



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

“Análisis comparativo de interpolaciones geoestadísticas de concentraciones de metales pesados, en la parroquia San Bartolomé, Cantón Sígig, Provincia del Azuay.”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
Magister en Minas con mención en Planeamiento Minero.

Autor:

FRANK ANDRÉS ALDAZ CORNEJO

Director:

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA, ECUADOR

2024

Frank Andrés Aldaz Cornejo

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Marzo, 2024

“Análisis comparativo de interpolaciones geoestadísticas de concentraciones de metales pesados, en la parroquia San Bartolomé, Cantón Sígig, Provincia del Azuay.”

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres Jeanneth Cornejo y Frank Aldaz, que han sido un pilar fundamental en mi etapa como estudiante, me han brindado su apoyo incondicional en todo momento, confiaron en mi cuando nadie lo hacía y aunque a veces los decepcioné nunca me faltó su cariño, ellos han sido un ejemplo luchando para sacarnos adelante a mis hermanos y a mi persona.

De igual manera a mis hermanos Carolina Aldaz y David Aldaz, que son una parte muy importante en mi vida y me han ayudado a salir adelante en todo momento, gracias por su apoyo y espero que tengan mucho éxito en su futuro.

A mi sobrinita Sofía, que la esperamos con muchas ansias.

A mi perrito Sebitas, que está conmigo en las buenas y malas.

Frank Andrés Aldaz Cornejo

AGRADECIMIENTO

A mis padres que me han ayudado a salir adelante, a mis hermanos y a mi Sebitas.

Al director de mi tesis Ing. Fernando Valencia, gracias por su tiempo y el aporte en la ejecución de este proyecto.

Al Ing. Eduardo Luna por su ayuda en el correcto desarrollo del presente proyecto.

Frank Andrés Aldaz Cornejo

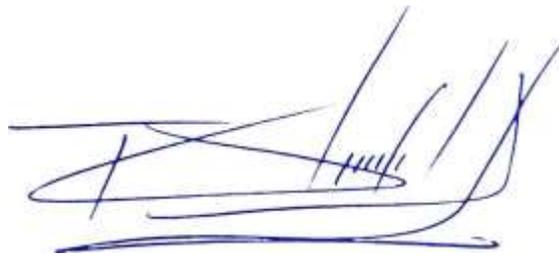
RESUMEN

El presente proyecto se basa en el análisis geoestadístico de las concentraciones de metales pesados en la parroquia San Bartolomé, cantón Sígsig, provincia del Azuay. El estudio abarca la aplicación y la comparación de varios métodos de interpolación geoestadística, como Kriging Simple, Kriging Ordinario, Kriging Universal e Inverso a la Distancia, para estimar las concentraciones de Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) en la zona.

La investigación incluye un análisis exploratorio de datos basado en las muestras recolectadas en campo por el Ingeniero Fernando Valencia, donde se observa patrones espaciales y áreas de concentración elevadas en la parte Noroeste, asociada a la antigua mina “Armenonic”.

Se aborda la determinación del método geoestadístico más apto para el análisis del comportamiento de los metales pesados, optando por el Inverso a la Distancia para el Cadmio y Kriging Universal para el Plomo y Zinc.

Palabras clave: metales pesados, geoestadística, minería, interpolación, contaminación.



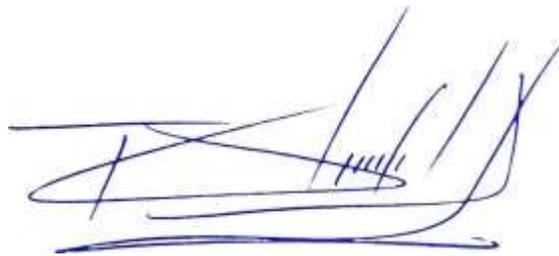
Ing. Fernando Valencia Guaricela

Director del trabajo de titulación

ABSTRACT

The present project is based on the geostatistical analysis of heavy metal concentrations in the San Bartolomé parish, Sígsig canton, Azuay province. The study encompasses the application and comparison of various geostatistical interpolation methods, such as Simple Kriging, Ordinary Kriging, Universal Kriging, and Inverse Distance Weighting, to estimate the concentrations of Cadmium (Cd), Lead (Pb), and Zinc (Zn) in the area. The research includes an exploratory data analysis based on field samples collected by Engineer Fernando Valencia, where spatial patterns and areas of high concentration are observed in the Northwest part, associated with the former "Armenonic" mine. The determination of the most suitable geostatistical method for analyzing the behavior of heavy metals is addressed, opting for Inverse Distance Weighting for Cadmium and Universal Kriging for Lead and Zinc.

