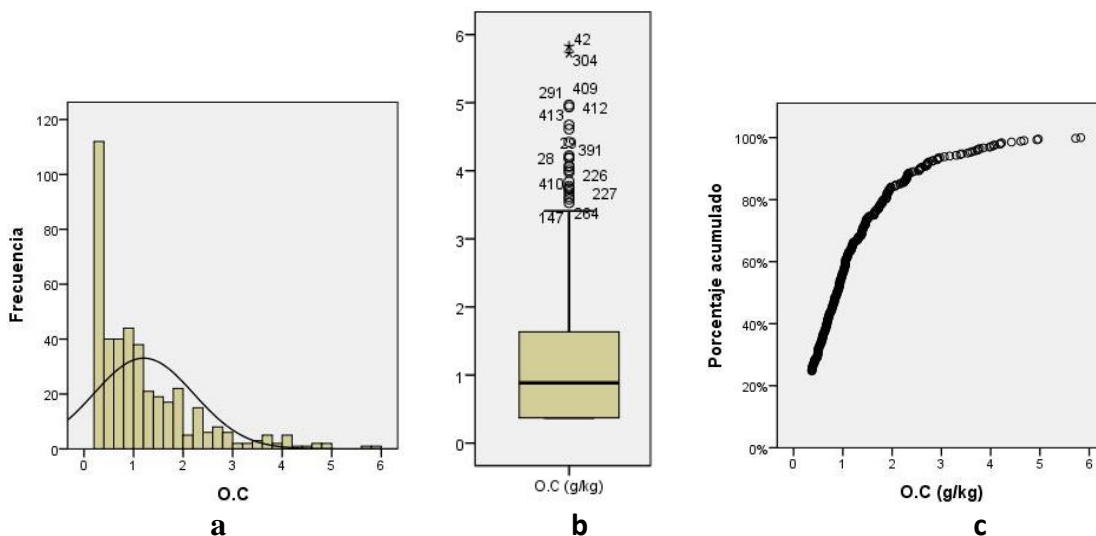


Figura 31: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para O.C en All Soil.

4.7 Estadística Descriptiva propiedades del suelo

En las tablas 1, 2, 3 y 4 se presentan las propiedades del suelo y sus elementos, el rango en que se encuentran, sus medias (aritmética y geométrica) y medianas junto con el Coeficiente de Variación (C.V %).

Top Soil	Arena (g/kg)	Limo (g/kg)	Arcilla (g/kg)	pH	Ct (%)	CIC (cmol/kg)	O.C (g/kg)
Rango	338 - 998,07	1,9 - 555,7	0,03 - 106,3	3,95 - 9,69	0,48 - 28,34	1,2 - 70,97	0,37 - 5,83
Media ± Desv.S	840,21 ± 119,71	146,56 ± 105,59	13,33 ± 19,61	6,93 ± 0,85	4,57 ± 3,8	13,96 ± 11,8	1,5 ± 1,1
Media Geometrica	829,6	110,93	4,91	6,87	3,54	10,64	1,15
Mediana	874,6	117,36	4,17	7,04	3,69	10,26	1,5
C.V %	14,25	72,05	147,11	12,27	83,15	84,53	73,33

Tabla 1: Parámetros de las propiedades Estadísticos del suelo Top Soil.

Sub Soil	Arena (g/kg)	Limo (g/kg)	Arcilla (g/kg)	pH	Ct (%)	CIC (cmol/kg)	O.C (g/kg)
Rango	366,2 - 999,59	0,4 - 556,81	0,01 - 101,8	3,43 - 8,53	0,41 - 26,46	0,92 - 76,33	0,37 - 4,61
Media ± Desv.S	839,98 ± 122,96	147,43 ± 110,65	13,59 ± 18,86	6,9 ± 0,87	4,39 ± 3,81	13,66 ± 11,83	1,27 ± 0,96
Media Geometrica	828,33	106,27	4,96	6,84	3,3	10,38	0,98
Mediana	877,03	118,65	4,14	7,04	3,26	9,37	0,99
C.V %	14,64	75,05	138,78	12,61	86,79	86,6	75,59

Tabla 2: Parámetros de las propiedades Estadísticos del suelo Sub Soil.

Deep Soil	Arena (g/kg)	Limo (g/kg)	Arcilla (g/kg)	pH	Ct (%)	CIC (cmol/kg)	O.C (g/kg)
Rango	218,41 - 996,15	3,23 - 771,03	0,07 - 71,09	3,22 - 9,28	0,4 - 54,24	1,49 - 48,81	0,37 - 5,73
Media ± Desv.S	844,13 ± 143,4	142,82 ± 133,92	13,13 ± 17,3	6,73 ± 1,14	4,02 ± 6,29	11,48 ± 9,67	0,84 ± 0,85
Media Geometrica	828,6	86,04	4,62	6,61	2,4	8,37	0,65
Mediana	891,3	97,91	4,43	6,95	2,28	7,86	0,54
C.V %	16,99	93,77	131,76	16,94	156,47	84,23	101,19

Tabla 3: Parámetros de las propiedades Estadísticos del suelo Deep Soil.

All Soil	Arena (g/kg)	Limo (g/kg)	Arcilla (g/kg)	pH	Ct (%)	CIC (cmol/kg)	O.C (g/kg)
Rango	218 - 999,39	0,4 - 771,03	0,01 - 106,3	3,22 - 9,69	0,4 - 54,24	0,92 - 76,33	0,37 - 5,83
Media ± Desv.S	841,11 ± 128,83	145,57 ± 117,1	13,35 ± 18,57	6,85 ± 0,96	4,33 ± 4,77	13,03 ± 0,96	1,2 ± 1,01
Media Geometrica	828,84	100,48	4,83	6,77	3,04	9,74	0,9
Mediana	881,01	110,51	4,35	7,02	3,12	9,24	0,88
C.V %	15,32	80,44	139,10	14,01	110,16	7,37	84,17

Tabla 4: Parámetros de las propiedades Estadísticos del suelo All Soil.

En la Tabla 5 se muestra la tabla de escalas de pH para las distintas profundidades de suelo, en donde se puede apreciar que el 90% de las muestras se encuentra con un pH entre 6 – 8.

T O P S O I L	Ph	Especificacion	N° Muestra	%
	< 4	Muy Acido	1	0,71%
	5	Moderadamente Acido	4	2,9%
	6	Ligeramente Acido	12	8,6%
	7	Neutro	48	34,3%
	8	Moderadamente Alcalino	67	47,9%
	9	Ligeramente Alcalino	7	5,0%
	≥ 10	Muy Alcalino	1	0,71%
		Total	140	1

S U B S O I L	Ph	Especificacion	N° Muestras	%
	< 4	Muy Acido	2	1,4%
	5	Moderadamente Acido	2	1,4%
	6	Ligeramente Acido	17	12,1%
	7	Neutro	47	33,6%
	8	Moderadamente Alcalino	63	45,0%
	9	Ligeramente Alcalino	9	6,4%
	≥ 10	Muy Alcalino	0	0
		Total	140	1

D E E P S O I L	Ph	Especificacion	N° Muestra	%
	< 4	Muy Acido	7	5,00%
	5	Moderadamente Acido	6	4,3%
	6	Ligeramente Acido	12	8,6%
	7	Neutro	47	33,6%
	8	Moderadamente Alcalino	61	43,6%
	9	Ligeramente Alcalino	6	4,3%
	≥ 10	Muy Alcalino	1	0,71%
		Total	140	1

A L L S O I L	Ph	Especificacion	N° Muestras	%
	< 4	Muy Acido	10	2,4%
	5	Moderadamente Acido	12	2,9%
	6	Ligeramente Acido	41	9,8%
	7	Neutro	142	33,8%
	8	Moderadamente Alcalino	191	45,5%
	9	Ligeramente Alcalino	22	5,2%
	≥ 10	Muy Alcalino	2	0,48%
		Total	420	1

Tabla 5: Tabla de clasificación de pH para todas las profundidades.

Las Tablas 6, 7, 8 y 9 presentan un resumen de parámetros estadísticos seleccionados de las capas del suelo. Se puede destacar que:

- Ct en Deep Soil. la concentración máxima es 2 veces menor a la de los otros suelos.
- pH tiene todos sus parámetros estadísticos similares en todos los suelos.
- CIC en Deep Soil la concentración máxima es bastante menor a la de los otros suelos.
- La mediana del O.C en Deep Soil cm. es casi 2 veces menor que en el resto de los suelos.

Elemento	Mediana	Media	SD	CV(%)	Sesgo	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD	Robust CV(%)
								5	25	50	75	95			
Ct	3,69	4,57	3,8	83,15	2,93	12,7	0,48	0,99	2,19	3,69	5,58	10,35	28,34	1,56	42,28
Ph	7,04	6,93	0,85	12,27	-0,80	2,18	3,95	5,43	6,47	7,04	7,39	8,07	9,69	0,5	7,10
CIC	10,26	13,96	11,8	84,53	2,4	7,41	1,2	3,13	6,63	10,26	16,7	38,38	70,97	4,52	44,05
O.C	1,21	1,5	1,1	73,33	1,33	1,75	0,37	0,37	0,58	1,21	1,97	3,84	5,83	0,86	71,07

Tabla 6: Estadística simple de las muestras de Top Soil.

Elementos	Mediana	Media	SD	CV(%)	Sesgo	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD	Robust CV(%)
								5	25	50	75	95			
Ct	3,26	4,39	3,81	86,79	2,64	9,77	0,41	0,86	2,04	3,26	5,38	12,66	26,46	1,37	42,02
Ph	7,04	6,9	0,87	12,61	-0,99	1,96	3,43	5,4	6,42	7,04	7,49	8,16	8,53	0,47	6,68
CIC	9,37	13,66	11,83	86,60	2,66	9,56	0,92	3,03	6,69	9,37	27,59	37,45	76,33	4,31	46,00
O.C	1	1,27	0,96	75,59	1,41	1,71	0,37	0,37	0,48	0,99	1,7	3,59	4,61	0,75	75,00

Tabla 7: Estadística simple de las muestras de Sub Soil.

Elementos	Mediana	Media	SD	CV(%)	Sesgo	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD	Robust CV(%)
								5	25	50	75	95			
Ct	2,28	4,02	6,29	156,47	5,66	39,42	0,4	0,55	1,15	2,28	4,2	10,9	54,24	1,36	59,65
Ph	6,95	6,73	1,14	16,94	-1,17	1,54	3,22	3,96	6,29	6,95	7,5	8,08	9,28	0,58	8,35
CIC	7,86	11,48	9,67	84,23	1,64	2,77	1,49	2,54	4,6	7,86	16,42	32,12	48,81	4,16	52,93
O.C	0,54	0,84	0,85	101,19	3,40	13,62	0,37	0,37	0,37	0,54	0,97	2,55	5,73	0,51	94,44

Tabla 8: Estadística simple de las muestras de Deep Soil.

Elementos	Mediana	Media	SD	CV(%)	Sesgo	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD	Robust CV(%)
								5	25	50	75	95			
Ct	3,12	4,33	4,77	110,16	5,11	41,01	0,40	0,72	1,81	3,12	5,26	10,48	54,24	1,49	47,76
Ph	7,02	6,85	0,96	14,01	-1,13	2,26	3,22	4,87	6,42	7,02	7,47	8,08	9,69	0,52	7,41
CIC	9,24	13,03	11,17	85,73	2,37	7,75	0,92	2,76	5,89	9,24	17,37	34,74	76,33	4,41	47,73
O.C	0,88	1,21	1,01	83,47	1,77	3,32	0,37	0,37	0,37	0,88	1,63	3,6	5,83	0,76	86,36

Tabla 9: Estadística simple de las muestras de All Soil.

Las tablas 10, 11, 12 y 13 muestran la correlación de Spearman para las propiedades del suelo y sus elementos. Como era de esperarse Ct y O.C se asocian directamente para Top, Sub y Deep Soil, no así para All Soil, pH y Ct se asocian de manera inversa para todos, O.C se no se asocia con nadie en All Soil.

Top Soil	Ct	pH	CIC	O.C
Ct	1,00	-0,249**	0,305**	0,689**
pH		1,00	0,14	-0,167*
CIC			1,00	0,246**
O.C				1,00

Tabla 10: Correlación de Spearman para Ct, pH, CIC y O.C en Top Soil.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

Sub Soil	Ct	pH	CIC	O.C
Ct	1,00	-0,293**	0,257**	0,692**
pH		1,00	0,15	0,249**
CIC			1,00	0,24**
O.C				1,00

Tabla 11: Correlación de Spearman para Ct, pH, CIC y O.C en Sub Soil.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

Deep Soil	Ct	pH	CIC	O.C
Ct	1	-0,234**	0,427**	0,67**
pH		1	0,05	-0,105
CIC			1	0,467**
O.C				1

Tabla 12: Correlación de Spearman para Ct, pH, CIC y O.C en Deep Soil.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

All Soil	Ct	pH	CIC	O.C
Ct	1	-247**	0,351**	0,054
pH		1	0,123*	-0,039
CIC			1	-0,043
O.C				1

Tabla 13: Correlación de Spearman para Ct, pH, CIC y O.C en All Soil.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

La tabla 14 nos muestra un resumen de la Prueba de Wilcoxon aplicada a los elementos. En la tabla se hace una comparación entre A-B (Top Soil y Sub Soil), B-C (Sub Soil y Deep Soil) y A-C (Top Soil y Deep Soil.), en color rojo se muestra los valores menores a 0,05, criterio de rechazo de la hipótesis nula de que las variables se comportan de manera similar.

Con esto podemos hacer los siguientes análisis:

- Ct y O.C se observa que hay diferencia significativa entre las poblaciones.
- Con pH se observa que no hay diferencia significativa entre las poblaciones.
- En Top soil no hay diferencia significativa, pero en Sub y Deep Soil si la hay para CIC.

	A-B	B-C	A-C
Ct	0,005	0	0
pH	0,777	0,164	0,181
CIC	0,142	0	0
O.C	0	0	0

Tabla 14: Prueba de Wilcoxon para Ct, pH, CIC y O.C

4.8 Gráficos estadísticos Cromo (Cr)

- **Top Soil**

En el histograma del Cromo (Figura 32a) se observa un valor aislado de 654 mg kg^{-1} y una mediana de 133 mg kg^{-1} , en el grafico Box Plot (Figura 32b) existen 4 valores atípicos superior (Muestras TLH 7, 68, 118 y 119). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 258 mg kg^{-1} . (Figura 32c)

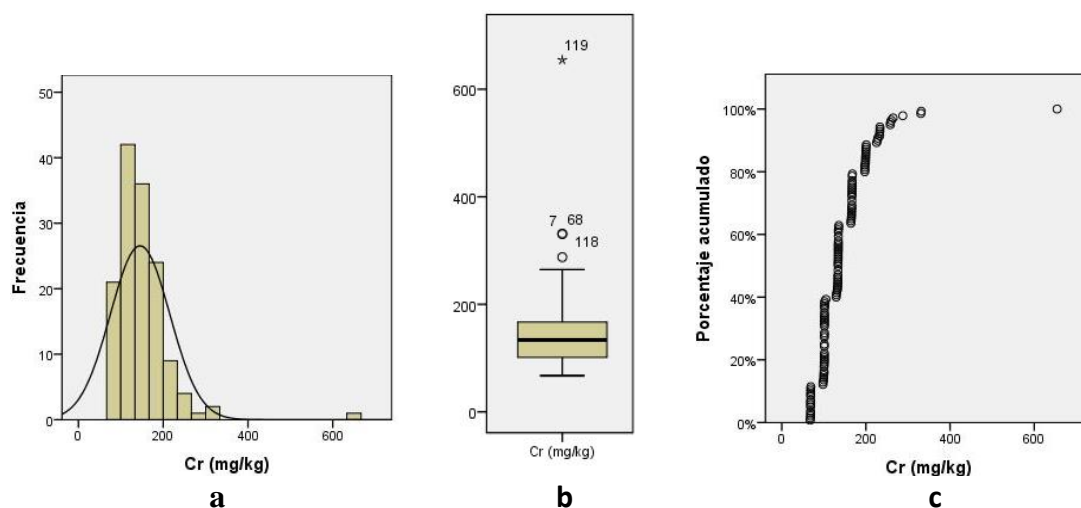


Figura 32: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Cr en Top Soil.

- **Sub Soil**

En el histograma del Cromo (Figura 33a) se observa un valor aislado de 594 mg kg^{-1} y una mediana 133 mg kg^{-1} , en el grafico Box Plot (Figura 33b) existen 5 valores atípicos superior (Muestras TLH 8, 9, 67, 72 y 116). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 263 mg kg^{-1} . (Figura 33c)

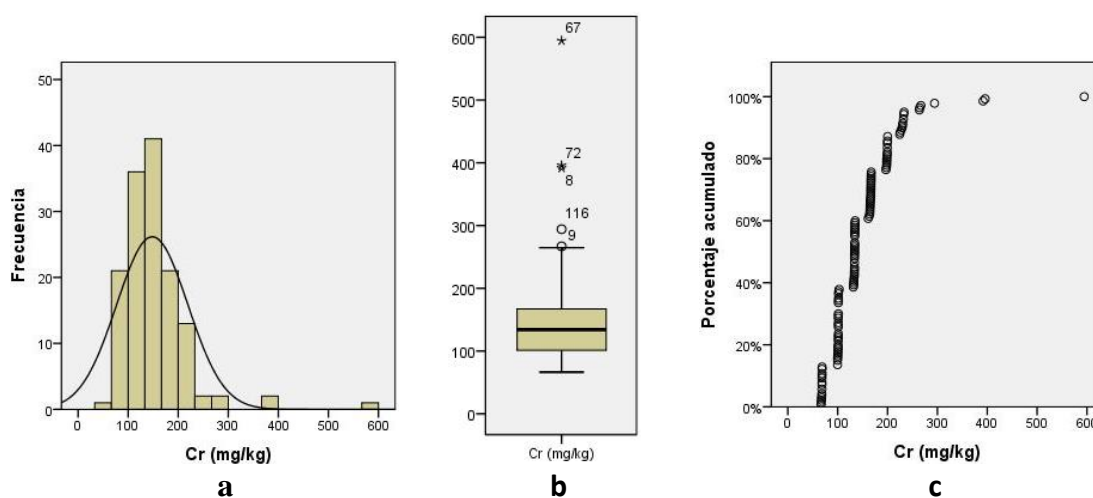


Figura 33: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Cr en Sub Soil.

- **Deep Soil**

El histograma del Cromo (Figura 34a) muestra una tendencia normal y una mediana de 133,7 mg kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 34b) existe solo 1 valor atípico superior (Muestra TLH 114). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 233 mg kg⁻¹. (Figura 34c).

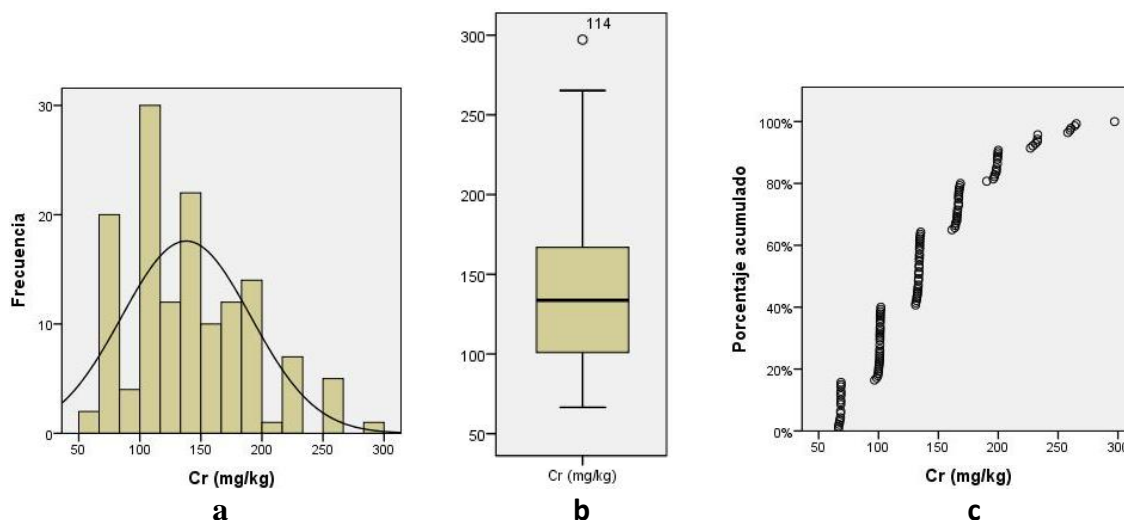


Figura 34: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Cr en Deep Soil.

- **All Soil**

En el histograma del Cromo (Figura 35a) se observa un sesgo a la izquierda y una mediana 133,8 mg kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 35b) existen 10 valores atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 233 mg kg⁻¹. (Figura 35c)

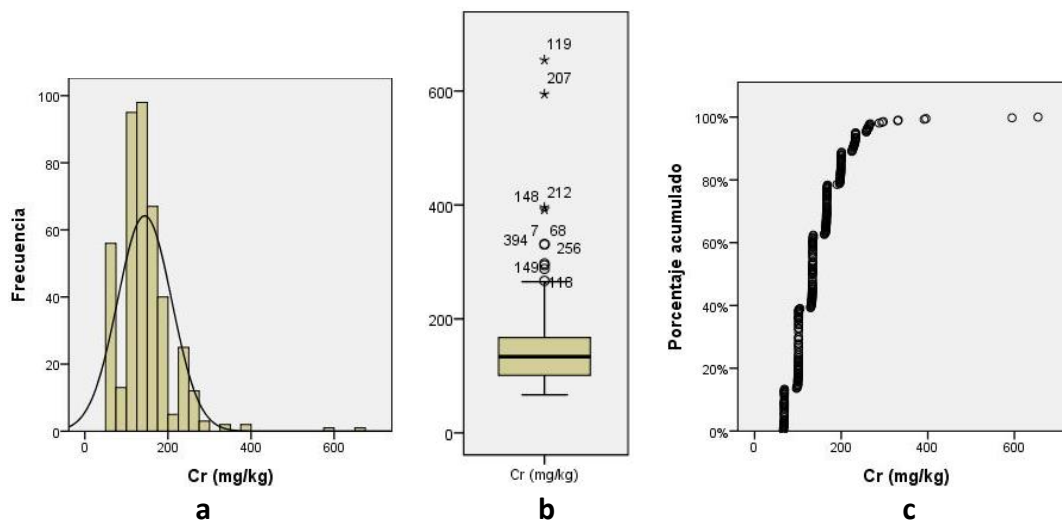


Figura 35: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Cr en All Soil.

4.9 Gráficos estadísticos de Níquel (Ni)

- **Top Soil**

El histograma del Níquel (Figura 36a) presenta un pequeño sesgo a la izquierda y una mediana 53 mg kg^{-1} , en el grafico Box Plot (Figura 36b) existen 3 valores atípicos superior (Muestras TLH 79, 98 y 129). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 103 mg kg^{-1} . (Figura 36c)

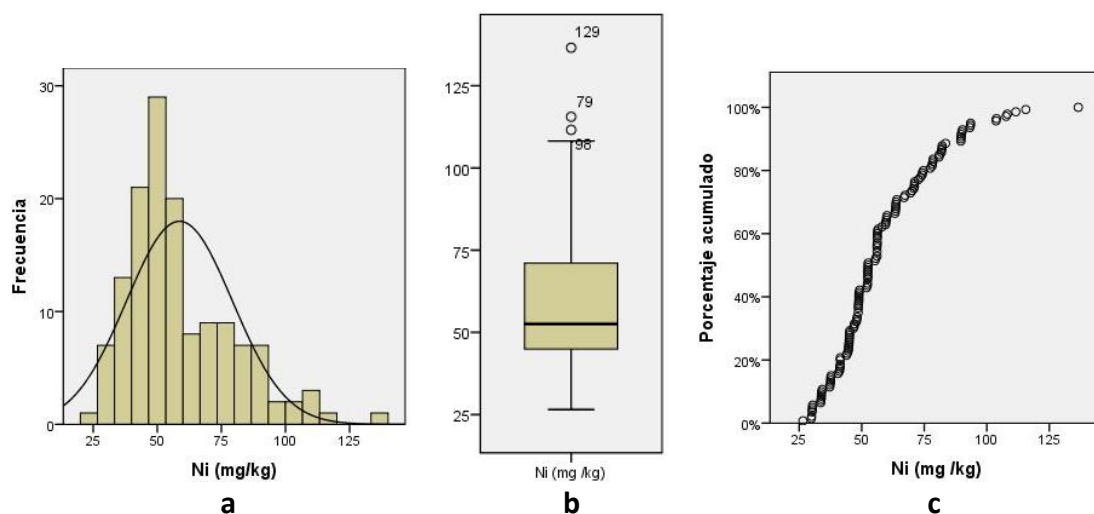


Figura 36: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Ni en Top Soil.

- **Sub Soil**

El histograma del Níquel (Figura 37a) tiende a la normalidad y tiene una mediana 56 mg kg^{-1} , en el grafico Box Plot (Figura 37b) existen 3 valores atípicos superior (Muestras TLH 67, 89 y 129). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 119 mg kg^{-1} . (Figura 37c)

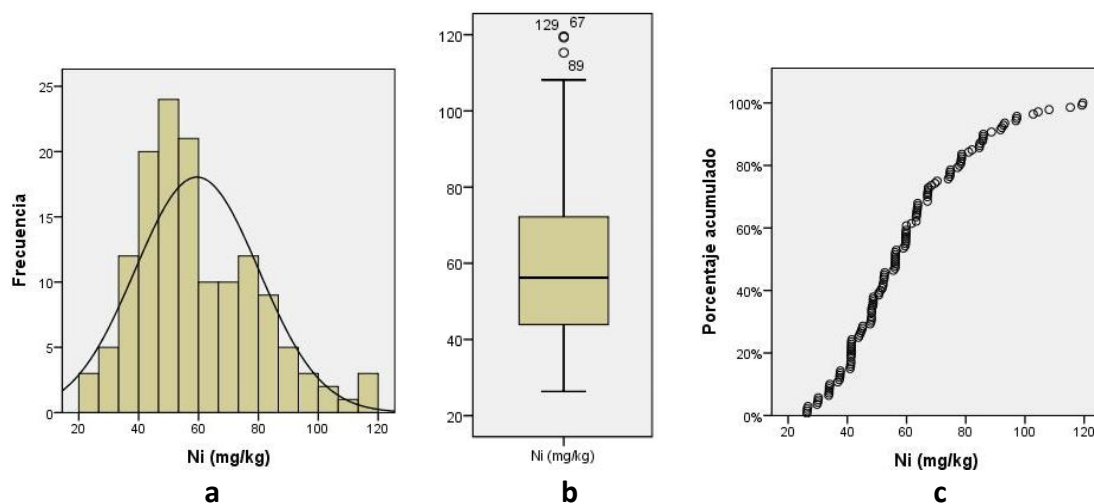


Figura 37: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Ni en Sub Soil.

- **Deep Soil**

El histograma del Níquel (Figura 38a) es sesgado hacia la izquierda y tiene una mediana de 59 mg kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 38b) existe 1 valor atípico superior (Muestra TLH 129). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 90 mg kg⁻¹. (Figura 38c)

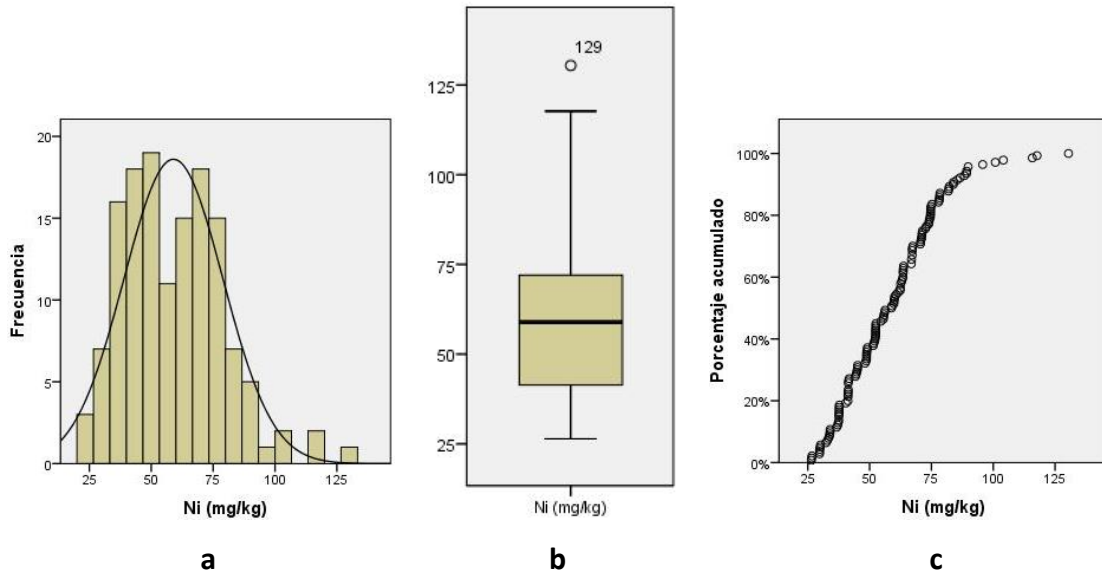


Figura 38: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Ni en Deep Soil.

- **All Soil**

El histograma del Níquel (Figura 39a) es sesgado hacia la izquierda y tiene una mediana de 56 mg kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 39b) existen 6 valores atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 97 mg kg⁻¹. (Figura 39c)

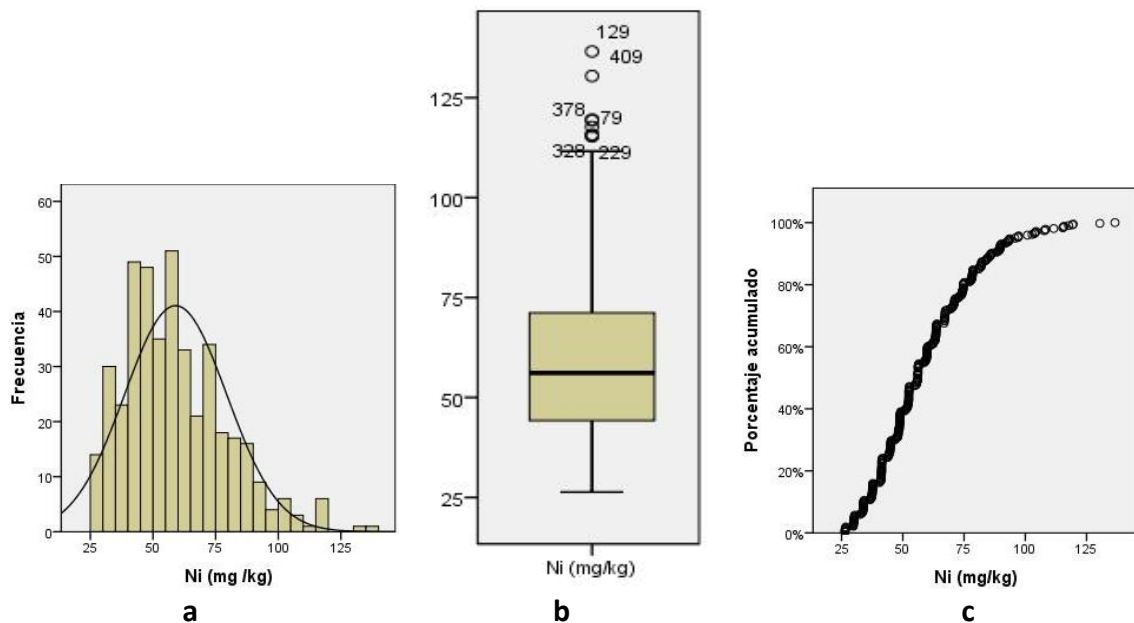


Figura 39: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Ni en All Soil.

4.10 Gráficos estadísticos de Litio (Li)

- **Top Soil**

En el histograma del Litio (Figura 40a) se observa sesgo a la izquierda y una mediana 7 mg kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 40b) existen 5 valores atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 15 mg kg⁻¹. (Figura 40c)

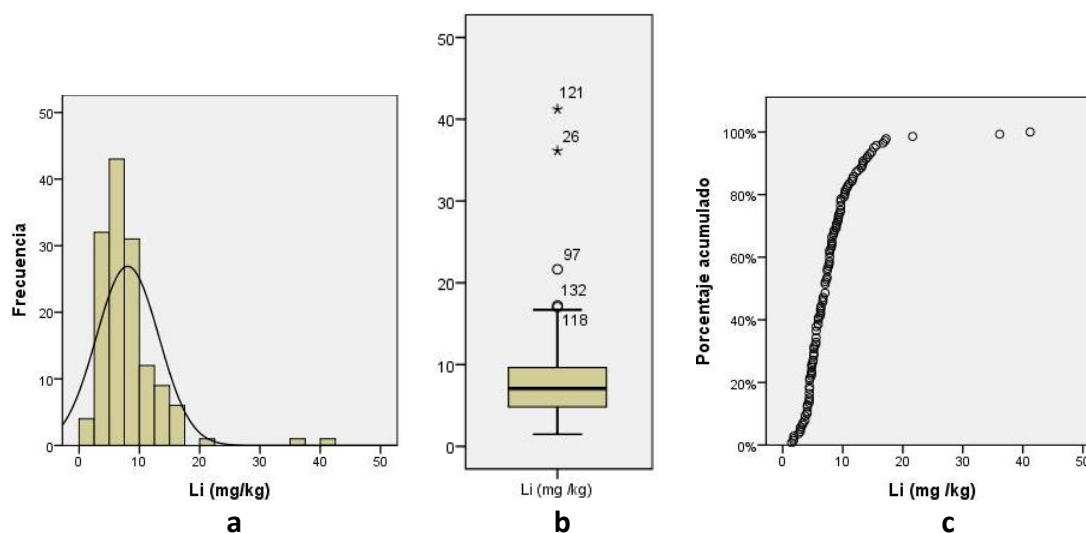


Figura 40: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Li en Top Soil.