Keywords: heavy metals, geostatistics, mining, interpolation, contamination.



Ing. Fernando Valencia Guaricela

Thesis Director

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA		iii
AGRADECIMIENTO		iv
RESUMEN		v
ABSTRACT		vi
ÍNDICE DE TABLAS		xi
ÍNDICE DE FIGURAS		xii
ÍNDICE DE ANEXOS		xvi
CAPÍTULO 1		1
ANTECEDENTES		1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Trabajos previos	2
1.3	Justificación	2
1.4	Beneficiarios.....	3
1.5	Relevancia	4
1.6	Planteamiento del problema	4
1.7	Formulación del problema.....	5
1.8	Objetivos.....	6
1.8.1	<i>Objetivo general</i>	6

1.8.2	<i>Objetivos específicos</i>	6
1.9	Factibilidad del proyecto	6
1.10	Acceso a la información	7
CAPÍTULO 2		8
MARCO TEÓRICO		8
2.1	Área de estudio	8
2.1.1	<i>Ubicación geográfica</i>	8
2.1.2	<i>Accesibilidad</i>	9
2.1.3	<i>Relieve</i>	9
2.1.4	<i>Geología</i>	11
2.2	Definición y características de los metales pesados	13
2.3	Fuentes de contaminación de los metales pesados	15
2.4	Impactos de la contaminación de metales pesados en el medio ambiente y salud humana	16
2.5	Geoquímica	17
2.6	Movilidad de metales pesados en el suelo	18
2.7	Métodos de muestreo y análisis de metales pesados	19
2.8	Interpolación geoestadística como herramienta para estimar concentraciones	20
2.9	Conceptos básicos de la geoestadística	21

2.10	Modelos geoestadísticos utilizados en la interpolación.....	22
2.11	Variables y parámetros relevantes en el análisis de concentraciones.....	26
2.12	Métodos de validación de concentraciones	27
CAPÍTULO 3		29
METODOLOGÍA.....		29
3.1	Diseño de muestreo y recolección de muestras de metales pesados	29
3.2	Análisis de las muestras recolectadas.....	31
3.3	Análisis exploratorio de datos	32
3.3.1	Distribución de Concentraciones.....	32
3.1.2	Boxplots Espaciales.....	36
3.1.3	Log probability	38
3.4	Interpolación geoestadística de las concentraciones de metales pesados.....	40
3.4.1	Kriging simple	40
3.4.2	Kriging Ordinario	46
3.4.3	Kriging Universal	53
3.4.4	Inverso de la distancia	59
CAPÍTULO 4.....		63
RESULTADO Y ANÁLISIS		63
4.1	Análisis de las concentraciones de metales pesados obtenidas	63
4.1.1	Análisis para el Plomo (Pb).....	63

4.1.2	Análisis para el Cadmio (Cd)	63
4.1.3	Análisis para el Zinc (Zn).....	64
4.2	Comparación de las interpolaciones realizadas	64
4.2.1	Comparación de las interpolaciones para el Pb.....	64
4.2.2	Comparación de las interpolaciones para el Cd.	64
4.2.3	Comparación de las interpolaciones para el Zinc.....	65
4.3	Evaluación de la precisión y exactitud de los métodos de interpolación	65
4.3.1	Precisión de los métodos de estimación	65
4.3.2	Exactitud de los métodos de interpolación.....	76
4.4	Implicaciones de los resultados para la gestión de la contaminación de metales pesados	91
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
	Conclusiones.....	92
	Recomendaciones	94
	BIBLIOGRAFÍA	95
	Anexos.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estadística descriptiva del Pb.....	32
Tabla 2. Estadística descriptiva del Cd.	33
Tabla 3. Estadística descriptiva del Zn.....	35
Tabla 4. Tabla de precisión de la interpolación para los metales pesados.	66
Tabla 5. Exactitud de los métodos de interpolación.....	77
Tabla 6. Exactitud predicción y error estándar del Pb.	79
Tabla 7. Exactitud predicción y error estándar del Cd.	83
Tabla 8. Exactitud predicción y error estándar del Zn.	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.	8
Figura. 2. Mapa de accesibilidad a la zona de estudio.	9
Figura. 3. Mapa de relieve de la zona de estudio.	10
Figura. 4. Mapa de pendientes.	11
Figura. 5. Mapa geológico de la zona de estudio.	12
Figura. 6. Modelo de variograma esférico.	23
Figura. 7. Modelo de variograma exponencial.	24
Figura. 8. Modelo de variograma Gaussiano.	25
Figura. 9. Modelo de variograma lineal.	25
Figura. 10. Zona de estudio.	30
Figura. 11. Toma de muestras.	30
Figura. 12. Mapa de ubicación de muestras.	31
Figura. 13. Histograma del Pb (ppm).	33
Figura. 14. Histograma del Cd (ppm).	34
Figura. 15. Histograma del Zn.	35
Figura. 16. Box plot del Pb.	36
Figura. 17. Box plot del Cd.	37

Figura. 18. Box plot del Zn.	37
Figura. 19. Log probability del Pb.	38
Figura. 20. Log probability del Cd.	39
Figura. 21. Log probability del Zn.	39
Figura. 22. Mapa de covariancia Kriging Simple.	41
Figura. 23. Elipsoide de búsqueda Kriging simple.	41
Figura. 24. Mapa de Kriging Simple para el Pb (ppm).	42
Figura. 25. Mapa de covariancia del Kriging Simple Cd.	43
Figura. 26. Elipsoide de búsqueda Kriging Simple Cd.	43
Figura. 27. Mapa de Kriging simple para el Cd (ppm).	44
Figura. 28. Mapa de covariancia Kriging Simple Zn.	45
Figura. 29. Elipsoide de búsqueda Kriging Simple Zn.	45
Figura. 30. Mapa de Kriging Simple para el Zn (ppm).	46
Figura. 31. Propiedades del método Kriging Ordinario para el Pb.	47
Figura. 32. Mapa del semivariograma Kriging Ordinario del Pb.	47
Figura. 33. Elipsoide de búsqueda Kriging Ordinario Pb.	48
Figura. 34. Mapa del Kriging Ordinario Pb.	48
Figura. 35. Propiedades del método Kriging Ordinario para el Cd.	49

Figura. 36. Mapa del semivariograma Kriging Ordinario Cd.....	49
Figura. 37. Elipsoide de búsqueda Kriging Ordinario Cd.....	50
Figura. 38. Mapa del Kriging Ordinario para el Cd (ppm).	50
Figura. 39. Propiedades del método Kriging Ordinario para el Zn.....	51
Figura. 40. Semivariograma Kriging Ordinario para el Zn.....	51
Figura. 41. Elipsoide de búsqueda Kriging Ordinario para el Zn.	52
Figura. 42. Mapa del Kriging Ordinario para el Zn (ppm)	52
Figura. 43. Propiedades del método Kriging Universal para el Pb.....	53
Figura. 44. Semivariograma Kriging Universal para el Pb.....	53
Figura. 45. Mapa de Kriging Universal para el Pb (ppm).....	54
Figura. 46. Propiedades del método Kriging Universal para el Cd.....	55
Figura. 47. Semivariograma Kriging Universal para el Cd.....	55
Figura. 48. Elipsoide de búsqueda Kriging Universal para el Cd.....	56
Figura. 49. Mapa de Kriging Universal para el Cd (ppm).	56
Figura. 50. Propiedades del método Kriging Universal para el Zn.....	57
Figura. 51. Semivariograma Kriging Universal para el Zn.....	57
Figura. 52. Elipsoide de búsqueda Kriging Universal para el Zn.	58
Figura. 53. Mapa de Kriging Universal para el Zn (ppm).....	58

Figura. 54. Elipsoide de búsqueda Inverso de la distancia para el Pb.....	59
Figura. 55. Mapa del Inverso de la distancia para el Pb (ppm).....	60
Figura. 56. Elipsoide de búsqueda Inverso de la distancia para el Cd.	61
Figura. 57. Mapa del Inverso de la distancia para el Cd.	61
Figura. 58. Elipsoide de búsqueda Inverso de la distancia para el Zn.	62
Figura. 59. Mapa del Inverso de la distancia para el Zn (ppm).....	62
Figura. 60. Mapa de inspección visual de Kriging Simple Pb.	70
Figura. 61. Mapa de inspección visual de Kriging Ordinario Pb.....	71
Figura. 62. Mapa de inspección visual de Kriging Universal Pb.....	71
Figura. 63. Mapa de inspección visual de Inverso a la Distancia Pb.	72
Figura. 64. Mapa de inspección visual de Kriging Simple Cd.....	72
Figura. 65. Mapa de inspección visual de Kriging Ordinario Cd.	73
Figura. 66. Mapa de inspección visual de Kriging Universal Cd.	73
Figura. 67. Mapa de inspección visual de Inverso a la Distancia Cd.....	74
Figura. 68. Mapa de inspección visual de Kriging Simple Zn.	74
Figura. 69. Mapa de inspección visual de Kriging Ordinario Zn.....	75
Figura. 70. Mapa de inspección visual de Kriging Universal Zn.....	75
Figura. 71. Mapa de inspección visual del Inverso a la Distancia Zn.....	76