- **Sub Soil**

En el histograma del Litio (Figura 41a) se observa sesgo a la izquierda y una mediana 7 mg kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 41b) existen 5 valores atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 15 mg kg⁻¹. (Figura 41c)

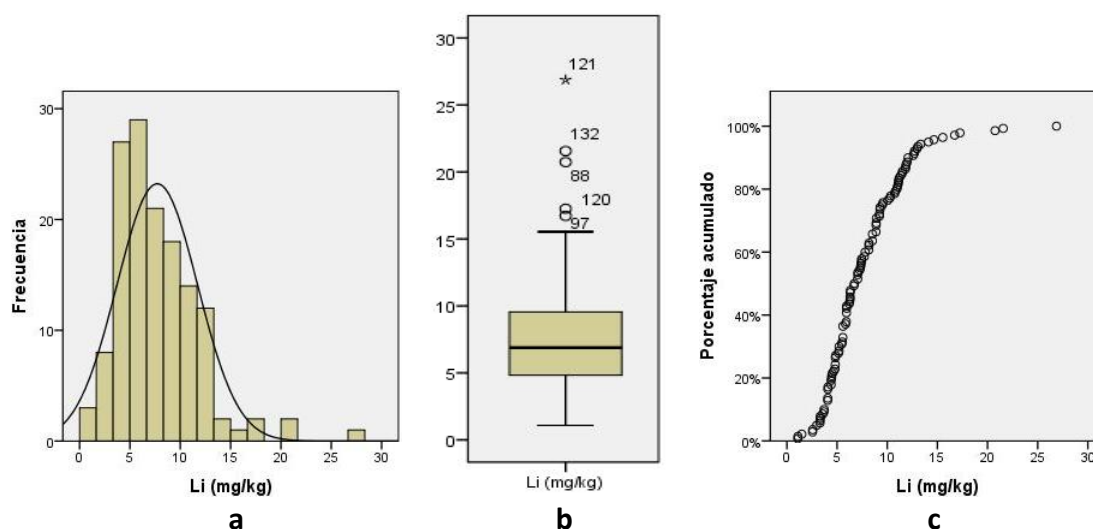


Figura 41: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Li en Sub Soil.

- **Deep Soil**

En el histograma del Litio (Figura 42a) se observa sesgo a la izquierda y una mediana 5 mg kg^{-1} , en el grafico Box Plot (Figura 42b) existen 9 valores atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 18 mg kg^{-1} . (Figura 42c)

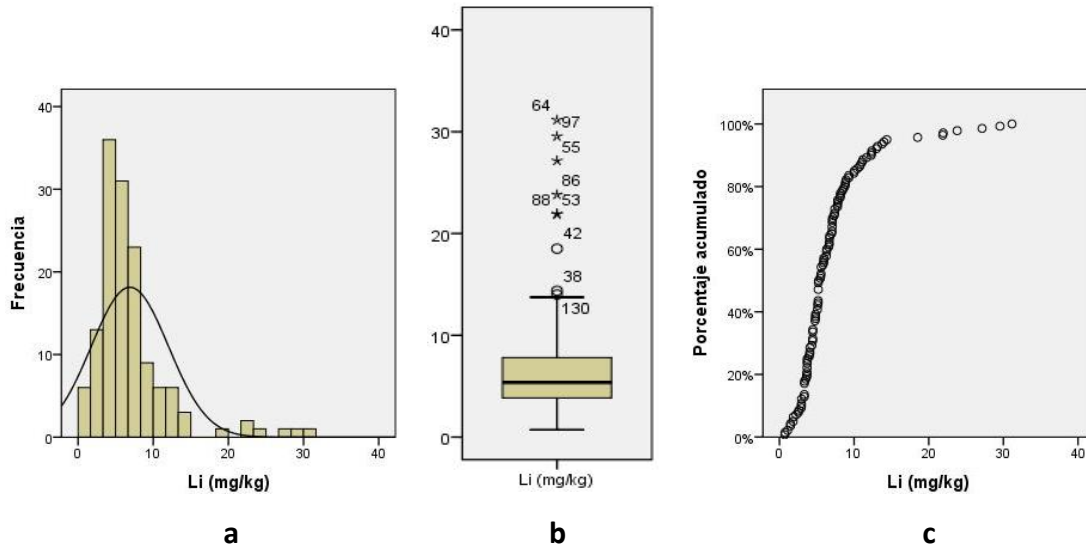


Figura 42: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Li en Deep Soil.

- **All Soil**

En el histograma del Litio (Figura 43a) se observa sesgo a la izquierda y una mediana 6 mg kg^{-1} , en el grafico Box Plot (Figura 43b) existen 19 valores atípicos superior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 15 mg kg^{-1} . (Figura 43c)

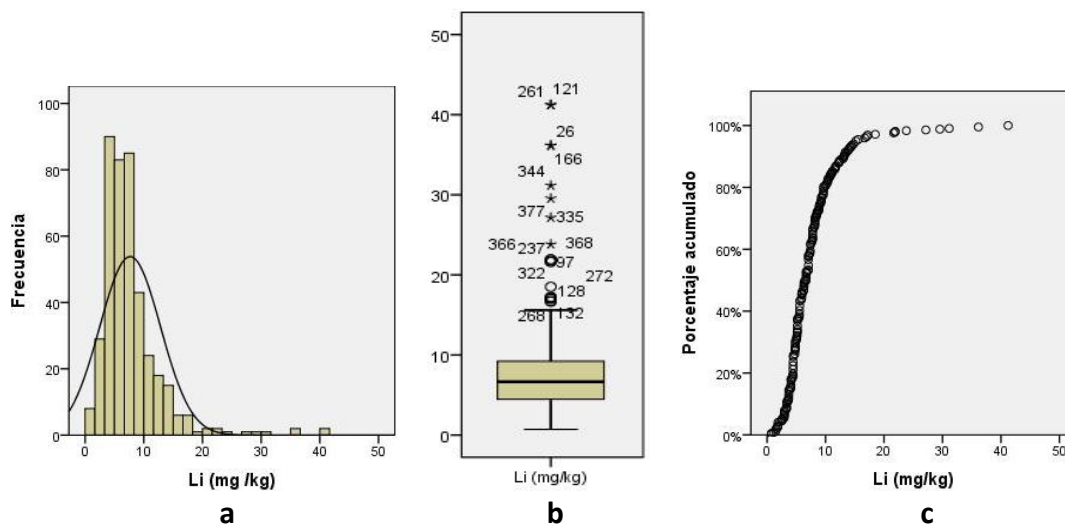


Figura 43: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Li en All Soil.

4.11 Gráficos estadísticos de Hierro (Fe)

- **Top Soil**

En el histograma del Hierro (Figura 44a) se observa un valor aislado de 125 g kg⁻¹ y una mediana 60 g kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 44b) existen 4 valores atípicos superior y 2 inferior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 85 g kg⁻¹. (Figura 44c)

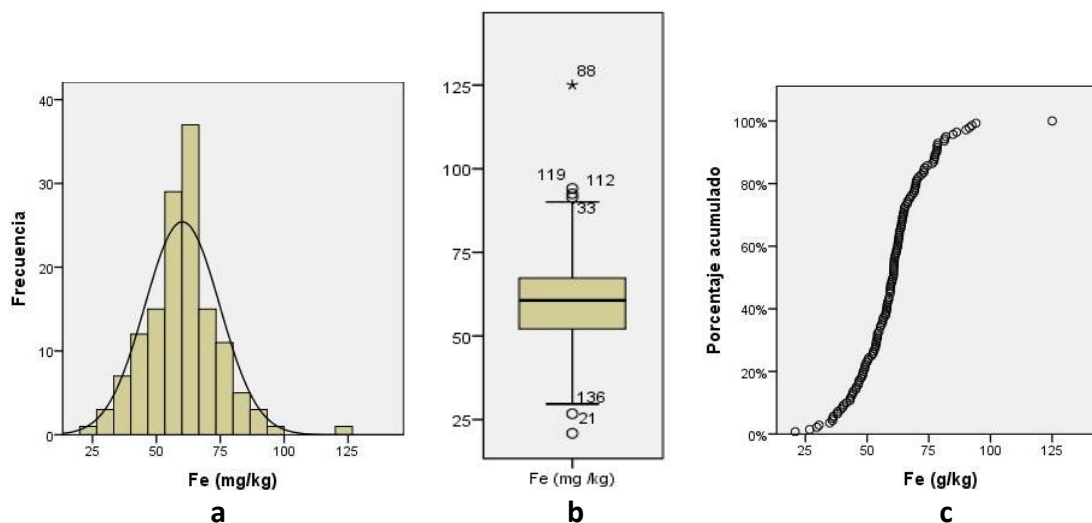


Figura 44: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Fe en Top Soil.

- **Sub Soil**

El histograma del Hierro (Figura 45a) se observa un valor aislado de 135 g kg⁻¹ y una mediana 59 g kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 45b) existen 4 valores atípicos superior y 3 inferior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 86 g kg⁻¹. (Figura 45c)

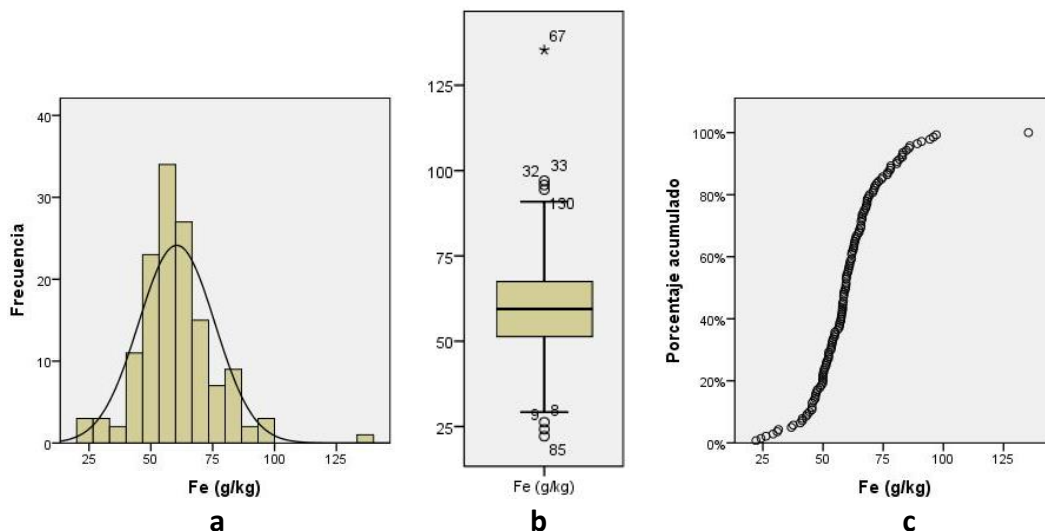


Figura 45: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Fe en Sub Soil.

- **Deep Soil**

El histograma del Hierro (Figura 46a) muestra tendencia normal y tiene una mediana de 59 g kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 46b) existen 2 valores atípicos superior (Muestras TLH 32 y 139) y 1 inferior (Muestra TLH 14). El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 87 g kg⁻¹. (Figura 46c).

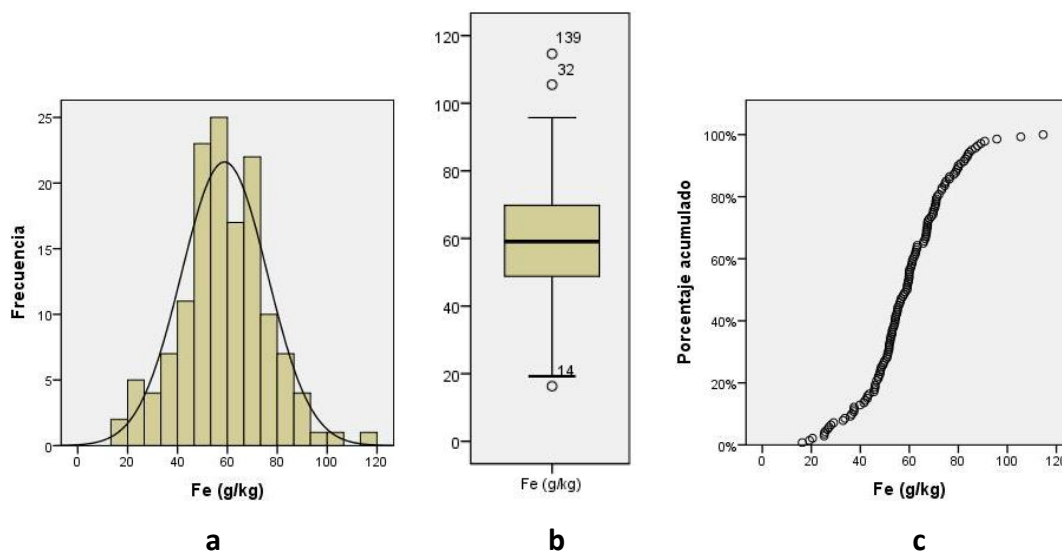


Figura 46: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Fe en Deep Soil.

- **All Soil**

El histograma del Hierro (Figura 47a) muestra tendencia normal y tiene una mediana de 59 g kg⁻¹, en el grafico Box Plot (Figura 47b) existen 7 valores atípicos superior y 6 inferior. El 95% de las muestras tiene concentraciones menores a 85 g kg⁻¹. (Figura 47c).

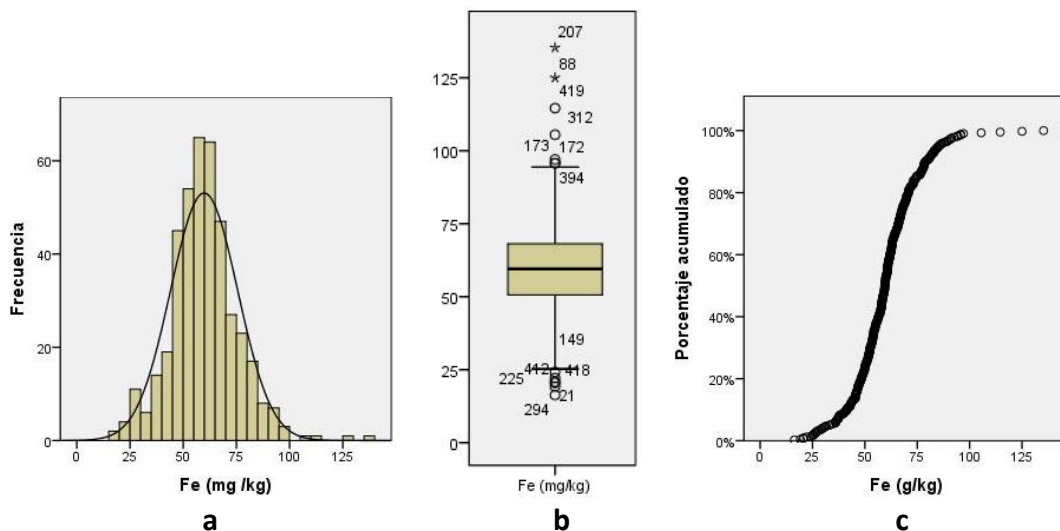


Figura 47: a) Histograma b) Box Plot c) Porcentaje Acumulado; para Fe en All Soil.

4.12 Estadística Descriptiva de los metales.

Las Tablas 15, 16, 17 y 18 presentan un resumen de parámetros estadísticos seleccionados de las capas del suelo. Se puede destacar que:

- La concentración máxima de Cromo para Deep Soil es mucho menor que el de los otros.
- Los elementos se comportan de manera similar en todos los suelos.

Elemento	Mediana	Media	SD	CV(%)	Sesgo	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD	Robust CV(%)
								5	25	50	75	95			
Cr (mg/kg)	133,74	145,35	70,14	48,26	3,18	19,300	67,5	68,45	101,27	133,74	167,14	258,32	654,5	32,76	24,50
Ni (mg/kg)	52,56	58,63	20,69	35,29	1,02	1,021	26,51	30,29	44,91	52,56	71,06	103,19	136,6	11,15	21,21
Li (mg/kg)	7,07	8,04	5,19	64,55	3,3	16,85	1,48	2,95	4,83	7,07	9,64	15,57	41,22	2,26	31,97
Fe (g/kg)	60,63	60,14	14,64	24,34	0,52	2,34	20,86	36,07	51,94	60,63	67,44	84,69	125,04	7,87	12,98

Tabla 15: Estadística simple para las muestras de Top Soil

Elementos	Mediana	Media	SD	CV(%)	Sesgo	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD	Robust CV(%)
								5	25	50	75	95			
Cr (mg/kg)	133,97	148,11	71,13	48,03	2,47	11,460	66,6	68,3	101,21	133,97	167,23	262,89	594,5	32,83	24,51
Ni (mg/kg)	56,21	59,48	20,63	34,68	0,74	0,202	26,4	30,18	43,83	56,21	73,13	97,23	119,6	13,74	24,44
Li (mg/kg)	6,88	7,71	4	51,88	3,3	4,06	1,08	2,99	4,83	6,88	9,56	14,62	26,87	2,33	33,87
Fe (g/kg)	59,45	60,46	12,42	20,54	0,83	3,61	22,2	36,87	51,31	59,45	67,64	86,04	135,3	7,89	13,27

Tabla 16: Estadística simple para las muestras de Sub Soil.

Elementos	Mediana	Media	SD	CV(%)	Sesgo	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD	Robust CV(%)
								5	25	50	75	95			
Cr (mg/kg)	133,66	137,99	52,91	38,34	0,68	-0,06	66,6	68,38	101,05	133,66	166,9	233,02	297,2	33,07	24,74
Ni (mg/kg)	58,93	58,97	20,02	33,95	0,69	0,66	26,4	30,04	41,38	58,93	72,31	89,81	130,4	15,05	25,54
Li (mg/kg)	5,37	6,89	5,13	74,46	2,53	7,87	0,72	1,84	3,79	5,37	7,82	18,3	31,15	1,72	32,03
Fe (g/kg)	59,10	58,82	17,23	29,29	0,10	0,51	16,32	26,62	48,67	59,10	69,85	86,89	114,62	10,64	18,00

Tabla 17: Estadística simple para las muestras de Deep Soil.

Elementos	Mediana	Media	SD	CV(%)	Sesgo	Curtosis	Min	Percentiles					Max	MAD	Robust CV(%)
								5	25	50	75	95			
Cr (mg/kg)	133,75	143,82	65,24	45,36	2,51	14,01	66,55	68,38	101,21	133,75	167,02	256,65	654,46	42,53	31,80
Ni (mg/kg)	56,13	59,03	20,4	34,56	0,82	0,58	26,36	30,18	44,19	56,13	71,19	96,88	136,57	14,03	25,00
Li (mg/kg)	6,67	7,66	5,19	67,75	2,98	13,46	0,72	2,59	4,47	6,67	9,22	15,57	41,22	2,59	38,83
Fe (g/kg)	59,57	59,8	15,78	26,39	0,42	1,93	16,32	32,99	50,65	59,57	68,18	85,70	135,33	11,95	20,06

Tabla 18: Estadística simple para las muestras de All Soil.

Las tablas 19, 20, 21 y 22 muestran la correlación de Spearman para los metales Cr, Ni, Li, Fe. El Litio con el Níquel así como en el Cromo no se correlaciona muy bien en ningún estrato, el Hierro se correlaciona con todos los demás elementos y en todos los suelos.

Top Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	-0,10	0,272**	0,467**
Ni		1,00	-0,10	0,04
Li			1,00	0,299**
Fe				1,00

Tabla 19: Correlación de Spearman para Cr, Ni, Li y Fe en Top Soil.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

Sub Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1,00	0,04	0,275**	0,378**
Ni		1,00	-0,01	0,192*
Li			1,00	0,33**
Fe				1,00

Tabla 20: Correlación de Spearman para Cr, Ni, Li y Fe en Sub Soil.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

Deep Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	-0,141	0,44**	0,396**
Ni		1	-0,006	0,159
Li			1	0,484**
Fe				1

Tabla 21: Correlación de Spearman para Cr, Ni, Li y Fe en Deep Soil.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

All Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	-0,072	0,33**	0,409**
Ni		1	-0,041	0,127**
Li			1	0,378**
Fe				1

Tabla 22: Correlación de Spearman para Cr, Ni, Li y Fe en All Soil.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

En la tabla 23 se hace una comparación entre A-B (Top Soil. y Sub Soil), B-C (Sub Soil y Deep Soil) y A-C (Top Soil y Deep Soil), con esto podemos hacer los siguientes análisis:

- Con el Li hay diferencia significativa en Sub Soil y en All Soil.
- Para el Cr u Ni no hay diferencia significativa en los suelos.
- En Top Soil no hay diferencia significativa entre los elementos.

	A-B	B-C	A-C
Cr	0,964	0,167	0,124
Ni	0,83	0,928	0,848
Li	0,893	0,001	0,003
Fe	0,697	0,142	0,035

Tabla 23: Prueba de wilcoxon (en color rojo se muestra los valores menores a 0,05, criterio de rechazo de la hipótesis nula de que las variables se comportan de manera similar)

4.13 Valores de Fondo

En las tablas 24 - 27 se muestran los valores de fondo para cada elemento junto al % de las muestras que esta sobre ella, para los distintos métodos seleccionados y tipo de suelo. Los métodos de Dutch Guideline Target e Intervention no tienen información para los elementos Li y Fe. Además se tomó como elemento base para calcular el factor de enriquecimiento el Hierro para Top y Sub Soil.

Top Soil	Cr	n°	%
Media ± 2*SD	236,27	7	5
Mediana ± 2*MAD	199	24	17,14
DG Target	58,43	140	100
E.F	2	7	5
Upper Whisker	265,95	4	2,86
DG Intervention	269,43	4	2,86

Sub Soil	Cr	n°	%
Media ± 2*SD	239,53	7	5
Mediana ± 2*MAD	199,04	26	18,57
DG Target	47,56	140	100
E.F	2	5	3,57
Upper	266,26	5	3,57
DG Intervention	222	17	12,14

Deep Soil	Cr	n°	%
Media ± 2*SD	239,51	6	4,29
Mediana ± 2*MAD	199,78	14	10,00
DG Target	58,49	140	100,00
Upper	265,68	1	0,71
DG Intervention	222,26	10	7,14

All Soil	Cr	n°	%
Media ± 2*SD	238,23	21	5,00
Mediana ± 2*MAD	199,14	70	16,67
DG Target	61,73	420	100,00
Upper	265,74	10	2,38
DG Intervention	234,58	21	5,00

Tabla 24: Valores de Fondo para Cromo (n°= número de muestras que están sobrevalores de fondo).

Top Soil	Ni	n°	%
Media ± 2*SD	94,48	7	5
Mediana ± 2*MAD	74,68	29	20,71
DG Target	7,93	140	100
E.F	2	6	4,29
Upper Whisker	110,29	3	2,14
DG Intervention	47,56	96	68,57

Sub Soil	Ni	n°	%
Media ± 2*SD	97,54	6	4,29
Mediana ± 2*MAD	82,01	22	15,71
DG Target	7,92	140	100,00
E.F	2	7	5
Upper	117,08	2	1,43
DG Intervention	47,54	91	65,00

Deep Soil	Ni	n°	%
Media ± 2*SD	96,73	5	3,57
Mediana ± 2*MAD	89	10	7,14
DG Target	7,95	140	100,00
Upper	118,71	1	0,71
DG Intervention	47,54	96	68,57

All Soil	Ni	n°	%
Media ± 2*SD	95,04	21	5,00
Mediana ± 2*MAD	84,88	47	11,19
DG Target	9,02	420	100,00
Upper	111,29	8	1,90
DG Intervention	54,11	222	52,86

Tabla 25: Valores de fondo para Níquel (n°= número de muestras que están sobrevalores de fondo).

Top Soil	Li	n°	%
Media ± 2*SD	13,91	12	8,57
Mediana ± 2*MAD	11,58	22	15,71
Upper Whisker	16,86	5	3,57
E.F	2	22	15,71

Sub Soil	Li	n°	%
Media ± 2*SD	13,66	13	9,29
Mediana ± 2*MAD	11,53	23	16,43
Upper	16,66	6	4,29
E.F	2	19	13,57

Deep Soil	Li	n°	%
Media ± 2*SD	11,42	15	10,71
Mediana ± 2*MAD	8,75	27	19,29
Upper	13,87	9	6,43

All Soil	Li	n°	%
Media ± 2*SD	13,18	35	8,33
Mediana ± 2*MAD	10,02	86	20,48
Upper	16,35	16	3,81

Tabla 26: Valores de fondo para Litio (n°= número de muestras que están sobrevalores de fondo).

Top Soil	Fe	n°	%
Media ± 2*SD	85,44	6	4,29
Mediana ± 2*MAD	75,04	20	14,29
Upper Whisker	92,17	3	2,14

Sub Soil	Fe	n°	%
Media ± 2*SD	85,44	7	5,00
Mediana ± 2*MAD	75,04	19	13,57
Upper	92,14	4	2,86

Deep Soil	Fe	n°	%
Media ± 2*SD	90,45	4	2,86
Mediana ± 2*MAD	79,32	16	11,43
Upper	101,63	2	1,43

All Soil	Fe	n°	%
Media ± 2*SD	88,21	16	3,81
Mediana ± 2*MAD	77,13	54	12,86
Upper	96,42	5	1,19

Tabla 27: Valores de fondo para Hierro (n°= número de muestras que están sobrevalores de fondo).

La Tabla 28 muestra un resumen de las tablas anteriores separado en Background y Polluted Values

%	Top Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Background Values	Media \pm 2*SD	5	5	8,57	4,29
	Mediana \pm 2*MAD	17,14	20,71	15,71	14,29
	Dutch Guideline Target	100	100	N/D	N/D
Polluted Values	Upper Whisker	2,86	2,14	3,57	2,14
	Enrichment Factor	5	4,29	15,71	Referencia
	Dutch Guideline Intervention	2,86	68,57	N/D	N/D

%	Sub Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Background Values	Media \pm 2*SD	5	4,29	9,29	5
	Mediana \pm 2*MAD	18,57	15,71	16,43	13,57
	Dutch Guideline Target	100	100	N/D	N/D
Polluted Values	Upper Whisker	3,57	1,43	4,29	2,86
	Enrichment Factor	3,57	5	13,57	Referencia
	Dutch Guideline Intervention	12,14	65	N/D	N/D

%	Deep Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Background Values	Media \pm 2*SD	4,29	3,57	10,71	2,86
	Mediana \pm 2*MAD	10	7,14	19,29	11,43
	Dutch Guideline Target	100	100	N/D	N/D
Polluted Values	Upper Whisker	0,71	0,71	6,43	1,43
	Dutch Guideline Intervention	7,14	68,57	N/D	N/D

%	All Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Background Values	Media \pm 2*SD	5	5	8,33	3,81
	Mediana \pm 2*MAD	16,67	11,19	20,48	12,86
	Dutch Guideline Target	100	100	N/D	N/D
Polluted Values	Upper Whisker	2,38	1,9	3,81	1,19
	Dutch Guideline Intervention	5	52,86	N/D	N/D

Tabla 28: Resumen de porcentaje de muestras sobre valores de fondo según método, para todos los suelos.

4.14 Uso de Suelo

Para hacer un estudio más refinado se clasifico el suelo según su uso de: Comercial, Industrial y Residencial, ya que es el más superficial y por lo tanto importante para la población en lo que es contaminación.

La Tabla 29 muestra el número de muestras (n) y porcentaje (%) de muestras según su uso de suelo.

	n	%
Zona Comercial	55	39,29
Zona Industrial	23	16,43
Zona Residencial	62	44,29
Total	140	100

Tabla 29: Uso de suelo de las muestras tomadas.

Con un 44% la zona Residencial fue la que más muestras se extrajo para el estudio, seguido por Comercial con 39% y finalmente Industrial con un 16%. La Figura 48 muestra el mapa de distribución según uso de suelo.

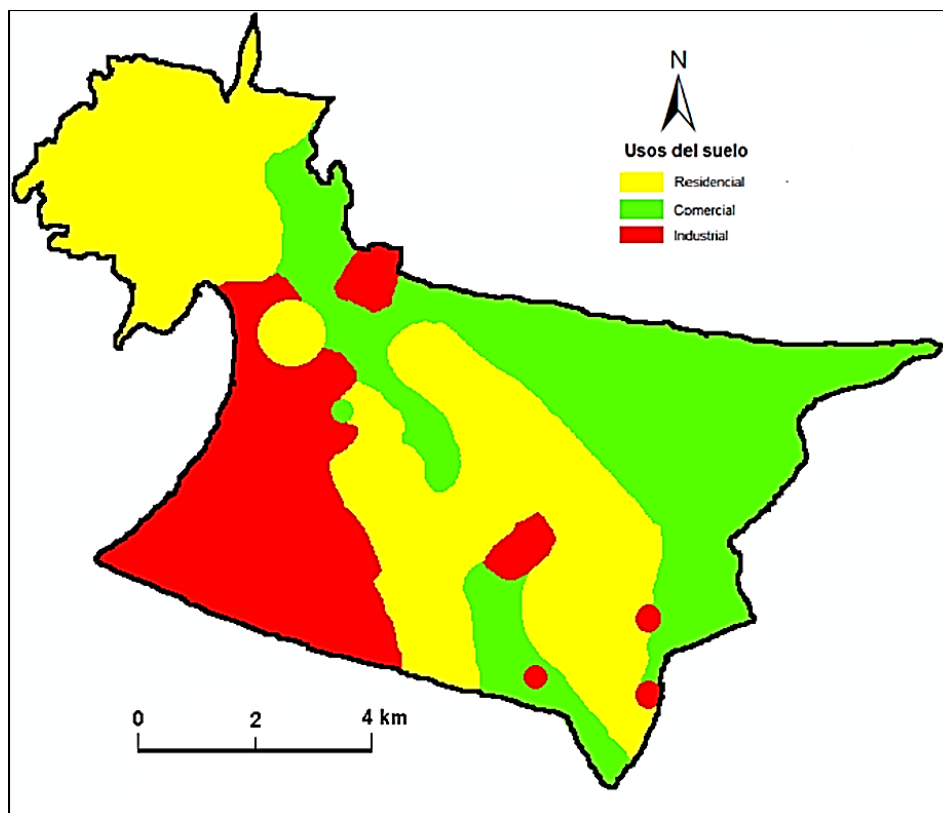


Figura 48: Mapa de distribución según uso de suelo.

La tabla 30, 31 y 32 muestra que la mediana de las concentraciones del Cromo, Lito y Hierro es mayor para la Residencial que para el resto de las zonas, pero la menor para el caso del Níquel. No se aprecia mayor diferencia entre Top, Sub y Deep Soil. Salvo en el caso del Cr entre Sub y Deep Soil que tiene diferencia en la mediana del 25%.

Top Soil	Comercial			Industrial			Residencial		
	(n=55)			(n=23)			(n=62)		
	Media	SD	Mediana	Media	SD	Mediana	Media	SD	Mediana
Cr (mg/kg)	120,52	35,97	129,31	140,77	49,35	134,19	169,07	89,67	149,32
Ni (mg/kg)	64,42	23,85	56,27	58,31	21,8	55,57	53,61	15,62	50,59
Li (mg/kg)	8,6	7,25	7,07	6,36	1,83	5,93	8,18	3,5	7,44
Fe (g/kg)	54,44	13	55,86	59,73	12,1	61,37	65,36	15,14	63,75

Tabla 30: Estadística descriptiva según uso de suelo para Top Soil.

Sub Soil	Comercial			Industrial			Residencial		
	(n=55)			(n=23)			(n=62)		
	Media	SD	Mediana	Media	SD	Mediana	Media	SD	Mediana
Cr (mg/kg)	128,00	43	133,40	152,10	69,3	134,20	164,30	87	163,80
Ni (mg/kg)	63,9	20,9	59,8	58,9	22,8	56,1	56,23	19,07	52,4
Li (mg/kg)	8,7	7,3	7,1	6,4	1,8	5,9	8,18	3,5	7,4
Fe (g/kg)	57	13,9	56,9	56,3	16	58,6	65,2	15,53	62,6

Tabla 31: Estadística descriptiva según uso de suelo para Sub Soil.

Deep Soil	Comercial			Industrial			Residencial		
	(n=55)			(n=23)			(n=62)		
	Media	SD	Mediana	Media	SD	Mediana	Media	SD	Mediana
Cr (mg/kg)	125,05	45,92	133,23	123,64	41,35	101,91	154,63	58,79	149,115
Ni (mg/kg)	67,66	22,33	67,23	55,94	11,28	55,57	52,85	17,25	48,785
Li (mg/kg)	6,26	5,20	5,08	5,66	2,01	5,2	7,94	5,76	5,945
Fe (g/kg)	54,18	18,07	54,41	58,23	12,76	56,11	63,24	17,27	60,92

Tabla 32: Estadística descriptiva según uso de suelo para Deep Soil.

Las tablas 33, 34 y 35 muestran las correlaciones de Spearman para los distintos usos de suelos entre Top, Sub y Deep Soil.