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo. 1. Resultados de laboratorio.	97
Anexo. 2. Validación método Inverso a la Distancia Cd.	103
Anexo. 3. Validación método Inverso a la Distancia Pb.	104
Anexo. 4 Validación método Inverso a la Distancia Zn.	105
Anexo. 5 Validación método Kriging Ordinario Cd.	106
Anexo. 6. Validación método Kriging Ordinario Pb.	107
Anexo. 7. Validación método Kriging Ordinario Zn.	108
Anexo. 8. Validación método Kriging Simple Cd.	109
Anexo. 9. Validación método Kriging Simple Pb.	110
Anexo. 10 Validación método Kriging Simple Zn.	111
Anexo. 11. Validación método Kriging Universal Cd.	112
Anexo. 12 Validación método Kriging Universal Pb.	113
Anexo. 13. Validación método Kriging Universal Zn.	114

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Introducción

La industria minera, a pesar de su contribución al crecimiento económico y al desarrollo de un país, plantea desafíos significativos en términos de impactos ambientales y de salud pública. En el contexto ecuatoriano, donde se ha reconocido a la minería como un sector estratégico, es esencial comprender y abordar estos desafíos de manera efectiva. Uno de los problemas críticos relacionados con la minería es la contaminación del suelo y del agua por metales pesados, un problema que afecta a numerosas comunidades y ecosistemas en todo el país.

En particular, la parroquia San Bartolomé, ubicada en el cantón Sígsig de la provincia del Azuay, ha experimentado una presión creciente debido a las actividades mineras en la región. Esta presión plantea interrogantes acerca de la calidad ambiental y la seguridad de la salud en esta área. Para abordar esta problemática, es necesario realizar un análisis comparativo de las técnicas de interpolación geoestadística utilizadas para evaluar las concentraciones de metales pesados en suelos y aguas en la parroquia San Bartolomé.

Este estudio busca arrojar luz sobre la distribución espacial de metales pesados en esta región minera específica y proporcionar información crítica para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y de salud pública. A través de un análisis comparativo de diferentes métodos de interpolación geoestadística, se pretende identificar la técnica más adecuada para evaluar y mapear la contaminación por metales pesados en San Bartolomé. Además, se considerarán factores como la geología local, las prácticas mineras y las características del terreno que puedan influir en la dispersión de estos contaminantes.

1.2 Trabajos previos

El estudio “Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé” ha sido el punto de partida para el desarrollo de la presente investigación, el estudio realizado por el ingeniero Fernando Valencia en el año 2017 se enfocó en lo siguiente:

La identificación de la distribución espacial de metales pesados en suelos utilizados para la agricultura en una zona específica. Este sector de investigación abarcó un área de 2400 hectáreas en las microcuencas de los arroyos Sorche y El Salado, situados en la parroquia de San Bartolomé, dentro del cantón Sígsig de la provincia de Azuay, en Ecuador.

El objetivo principal fue desarrollar un modelo geoestadístico que ayudará a comprender cómo se dispersan los metales pesados en el suelo, especialmente plomo (Pb), cadmio (Cd) y zinc (Zn). Para lograr esto, se recolectaron 106 muestras estratificadas de suelo en áreas agrícolas con una densidad de al menos 2.5 muestras por kilómetro cuadrado.

Las muestras se analizaron en laboratorio para determinar las concentraciones de metales pesados en partes por millón (ppm) utilizando espectrometría de absorción atómica. Luego, se procesaron los datos y se utilizó un software SIG (Sistema de Información Geográfica) para generar un modelo predictivo representando la dispersión de metales pesados en la zona de estudio. Este modelo identificó las áreas donde las concentraciones de metales pesados superaban los límites de riesgo establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana y se crearon mapas que podrían utilizarse para la planificación territorial.