Comercial	Top Cr	Top Ni	Top Li	Top Fe	Sub Cr	Sub Ni	Sub Li	Sub Fe	Deep Cr	Deep Ni	Deep Li	Deep Fe
Top Cr	1,00	-0,15	0,16	,5 **	,5 **	-0,07	0,16	0,21	,5 **	-,3 *	0,24	0,21
Top Ni	-----	1,00	-,32 *	0,09	-,34 *	,55 **	-,32 *	0,18	-0,23	,55 **	0,02	0,09
Top Li	-----	-----	1,00	0,19	0,19	-0,08	1 **	0,11	0,08	-0,21	0,14	-0,07
Top Fe	-----	-----	-----	1,00	0,19	0,18	0,19	,72 **	,31 *	-0,07	,4 **	,49 **
Sub Cr	-----	-----	-----	-----	1,00	-0,08	0,19	,29 *	,65 **	-0,23	,28 *	,3 *
Sub Ni	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	-0,08	,34 *	-0,09	,45 **	0,22	0,26
Sub Li	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	0,11	0,08	-0,21	0,14	-0,07
Sub Fe	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	,37 **	0,15	,4 **	,73 **
Deep Cr	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	-0,14	,39 **	,47 **
Deep Ni	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	0,08	,27 *
Deep Li	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	,49 **
Deep Fe	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00

Tabla 33: Correlación de Spearman para uso de suelo Comercial entre Top, Sub y Deep Soil

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

Industrial	Top Cr	Top Ni	Top Li	Top Fe	Sub Cr	Sub Ni	Sub Li	Sub Fe	Deep Cr	Deep Ni	Deep Li	Deep Fe
Top Cr	1,00	,177	,365	-,10	0,69 **	,32	,365	-,111	0,5 **	,032	,033	-,337
Top Ni	-----	1,00	,294	,39	,361	,38	,294	,278	,009	0,57 **	,046	-,041
Top Li	-----	-----	1,00	,09	0,49 *	,41	1 **	,291	,124	,171	0,52 **	-,118
Top Fe	-----	-----	-----	1,00	,037	,04	,085	0,73 **	,296	-0,28	,355	0,58 **
Sub Cr	-----	-----	-----	-----	1,00	,30	0,49 *	,087	0,44 *	,071	,006	-,144
Sub Ni	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	,409	,378	-0,093	,316	,081	,007
Sub Li	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	,291	,124	,171	0,52 **	-,118
Sub Fe	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	,098	,049	,387	0,53 **
Deep Cr	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	-,252	,371	,049
Deep Ni	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	-,006	-,117
Deep Li	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	,321
Deep Fe	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00

Tabla 34: Correlación de Spearman para uso de suelo Industrial entre Top, Sub y Deep Soil

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

Residencial	Top Cr	Top Ni	Top Li	Top Fe	Sub Cr	Sub Ni	Sub Li	Sub Fe	Deep Cr	Deep Ni	Deep Li	Deep Fe
Top Cr	1,00	-,035	0,33 **	0,48 **	0,77 **	,153	0,33 **	0,61 **	0,58 **	-,016	0,26 *	0,4 **
Top Ni	-----	1,00	,041	,073	-,170	0,54 **	,041	,004	-,141	0,37 **	,184	,107
Top Li	-----	-----	1,00	0,34 **	,182	-,018	1	0,33 **	,164	-0,067	0,49 **	0,3 *
Top Fe	-----	-----	-----	1,00	0,36 **	0,27 *	0,34 **	0,73 **	0,25 *	0,29 *	0,38 **	0,59 **
Sub Cr	-----	-----	-----	-----	1,00	,106	,182	0,51 **	0,67 **	,026	,216	0,33 **
Sub Ni	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	-,018	,122	-0,009	0,56 **	,152	0,25 *
Sub Li	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	0,33 **	,164	-0,067	0,49 **	0,3 *
Sub Fe	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	0,30 *	,150	0,28 *	0,59 **
Deep Cr	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	-,014	0,40 **	0,4 **
Deep Ni	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	,095	0,36 **
Deep Li	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00	0,5 **
Deep Fe	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1,00

Tabla 35: Correlación de Spearman para uso de suelo Residencial entre Top, Sub y Deep Soil

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

Se puede concluir de la Tabla 36 que no hay diferencia significativa entre los uso de suelos, si cabe destacar que el Litio entre Top y Sub Soil tiene significancia asintótica 1 o sea que es el mismo en los 3.

Comercial	Sub Cr - Top Cr	Deep Cr - Sub Cr	Deep Cr - Top Cr
Z	-,746	-,846	-,302
Sig. asintót. (bilateral)	,456	,397	,763
	Sub Ni - Top Ni	Deep Ni - Sub Ni	Deep Ni - Top Ni
Z	-,436	-1,282	-,838
Sig. asintót. (bilateral)	,663	,200	,402
	Sub Li - Top Li	Deep Li - Sub Li	Deep Li - Top Li
Z	,000	-2,086	-2,086
Sig. asintót. (bilateral)	1,000	,037	,037
	Sub Fe - Top Fe	Deep Fe - Sub Fe	Deep Fe - Top Fe
Z	-,930	-1,014	-,419
Sig. asintót.	,352	,311	,675
Industrial	Sub Cr - Top Cr	Deep Cr - Sub Cr	Deep Cr - Top Cr
Z	-1,217	-1,703	-1,673
Sig. asintót. (bilateral)	,224	,089	,094
	Sub Ni - Top Ni	Deep Ni - Sub Ni	Deep Ni - Top Ni
Z	-,304	-,456	-,852
Sig. asintót. (bilateral)	,761	,648	,394
	Sub Li - Top Li	Deep Li - Sub Li	Deep Li - Top Li
Z	,000	-1,414	-1,414
Sig. asintót. (bilateral)	1,000	,157	,157
	Sub Fe - Top Fe	Deep Fe - Sub Fe	Deep Fe - Top Fe
Z	-1,247	-,578	-1,065
Sig. asintót.	,212	,563	,287
Residencial	Sub Cr - Top Cr	Deep Cr - Sub Cr	Deep Cr - Top Cr
Z	-1,377	-,228	-1,693
Sig. asintót. (bilateral)	,169	,820	,090
	Sub Ni - Top Ni	Deep Ni - Sub Ni	Deep Ni - Top Ni
Z	-,915	-1,371	-,088
Sig. asintót. (bilateral)	,360	,170	,930
	Sub Li - Top Li	Deep Li - Sub Li	Deep Li - Top Li
Z	,000	-1,774	-1,774
Sig. asintót. (bilateral)	1,000	,076	,076
	Sub Fe - Top Fe	Deep Fe - Sub Fe	Deep Fe - Top Fe
Z	-,200	-1,644	-1,784
Sig. asintót.	,842	,100	,074

Tabla 36: Prueba de Wilcoxon para uso de suelo

Las tablas 37, 38 y 39 muestran la correlación que existe entre los elementos según su profundidad y según su uso de suelo.

Top Soil	Cr	Ni	Li	Fe	Sub Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	-0,154	0,161	0,499**	Cr	1	-0,084	0,194	0,285*
Ni	-----	1	-0,317*	0,088	Ni	-----	1	-0,082	0,335*
Li	-----	-----	1	0,186	Li	-----	-----	1	0,112
Fe	-----	-----	-----	1	Fe	-----	-----	-----	1

Deep Soil	Cr	Ni	Li	Fe	Al Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	-0,135	0,387**	0,470**	Cr	1	-0,1284	0,253**	0,418**
Ni	-----	1	0,084	0,266*	Ni	-----	1	-0,120	0,213**
Li	-----	-----	1	0,494**	Li	-----	-----	1	0,278**
Fe	-----	-----	-----	1	Fe	-----	-----	-----	1

Tabla 37: Correlación de Spearman para elementos en uso de suelo Comercial.

Top Soil	Cr	Ni	Li	Fe	Sub Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	0,177	0,365	-0,097	Cr	1	0,298	0,494*	0,087
Ni	-----	1	0,294	0,391	Ni	-----	1	0,409	0,378
Li	-----	-----	1	0,085	Li	-----	-----	1	0,291
Fe	-----	-----	-----	1	Fe	-----	-----	-----	1

Deep Soil	Cr	Ni	Li	Fe	All Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	-0,252	0,371	0,049	Cr	1	0,132	0,429**	0,032
Ni	-----	1	-0,006	-0,117	Ni	-----	1	0,083	0,179
Li	-----	-----	1	0,321	Li	-----	-----	1	0,250*
Fe	-----	-----	-----	1	Fe	-----	-----	-----	1

Tabla 38: Correlación de Spearman para elementos en uso de suelo Industrial.

Top Soil	Cr	Ni	Li	Fe	Sub Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	-0,035	0,331**	0,481**	Cr	1	0,106	0,182	0,511**
Ni	-----	1	0,041	0,073	Ni	-----	1	-0,018	0,122
Li	-----	-----	1	0,342**	Li	-----	-----	1	0,335**
Fe	-----	-----	-----	1	Fe	-----	-----	-----	1

Deep Soil	Cr	Ni	Li	Fe	All Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Cr	1	-0,014	0,40**	0,40**	Cr	1	0,019	0,296**	0,470**
Ni	-----	1	0,095	0,366**	Ni	-----	1	0,048	0,197**
Li	-----	-----	1	0,496**	Li	-----	-----	1	0,412**
Fe	-----	-----	-----	1	Fe	-----	-----	-----	1

Tabla 39: Correlación de Spearman para elementos en uso de suelo Residencial.

* La correlación es significativa al nivel 0,01 (Bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,05 (Bilateral).

Índices de Contaminación

Los Índices de Contaminación se pueden utilizar para proporcionar una clasificación relativa de contaminación por niveles. El índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento pueden ser empleados para evaluar el estado de la contaminación y para estimar el impacto de las actividades antropogénicas (Lee et al, 2006; Loska et al, 2004).

Para este estudio se emplearon el Índice de Geo-acumulación (I_g) y el Índice de carga contaminante (PLI) para evaluar la contaminación de metales en Talcahuano.

Índice de Carga Contaminante (PLI)

Según Zhang et al. (2011), el PLI se divide en siete niveles, desde sin contaminación a alta contaminación, para indicar el grado de contaminación y clasificación como concentración de fondo. (Figura 49)

Grado de polución			
Grado	Nivel		Descripción
1	\leq	0	Sin polución
2	0	1	Sin polución a moderada
3	1	2	Polución moderada
4	2	3	Polución moderada a alta
5	3	4	Polución alta
6	4	5	Polución muy alta
7	5	\geq	Polución extrema

Figura 49: Grados de Polución según Zhang et al. (2011)

Índice de Geoacumulación (I_g)

El índice geoacumulación (I_g) es un criterio geoquímico para evaluar el nivel de contaminación en suelos o sedimentos y se ha utilizado desde finales de 1960 (Müller, 1969).

Según Muller (1969), el índice de geoacumulación consta de 7 clases y se usa la misma Figura 49.

La tablas 40 y 41 muestran los coeficientes de contaminación (necesario para calcular el PLI) y el coeficiente de enriquecimiento para Top y Sub Soil.

C.F

Top Soil									
Factor de Contaminacion									
Elemento	Media	S.D	Min	Percentiles					
				5	25	50	75	95	Max
Cr	,62	,30	,29	,29	,43	,57	,71	1,09	2,77
Ni	,62	,22	,28	,32	,48	,56	,75	1,09	1,45
Li	,58	,37	,11	,21	,35	,51	,69	1,12	2,96
Fe	,75	,57	,24	,42	,61	,71	,80	1,01	7,12

Sub Soil

Sub Soil									
Factor de Contaminacion									
Elemento	Media	S.D	Min	Percentiles					
				5	25	50	75	95	Max
Cr	,62	,30	,28	,29	,42	,56	,70	1,1	2,5
Ni	,61	,21	,27	,31	,45	,58	,75	1,0	1,2
Li	,59	,38	,11	,22	,35	,52	,71	1,1	3,0
Fe	,71	,18	,26	,43	,60	,70	,79	1,0	1,6

Tabla 40: Factor de Contaminación para Top y Sub Soil

E.F

Top Soil									
Factor de Enriquecimiento									
Elemento	Media	S.D	Min	Percentiles					
				5	25	50	75	95	Max
Cr	1,08	0,5	0,13	0,52	0,76	1	1,31	2,04	3,42
Ni	1,02	0,43	0,1	0,47	0,74	0,96	1,21	1,83	2,93
Li	1,4	1,33	0,24	0,4	0,84	1,1	1,48	3,72	12,23

Sub Soil

Sub Soil									
Factor de Enriquecimiento									
Elemento	Media	S.D	Min	Percentiles					
				5	25	50	75	95	Max
Cr	1,12	0,64	0,26	0,49	0,78	1,03	1,3	1,92	5,35
Ni	1,05	0,46	0,21	0,52	0,73	0,97	1,23	2,09	3,22
Li	1,5	1,52	0,27	12,84	0,44	0,86	1,1	1,48	4,51

Tabla 41: Factor de enriquecimiento para Top y Sub Soil.

La Tablas 42 muestra el porcentaje de contaminación según el Índice de Geoacumulacion para cada elemento en Top y Sub Soil respectivamente. La Tabla 43 nos muestra el porcentaje de contaminación según el PLI para cada suelo.

Indice de Geoacumulacion	Grado de Contaminacion	Cr	Ni	Fe
Top Soil	Sin polución	62,86%	99,29%	94,29%
	Sin polución a moderada	36,43%	0,71%	5,00%
	Polución moderada	0,71%	0%	0,71%
Sub Soil	Sin polución	60,00%	97,86%	93,57%
	Sin polución a moderada	39,29%	2,14%	6,43%
	Polución moderada	0,71%	0%	0%
Deep Soil	Sin polución	64,29%	100%	100%
	Sin polución a moderada	35,71%	0%	0%
	Polución moderada	0%	0%	0%

Tabla 42: Porcentajes de distribución utilizando el índice de geoacumulación para Top, Sub y Deep Soil

PLI	Top Soil	Sub Soil	Deep Soil
Sin polución	0%	0%	0%
Sin polución a moderada	97,86%	99,29%	99,29%
Polución moderada	2,14%	0,71%	0,71%

Tabla 43: Porcentajes de distribución utilizando el PLI para Top, Sub y Deep Soil

Se aprecia que los valores entre Top y Sub Soil son muy similares y además nos dice que bajo estos parámetros el suelo tendría un bajo porcentaje de contaminación moderada.

Determinación de lugares potencialmente peligrosos

Una vez finalizada la determinación de los valores de fondo por todos los métodos, se procedió a determinar las muestras que estaban sobre estos. Se considera un lugar como potencialmente peligroso cuando sobrepasa el valor de fondo de al menos 4 de los métodos utilizados.

La tabla 44 hace un resumen de las muestras (Enumeradas de 300 - 440) clasificadas por Top, Sub y Deep Soil que tienen potencial de riesgo.

	Top Soil	Sub Soil	Deep Soil	All Soil
Elemento	Codigo de muestra			
Cr	307	308	414	307-A
	419	309		308-B
		367		309-B
		372		367-B
		416		368-B
				372-B
				414-C
				416-B
				418-A
			419-A	
Ni		367	429	348-C
		429		367-B
				379-A
				429-A
				429-B
			429-C	
Li	421	326	338	326-A
	432	397	342	342-C
		418	353	353-C
		421	355	355-C
		428	364	364-C
		432	386	386-C
			388	388-B
			397	388-C
			430	397-A
				397-B
				397-C
				418-A
			420-B	
			421-A	
			421-B	
			428-A	
Fe	333	332	332	432-C
	388	333	439	433-B
	419	367		367-B
		430		388-A
			439-C	
PLI	326	367		
	419			

Tabla 44 Resumen de las muestras que sobre pasan la línea base.

Las concentraciones de Níquel en la muestra TLH 429 sobrepasa los límites en todos los estratos, al igual que el Litio en la muestra TLH 397. Para Top y Sub Soil el Litio pasa los límites en las muestras TLH 421 y TLH 432, también los hace el Hierro en TLH 333. Para Sub y Deep Soil. El Litio en la muestra TLH 388 y el Hierro en TLH 332 sobrepasan los valores de fondo.

Con las coordenadas y la determinación de las muestras potencialmente peligrosas se procede a ubicarlas en el mapa con ayuda de Google Earth.

Para el Cromo se utilizó el color Negro, Niquel con color Blanco, Litio verde, Hierro Café y los puntos con más de un elemento que sobrepasa los valores de fondo color Rojo

La Figura 50 muestra la ubicación de los puntos con muestras potencialmente peligrosas para Top Soil. La muestra TLH 419 tiene Cr, Fe y PLI con potencial, esta se encuentra en la calle Jaime Repullo en el patio de unos galpones de industrias.



Figura 50: Ubicación muestras potencialmente peligrosas en Top Soil.

La Figura 51 muestra la ubicación de las muestras potencialmente peligrosas para Sub Soil. La muestra TLH 367 tiene Cr, Ni, Fe y PLI con potencial de peligro y se encuentra en a las faldas del cerro Denavisur n°4, específicamente en el patio de una casa residencial en calle Lago Rupanco.



Figura 51: Ubicación muestras potencialmente peligrosas en Sub Soil.

La Figura 52 muestra la ubicación de las muestras potencialmente peligrosas para Deep Soil. En este estrato se nota mayor número de muestras de Litio, con respecto a los otros estratos. Así también el número de muestras de Cromo bajo en comparación a los estratos superiores.



Figura 52: Ubicación muestras potencialmente peligrosas en Deep Soil.

4.15 Distribución Espacial de los elementos.

Para determinar la distribución espacial de los metales se usó el programa ArcGis y su módulo de geoestadística como se explicó en la metodología, se complementa con el programa Vesper para la elección del variograma.

4.15.1 Análisis de ajuste de distribución.

En las Figuras 54 - 56 se hace un resumen del tipo de distribución que se ajusta cada a elemento, podemos ver que el hierro se distribuye normal para todos los estratos.

Cabe destacar Arcgis considera Distribución Normal a aquellos datos que tienen un sesgo menor a 1, por lo tanto se siguió ese

		Top Soil			
Cr (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,5	Distribucion Logaritmica
	Min:	1,83	Curtosis:	1,29	
	Max:	2,82	1° cuartil:	2,01	
	Media:	2,16	Mediana:	2,13	
	Desv. S:	1,85	3° cuartil:	2,22	
Ni (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,19	Distribucion Logaritmica
	Min:	3,28	Curtosis:	2,61	
	Max:	4,92	1° cuartil:	3,81	
	Media:	4,01	Mediana:	3,96	
	Desv. S:	0,34	3° cuartil:	4,26	
Li (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,1	Distribucion Logaritmica
	Min:	0,39	Curtosis:	4,12	
	Max:	3,72	1° cuartil:	1,58	
	Media:	1,94	Mediana:	1,96	
	Desv. S:	0,53	3° cuartil:	2,27	
Fe (g/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,52	Distribucion Normal
	Min:	20,86	Curtosis:	5,21	
	Max:	125	1° cuartil:	52,11	
	Media:	60,14	Mediana:	60,63	
	Desv. S:	14,65	3° cuartil:	67,31	

Figura 54: Resumen de la distribución de ajuste para cada elemento en Top Soil.

		Sub Soil			
Cr (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,05	Distribucion Logaritmica
	Min:	4,09	Curtosis:	2,59	
	Max:	5,98	1° quartil:	4,62	
	Media:	4,89	Mediana:	4,89	
	Desv. S:	0,4	3° quartil:	5,11	
Ni (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,73	Distribucion Normal
	Min:	26,35	Curtosis:	3,15	
	Max:	119,6	1° quartil:	43,91	
	Media:	59,47	Mediana:	56,21	
	Desv. S:	20,64	3° quartil:	72,2	
Li (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,1	Distribucion Logaritmica
	Min:	0,39	Curtosis:	4,12	
	Max:	3,72	1° quartil:	1,58	
	Media:	1,94	Mediana:	1,96	
	Desv. S:	0,53	3° quartil:	2,27	
Fe (g/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,83	Distribucion Normal
	Min:	22,16	Curtosis:	6,44	
	Max:	135,3	1° quartil:	51,33	
	Media:	60,45	Mediana:	59,45	
	Desv. S:	15,42	3° quartil:	67,48	

Figura 55: Resumen de la distribución de ajuste para cada elemento en Sub Soil.

		Deep Soil			
Cr (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,67	Distribucion Normal
	Min:	66,58	Curtosis:	2,9	
	Max:	297,2	1° quartil:	101,1	
	Media:	137,9	Mediana:	133,7	
	Desv. S:	52,91	3° quartil:	166,9	
Ni (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,69	Distribucion Normal
	Min:	26,44	Curtosis:	3,59	
	Max:	130,4	1° quartil:	41,37	
	Media:	58,96	Mediana:	58,92	
	Desv. S:	20,02	3° quartil:	72,02	
Li (mg/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	-0,16	Distribucion Logaritmica
	Min:	-0,33	Curtosis:	4,29	
	Max:	4,43	1° quartil:	1,35	
	Media:	1,72	Mediana:	1,68	
	Desv. S:	0,64	3° quartil:	2,06	
Fe (g/kg)	Muestras:	140	Sesgo:	0,09	Distribucion Normal
	Min:	16,31	Curtosis:	3,45	
	Max:	114,6	1° quartil:	48,84	
	Media:	58,82	Mediana:	59,1	
	Desv. S:	17,23	3° quartil:	69,82	

Figura 56: Resumen de la distribución de ajuste para cada elemento en Deep Soil.

4.15.2 Selección de Variograma.

Para la elección del variograma se selecciona el modelo que tuviera menor error, se comparó entre los resultados arrojados por el programa ArcGis y Vesper.

La Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (*Root Mean Squared Error*) es una medida de desempeño cuantitativa y consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos, este parámetro nos ayudara a decidir el modelo a seleccionar.

Comenzaremos analizando los datos con el programa Vesper. El modelo de Gauss está en el límite de la aceptabilidad de un proceso aleatorio y puede conducir a predicciones extrañas (Chiles y Delfiner, 2012).

En las tablas 45-47 vemos que el Níquel en Top y Sub Soil se puede acomodar a cualquier modelo, al igual que el Fe en Deep Soil. La tabla 48 muestra el resumen de los modelos generados por Vesper que se seleccionaron según el menor RMSE obtenido.

Top Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Modelo	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
Esférico	799	85,34	48,91	27,68
Exponencial	813	85,34	52,51	27,96

Tabla 45: Resumen de errores para diferentes modelos de variograma en Vesper para Top Soil.

Sub Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Modelo	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
Esférico	468	60,29	50,08	41,57
Exponencial	478	60,29	50,14	41,89

Tabla 46: Resumen de errores para diferentes modelos de variograma en Vesper para Sub Soil.

Deep Soil	Cr	Ni	Li	Fe
Modelo	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
Esférico	478	48,09	25,28	84,43
Exponencial	487	40,43	27,05	84,43

Tabla 47: Resumen de errores para diferentes modelos de variograma en Vesper para Deep Soil.

	Top Soil	Sub Soil	Deep Soil
Cr	Esférico	Esférico	Esférico
Ni	Esférico/Exponencial	Esférico/Exponencial	Exponencial
Li	Esférico	Esférico	Esférico
Fe	Esférico	Esférico	Esférico/Exponencial

Tabla 48: Resumen de los modelos seleccionado para los diferentes suelos con Vesper.

Ahora analizaremos los datos con ArcGis 10.1.

En las tablas 49-51 vemos que el Níquel en Top, Sub y Deep Soil se puede acomodar al modelo Esférico, al igual que el Fe. El Litio se acomoda a un modelo Exponencial en todo sus estratos.

La tabla 52 muestra el resumen de los modelos que se seleccionaron según el menor RMSE obtenido

Top Soil	Esférico	Exponencial
Cr	47,54	47,52
Ni	20,52	20,57
Li	5,37	5,33
Fe	13,04	13,11

Tabla 49: Resumen de errores para diferentes modelos de variograma en ArcGis para Top Soil.

Sub Soil	Esférico	Exponencial
Cr	52,82	52,87
Ni	20,87	20,90
Li	5,34	5,33
Fe	14,98	15,03

Tabla 50: Resumen de errores para diferentes modelos de variograma en ArcGis para Sub Soil.

Deep Soil	Esférico	Exponencial
Cr	46,62	47,65
Ni	18,84	18,98
Li	5,18	5,15
Fe	15,67	15,78

Tabla 51: Resumen de errores para diferentes modelos de variograma en ArcGis para Deep Soil.

	Top Soil	Sub Soil	Deep Soil
Cr	Exponencial	Esférico	Esférico
Ni	Esférico	Esférico	Exponencial
Li	Exponencial	Exponencial	Esférico
Fe	Esférico	Esférico	Esférico

Tabla 52: Resumen de los modelos seleccionado para los diferentes Suelos con ArcGis.

Por lo tanto, la selección del modelo de variograma una vez hecho la comparación con los 2 programas y dejando como primera opción los resultados arrojados por Vesper (debido a su interfaz más fácil e intuitiva que la de ArcGis), queda como muestra la Tabla 53.

	Top Soil	Sub Soil	Deep Soil
Cr	Esférico	Esférico	Esférico
Ni	Esférico	Esférico	Exponencial
Li	Esférico	Esférico	Esférico
Fe	Esférico	Esférico	Esférico

Tabla 53: Resumen de los modelos seleccionado.

Las tablas 54, 55 y 56 muestran el efecto pepita y meseta en los diferentes estratos. Se aprecia en el Cromo un efecto pepita muy superior a los demás elementos. El Níquel en Deep Soil y con el modelo exponencial no posee efecto pepita.

Top Soil			
Modelo Esférico	Efecto pepita (C0)	C1	Sill
Cr	2052,7	7291	9343,7
Ni	506,2	146,8	653
Li	233,2	216,7	449,9
Fe	768,6	48,58	817,18

Modelo Exponencial	Efecto pepita (C0)	C1	Sill
Cr	2037,5	11651	13688,5
Ni	623,9	29,04	652,94
Li	179,7	271,1	450,8
Fe	764,5	52,48	816,98

Tabla 54: Tabla Efecto pepita Top Soil.

Sub Soil			
Modelo Esférico	Efecto pepita (C0)	C1	Sill
Cr	2605,9	9475,5	12081,4
Ni	828,9	11,07	839,97
Li	345,8	87,81	433,61
Fe	826	39,6	865,6

Modelo Exponencial	Efecto pepita (C0)	C1	Sill
Cr	2583,7	13626	16209,7
Ni	812,3	27,6	839,9
Li	179,7	271,1	450,8
Fe	829,9	135,7	965,6

Tabla 55: Tabla Efecto pepita Sub Soil.

Deep Soil			
Modelo Esférico	Efecto pepita (C0)	C1	Sill
Cr	1976,8	4215,1	6191,9
Ni	775,4	69,95	845,35
Li	281,1	136,4	417,5
Fe	839,2	25,64	864,84

Modelo Exponencial	Efecto pepita (C0)	C1	Sill
Cr	1968,9	6711,6	8680,5
Ni	0	836,4	836,4
Li	251	170,7	421,7
Fe	864,8	0	864,8

Tabla 56: Tabla Efecto pepita Deep Soil.

4.15.3 Análisis de Tendencia.

Es importante analizar si los datos manifiestan tendencias direccionales y formular modelos de comportamiento. La tendencia más fuerte se tendrá sobre aquella dirección en la que la línea de tendencia es más gruesa. El eje de las X representa la dirección ESTE – OESTE y su proyección es la línea de color Verde, el eje Y representa la dirección NORTE – SUR y su proyección es la línea color Azul.

A continuación la Figura 57 hasta la Figura 59 muestra el tipo de tendencia que siguen nuestros datos para los diferentes estratos.

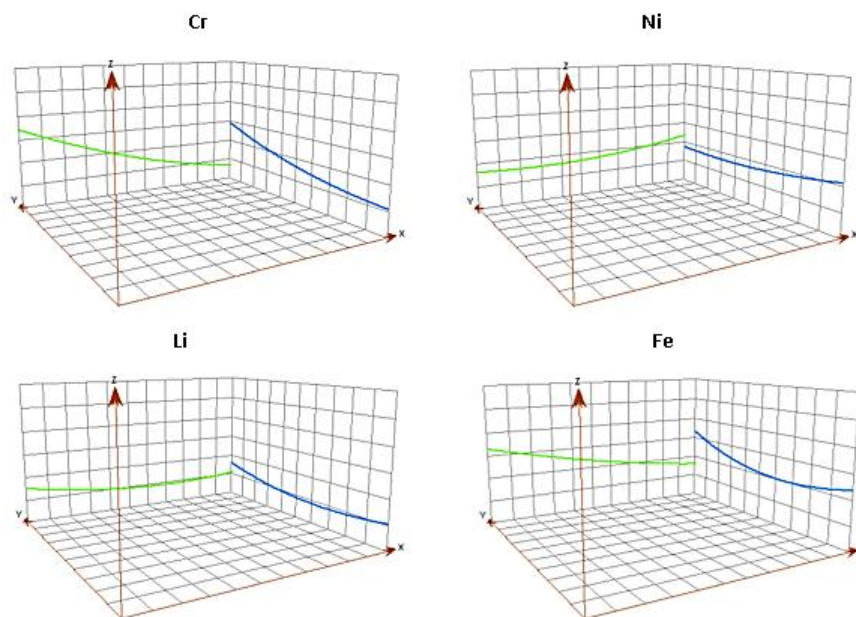


Figura 57: Gráficos de tendencia Top Soil.

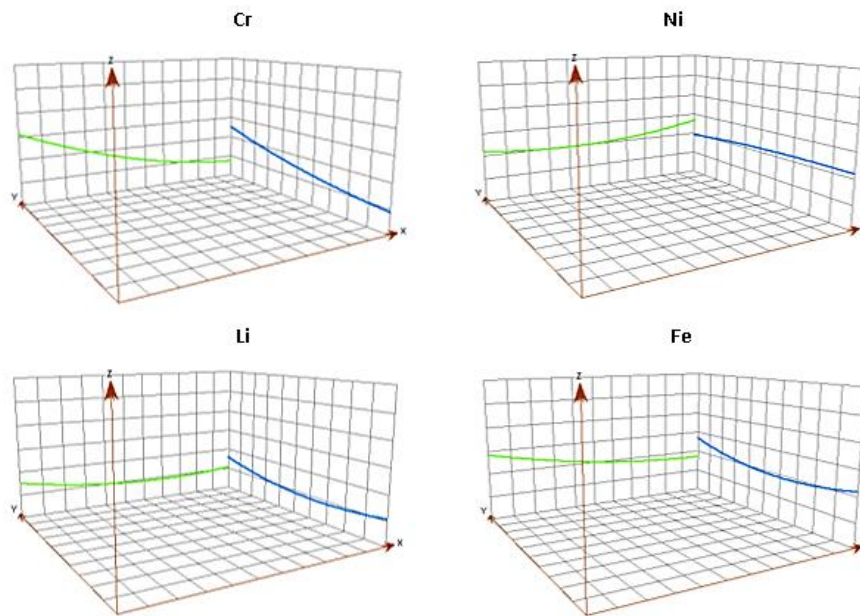


Figura 58: Gráficos de tendencia Sub Soil.

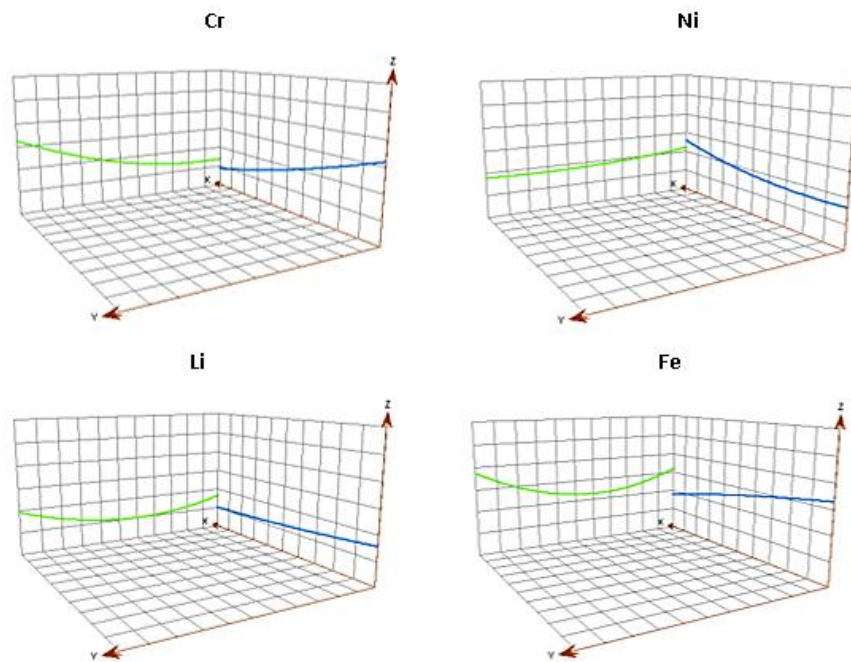


Figura 59: Gráficos de tendencia Deep Soil.

Todos los gráficos presentan una tendencia de 2° Orden. (Una curva con una concavidad) y orientación predominante ESTE – OESTE (Línea Verde)

4.15.4 Mapa de distribución espacial.

En la distribución espacial del Cromo vemos que no hay valores que sobrepasen los 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pero si tenemos la zona Portuaria y zona industrial con concentraciones elevadas que van de los 167-258 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en los 3 estratos. (Figuras 60-62)

CROMO

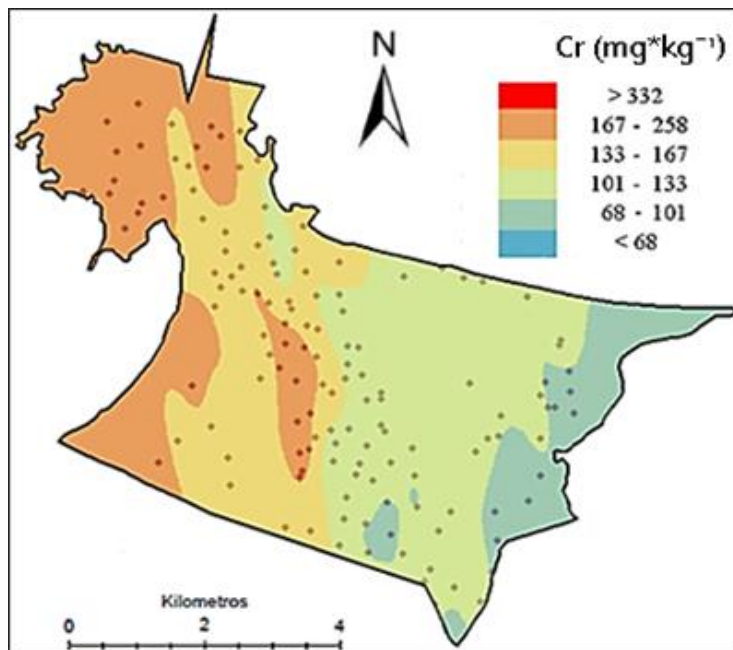


Figura 60: Mapa predicción de la distribución espacial Cromo Top Soil.

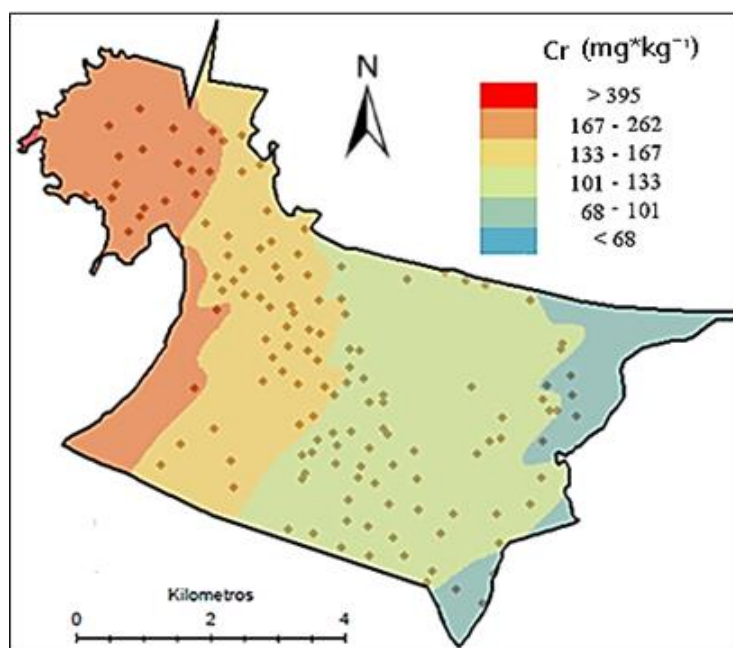


Figura 61: Mapa predicción de la distribución espacial Cromo Sub Soil.

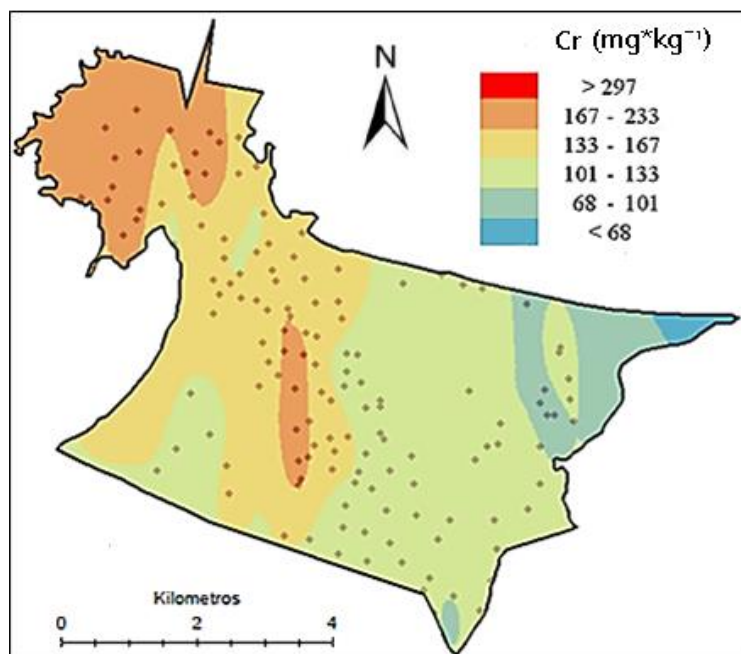


Figura 62: Mapa predicción de la distribución espacial Cromo Deep Soil.

NIQUEL

En la distribución espacial del Níquel vemos que hay valores que sobrepasen los 136 mg*kg⁻¹ y otras, con concentraciones elevadas que van de los 71-103 mg*kg⁻¹ en los 3 estratos. (Figuras 63-65)

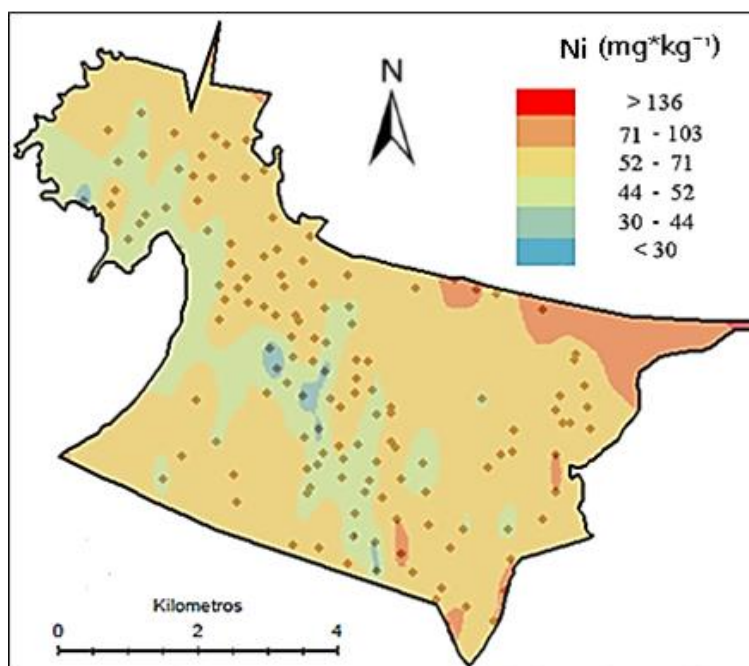


Figura 63: Mapa predicción de la distribución espacial Níquel Top Soil.

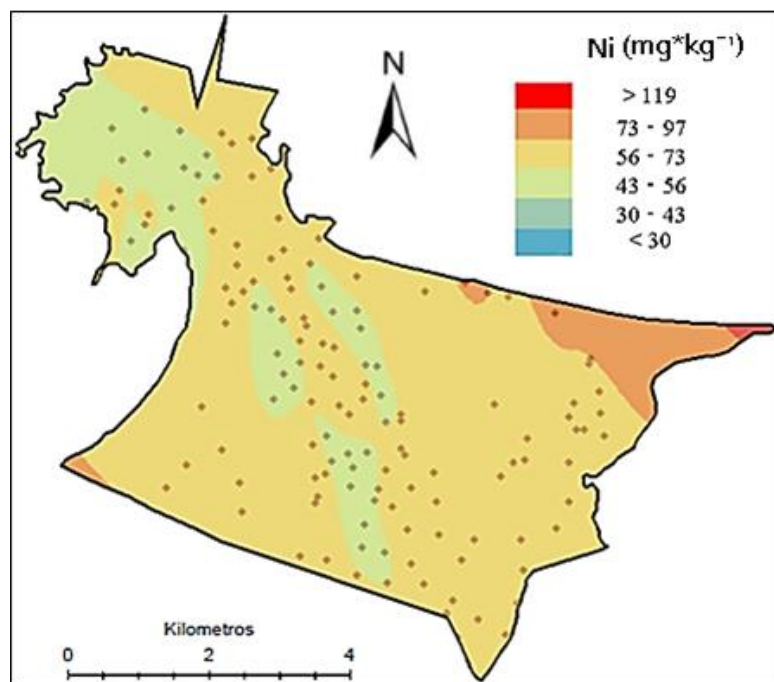


Figura 64: Mapa predicción de distribución espacial Níquel Sub Soil.

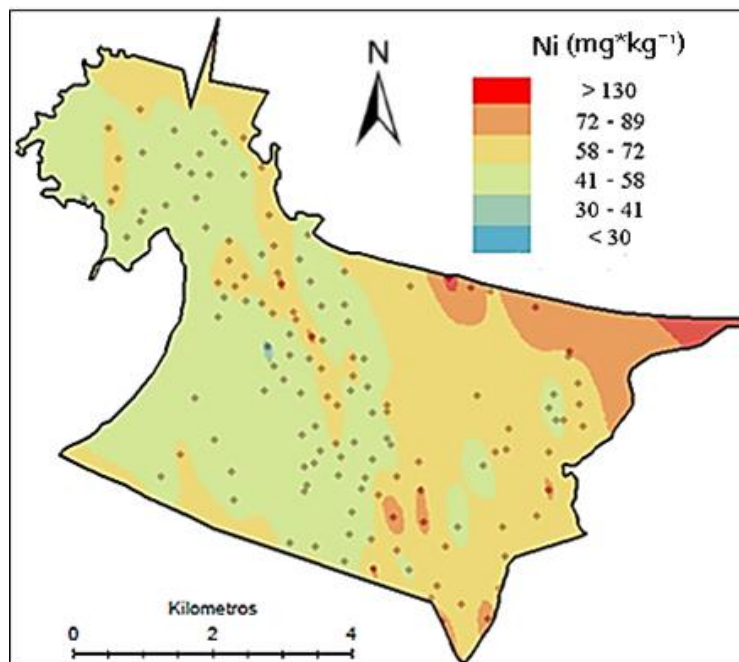


Figura 65: Mapa predicción de distribución espacial Níquel Deep Soil

LITIO

En la distribución espacial del Litio vemos que hay valores que sobrepasen los $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y otras, con concentraciones elevadas que van de los $7-18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ en los 3 estratos. (Figuras 66-68)

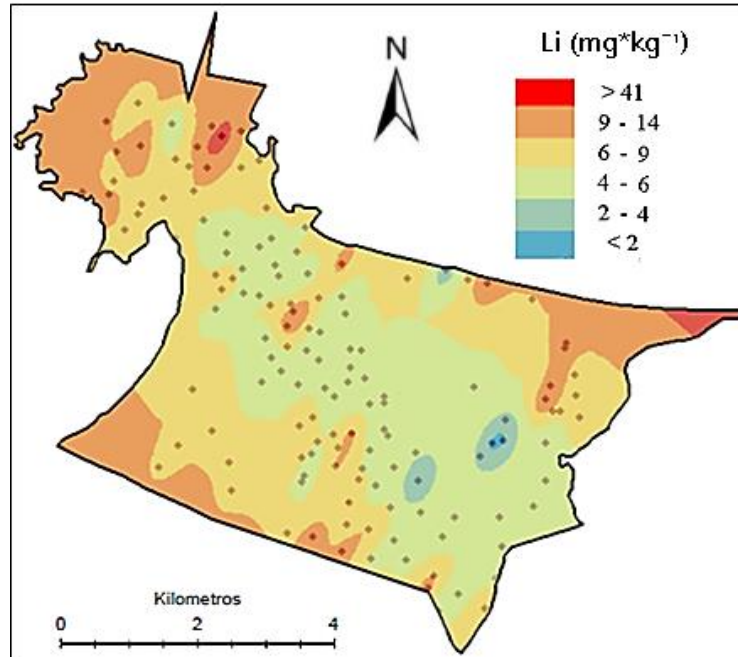


Figura 66: Mapa predicción de distribución espacial Litio Top Soil.

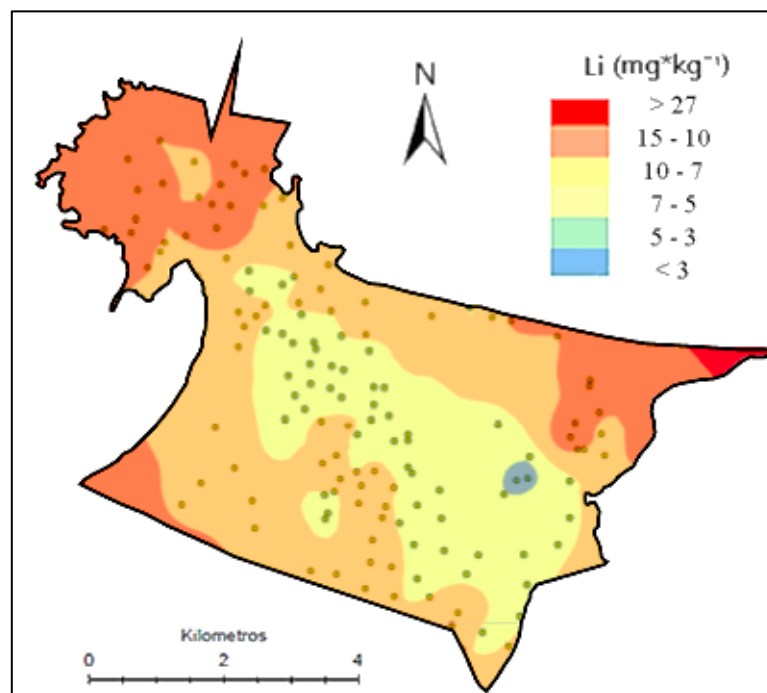


Figura 67: Mapa predicción de distribución espacial Litio Sub Soil.

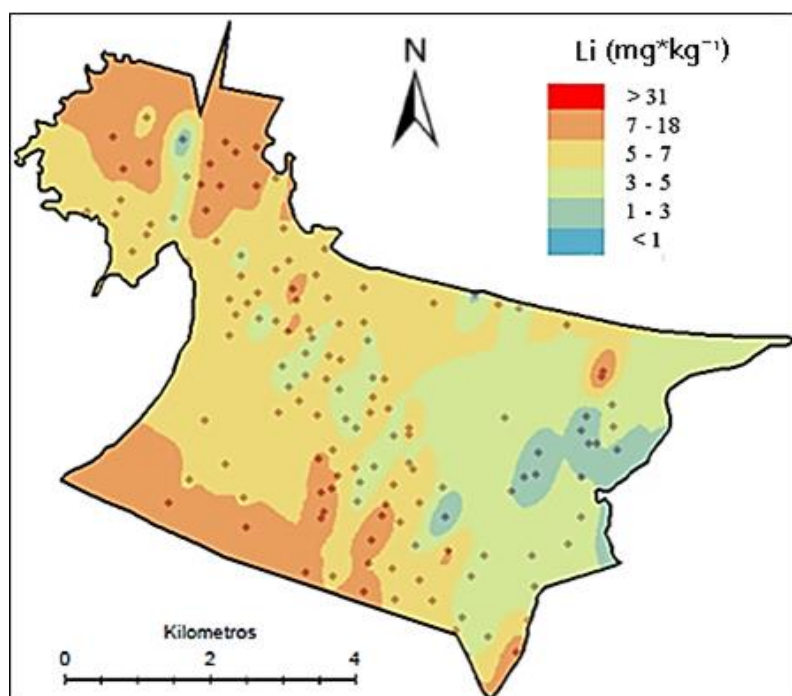


Figura 68: Mapa predicción de distribución espacial Litio Deep Soil.

HIERRO

En la distribución espacial del Hierro vemos que no hay zonas que sobrepasen los 135 g*kg^{-1} , y otras, con concentraciones elevadas que van de los 67-86 g*kg^{-1} en los 3 estratos. (Figuras 63-65)

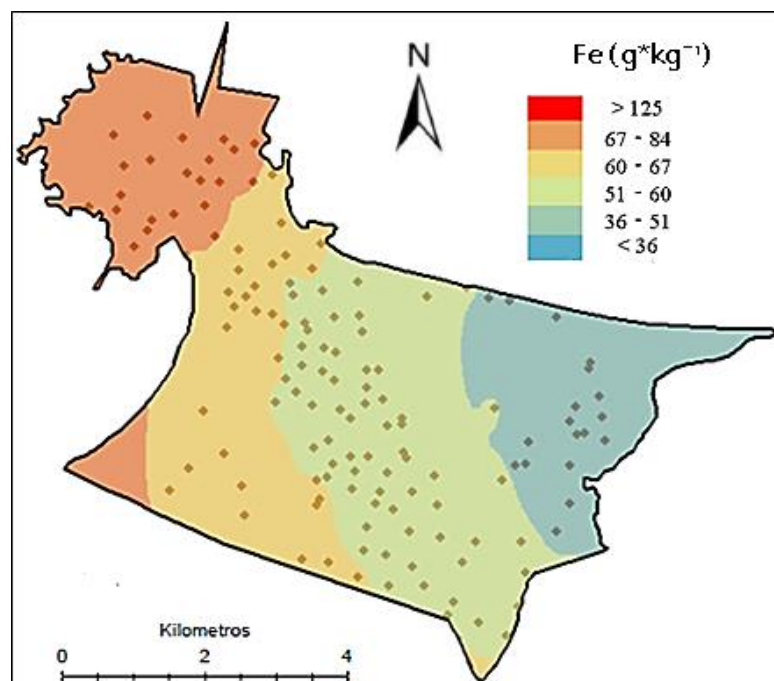


Figura 69: Mapa predicción de distribución espacial Hierro Top Soil.

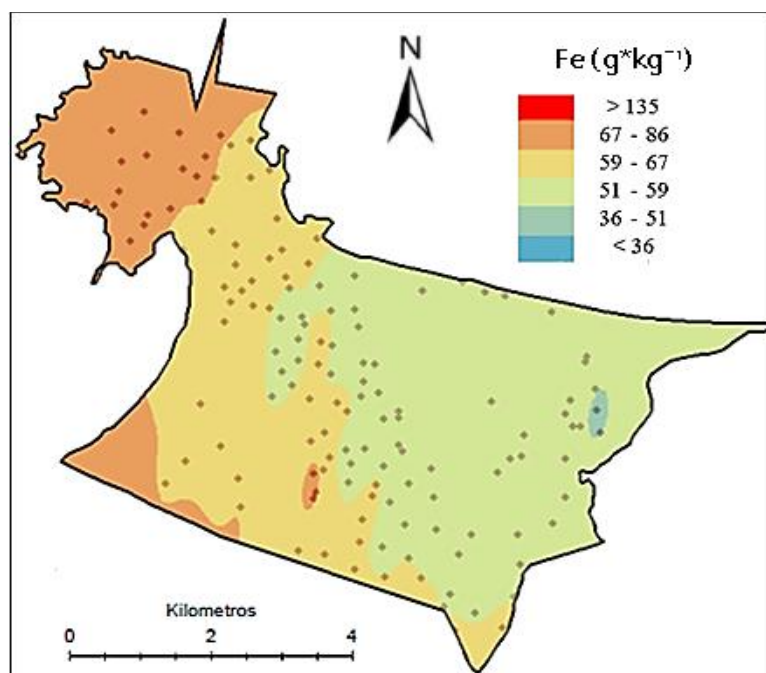


Figura 70: Mapa predicción de distribución espacial Hierro Sub Soil.

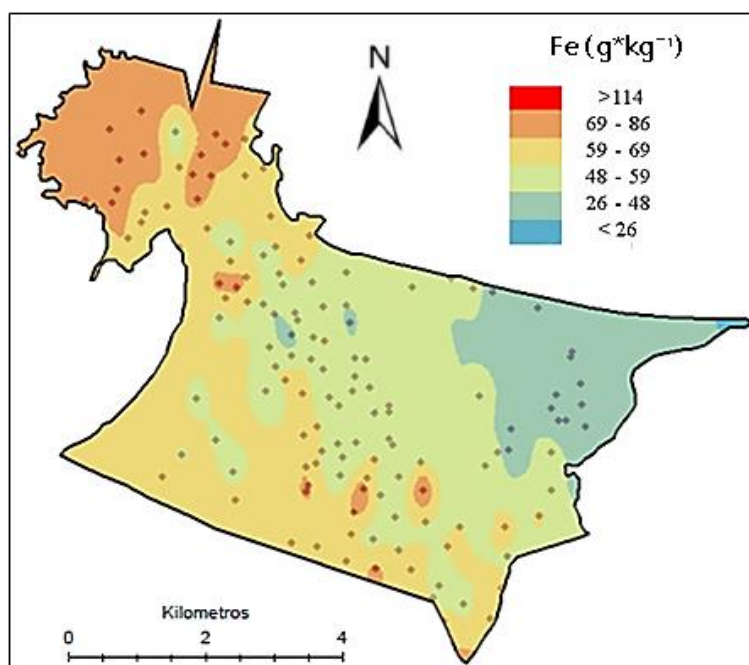


Figura 71: Mapa predicción de distribución espacial Hierro Deep Soil

CAPITULO: 5 DISCUSIONES

Se realizó un análisis de los aspectos más importantes de los resultados, separando estos en: análisis de los parámetros del suelo, análisis de los elementos, contaminación del suelo, uso de suelo, índices de contaminación y mapas de distribución espacial.

Análisis parámetros del suelo

Se determinó mediante el uso de triangulo textural de la USDA que el suelo en estudio es mayoritariamente Arenoso ($\pm 60\%$) y Franco Arenoso ($\pm 25\%$) para los 4 tipos de muestras Top, Sub, Deep y All Soil.

En la Tabla 57 están los principales valores estadísticos se determinaron para los parámetros del suelo

Top Soil					Deep Soil				
Elemento	Media	Mediana	Min	Max	Elemento	Media	Mediana	Min	Max
Ct %	4,6	3,7	0,48	28,3	Ct %	4	2,3	0,40	54,2
pH	6,9	7,0	4,0	9,7	pH	6,7	7	3,2	9,3
CIC (cmol /kg)	14	10,3	1,2	71,0	CIC (cmol /kg)	11,5	7,9	1,5	48,8
O.C (g/kg)	1,5	1,2	0,37	5,8	O.C (g/kg)	0,84	0,54	0,37	5,7

Sub Soil					All Soil				
Elemento	Media	Mediana	Min	Max	Elemento	Media	Mediana	Min	Max
Ct %	4,4	3,3	0,41	26,5	Ct %	4,3	3,1	0,4	54,2
pH	6,9	7,0	3,4	8,5	pH	6,9	7	3,2	9,7
CIC (cmol /kg)	13,7	9,4	0,92	76,3	CIC (cmol /kg)	13	9,2	0,9	76,3
O.C (g/kg)	1,3	1,0	0,37	4,6	O.C (g/kg)	1,2	0,88	0,4	5,8

Tabla 57: Estadísticos principales parámetros del suelo

El Carbono Total (Ct) en Deep Soil tiene una concentración máxima que es 2 veces mayor a la de los otros suelos, pH tiene una mediana de 7 por lo tanto podríamos decir que es neutro para todas las profundidades. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) en Deep Soil tiene una concentración máxima que es bastante menor a la de los otros suelos y por último la mediana del Carbono Orgánico (O.C) en Deep Soil es casi 2 veces menor que en el resto.

Para la correlación de Spearman (Tablas 9-12) notamos que $Ct/O.C=0,69$ tienen como promedio una correlación positiva para Top, Sub y Deep Soil, no así para All Soil que tienen correlación casi nula. Con una correlación $pH/Ct=-0,25$ promedio, decimos que estos se asocian de manera inversa para Top, Sub, Deep y All Soil, CIC y Ct tienen una relación aceptable en todos los suelos.

En la prueba de wilcoxon tenemos que Ct y O.C tienen diferencia significativa entre Top, Sub, Deep y All Soil, no así pH que no tiene diferencia significativa entre ellos.

Análisis de los elementos

A continuación se presenta la Tabla 58 con el resumen de los estadísticos más importantes los cuales ayudan a entender a mayor profundidad el comportamiento de los elementos en estudio.

Top Soil					Deep Soil				
Elemento	Media	Mediana	Min	Max	Elemento	Media	Mediana	Min	Max
Cr (mg/kg)	145	134	67,5	655	Cr (mg/kg)	138	134	66,6	297
Ni (mg/kg)	58,6	52,6	26,5	137	Ni (mg/kg)	59,0	58,9	26,4	130,4
Li (mg/kg)	8	7,1	1,5	41,2	Li (mg/kg)	6,9	5,4	0,72	31,2
Fe (g/kg)	60,1	60,6	20,9	125	Fe (g/kg)	58,8	59,1	16,3	115

Sub Soil					All Soil				
Elemento	Media	Mediana	Min	Max	Elemento	Media	Mediana	Min	Max
Cr (mg/kg)	148	134	66,6	595	Cr (mg/kg)	144	134	66,6	654
Ni (mg/kg)	59,5	56,2	26,4	120	Ni (mg/kg)	59	56,1	26,4	137
Li (mg/kg)	7,7	6,9	1,1	26,9	Li (mg/kg)	7,7	6,7	0,72	41,2
Fe (g/kg)	60,5	59,5	22,2	135	Fe (g/kg)	60	59,6	16,3	135

Tabla 58: Estadísticos principales para los elementos

Observamos que la concentración máxima de Cr para Deep Soil es 2 veces menor que para el resto de las profundidades. Como los elementos se comportan de manera similar en Top, Sub, Deep y All Soil podemos establecer algunos valores de referencia como conjunto, así tenemos que:

El Cromo tiene rango de 66–650 mg kg⁻¹ y mediana 134 mg kg⁻¹, el Níquel un rango de 26–137 mg kg⁻¹ y mediana de 55 mg kg⁻¹, el Litio tiene rango de 0,72–41 mg kg⁻¹ y mediana 6,5 mg kg⁻¹ y el Hierro posee un rango de 16–135 mg kg⁻¹ y mediana 60 mg kg⁻¹.

Las correlaciones de Spearman (Tablas 19-22) para los metales Cr, Ni, Li, Fe arrojan los siguientes resultados: las mejores correlaciones para Top, Sub y All Soil las tiene Cr/Fe=(0,47)(0,38)(0,41) y Li/Fe=(0,3)(0,48)(0,38) respectivamente, para Deep Soil tenemos Cr/Li=0,44 y Fe/Li=0,48. Este tipo de correlación (<0,9) nos indica la relación antropogénica de estos metales.

Para la prueba de wilcoxon (Tabla 23) tenemos que Li tiene diferencia significativa en Sub Soil y en All Soil. Para Cr y Ni no hay diferencia significativa en los suelos. En Top Soil no hay diferencia significativa entre los elementos.

La Tabla 59 muestra la comparación de las medianas de las concentraciones entre Talcahuano y ciudades puertos del mundo, en mg kg⁻¹

Localización	Cr	Ni	Referencia
Arica (Chile)	7.5	5.3	Rubio (2015)
Atenas(Grecia)	163	111	Argyaki y Kelepertzis (2014)
Estocolmo (Suiza)	7.5	13	Linde (2005)
Hong Kong (China)	17.8	4.08	Lee et al. (2006)
Lisbon (Portugal)	38	43	Cachada et al. (2013)
Oslo (Noruega)	30.5	29.4	Tijhuis (2013)
Palermo(Italia)	39	19.1	Manta et al. (2002)
Paraná(Brasil)	92.64	39.9	Licht et al. (2006)
Talcahuano (Chile)	39.1	31.9	Tume et al. (2014)
Tallin (Estonia)	40	16	(Bityukova, Shogenova y Birke. 2000)
Trondheim(Noruega)	73.3	47.8	Ottensen y Langedal (2001)

Tabla 59: Mediana de las concentraciones (mgkg⁻¹) en ciudades puertos del mundo

Para tener un punto de referencia se comparó la ciudad de Arica con otras ciudades puerto, asumiendo que cada ciudad tiene distinta Geología, Edad, Contaminación, etc.

La ciudad de Arica presenta la menor concentración de Cr con 7.5 mg kg⁻¹ y la ciudad de Atenas, Grecia la que presenta la mayor concentración promedio 163 mg kg⁻¹. Talcahuano está muy por sobre Arica pero menor que Atenas con 134 mg kg⁻¹. Arica posee la menor concentración de Ni con un 5.3 mg kg⁻¹, la mayor concentración se encuentra en la ciudad de Atenas, Grecia 111 mg kg⁻¹. Talcahuano está por sobre Arica y bajo Atenas con 56 mg kg⁻¹.

Contaminación de suelos

Se usaron 3 métodos para definir los Valores de Fondo o (Background Values) (Media + 2*SD, Mediana + 2*MAD y Dutch Guide Target) y 3 métodos para definir suelos que requieren una intervención rápida o Polluted Values (Enrich Factor, Upper Whisker y Dutch Guide Intervention). A continuación en la Tabla 60 se muestra la Tabla con los valores umbrales.

Valor Umbral	Cr				Ni				Li				Fe			
	T.S	S.S	D.S	A.S	T.S	S.S	D.S	A.S	T.S	S.S	D.S	A.S	T.S	S.S	D.S	A.S
Media ± 2*SD	236	240	240	238	94,5	97,5	96,7	95	13,9	13,7	11,4	13,2	85,4	85,4	90,5	88,2
Mediana ± 2*MAD	199	199	200	199	74,7	82	89	84,9	11,6	11,5	8,8	10	75	75	79,3	77,1
DG Target	58,4	47,6	58,5	61,7	7,9	7,9	8	9	---	---	---	---	---	---	---	---
E.F	2	2	---	---	2	2	---	---	2	2	---	---	---	---	---	---
Upper Whisker	266	266	266	266	110	117	119	111	16,9	16,7	13,9	16,4	92,2	92,1	102	96,4
DG Intervention	269	222	222	235	48	48	48	54	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabla 60: Valores Umbrales de concentraciones en suelos de Talcahuano

La tabla 61 muestra el porcentaje de las muestras que sobrepasan los valores umbrales según el método utilizado

%	Cr				Ni				Li				Fe			
	T.S	S.S	D.S	A.S	T.S	S.S	D.S	A.S	T.S	S.S	D.S	A.S	T.S	S.S	D.S	A.S
Media + 2*SD	5,0	5,0	4,3	5,0	5,0	4,3	3,6	5,0	8,6	9,3	10,7	8,3	4,3	5,0	2,9	3,8
Mediana + 2*MAD	17,1	18,6	10	16,7	20,7	15,7	7,1	11,2	15,7	16,4	19,3	20,5	14,3	13,6	11,4	12,9
DG Target	100	100	100	100	100	100	100	100	---	---	---	---	---	---	---	---
E.F	5,0	3,6	---	---	4,3	5,0	---	---	15,7	13,6	---	---	---	---	---	---
Upper Whisker	2,9	3,6	0,71	2,4	2,1	1,0	0,71	1,9	3,6	4,3	6,4	3,8	2,1	2,9	1,4	1,2
DG Intervention	2,9	12,1	7,1	5,0	68,6	65,0	68,6	52,9	---	---	---	---	---	---	---	---

T.S= Top Soil

S.S= Sub Soil

D.S= Deep Soil

A.S= All Soil

Tabla 61: (%) de muestras por encima del límite de concentraciones en suelos de Talcahuano.

Al observar los valores correspondiente a los Background Values de los dos primeros métodos de la Tabla 61 vemos que el método 2 (Mediana+ 2*MAD) arroja un mayor porcentaje de contaminación que el método 1 (Media + 2*SD) para todos los elementos en todos los suelos, llegando a un máximo del 21% para el caso del Niquel en Top Soil. Además vemos que el método de Target Value posee un 100% de proporción de contaminación en Cromo y Niquel en todos los suelos. Según el factor de enriquecimiento (E.F) el Litio tiene un 16 % de las muestras contaminadas, siendo el máximo medido.

El análisis de valores anómalos (polluted values) indica que no existe un porcentaje alto de contaminación de concentraciones por el método del upper whisker el mayor porcentaje se da con el Litio en Deep Soil (6,4%). Para los valores de intervención el Niquel está con un porcentaje elevado de muestras contaminadas $\pm 65\%$, en todos los suelos.

Uso de Suelo

Con un 44% la zona Residencial fue la que más muestras se extrajo para el estudio, seguido por Comercial con 39% y finalmente Industrial con un 16%. La tabla 62 resume los valores promedios para cada elemento según uso de suelo.

Media	Comercial			Industrial			Residencial		
	Top	Sub	Deep	Top	Sub	Deep	Top	Sub	Deep
Cr (mg*kg-1)	121	128	125	141	152	124	169	164	155
Ni (mg*kg-1)	64	64	68	58	59	56	54	56	53
Li (mg*kg-1)	8,6	8,7	6,3	6,4	6,4	5,7	8,2	8,2	7,9
Fe (g*kg-1)	54	57	54	60	56	58	65	65	63

Tabla 62: Valores medios según uso de suelo para los elementos

Para el Cromo y el Hierro tenemos una mayor concentración promedio en la zona Residencial y menor en Comercial, el Níquel tiene mayor concentración promedio en la zona Comercial y menor concentración en Residencial. Por último el Litio tiene mayor concentración en Comercial Sub Soil con $8,7 \text{ mg kg}^{-1}$ y menor en Industrial Deep Soil con $5,7 \text{ mg kg}^{-1}$.

En cuanto a las correlaciones de Spearman para el análisis vertical encontramos las correlaciones más grandes en el Litio para Sub y Top Soil con una correlación 1, seguido del Hierro entre Sub y Deep Soil con 0,73, esto se da para los 3 usos de Suelo comercial, industrial y residencial, viendo que para el uso de suelo su fuente es de origen Antropogénica.