1.3 Justificación

En Ecuador, un país con una gran diversidad ecológica, la contaminación ambiental puede tener efectos devastadores en sus ecosistemas únicos. Investigar y comprender cómo la minería

afecta la calidad del suelo y del agua en una región específica como San Bartolomé permitirá abordar problemas ambientales específicos en el contexto ecuatoriano.

Además, existe una escasez de investigaciones comparativas exhaustivas sobre las diferentes técnicas de interpolación geoestadística en relación con la contaminación por metales pesados en áreas mineras específicas en Ecuador. Esta tesis llenaría ese vacío de conocimiento y proporcionaría información valiosa para futuros proyectos y políticas relacionadas con la minería.

Los resultados de esta investigación podrían tener aplicaciones prácticas directas en la gestión ambiental y la toma de decisiones. Las autoridades locales, los responsables de la minería y las comunidades podrían utilizar estos datos para implementar medidas de mitigación y restauración más efectivas.

1.4 Beneficiarios

Los beneficiarios pueden ser diversos y abarcar diferentes ámbitos, entre los principales están:

- Comunidades locales de San Bartolomé: serán los beneficiarios directos de esta investigación, ya que se proporcionará información sobre los niveles de contaminación por metales pesados que existe en su entorno.
- Autoridades locales y regionales: las autoridades podrán utilizar estos resultados para tomar decisiones sobre regulaciones y políticas relacionadas con la minería y la gestión ambiental.
- Empresas mineras: este proyecto les permitirá comprender mejor los impactos de sus operaciones en el entorno y la comunidad local.

- Público en general: la presente investigación contribuirá al conocimiento sobre la contaminación por metales pesados en áreas mineras.

1.5 Relevancia

La elaboración del presente proyecto tiene gran relevancia en múltiples aspectos. En primer lugar, aborda un tema de gran importancia ambiental, ya que la minería puede tener un impacto significativo en el entorno natural, incluyendo la contaminación por metales pesados que afecta tanto al suelo como al agua. Esta investigación proporcionaría datos valiosos para comprender mejor la extensión y gravedad de estos problemas.

Además, el estudio podría contribuir a la promoción de prácticas mineras más responsables y sostenibles en Ecuador, un país donde la minería se considera un sector estratégico. Los resultados podrían ser útiles tanto para las autoridades gubernamentales como para las empresas mineras, permitiéndoles implementar medidas más efectivas de mitigación y restauración ambiental.

1.6 Planteamiento del problema

La industria minera es una fuente importante de recursos y se encarga de aportar al desarrollo económico del país, a su vez genera una serie de problemas ambientales que al no ser estudiados, analizados y tratados de manera técnica podrían ocasionar afectaciones a la salud pública y al medio ambiente.

La contaminación de suelos por metales pesados debido a las actividades mineras mal realizadas representa un gran problema ambiental. El incorrecto manejo de los residuos y relaves mineros, la falta de medidas de mitigación y la ausencia de prácticas adecuadas de restauración de las áreas intervenidas pueden generar pasivos ambientales significativos.

Los diversos metales pesados como plomo, cadmio y zinc son altamente nocivos y tienen la capacidad de persistir en el medio ambiente por largos periodos, penetrando en la cadena trófica a través del suelo, lo que afecta tanto a la biodiversidad como a la salud humana.

La dispersión de estos metales a través del agua de lixiviación y la erosión del suelo conlleva un riesgo de contaminación de tierras agrícolas, lo que puede resultar en la absorción de estos elementos por cultivos y plantas, y finalmente llegar a la cadena alimentaria humana.

Además, la contaminación del suelo tiene un impacto devastador en el ecosistema local, afectando la flora y fauna del lugar, los ecosistemas acuáticos cercanos también pueden sufrir daños significativos debido a la presencia de metales pesados a través del escurrimiento superficial y la filtración en acuíferos.

1.7 Formulación del problema

La industria minera desempeña un papel fundamental en la generación de recursos y el desarrollo económico de un país. Si bien es una fuente crucial de ingresos, también está generando graves problemas ambientales que, si no se abordan de manera técnica y adecuada, pueden tener consecuencias perjudiciales tanto para la salud pública como para el medio ambiente.