En la prueba de wilcoxon tenemos que el Litio no tiene diferencia significativa entre ninguna de sus profundidades ni uso de suelo, es 1 para todo. En comercial tenemos la máxima similitud de muestras en el Cromo entre Deep y Top Soil con un valor de 0,76, Industrial el Níquel entre Top y Sub Soil con 0,76 y residencial el Níquel entre Top y Deep Soil con un 0,93. Para las correlación de Spearman en el análisis horizontal tenemos que las mejores correlaciones para el uso de suelo comercial las tiene el Hierro para Top Soil $\text{Cr/Fe}=0,5$, Sub Soil $\text{Ni/Fe}=0,34$, Deep Soil $\text{Li/Fe}=0,49$ y All Soil $\text{Cr/Fe}=0,42$. Para Industrial no hay correlaciones importantes para Top y Deep Soil, para Sub y All Soil tenemos $\text{Cr/Li}=0,49$ y $\text{Cr/Li}=0,43$ respectivamente. En Residencial Nuevamente el Hierro se correlaciona bien en todos las profundidades Top $\text{Cr/Fe}=0,48$, Sub $\text{Cr/Fe}=0,51$, Deep $\text{Li/Fe}=0,5$ y All Soil $\text{Cr/Fe}=0,47$.

Índices de contaminación

Para este estudio se emplearon, el Índice de carga contaminante (PLI) (Tabla 63) y el Índice de Geo-acumulación (I_g) (Tabla 64) para evaluar la contaminación de metales en Talcahuano.

PLI	Top Soil	Sub Soil	Deep Soil
Sin polución	0%	0%	0%
Sin polución a moderada	97,86%	99,29%	99,29%
Polución moderada	2,14%	0,71%	0,71%

Tabla 63: Índices de carga contaminante para cada profundidad.

Indice de Geoacumulacion	Grado de Contaminacion	Cr	Ni	Fe
Top Soil	Sin polución	62,86%	99,29%	94,29%
	Sin polución a moderada	36,43%	0,71%	5,00%
	Polución moderada	0,71%	0%	0,71%
Sub Soil	Sin polución	60,00%	97,86%	93,57%
	Sin polución a moderada	39,29%	2,14%	6,43%
	Polución moderada	0,71%	0%	0%
Deep Soil	Sin polución	64,29%	100%	100%
	Sin polución a moderada	35,71%	0%	0%
	Polución moderada	0%	0%	0%

Tabla 64: Índice de Geoacumulacion para los elementos en las distintas profundidades.

Según el índice de geoacumulacion el Cromo y el Hierro tendrían un 0,71% de las muestras con contaminación moderada para Top y Sub Soil, el Níquel tiene casi un 100% de sus muestras sin contaminación en todas las profundidades. Para el PLI se aprecia que los valores entre Top, Sub, y Deep Soil son muy similares y bajo estos parámetros el suelo tendría una contaminación moderada.

La muestra 419 tiene Cr y Fe con potencial de contaminación, esta se encuentra en la calle Jaime repullo en el patio de unos galpones de unas industrias (Top Soil). Esto tiene relación al ser una zona industrial y puede que esa zona sea de acopio industrial.

La muestra 367 tiene Cr, Ni y Fe con potencial de peligro y se encuentra en a las faldas del cerro Denavisur n°4, específicamente en el patio de una casa residencial en Lago Rupanco. Esto para el caso Sub Soil. Que se encuentre niveles altos de Cr, Ni y fe en el patio de una casa residencial a los 20 cm. es bastante preocupante y sin duda es un asunto a tratar frente a las autoridades, tratando de hacer una análisis del porque esos niveles solo se podría atribuir a la gran cantidad de industrias presentes al otro lado del cerro.

La muestra 418 tiene Cr y Li y se encuentra en San Vicente, (Este es un sitio eriazo probablemente un botadero clandestino) la muestra 388 tiene Li y Fe y está en la calle Almirante Latorre con Argentina (También un sitio eriazo ubicado en la intersección de ambas calles). La muestra 367 otra vez aparece ahora para All soil.

Con lo anterior podemos identificar y localizar los puntos específicos que están con potencial de contaminación.

Para saber el porqué estas muestras son potencialmente peligrosas se debería hacer un estudio más profundo y tratar de determinar la fuente de contaminación (Industria, Puertos, rellenos, botaderos, etc)

Mapas de distribución espacial de la concentración de elementos.

Se analizarán los mapas de distribución espacial de los 4 elementos (Cromo, Litio, Níquel y Hierro) y sus respectivas profundidades ordenadas Top, Sub y Deep Soil.

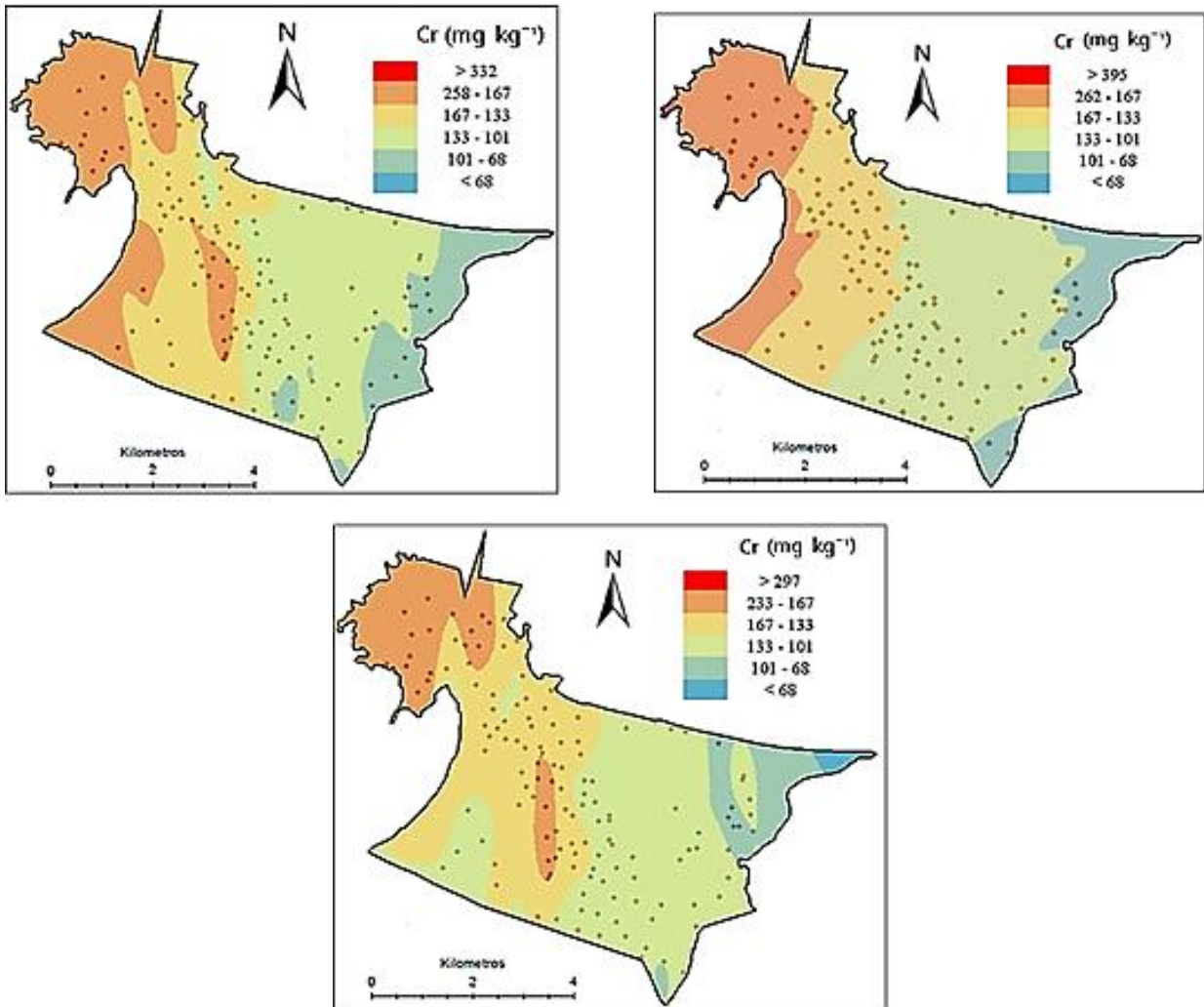


Figura 72: Mapa distribución espacial Cr para Top (Izq.), Sub (Der.) y Deep Soil (Abajo).

Podemos notar que la concentración de Cromo aumenta hacia el Noroeste con concentraciones elevadas que van del rango de $167\text{-}258 \text{ mg kg}^{-1}$ tanto en Top, Sub como en Deep Soil (Figura 72). Estas altas concentraciones se encuentran dentro de la zona de San Vicente y sector de las industrias, aunque en Deep Soil la zona de industrias baja sus niveles de concentración. También encontramos la zona de Denavisur tiene concentraciones elevadas de Cromo en Top y Deep Soil.

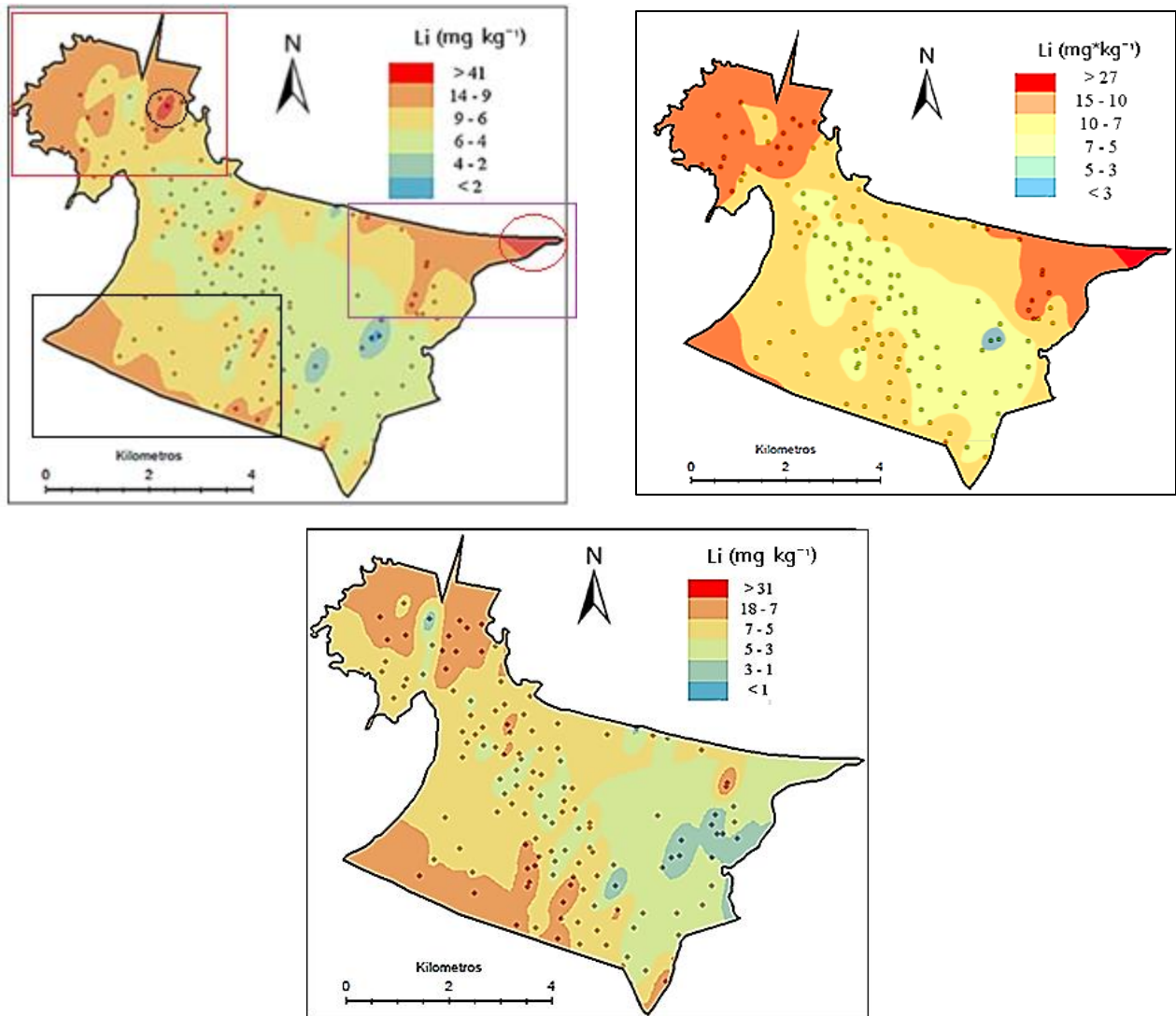
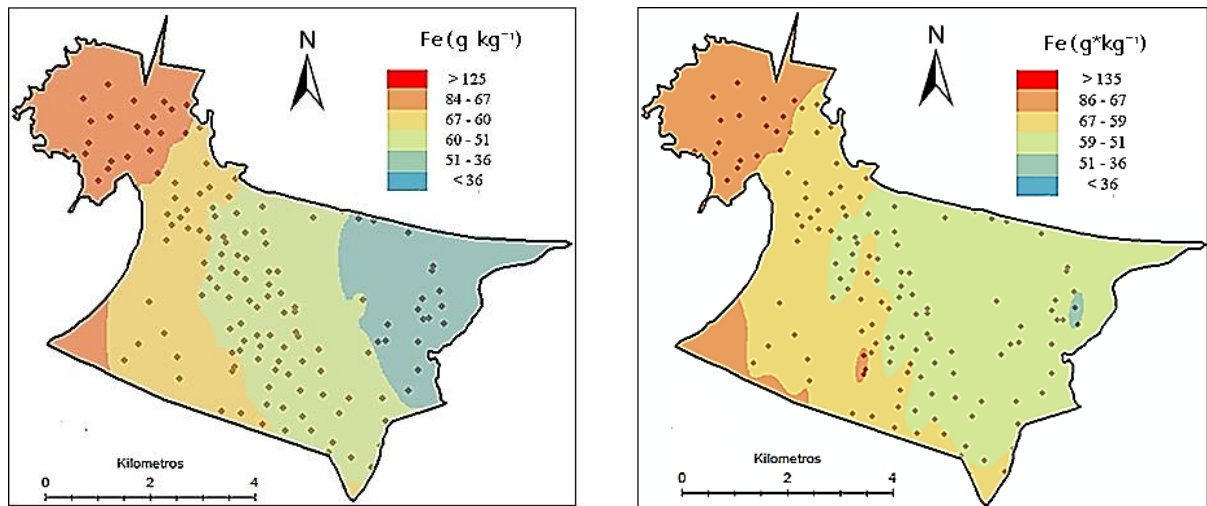


Figura 73: Mapa distribución espacial Li para Top (Izq.), Sub (Der.) y Deep Soil (Abajo).

La distribución espacial de Litio en sus suelos Top y Sub son bastante parecidas, pero Deep es diferente (Figura 73). Para Top y Sub Soil tenemos también nos encontramos con concentraciones elevadas entre 9-14 mg kg^{-1} . en la zona de San Vicente y el sector norte de la ciudad (Cuadrado rojo), todo el sector aledaño a la Av. Las Golondrinas (Cuadrado Negro), en el sur y al este los humedales cercanos a la ruta interportuaria (Cuadrado Morado). La desembocadura del río Andalien y una pequeña zona cerca del cerro Centinela tienen valores de contaminación que superan los 41 mg kg^{-1} , Círculo rojo y negro respectivamente.

En Deep Soil la zona de San Vicente tiene concentraciones elevadas de Litio aunque disminuye hacia el oeste, la zona cercana a la Av. Las golondrinas aumento su magnitud con respecto a los



otros suelos.

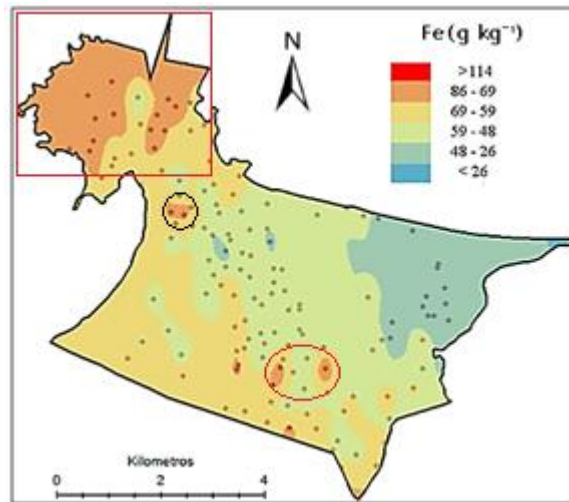


Figura 74: Mapa distribución espacial Fe para Top (Izq.), Sub (Der.) y Deep Soil (Abajo).

Podemos notar en la Figura 74 que la concentración de Hierro para Top y Sub Soil aumenta hacia el oeste con forma de franjas en donde las mayores concentraciones están en el orden de los 67-84 g kg⁻¹ y se encuentran nuevamente en el sector de San Vicente (Cuadrado rojo), también tenemos concentraciones elevadas en la zona camino a Lengua. En Deep Soil seguimos con concentraciones elevadas en el sector de San Vicente, pero se redujeron las concentraciones en camino a Lengua, además aparecieron pequeños focos de concentraciones elevadas la salida de concepción en la rotonda del Trebol (Círculo rojo) y Cementerio N°2 Talcahuano (Círculo Negro)

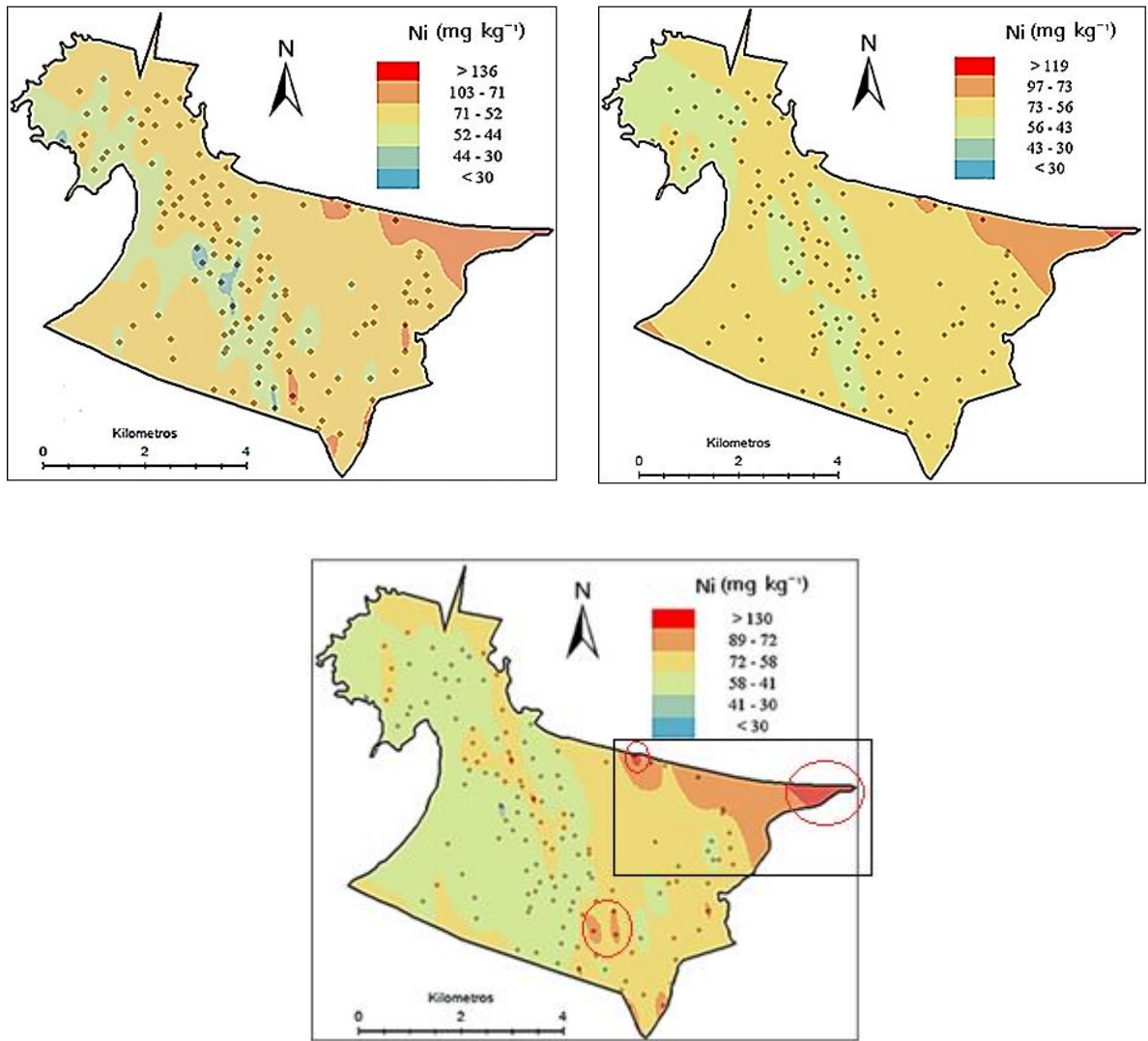


Figura 75: Mapa distribución espacial Ni para Top (Izq.), Sub (Der.) y Deep Soil (Abajo).

El mapa de distribución del Níquel (Figura 75) tiene para Top, Sub y Deep Soil una zona de contaminación con concentraciones que superan los 136, 119 y 130 mg kg^{-1} respectivamente y se hace cada vez mayor a más profundidad. Concentraciones elevadas se encuentran cercanas a la ruta interportuaria y a los humedales que ahí se encuentran. (Círculos rojos y Cuadrado negro) Tanto en Top como en Deep Soil aparecen pequeñas zonas con concentraciones entre 72 y 103 mg kg^{-1} ubicadas cercanas a la rotonda el Trebol. (Círculo rojo)

RECOMENDACIONES

Aunque el trabajo que aquí se presenta se limita en su capacidad para describir el origen, factores y procesos que afectan el contenido de metales pesados en los suelos, contribuyen a la base de datos de contenido de metales pesados en los suelos asociados a ciudades urbanas en Chile, en particular, Talcahuano.

Sin duda es necesario continuar investigando la distribución de los metales pesados en los suelos de la comuna de Talcahuano para poder determinar con más exactitud el grado y las fuentes de contaminación. Con lo que se sugiere las siguientes recomendaciones:

- Para la toma de muestras se recomienda hacer la distinción de las concentraciones que se obtienen en distintos horizontes del suelo pues así se representa mejor la realidad de la zona en estudio y no mezclar las concentraciones entre los distintos horizontes superficiales.
- Se recomienda realizar un tratamiento para mejorar la calidad de suelo o éste se encuentre en un rango de concentraciones aptas para el correcto desarrollo de la biodiversidad. Analizar zonas críticas, reducir su movilidad.
- Es importante que los investigadores durante el proceso de muestreo y de laboratorio utilicen los respectivos implementos de seguridad necesarios para no contaminar o alterar la muestra.
- Tratar de tomar muestras en las zonas industrial y portuaria para poder realizar un estudio más acabado.
- En lo que atañe a las altas concentraciones encontradas en las zonas residenciales se recomienda realizar gestiones para que el organismo pertinente tome cartas en el asunto y se realicen estudios más profundos o tomen medidas de mitigación.
- Quizás un análisis más acabado a los valores anómalos y no solo al conjunto de datos.

CAPITULO: 6 CONCLUSIONES

El análisis univariado y multivariado efectuado muestra la relación existente entre Cr/Fe Li/Fe y Cr/Li para todas las profundidades. Cr y Fe presentan las mayores concentraciones en promedio (140 mg kg⁻¹ y 60 g kg⁻¹ respectivamente).

El análisis de uso de suelo muestra que las concentraciones en promedio de Cr y Fe son mucho más altas en suelo Comercial en todos los estratos, que en los demás usos de suelo. El Níquel tiene mayor concentración promedio en la zona Comercial y menor concentración en Residencial. Por último el Litio tiene mayor concentración en Comercial Sub Soil y menor en Industrial Deep Soil.

Según los índices de contaminación el índice de geoacumulación del Cromo y del Hierro tendrían un 0,71% de las muestras con contaminación moderada, el Níquel tiene casi un 100% de sus muestras sin contaminación. Para el PLI se aprecia que los valores en todas las profundidades son muy similares y bajo estos parámetros el suelo tendría una contaminación moderada con valores de 2,14% máximo.

La comparación con respecto a las líneas bases muestra que el método 2 (Mediana+ 2*MAD) arroja un mayor porcentaje de contaminación que el método 1 (Media + 2*SD) para todos los elementos en todos los suelos, llegando a un máximo del 21% para el caso del Níquel en Top Soil. Además el método de Target Value posee un 100% de proporción de contaminación en Cromo y Níquel en todos los suelos. Según el factor de enriquecimiento (E.F) el Litio tiene un 16 % de las muestras contaminadas, siendo el máximo medido. Para los valores de intervención el Níquel está con un porcentaje elevado de muestras contaminadas ± 65%, en todos los suelos.

Los mapas de distribución muestran que la concentración de Níquel tiene una tendencia que aumenta Oeste-Este que llega a valores máximos que se consideran contaminados de sobre 130 (mg*kg⁻¹) y se encuentran en la zona donde desemboca el río Andalien. La distribución espacial de Litio en Top Soil nos encontramos con la misma zona de la desembocadura del río Andalien con valores contaminados que superan los 40 (mg kg⁻¹) y además una pequeña zona cerca del cerro Centinela.

BIBLIOGRAFIA

- Adriano, D.C., (1986). Heavy Metals in Terrestrial Environment. Springer, Berlin.
- Burt, R., (2004). Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report 42. United States Department of Agriculture, USA (Version 4.0.).
- Chester, R., Stoner, J.H., (1973). Pb in particulates from the lower atmosphere of the eastern Atlantic. *Nature* 245, 27–28.
- Chilès, J.-P., Delfiner, P., (2012). Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty, second edition. John Wiley & Sons, New York.
- Cressie, N. (1989). Geostatistics. *The American Statistician* 43(4): 611— 623.
- Crnkovic et al, (2006). Distribution of heavy metals and Arsenic in soils of Belgrade (Serbia and Montenegro). *Soil & Sediment Contamination*, 15, 581–589.
- David, M. (1977). Geostatistical ore reserve estimation. Elsevier. Amsterdam. 68 p.
- Desaulles, A., (2012). Critical evaluation of soil contamination assessment methods for trace metals. *Sci. Total Environ.* 426, 120–131.
- Gajardo, A. 1981. Hojas Concepción-Chillán, Región del Bío-Bío. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Mapas Geológicos Preliminares de Chile*, No. 4.
- Galli, C. (1967). Geología Urbana y Suelo de Fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Informe Final del Proyecto de Investigación N° 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción, 65- 71 pp.
- Gil, C., Boluda, R., Ramos, J., (2004). Determination and evaluation of cadmium, lead and nickel in greenhouse soils of Almería (Spain). *Chemosphere* 55, 1027–1034.
- Hernandez et al, (2003). Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. *Science of the Total Environment* 312, 195–219.
- ISO, (2005). Soil quality—guidance on the determination of background values. ISO 19258.
- Journel & Huijbregts, (1978), *Mining Geostatistics*. Academic Press, London.
- Krajewski, S. A. y Gibbs, B.L., (1993), *A Variogram Primer*, Gibbs Associates, 93 p.
- Lee, C.S., Li, X.D., Shi, W.Z., Cheung, S.C., Thornton, I., 2006. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics. *Sci. Total Environ.* 356, 45–61.

- Loska et al, (1997). Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indices to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik Water Reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 93: 347–365.
- Loska, K., Wiechula, D., Korus, I., (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environ. Int.* 30, 159–165.
- MAPA, (1994). Official methods for soils and water analyses. Spanish Ministry of Agriculture, Fishing and Food, Madrid.
- Micó et al, (2007). Baseline values for heavy metals in agricultural soils in an European Mediterranean region. *Sci. Total Environ.* 378, 13–17.
- Muller, G., (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal* 2, 108–118.
- Munita L (2012) Concentraciones y distribuciones de metales pesados y elementos traza en suelos del distrito sentmenat (Cataluña, España), Proyecto de Título de Ingeniero Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Myers, D. E, (1987). Optimization of sampling locations for variogram calculations. *Water Resour. Res.* 23(3): 283—293.
- Myers, D. E., (1991), Pseudo cross-variograms, positive-definiteness, and cokriging: *Math. Geology*, v. 23, no. 6, p. 805-816.
- Nairobi, (1977) Carta Mundial de los Suelos.
- Petitgas and Levenez, (1996) Spatial organization of pelagic fish: echogram structure, spatio-temporal condition, and biomass in Senegalese waters. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 147–153.
- Redon et al, (2013). Modelling trace metal background to evaluate anthropogenic contamination in arable soils of south-western France. *Geoderma* 206, 112–122.
- Reeve, N., Sumner, M.E., (1971). Cation exchange capacity and exchangeable aluminum in Natal Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35 (1), 38–42.
- Reimann, C., Garrett, R.G., (2005). Geochemical background concept and reality. *Sci. Total Environ.* 350, 12–27.
- Roche Alfonso, (1989b). Estadísticas en las Ciencias Geológicas, Tomo 2, Editorial ISPJAE, Ciudad de la Habana, 380 p.

- Siegel Sidney, (1972). Diseño Experimental No Paramétrico. Las medidas de correlación y sus pruebas de significación. El coeficiente de correlación de rangos de Spearman. Cuba: Edición Revolucionaria. Instituto Cubano del Libro; p. 233-245.
- Silva F (2013) Análisis Geoestadístico para la confección de Mapas de Precipitaciones Máximas, para la Región de Valparaíso, Proyecto de Título de Ingeniero Civil. UCSC.
- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)
- Soil Survey Staff, (1975) U.S. Dept. of Agriculture. Soil Conservation Service. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. U.S. Dept. of Agric. Handb. 436. U.S. Govt. Print. Off. Washington, DC. 754 pp.
- Stoffers et al, (1986). *Heavy metal pollution in Wellington Harbour*. New Zealand Journal of Marine fresh water Resources, 20:495-512.
- Tarbuck E.J., Lutgens F.K. y Tasa, D. Ciencias de la Tierra. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed.
- Taylor, S. R., 1964, Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, 1273-1285.
- Tomlinson et al, (1980): Problems in Assessment of Heavy Metals in the Estuaries and the Formation of Pollution Index. *Helgoland Mar. Res.*, 33: 566-575.
- Tume et al., (2014). Trace element concentrations in schoolyard soils from the port city of Talcahuano, Chile.
- Ulloa Guitián et al, (2003). Aplicación de la geoestadística al estudio de las propiedades del suelo. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2003*. Resumen: A-031.
- Veliz Moran, (2006) Análisis espacial para medir el índice de infección de la sigatoka negra en una hacienda bananera en el último trimestre 2005.
- Wackernagel, h. (1995). *Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications*, xiv + 256 pp. Berlín. ISBN 3 540 60127 9.
- Warrick, A. et al. (1986). Geoestatistical methods applied to soil science. In: *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. Madison: American Society of Agronomy – Soil Science Society of America, 53-82 pp.
- Yang, Z., Lu, W., Long, Y., Bao, X., Yang, Q., 2011. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China. *J. Geochem. Explor.* 108, 27–38.

ANEXOS

A continuación un ejemplo de cómo sacar todos los parámetros estadísticos que se utilizarán en este trabajo.

- Construir hoja en Excel con los datos que necesitemos sacar estadísticos descriptivos. En este ejemplo se mostrará el caso del Cromo para Top Soil 0-10 cm (TLH A) y solo 20 muestras de las 140.
- Abrir IBM SPSS, ir a **archivo** seleccionar **abrir** luego **datos**.(Figura 76)

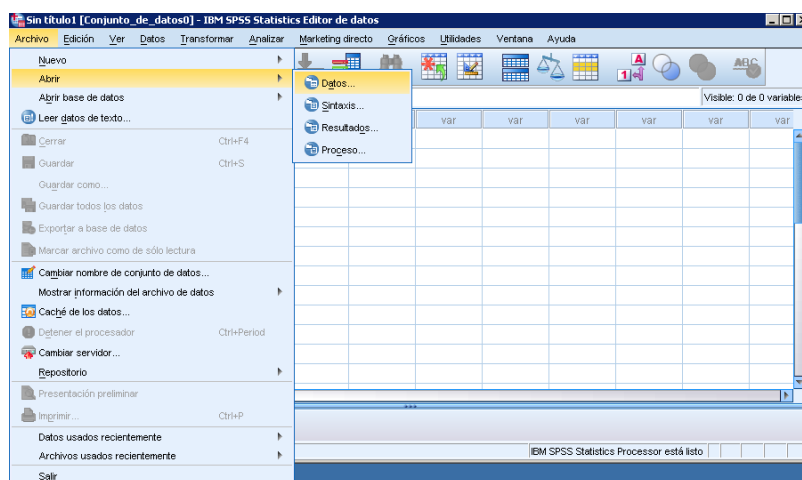


Figura 76: Abriendo IBM SPSS.