El presente proyecto busca establecer un modelo de las zonas sensibles de contaminación generada por la presa de relaves, además de encontrar la correlación entre los diferentes métodos geoestadísticos, para mitigar en cierto porcentaje la propagación de los metales pesados en la zona de estudio.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de los diferentes métodos geoestadísticos para investigar la distribución y concentración de metales pesados existentes en el suelo de uso agrícola en la parroquia de San Bartolomé, con la finalidad de establecer un modelo de las zonas sensibles de contaminación generada por la presa de relaves.

1.8.2 Objetivos específicos

- Analizar los diferentes métodos de interpolaciones geoestadísticas.
- Realizar un análisis exploratorio de los metales pesados en función a las muestras tomadas en campo.
- Encontrar una correlación entre los diferentes métodos geoestadísticos.
- Determinar el método geoestadístico apto para el correcto análisis del comportamiento de los metales pesados en la zona de estudio.

1.9 Factibilidad del proyecto

El proyecto es factible debido a varios motivos uno de ellos es porque existe un creciente interés tanto a nivel local como nacional en entender cómo la minería afecta al medio ambiente y a la salud de las personas en Ecuador. La minería es una actividad económica importante en el país, pero también plantea riesgos para el entorno y la salud que necesitan ser comprendidos y gestionados adecuadamente.

Además, en los últimos años ha habido avances en las herramientas y tecnologías disponibles para analizar y mapear la contaminación por metales pesados. Esto significa que ahora es más viable llevar a cabo investigaciones en este campo, con acceso a software

especializado y datos geoespaciales que facilitan la comparación de diferentes métodos de estimación.

1.10 Acceso a la información

El acceso a la información relevante para el desarrollo de la presente investigación se la puede obtener de varias fuentes:

- Base de datos científicas.
- Información gubernamental.
- Universidades.
- Datos geoespaciales.
- Artículos científicos.
- Datos de las muestras tomadas en la zona de estudio.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Área de estudio

2.1.1 Ubicación geográfica

El área de estudio (véase Figura. 1) está ubicada a unos 20.5 kilómetros al Sureste de la ciudad de Cuenca. Esta región engloba las microcuencas de los arroyos Sorche y El Salado, mayormente localizadas en la parroquia de San Bartolomé, la cual forma parte del cantón Sígsig en la provincia de Azuay.