- Elegir en **archivo tipo** la opción EXCEL, seleccionar su archivo, en este caso ejemplo.xlsx y ABRIR.(Figura 77)

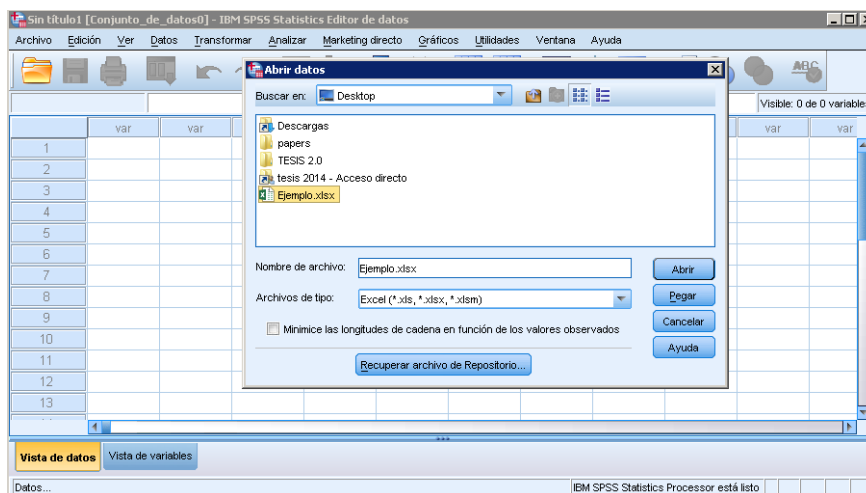


Figura 77: Selección de planilla con datos.

- En **hoja de trabajo** seleccionar la hoja de Excel en donde se encuentren nuestro datos a analizar en este ejemplo TLH A, ACEPTAR.(Figura 78)

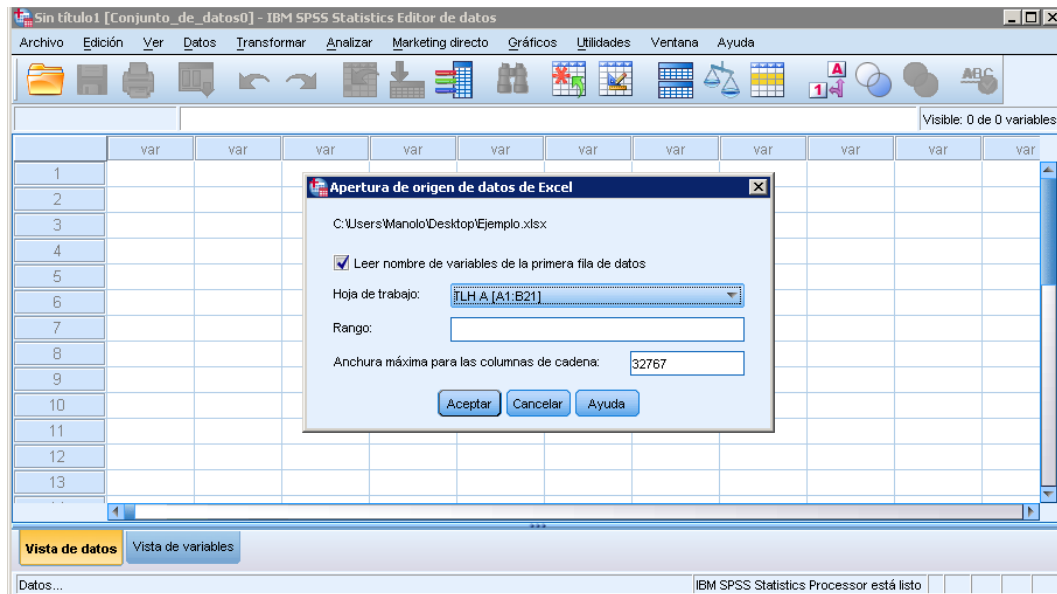


Figura 78: Selección de elementos a analizar.

- Después de realizar todos los pasos anteriores se cargan los datos en el programa. (Figura 79)

Figura 79: Datos cargados en SPSS.

- Hay que observar que los caracteres (/) no se leen en el programa
- Hay que asegurarse que los datos numéricos estén como tal así como los de información (Cadena), para esto se hace doble click en donde dice **tipo** y saldrá el recuadro que se ve en la foto. En este se puede modificar también la cantidad de decimales.(Figura 80)

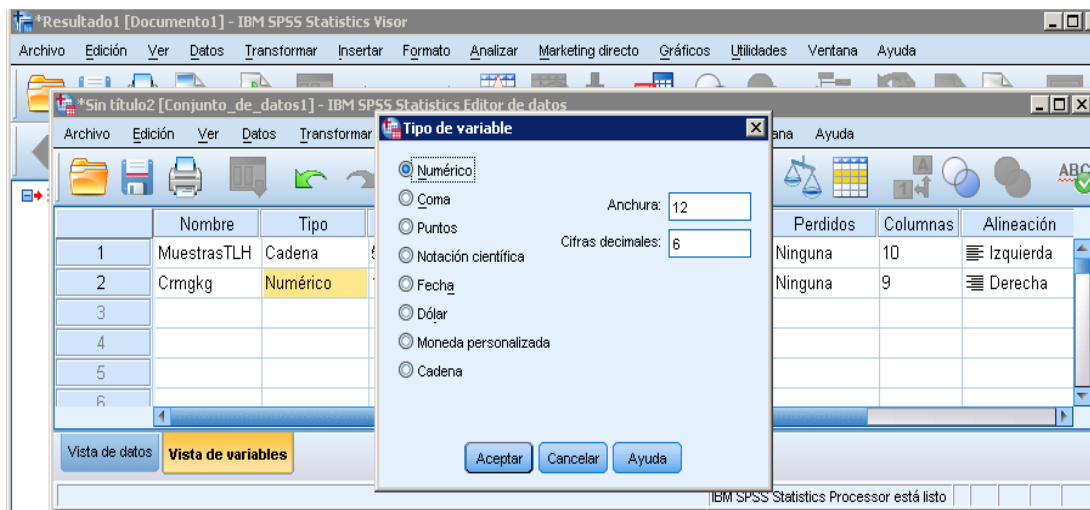


Figura 80: Selección del tipo de variable.

- Luego nos vamos a la pestaña **analizar**, **estadísticos descriptivos**, luego seleccionamos **frecuencias**. (Figura 81)

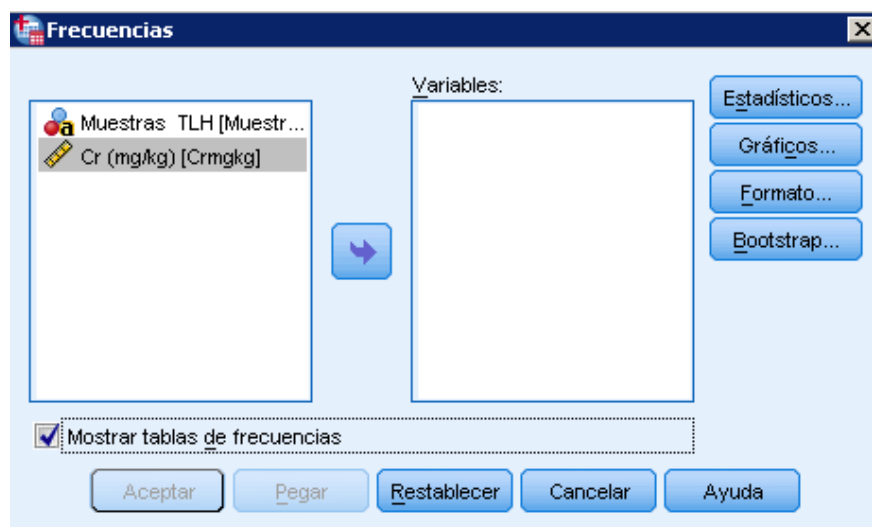



Figura 81: Análisis de Frecuencia.

En este recuadro seleccionamos nuestro dato de estudio (Cr) y apretamos ,
deseleccionamos **mostrar tablas de frecuencia**.

En el botón **estadísticos** se deja como en la siguiente imagen. (Figura 82)

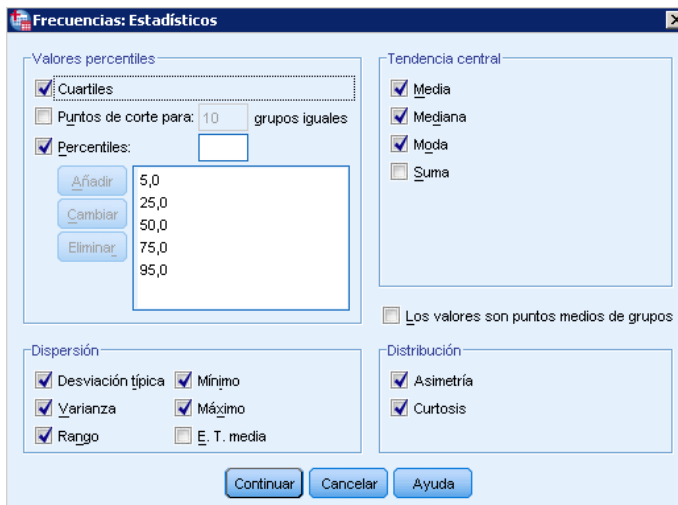


Figura 82: Selección de Estadísticos Descriptivos.

En el Botón **gráficos** se selecciona **histograma** y **mostrar curva normal**

Finalmente le damos a ACEPTAR y el programa arrojará todos los estadísticos descriptivos necesarios para nuestro estudio, además de la Gráfica del histograma. (Figura 83)

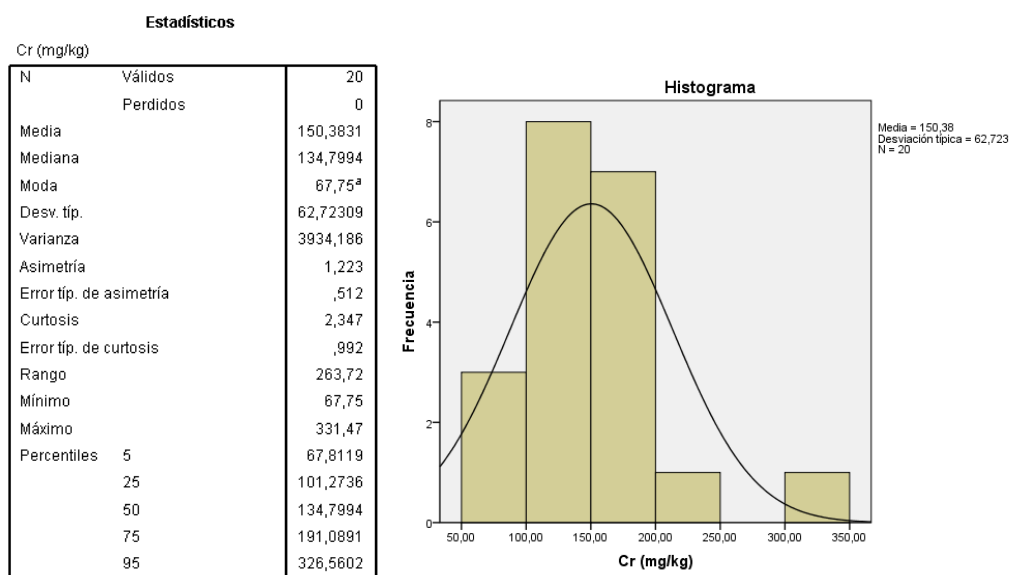


Figura 83: Estadísticos descriptivos e Histograma.

- Para obtener el gráfico Box Plot nos vamos a la pestaña **analizar, estadísticos descriptivos**, luego seleccionamos **explorar**. (Figura 84)

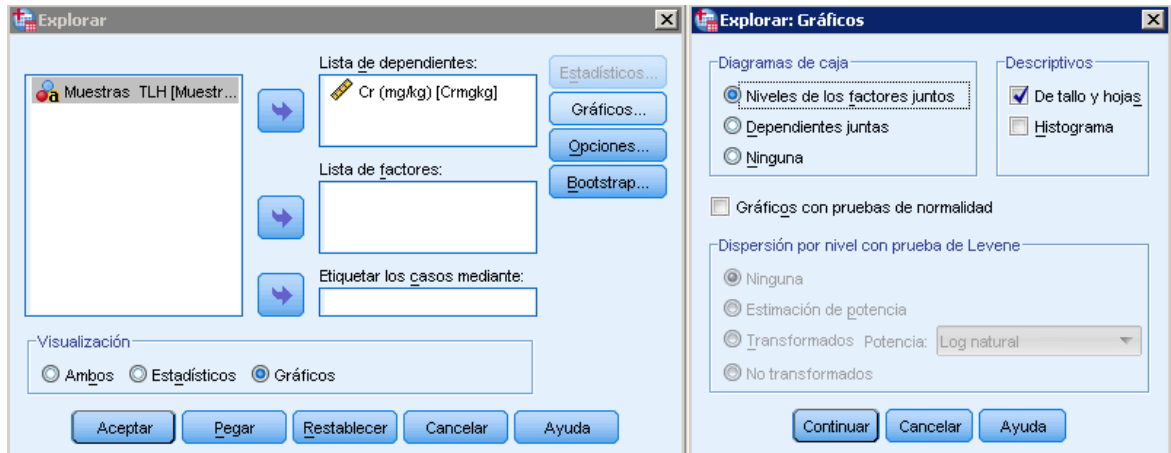


Figura 84: Variable a elegir para generar gráfico Box Plot.

Al igual que en el análisis anterior, seleccionamos nuestro dato y lo ingresamos a la **lista de dependientes**, en **visualización** seleccionamos **gráficos** y en el botón **gráficos** dejamos como sale en la figura de arriba, luego **ACEPTAR**. (Figura 85)

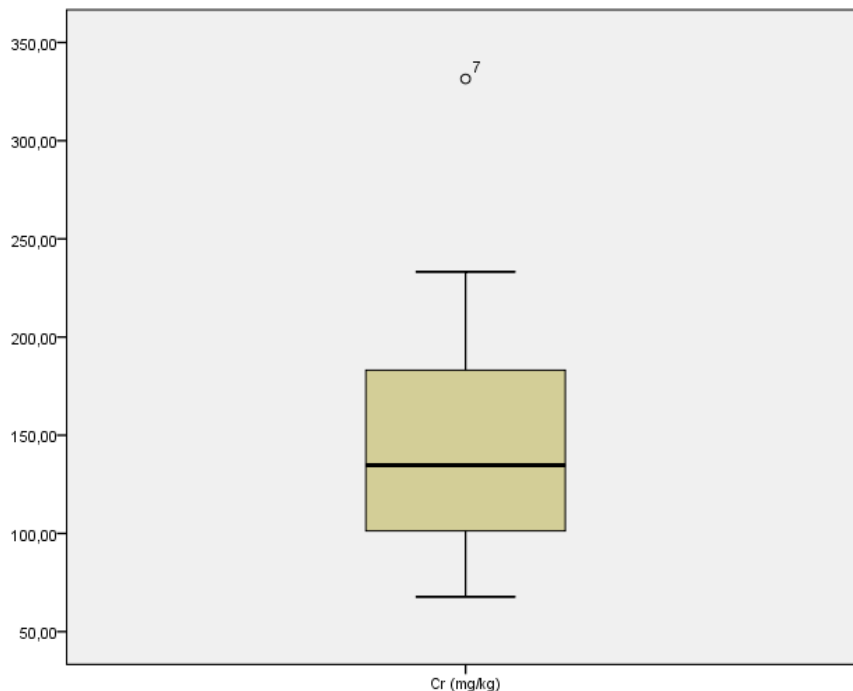


Figura 85. Gráfico Box Plot.

El programa nos arroja el gráfico BOX PLOT.

- Por ultimo para generar el grafico de Porcentaje acumulado, nos vamos a la pestaña **gráficos** de SPSS y seleccionamos **generador de gráficos**. (Figura 86)

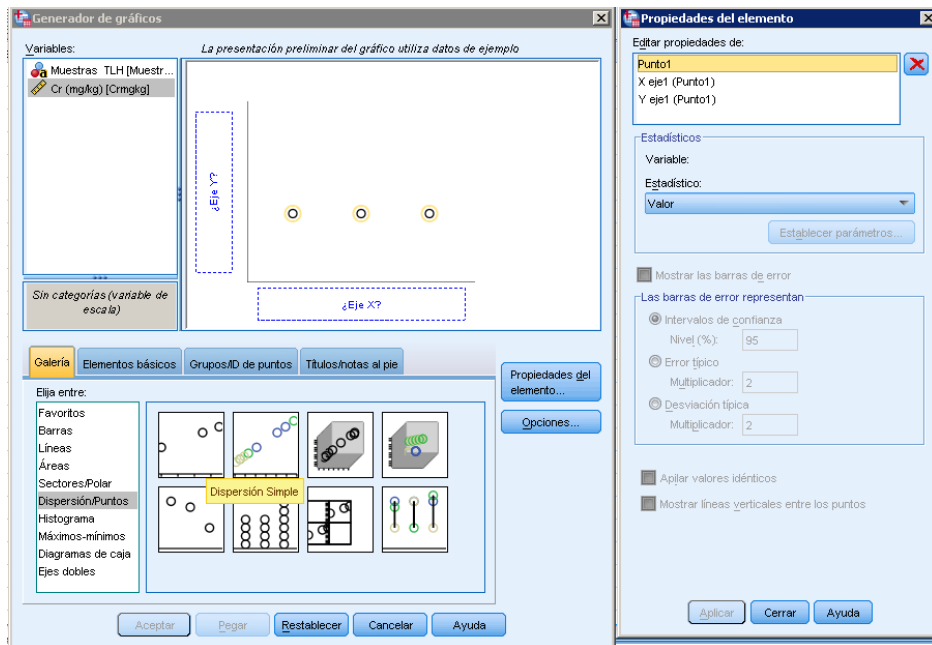


Figura 86: Generador de gráficos.

En la pestaña **galería** seleccionamos **dispersión de puntos** y hacemos clic en **dispersión simple** (el 1° de los 8 mostrados). Luego arrastramos la variable Cr a donde está el eje X. (Figura 87)

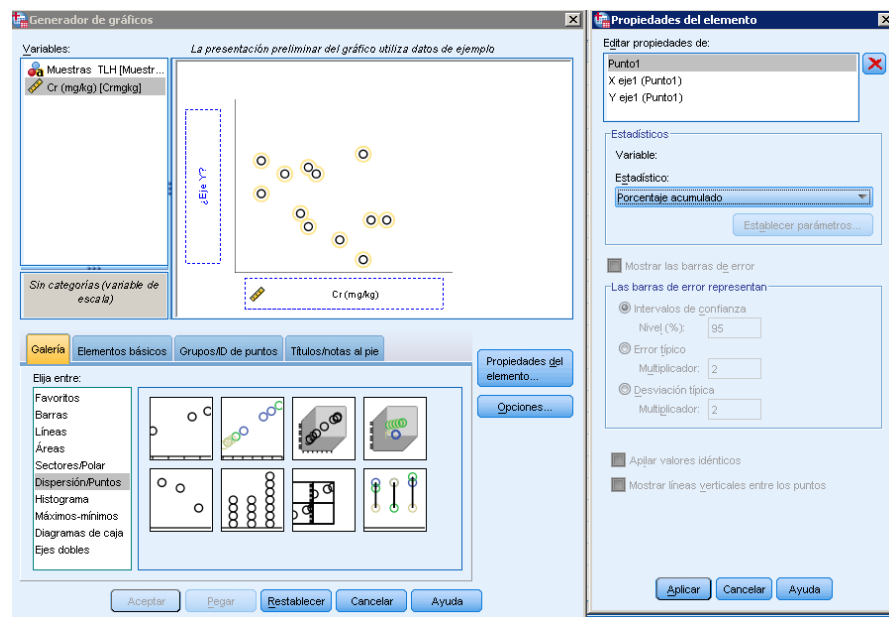


Figura 87: Generar gráfico de dispersión simple.

En **propiedades del elemento**, seleccionar **punto 1** y en **estadístico** seleccionar **porcentaje acumulado**, luego **APLICAR** y **ACEPTAR**. (Figura 88)

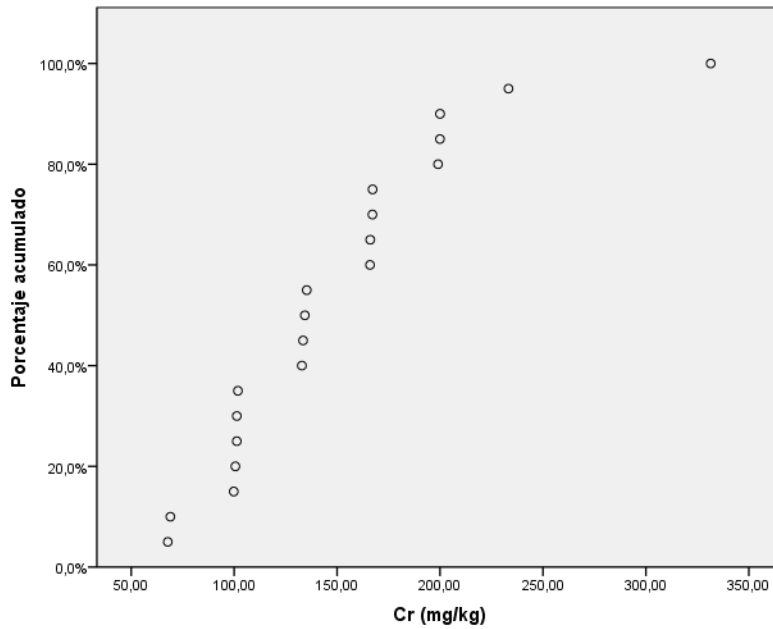


Figura 88: Gráfico Porcentaje acumulado.

- Para determinar la correlación Spearman entre los elementos, se carga el archivo Excel (Ejemplo.xlsx) con todos los elementos que se necesite comparar, en este ejemplo Cr, Ni, (Siempre en el estrato superficial TLH A y para 20 muestras) de la misma forma que para el análisis estadístico. (Figura 89)

	MuestrasTLH	Crmgkg	Nimgkg
1	301 A	167,16	56,27
2	302 A	167,23	30,26
3	303 A	165,97	66,94
4	304 A	166,10	59,61
5	305 A	134,35	41,41
6	306 A	200,00	52,55
7	307 A	331,47	48,86
8	308 A	199,96	63,89
9	309 A	199,04	78,20
10	310 A	101,82	90,01
11	311 A	133,47	63,30
12	312 A	233,25	48,92
13	313 A	135,25	49,17
14	314 A	69,01	56,56
15	315 A	100,59	74,19
16	316 A	99,80	80,91
17	317 A	101,29	52,45
18	318 A	101,27	33,89
19	319 A	67,75	48,19
20	320 A	132,89	37,28

Figura 89: Datos a ingresar para determina la correlación.

Luego ir a la pestaña **analizar, correlaciones, bivariadas.** (Figura 90)

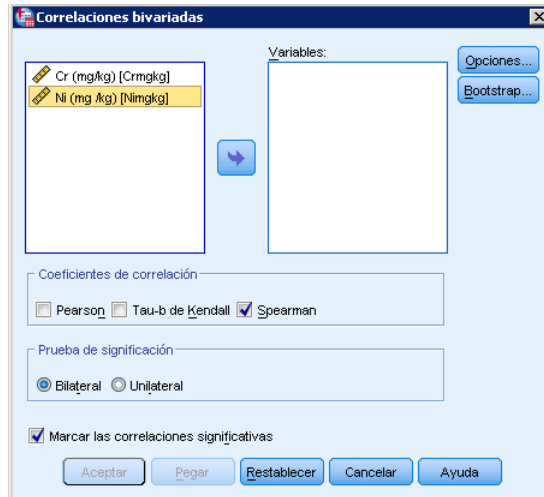



Figura 90: Seleccionar tipo de prueba.

En el recuadro seleccionar los datos a correlacionar, en este caso CR y Ni, con  Y dejar tal cual como se ve en la imagen, ACEPTAR (Figura 91)

Correlaciones			Ni (mg /kg)	Cr (mg/kg)
Rho de Spearman	Ni (mg /kg)	Coefficiente de correlación	1,000	-,095
		Sig. (bilateral)	.	,691
		N	20	20
	Cr (mg/kg)	Coefficiente de correlación	-,095	1,000
		Sig. (bilateral)	,691	.
		N	20	20

Figura 91: Resultados Arrojadados por el programa.

Finalmente el programa arroja como resultado un recuadro como el de la imagen con la correlación entre los 2 elementos.

Como el coeficiente de correlación de Spearman en este ejemplo es de -0,095 entre Ni y Cr, podemos decir que ambos elementos no presentan algún grado de asociación.

- Para el caso de Prueba de Wilcoxon, al igual que para la correlación de Spearman se carga el archivo Excel (Ejemplo.xlsx) con los elementos que se necesite comparar, en este ejemplo Cr, en el estrato superficial TLH A y Cr en el estrato TLH B para 20 muestras). (Figura 92)

	A	B	C
1	Muestras TLH	A Cr (mg/kg)	B Cr (mg/kg)
2	301	167,2	134,1
3	302	167,2	166,9
4	303	166,0	199,5
5	304	166,1	198,5
6	305	134,4	166,7
7	306	200,0	165,3
8	307	331,5	229,8
9	308	200,0	391,6
10	309	199,0	266,9
11	310	101,8	68,6
12	311	133,5	100,7
13	312	233,3	264,6
14	313	135,2	100,6
15	314	69,0	67,6
16	315	100,6	132,3
17	316	99,8	102,9
18	317	101,3	101,2
19	318	101,3	68,0
20	319	67,7	68,2
21	320	132,9	135,1
22			

Figura 92: Datos a ingresar para la prueba de Wilcoxon.

Luego a la ruta que muestra la imagen **analizar**, **pruebas no paramétricas**, **cuadro de diálogos antiguos** y finalmente seleccionamos **2 muestras relacionadas**. (Figura 93)

The screenshot shows the software's 'Análisis' (Analysis) menu. The 'Pruebas no paramétricas' (Non-parametric tests) option is selected, which has opened a sub-menu. Within this sub-menu, the 'Cuadros de diálogo antiguos' (Old dialog boxes) option is selected, leading to another sub-menu. In this final sub-menu, the '2 muestras relacionadas...' (2 related samples...) option is highlighted in yellow, indicating it is the selected test.

Figura 93: Seleccionar Pruebas no paramétricas, 2 muestras relacionadas.

Se abre el siguiente recuadro en el cual seleccionamos nuestros datos a analizar, TLH A Cr a **Variable 1** y TLH B Cr a **Variable 2**, seleccionar en **tipo de prueba Wilcoxon** y ACEPTAR. (Figura 94)

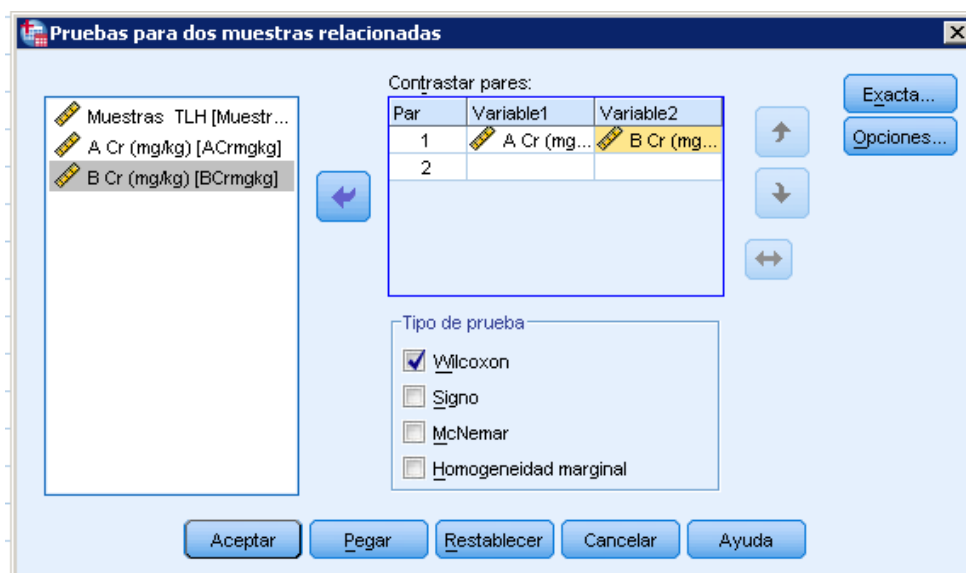


Figura 94: Ingresar variables a relacionar.

El programa arroja la siguiente tabla en donde lo más importante de analizar son los estadísticos de contraste. (Figura 95)

➔ **Pruebas no paramétricas**

[Conjunto_de_datos=1]

Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
B Cr (mg/kg) - A Cr (mg/kg)	Rangos negativos	10 ^a	10,90	109,00
	Rangos positivos	10 ^b	10,10	101,00
	Empates	0 ^c		
Total		20		

a. B Cr (mg/kg) < A Cr (mg/kg)
 b. B Cr (mg/kg) > A Cr (mg/kg)
 c. B Cr (mg/kg) = A Cr (mg/kg)

Estadísticos de contraste^b

	B Cr (mg/kg) - A Cr (mg/kg)
Z	-,149 ^a
Sig. asintót. (bilateral)	,881

a. Basado en los rangos positivos.
 b. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Figura 95: Resultados arrojados por el programa.

En **estadísticos de contraste** podemos ver que el que nos importa la Significancia asintótica = 0,881 lo que significa que el Cr en los estratos 0-10 cm y 10-20 cm son iguales.

Geoestadística con programa ArcGis 10.1

A continuación se describe el procedimiento realizado en ARCMAP (módulo de ARCGIS) para obtener los datos necesarios para kriging.

- **Archivo de entrada**

Se confecciona un archivo de TEXTO con las coordenadas UTM de las muestras, en este ejemplo al igual que en el anterior solo 20 muestras de Cr y del estrato superficial TLH A. Las coordenadas X corresponden a NORTE y las coordenadas Y a ESTE. (Figura 96)

ID	X	Y	Cr (mg/kg)
TLH 301	669652	5933026	167,16
TLH 302	668857	5931818	167,22
TLH 303	668753	5933518	165,96
TLH 304	668449	5932665	166,09
TLH 305	670297	5932584	134,35
TLH 306	669643	5931584	199,99
TLH 307	669277	5931669	331,47
TLH 308	667932	5932358	199,95
TLH 309	667506	5930867	199,04
TLH 310	670446	5931612	101,81
TLH 311	671077	5930736	133,47
TLH 312	669967	5930897	233,25
TLH 313	668133	5933763	135,24
TLH 314	669260	5932037	69,01
TLH 315	669109	5932959	100,58
TLH 316	671086	5930119	99,79
TLH 317	670722	5931070	101,28
TLH 318	670819	5930606	101,26
TLH 319	670214	5929785	67,74
TLH 320	670170	5929446	132,89

Figura 96: Tabla con datos a ingresar a ArcMap.

Una vez instalado el programa ArcGis con su módulo de Geoestadística, abrir el programa en “ArcMap” como se muestra en la Figura 97

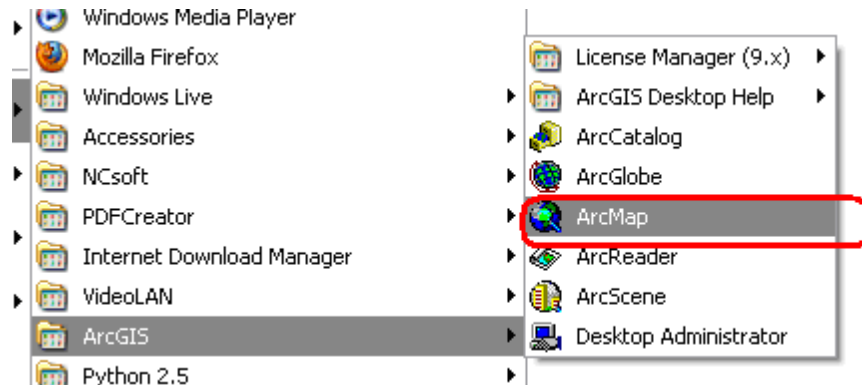


Figura 97: Ruta para encontrar módulo de ArcGis, ArcMap.

- **Seleccionar coordenadas del proyecto**

Presionar botón derecho del cursor, sobre la ventana en blanco, se despliega un menú, pinchar en “Data Frame propiedades”. (Figura 98)

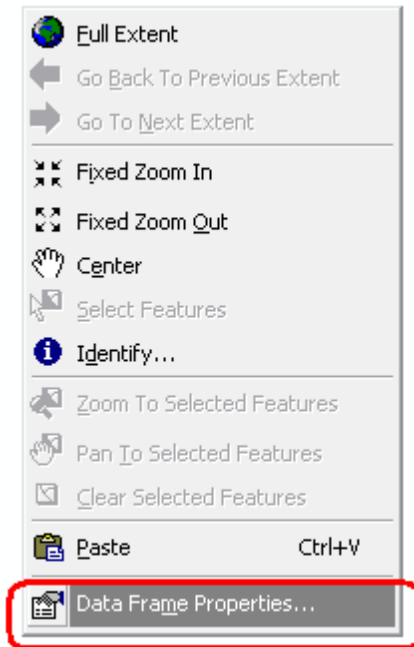


Figura 98: Propiedades del Marco de Datos.

Presionar sistema de coordenadas “Coordinate System” (Figura 99)

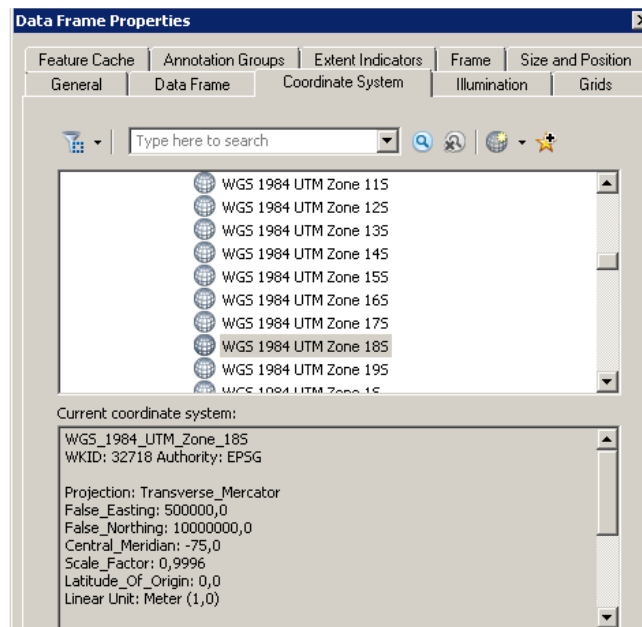


Figura 99: Elegir Sistema de Coordenadas.

Buscar sistema de coordenadas acorde con el proyecto: Predefined → Projected Coordinate Systems → UTM → WGS 1984 → WGS 1984 UTM ZONE 18 S, aplicar y aceptar.

Se recomienda ver las extensiones del programa, que se encuentren activadas, para lo cual se deben dirigir a Customize → Extensions y seleccionarlas todas. (Figura 100)

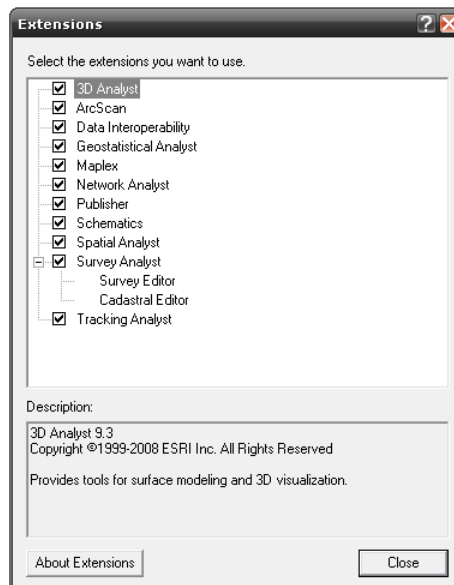


Figura 100: Selección de Extensiones.

- **Cargar shape**

Apretar encima de “Layers” botón derecho del mouse → Add Data, como se muestra en la Figura 101

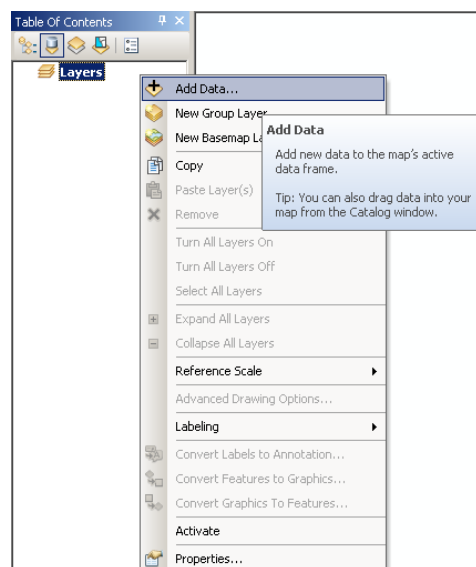


Figura 101: Cargar Shape.

Buscar el archivo “shape_talcahuano” y presionar **add**. (Figura 102)

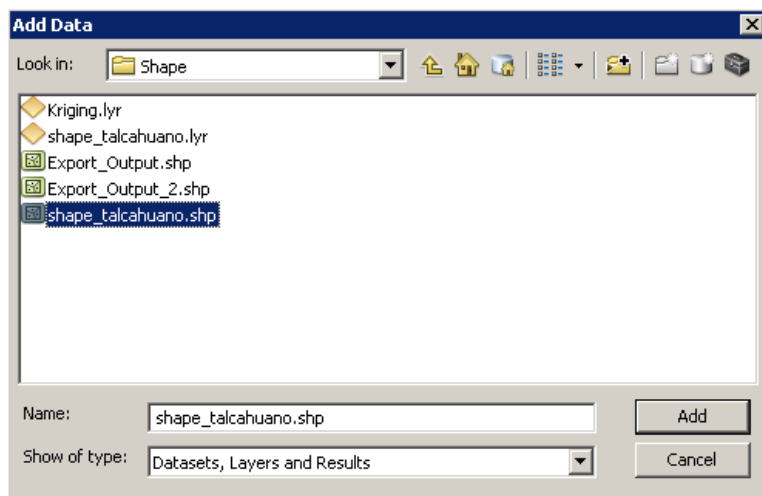


Figura 102: Selección De Shape.

De esta forma se carga el archivo “shape_talcahuano.shp”, quedando como en la Figura 103

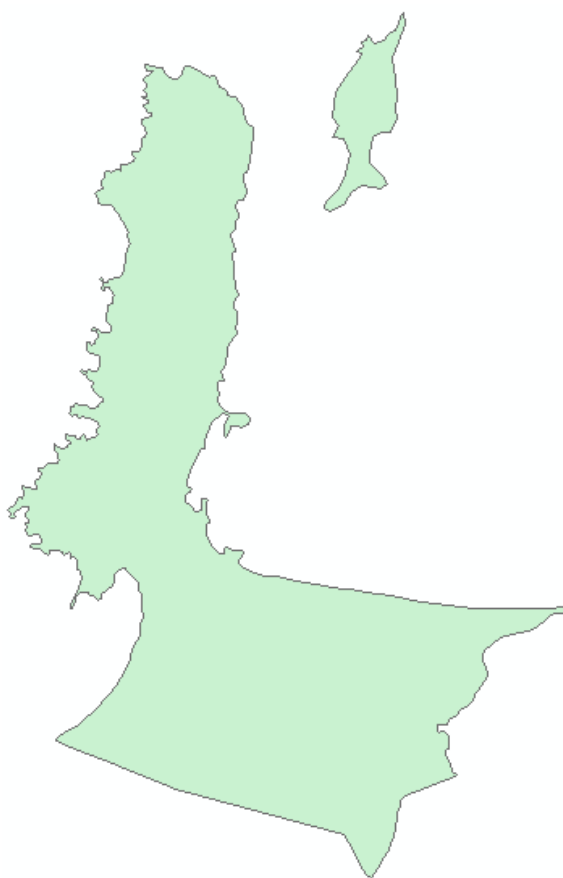



Figura 103: Shape cargado de la comuna de Talcahuano.

- **Cargar estaciones desde el archivo Excel**

Ir al botón  y hacer click en Add Data. (Figura 104)

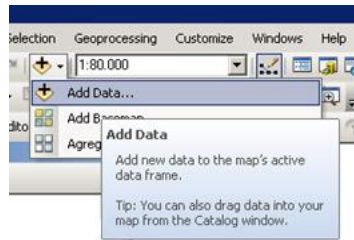


Figura 104: Cargar archivo georreferenciado.

Buscar el archivo “PUNTOS TLH.xls” y presionar add (Figura 105)

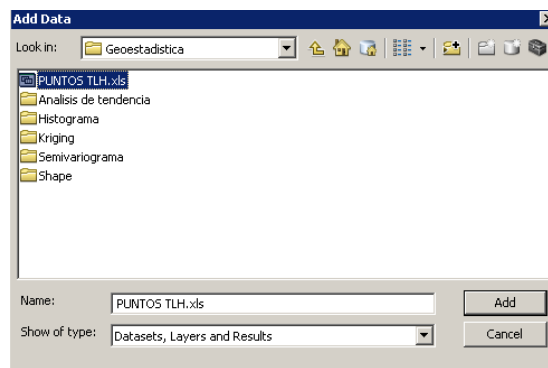


Figura 105: Buscar archivo con puntos.

Cabe destacar que ArcMap 10.1 no lee archivos Excel mayores al año 2003 o extensión .xlsx

Una vez cargado los puntos como se ve en la figura, click derecho en PUNTOS TLH y luego Display XY Data (Figura 106)

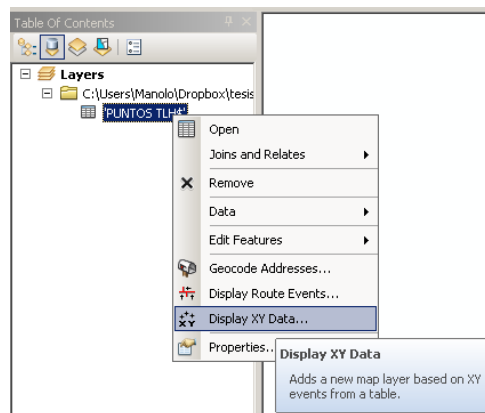


Figura 106: Configurar coordenadas de los puntos.

En la casilla “X Field” elegir Este (punto cardinal) que corresponde a la columna con coordenadas Este, análogo para casilla “Y Field”, luego presionar “Edit.” para seleccionar el sistema de coordenadas. (Figura 107)

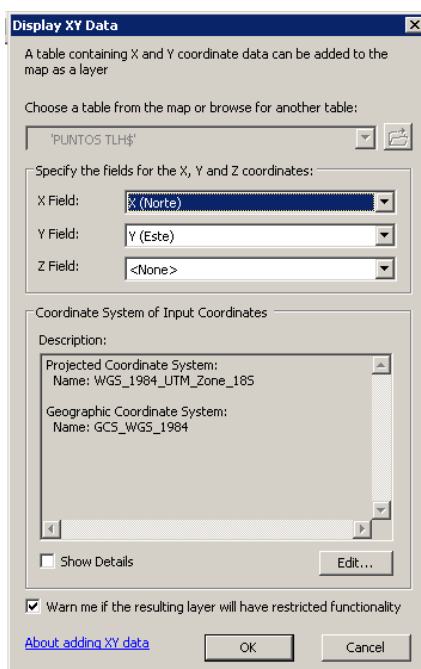


Figura 107: Seleccionar Dato y Huso horario.

De esta forma se carga los datos y el shape quedando como en la Figura 108

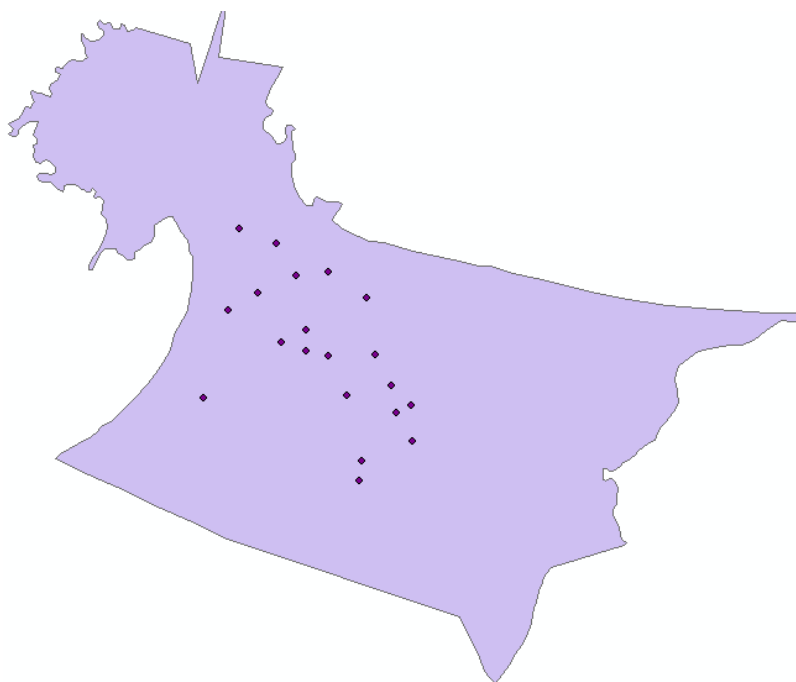


Figura 108: Datos cargados en ArcMap.

- **Accionar el Módulo de Geoestadística.**

Con **Geostatistical Analyst** es posible explorar la variabilidad de datos, examinar tendencias globales e investigar la autocorrelación y la correlación entre los datos, de igual forma se pueden crear predicciones y calcular errores de predicciones.

- **Cargar los datos para ser analizados.**

Se recomienda crear un nuevo proyecto, y seguir los siguientes pasos:

I) Configurar sistema de coordenadas del proyecto.

II) Cargar el archivo Excel o de texto, que contiene la variable de estudio.

III) Cargar el archivo Shape de la Zona de estudio

La Figura 109 muestra las capas cargadas.

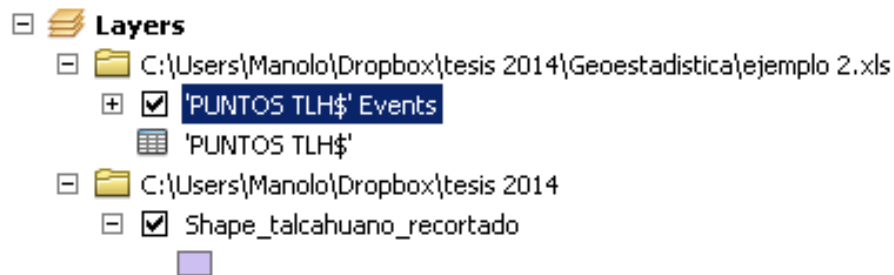


Figura 109: Carpetas Cargadas.

- **Análisis datos en el Histograma.**

Una vez creado o agregado el shape en ArcMap, hacer clic en **Geostatistical Analyst**, seguido de **Explore Data** y finalmente en **Histogram**, tal como se muestra en la Figura 110.

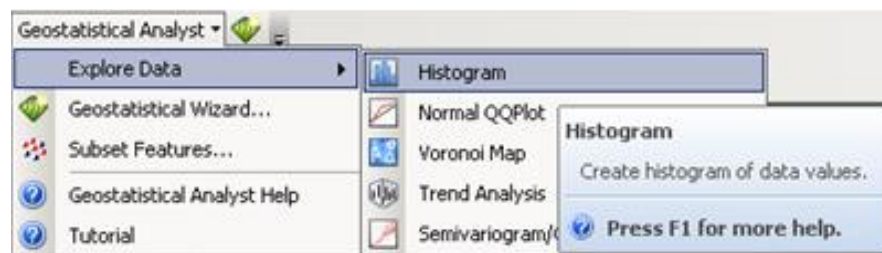


Figura 110: Cargar Histograma.

Bars: Permite elegir el número de intervalos, la herramienta automáticamente calcula la longitud de cada intervalo.

Transformation: Permite realizar una transformación logarítmica a los datos en caso de que estos no sigan una distribución normal.

Layer: Aquí aparece el nombre del Shape. En este caso es la “PUNTOS TLH”

Attribute: Aquí aparece por defecto el primer campo que tenemos en la tabla de atributos de nuestro Shape. En este caso es “Cr (mg/kg)”.

La Figura 111 muestra todo los parámetros que arroja el histograma

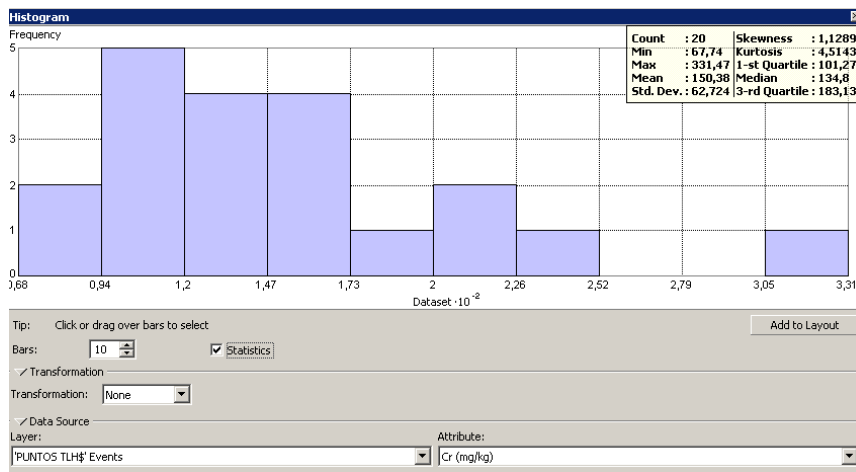


Figura 111: Histograma de Puntos TLH.

A estos parámetros le aplicamos las condiciones necesarias para verificar si los datos siguen la distribución normal. (Figura 112)

Si el coeficiente de sesgo (**Skewness**) es mayor a 1, es necesario realizar una transformación logarítmica. En la pestaña **Transformation** y seleccionar “Log”.

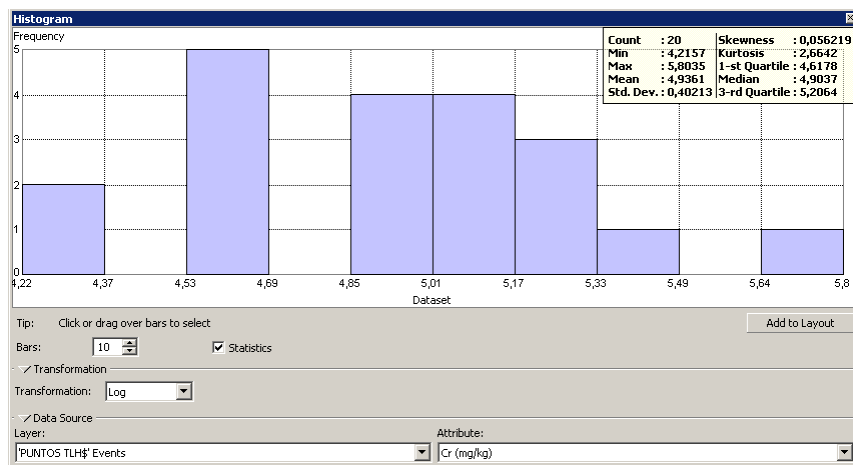


Figura 112: Histograma PUNTOS TLH transformados Log.

- **Exploración de Trend Analysis.**

Después de haber analizado los parámetros estadísticos y concluir que la distribución de los datos se puede tomar como normal, cerramos la ventana del Histograma y volvemos a dar clic en **Geostatistical Analyst**, seguido de **Explore Data** y finalmente en **Trend Analysis**, tal como se muestra en la Figura 113.

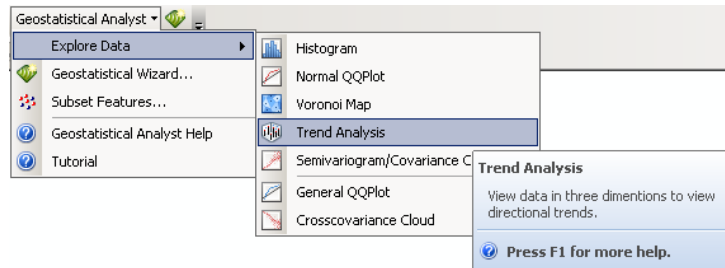


Figura 113: Cargar Trend Analysis.

La Figura 114 nos ayuda a ver la tendencia de los datos. En **Graph options**, hacemos clic en **Projected Data**, **Sticks**, **Input Data Points** para que desaparezcan de la gráfica, en **Attribute** seleccionamos el dato a analizar.

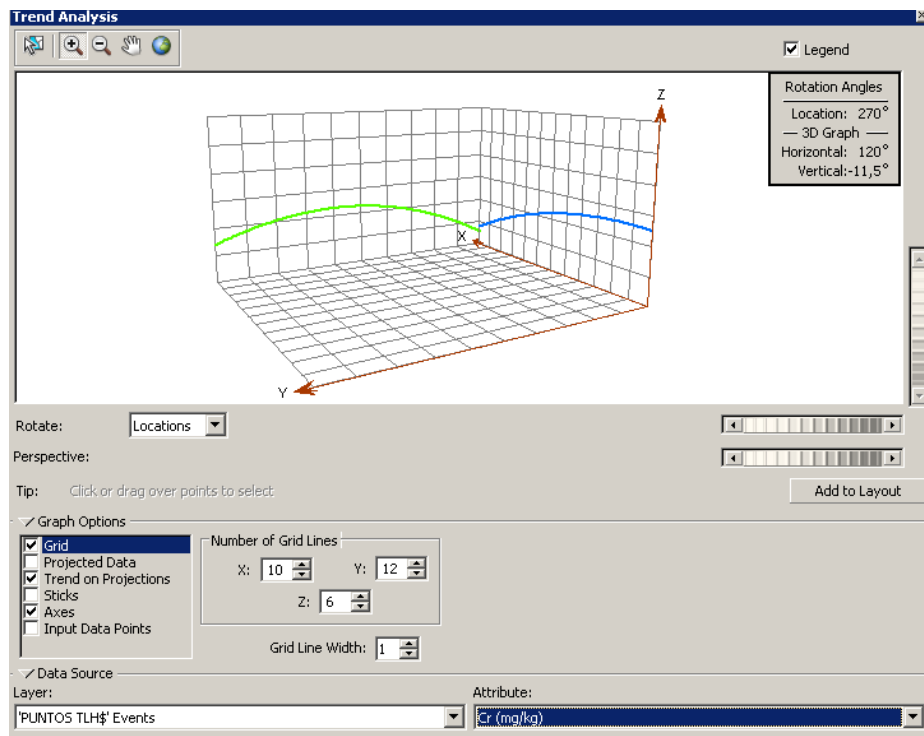


Figura 114: Ventana del Trend Analysis.

En la figura anterior se aprecian las líneas de tendencias (verde y azul de la misma figura) y se observa si estas siguen una línea recta, en caso tal la tendencia es lineal; en una curva con una concavidad, la tendencia es cuadrática o si es una línea con más de una concavidad, la tendencia será de orden 3. En este caso es de orden 2.

- **Análisis Geoestadístico de los datos.**

Una vez identificada la tendencia de los datos, el siguiente paso es el análisis estructural y realización del modelo geoestadístico con los datos. Para ello damos clic en **Geostatistical Analyst**, seguido de **Geostatistical Wizard**. (Figura 115)

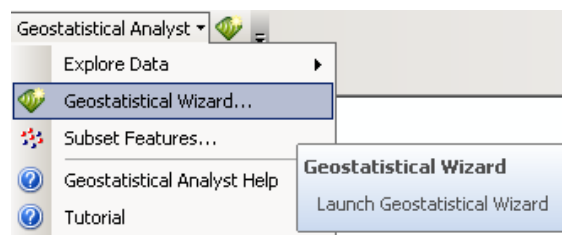


Figura 115: Cargar Geostatistical Wizard.

Methods: Se debe seleccionar el método con el cual se quieren analizar los datos, en este caso es **Kriging/CoKriging**. (Figura 116)

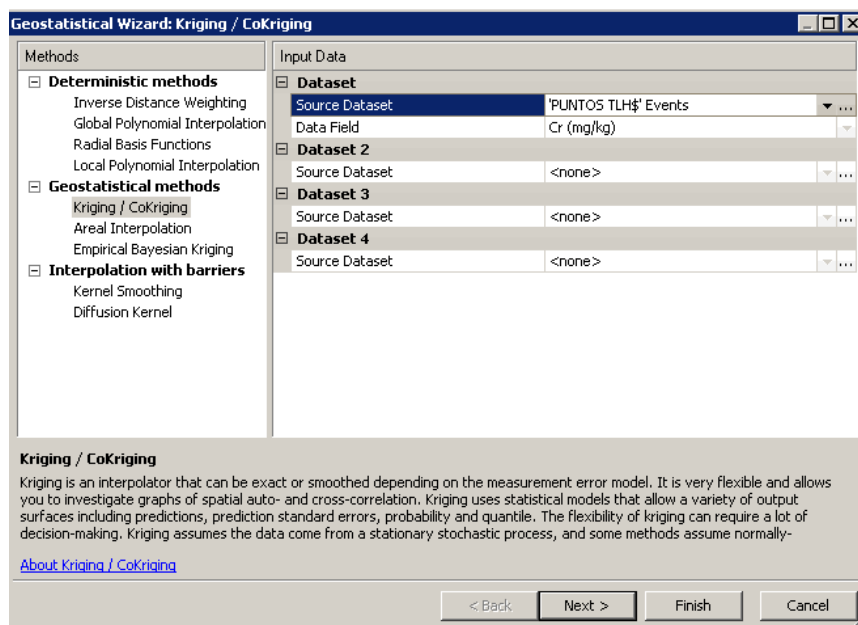


Figura 116: Parámetros a elegir.

En **Source Dataset** seleccionar el archivo Excel con los puntos y en **Data Field** el elemento a analizar

Clic en el botón **Next**. Aparece la siguiente ventana, donde rellenamos la siguiente información. (Figura 117)

- En **Kriging Type**, se selecciona **Simple**.
- En **Transformation Type**, se selecciona **Log**, pues ya habíamos concluido que es necesario realizar transformación logarítmica.
- En **Order of trend removal**, se selecciona **Second**, pues habíamos visto que los datos siguen una tendencia de segundo orden.
- En **Output Surface Type**, se selecciona **Prediction**.

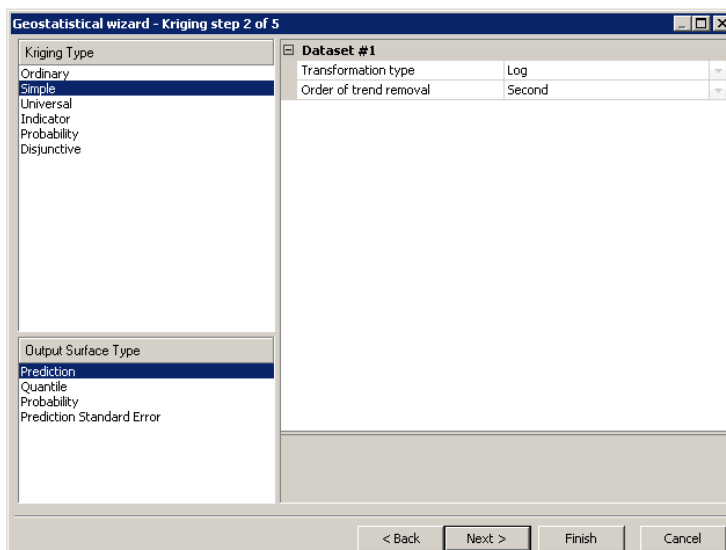


Figura 117: Parámetros a elegir.

Damos clic en **Next >**. Luego aparece una ventana que permite concluir si los datos presentan anisotropía direccional o no la presentan. Si en la gráfica aparece un círculo, no hay anisotropía direccional y si aparece otro tipo de imagen, como en la Figura 118, se concluye que existe anisotropía direccional la cual se debe tener presente, ya que en la ventana siguiente se le deberá indicar a la herramienta este parámetro.

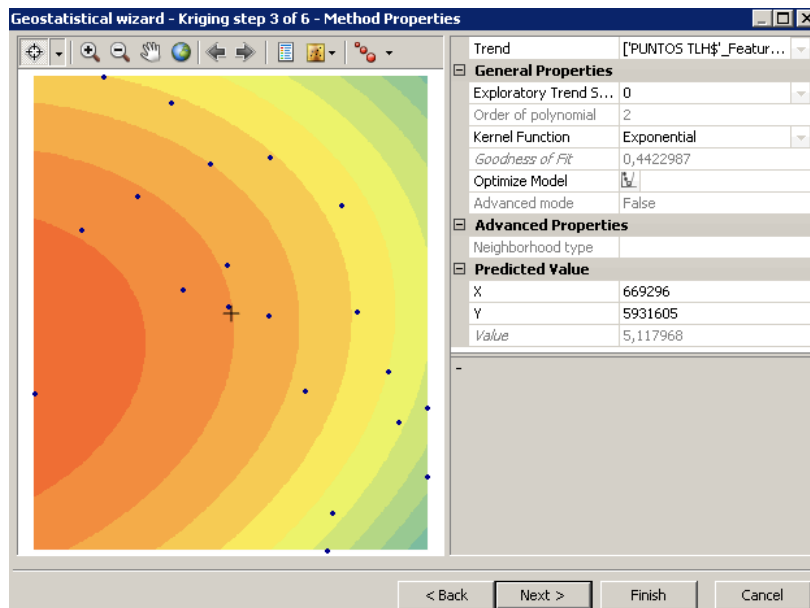


Figura 118: Grafico de anisotropía direccional.

En la ventana anterior rellenamos la siguiente información:

En **Model 1** debemos elegir el modelo geostatístico que deseemos usar para modelar los datos; para el caso del ejemplo, elegiremos el modelo **Spherical**. En el paso anterior concluimos que hay anisotropía estructural, por lo tanto, debemos seleccionar en Anisotropy **True**. (Figura 119)

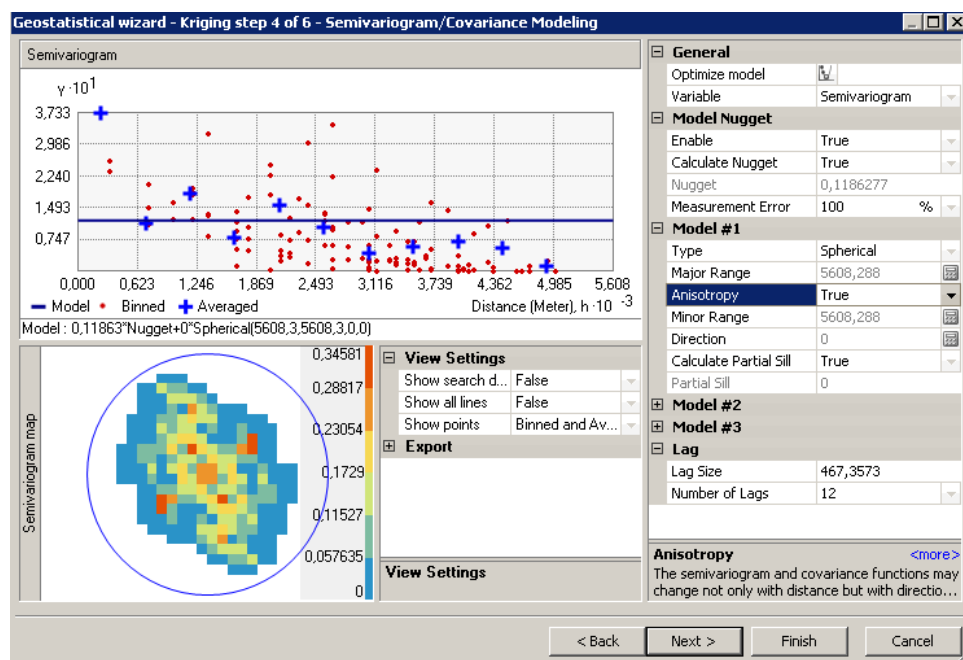


Figura 119: Parámetros a elegir en Variograma.

Después de dar clic en **Next>**. Se muestra la siguiente ventana. Por defecto se deja tal cual aparece. (Figura 120)

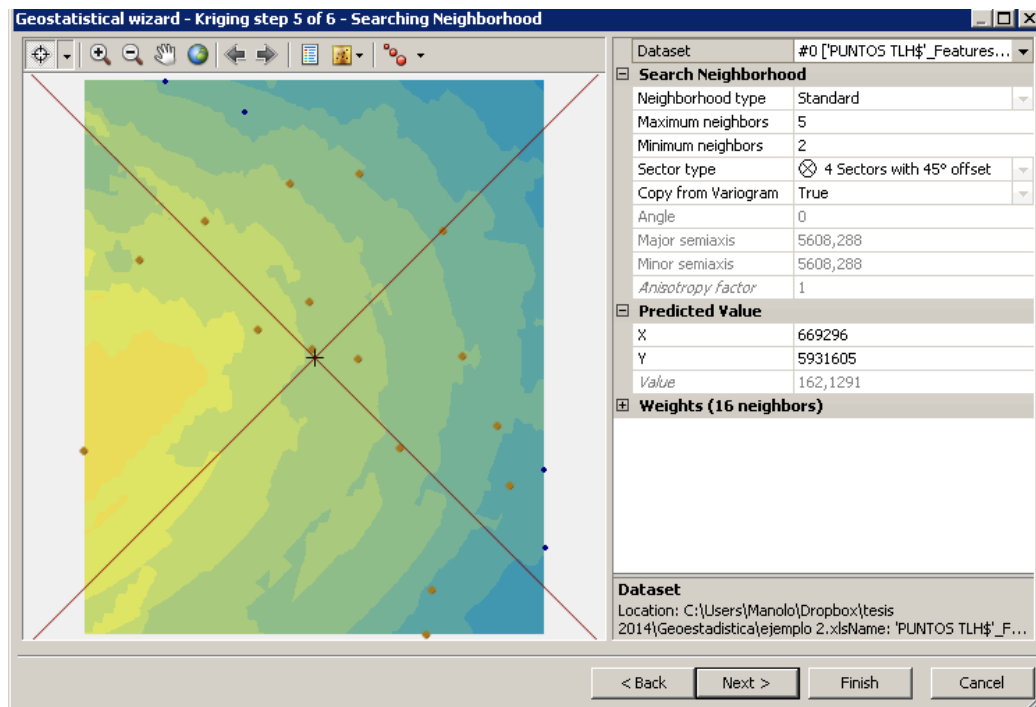


Figura 120: Ventana de Searching Neighborhood.