Figura. 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

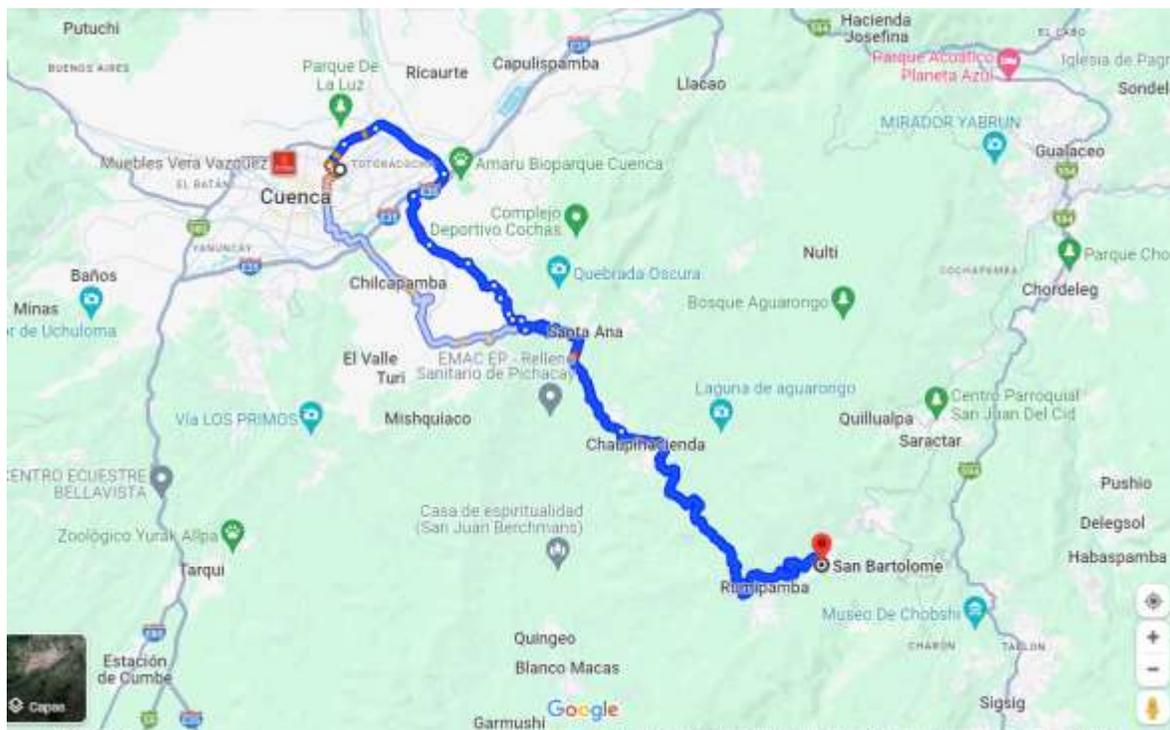


Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Accesibilidad

Para acceder a la parroquia de San Bartolomé desde Cuenca, hay diversas rutas disponibles (Figura. 2), tales como la vía del Valle, Santa Ana, Bello Unión, el cruce de Quingeo, y la ruta que pasa por Cuenca, Gualaceo, Chordeleg, La Unión del Sígsig y finalmente llega a San Bartolomé. Asimismo, se menciona una alternativa adicional a través del cantón Gualaceo, pasando por la parroquia San Juan Disha para finalmente llegar a San Bartolomé (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de San Bartolomé, 2020).

Figura. 2. Mapa de accesibilidad a la zona de estudio.

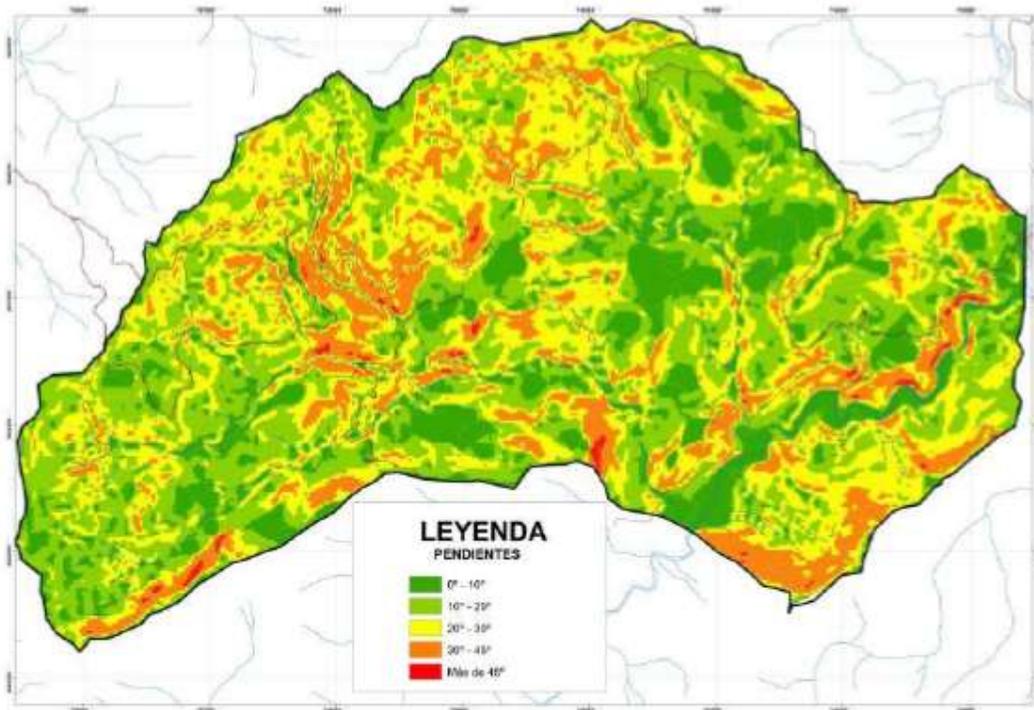


Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Relieve

Como menciona Valencia (2017): La zona de estudio abarca 2440 hectáreas, con altitudes que van desde los 3320 metros sobre el nivel del mar en su punto más elevado hasta los 2300

Figura. 4. Mapa de pendientes.