Volvemos a dar clic en **Next>**, en la siguiente ventana se muestra

- Un recalcu de los datos en comparación con los valores medidos para verificar obtenido.
- Cálculo de los errores:
 - Root-Mean-Square:
 - Average Standard Error:
 - Mean Standardized:
 - Root-Mean-Square Standardized:
- Un gráfico de comparación de datos medidos y datos calculados, en el que se pueden ver que los datos que más se alejan de la línea, y son los que mayores errores presentan en su predicción. (Figura 121)

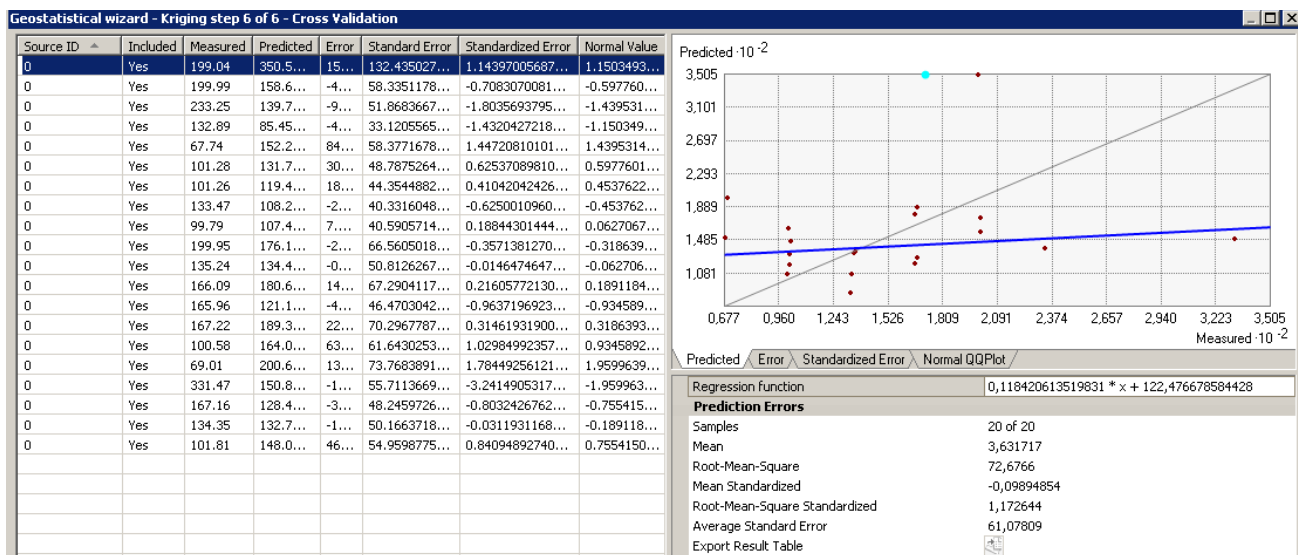


Figura 121: Validación Cruzada.

Damos clic en **Finish** y aparece un resumen del método utilizado. (Figura 122)

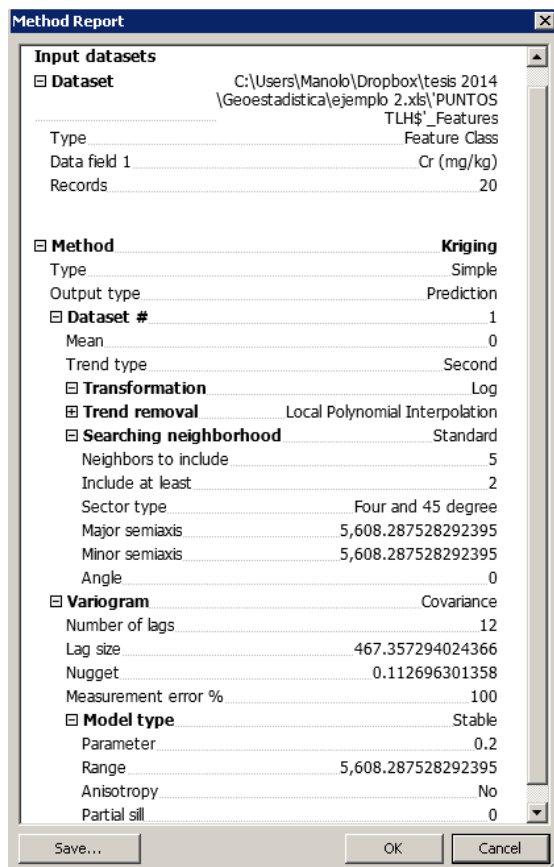


Figura 122: Resumen de parámetros seleccionados.

Hacer clic en **Ok** y aparece el mapa de “PUNTOS TLH” a partir del método Geoestadístico Kriging Simple, Esférico. (Figura 123)

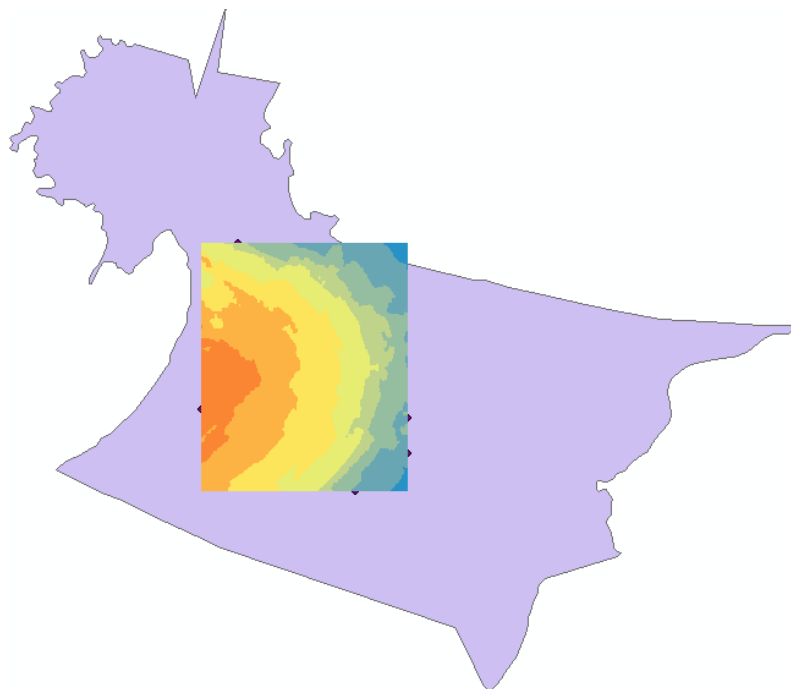


Figura 123: Resultado del mapa predicción “PUNTOS TLH” por Kriging Simple, Esférico.

Con la finalidad de extender interpolación a todo el área de estudio, es decir, extrapolar se hacen los siguientes pasos:

I. Presionar el botón derecho sobre **Kriging**, para que se despliegue el menú, luego presionar **Properties**, se desplegara una ventana tal como muestra en la Figura 124

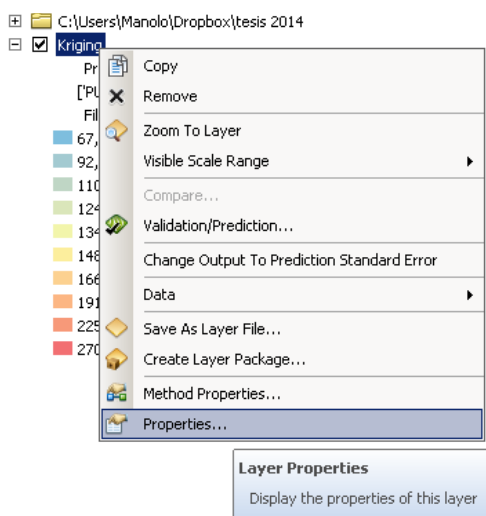


Figura 124: Extrapolar mapa.

II. Presionar la pestaña **Extent**, en la casilla **Set the extent to** seleccionar el archivo shape para que la extensión alcance los límites de este archivo. (Figura 125)

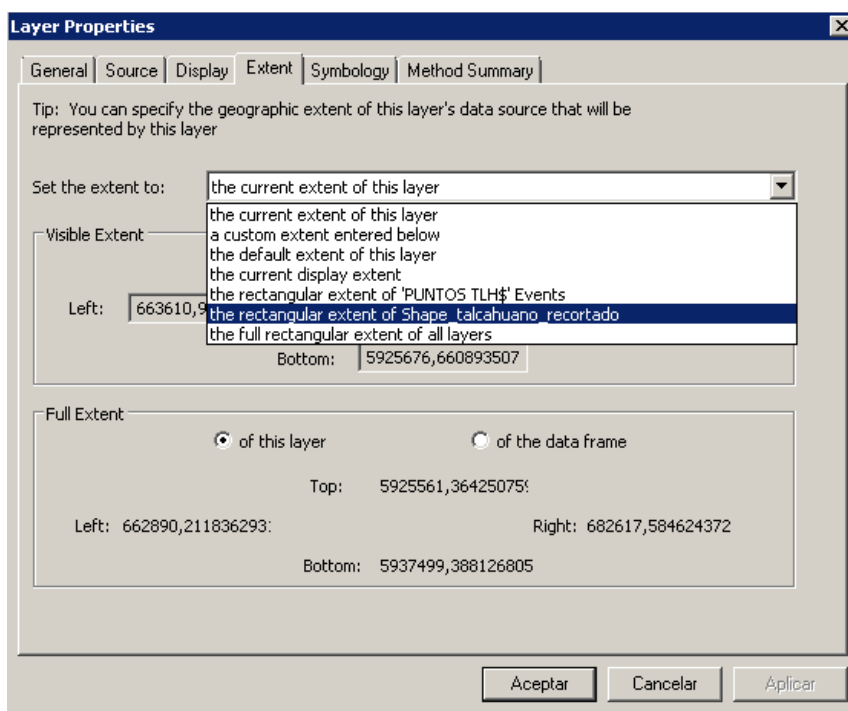


Figura 125: Extender mapa.

III. Para darle un suavizado al gráfico se selecciona la pestaña **Display**, se marca la casilla **Show Map Tips** y la **Transparency** se deja en $\pm 40\%$.(Figura 126)

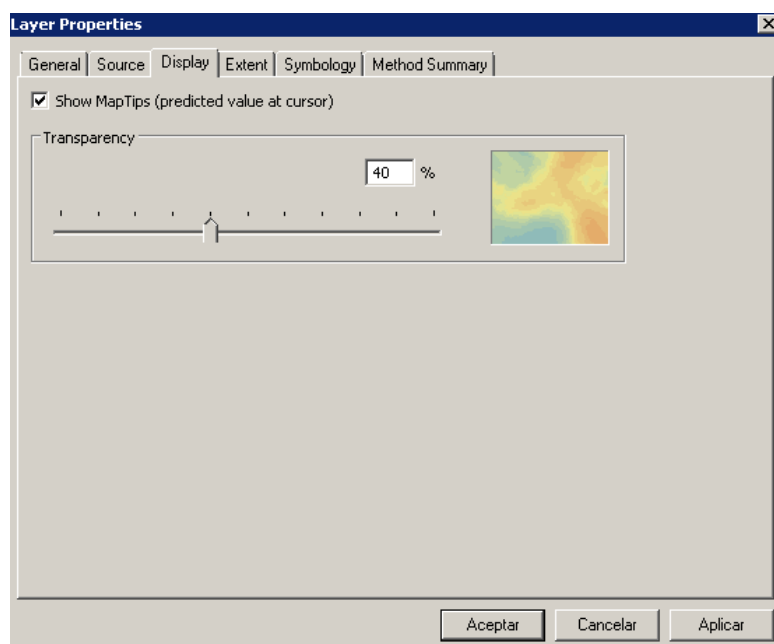


Figura 126: Transparencia del gráfico.

IV. Editar rangos de variable y escala de colores, en la ventana de propiedades seleccionar **Symbology**, activar **Filled Contours**, después presionar la pestaña **Color Ramp**. (Figura 127)

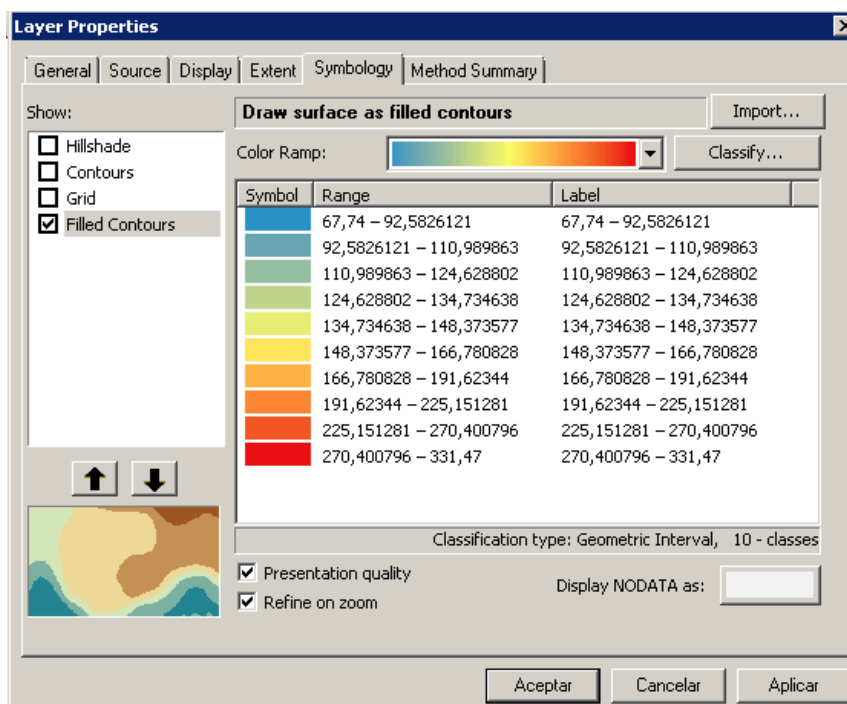


Figura 127: Propiedades de los colores.

El resultado final se ve en la Figura 128

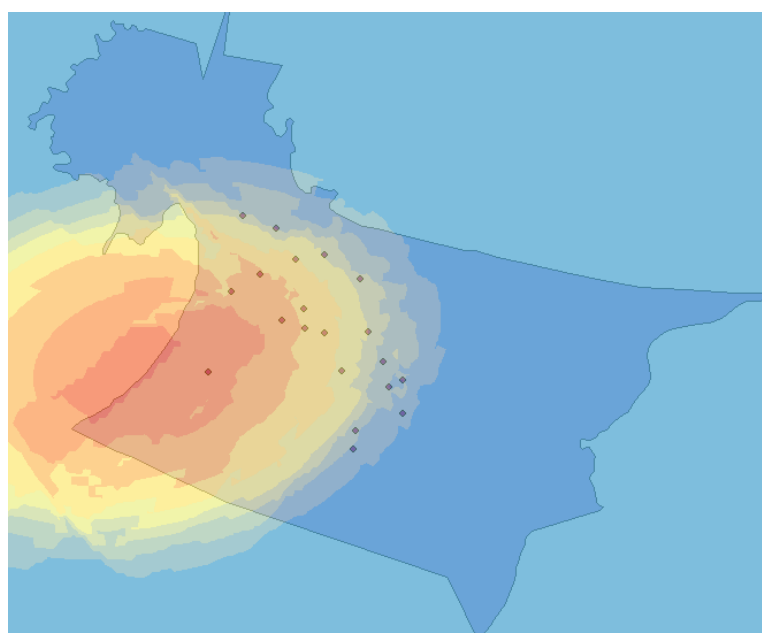


Figura 128: Resumen del modelo kriging Simple.

V. Para recortar el contorno de la Comuna de Talcahuano, hacer clic derecho en **Layers** y clic en **Propiedades**. (Figura 129)

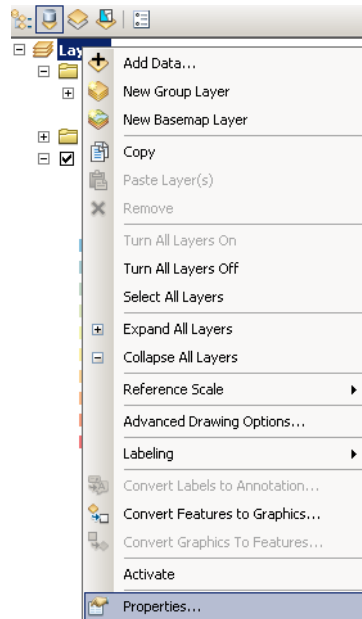


Figura 129: Propiedades de los Layers.

Luego clic en la pestaña **Data Frame**, después en **Extent** dejar Automatic, en **Clip Options** seleccionar **Clip to Shape** y posteriormente el botón **Specify Shape**. (Figura 130)

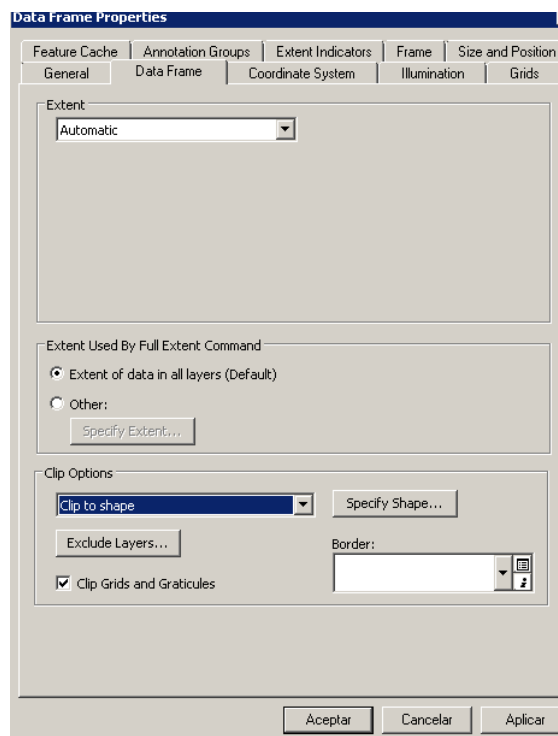


Figura 130: Data Frame Properties.

En la nueva ventana hacer clic en **Outline of Features**. En layer se busca el Shape el cual se quiere dejar como límite. En este caso es “Shape_talcahuano_recortado” y seleccionar en Features **All**. Posteriormente pinchar “**Ok**” (Figura 131)

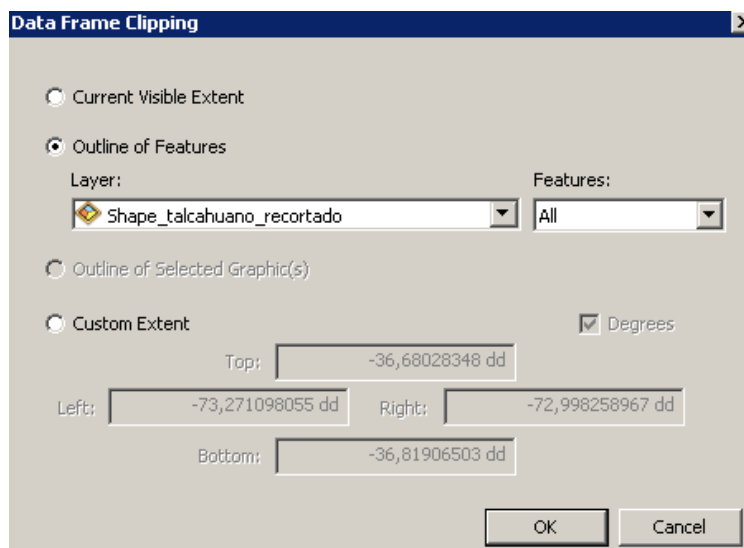


Figura 131: Data Frame Clipping.

Haga clic en **Aplicar** y después **Aceptar** para tener la capa cortada como lo muestra la Figura 132

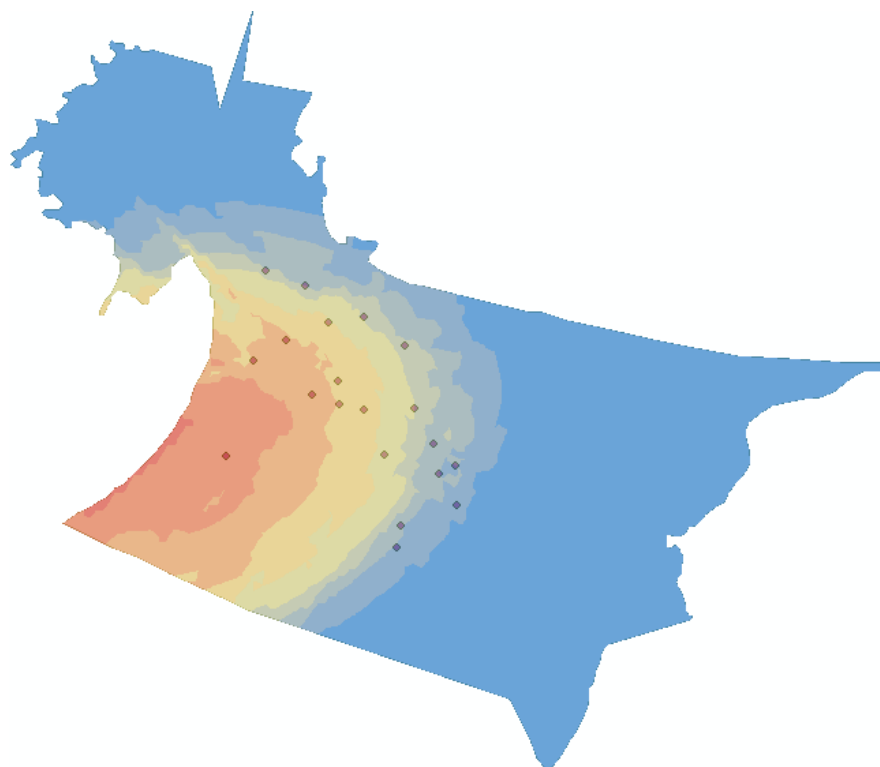


Figura 132: Resultado del recorte de capas.

- **Elección Modelo Variograma**

En este apartado se presenta la forma que se utilizó para seleccionar el mejor modelo teórico de semivariograma, a fin de seleccionar el modelo que mejor se ajusta.

Se utiliza el programa **VESPER** versión 1.6 (Australian Centre for Precision Agricultura 2006).

Los 3 tipos de modelos que van a ser analizados con el programa Vesper, son:

- Esférico
- Exponencial
- Gaussiano

Se compararan los resultados entregados por VESPER y los arrojados por ARCGIS.

Para comenzar, se debe arrancar el programa, en el cual se abrirá la siguiente ventana (Figura 133)

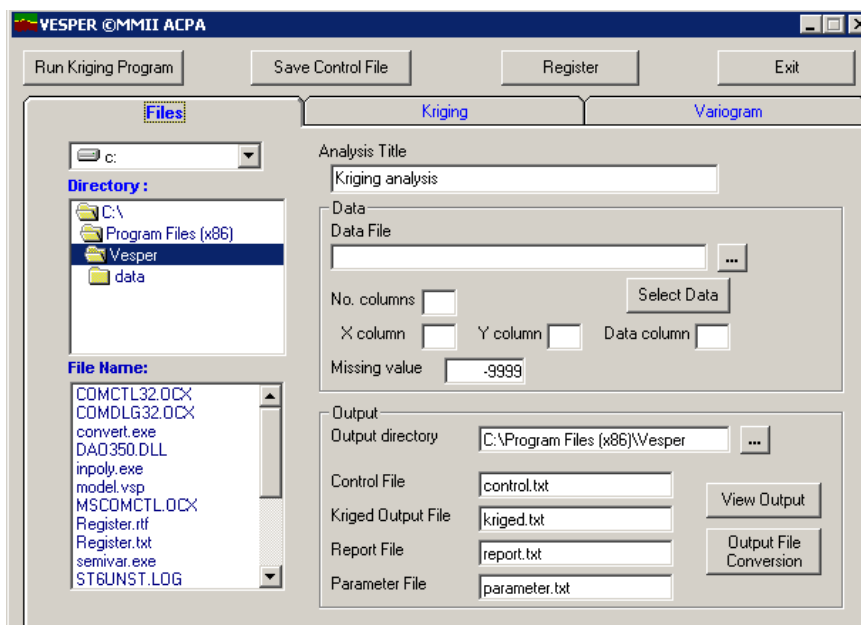


Figura 133: Programa Vesper.

Una vez cargado el programa, se debe seleccionar la pestaña **Variogram**, pues en ella es donde se trabajara. (Figura 134)

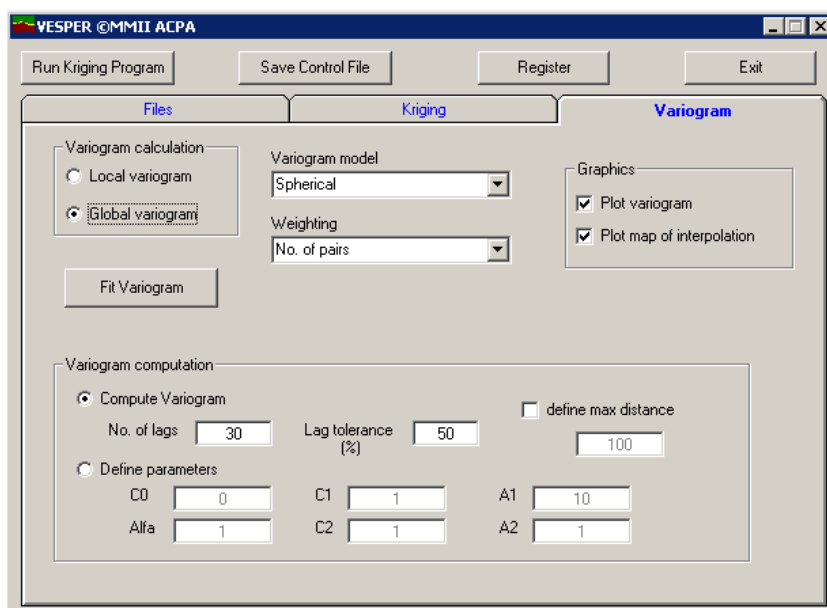


Figura 134: Módulo Variograma Programa Vesper.

En Variogram Calculation, dejar en **Global Variogram**, en Weighting seleccionar **No.of pairs** tal como lo recomienda el Manual del fabricante y luego hacer clic en **Fit Variogram**.

Se desplegara la siguiente ventana, en donde se deben seleccionar los datos y el método por el cual se analizaran. (Figura 135)

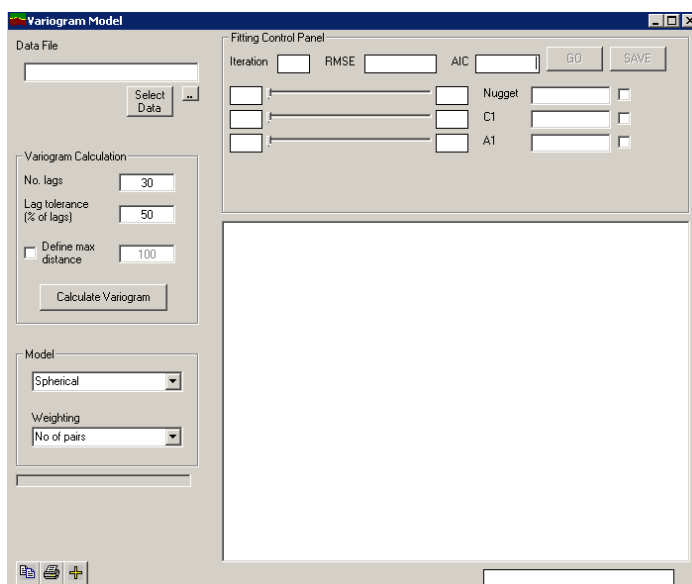



Figura 135: Selección Datos para Variogramas.

Se hace clic en  y se sigue la ruta hasta donde se encuentra el archivo con los datos.

Una vez realizado la carga de los datos, se desplegara la siguiente ventana, en ella solo se debe modificar el dato en **Data Column**, el cual corresponde a la columna con información que se requiere evaluar. En este caso la columna 3 corresponderá a Cr. (Figura 136)

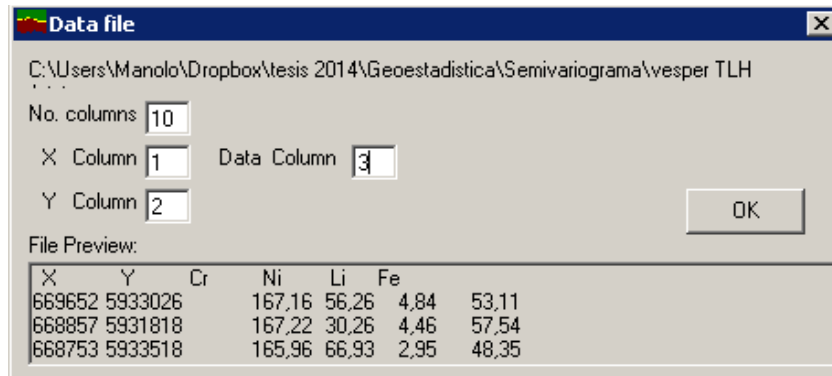


Figura 136: Selección de elemento a Evaluar.

Ahora queda seleccionar el método por el cual se requiere evaluar, el cual se puede cambiar en la pestaña desplegable asociada a **Model**. Estando todos los datos cargados y parámetros definidos, se procede a evaluar, haciendo clic en **Calculate Variogram**. (Figura 137)

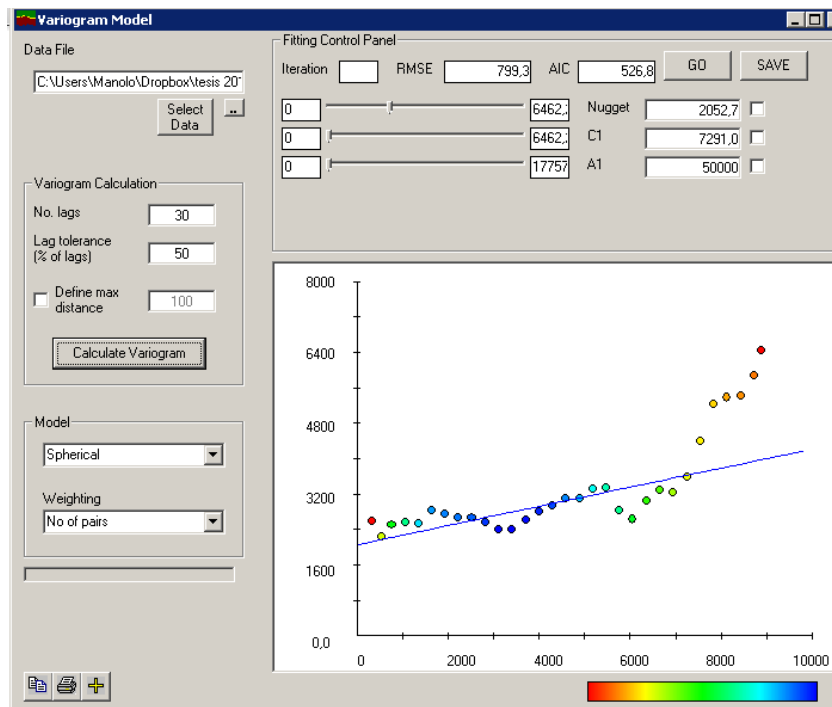


Figura 137: Variograma Generado.

El programa Vesper, tiene la opción de poder optimizar el Variograma, lo cual lo realiza a través de una iteración (Predefinida viene en 200).

Para Optimizar el variograma, basta solo con hacer clic en la parte superior de la ventana, en donde sale el botón GO, una vez presionado, la curva se modifica y cambian sus parámetros de RMSE. (Figura 138)

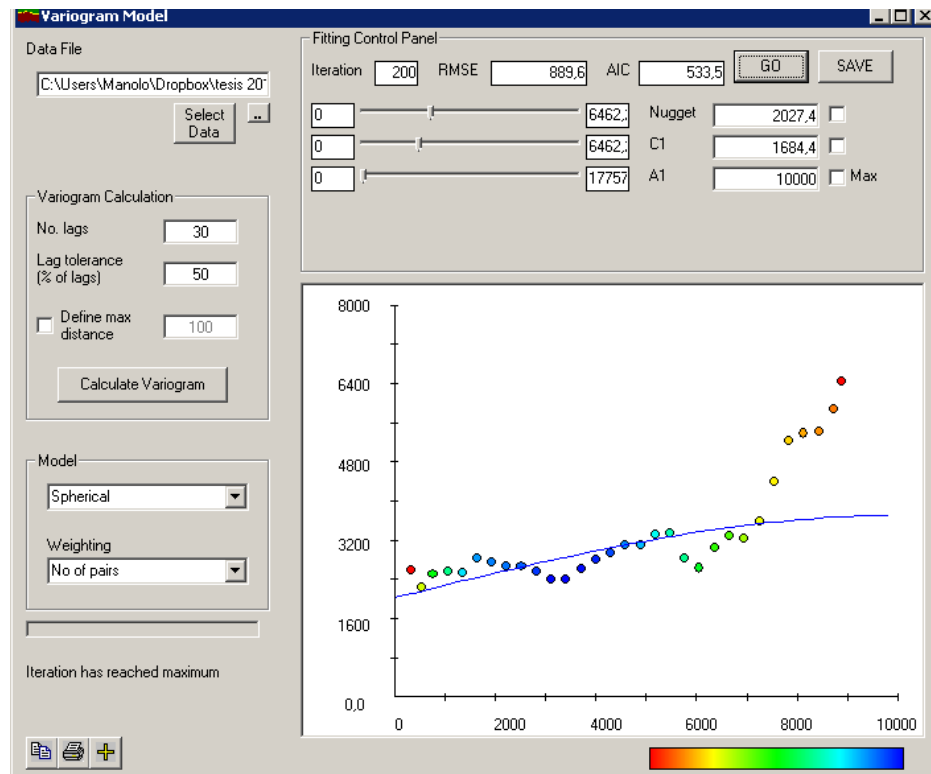


Figura 138: Variograma Optimizado.

Se debe determinar los errores RMSE asociados a los variogramas para cada uno de los Modelos evaluados y luego ser reunidos para lograr una comparación entre todos ellos. De esta forma, se escoge aquel modelo que represente el menor error, una vez escogido este modelo será el que se utilizara en cada uno de los métodos Geoestadísticos.

Se procede a ejecutar el software ArcGis, con el fin de poder determinar los errores RMS o RMSE según corresponda y se debe ejecutar en base al modelo obtenido a través del variograma.