Fuente: Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé. (Valencia, 2017)

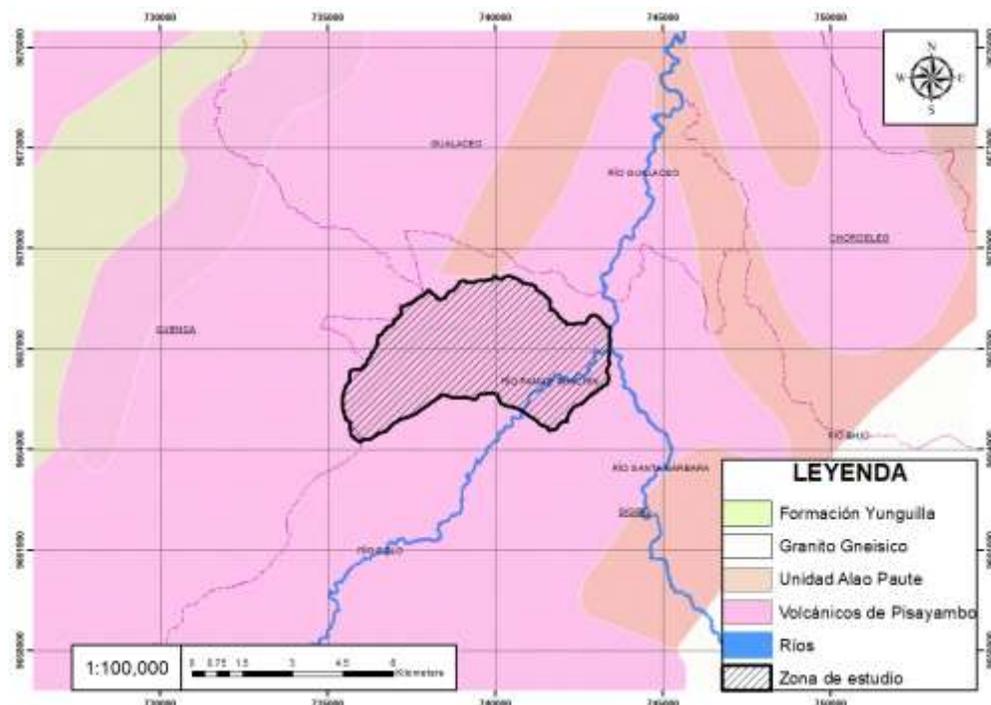
2.1.4 Geología

Valencia (2017), describe los siguientes tipos de litologías:

San Bartolomé se ubica a la formación Tarqui como la dominante en la zona de estudio (Figura. 5), estos materiales son volcánicos eólicos en su mayoría fuertemente degradados. Es considerada como el manto volcánico que cubre extensas regiones en la sierra sur del Ecuador en discordancia sobre capas más antiguas. En la zona se pueden encontrar depósitos de piroclastos y aglomerados con composición que varía desde riolítica hasta andesítica, así como tobas, cenizas volcánicas e ignimbritas, y en algunas áreas, lavas. Cerca del centro parroquial de San Bartolomé, se distingue la presencia de la Unidad Maguazo, compuesta principalmente por filitas, micaesquistos, pizarras y cuarcitas altamente plegadas, originadas por el metamorfismo de

rocas volcánicas y volcanodetritos como andesitas, tobas, conglomerados y aglomerados volcánicos, que también se encuentran expuestos en el valle del río Paute, aguas abajo de La Josefina. Este proceso de metamorfismo tuvo lugar hace aproximadamente 86 a 90 millones de años, en el Cretácico Superior Senoniano. En la zona media de la microcuenca de la quebrada El Salado se ha identificado la Unidad Chiguinda, que forma parte de la serie Loja y predomina en la parte sur de la Cordillera Real. Esta unidad está compuesta por cuarcitas y filitas negras, siendo notable su aparición en la zona de estudio debido a su antigüedad. Hacia la parte baja de la microcuenca, predominan los materiales volcánicos, incluyendo tobas estratificadas de grano fino y lapilli correspondientes a la formación Nabón. En las orillas del río Pamar se pueden encontrar depósitos aluviales de pequeña extensión y espesor, compuestos por clastos de tamaño decimétrico hasta arenas.

Figura. 5. Mapa geológico de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Definición y características de los metales pesados

Los metales pesados hacen referencia a los elementos químicos que tengan una alta densidad y sea tóxico o venenoso inclusive en concentraciones muy bajas, estos pueden ser el mercurio, cadmio, arsénico, cromo, talio y plomo (González, 2009)

A los metales pesados se les puede definir de dos maneras:

- Peso atómico: este elemento químico puede estar comprendido entre Cu (63,55) y Hg (200,59).
- Densidad: estos pueden estar entre 4 g/cm^3 hasta 7 g/cm^3 .

Estos metales se encuentran como componentes naturales de la corteza terrestre en forma de minerales, sales u otros compuestos, no pueden ser destruidos o degradados de forma natural o biológica; también pueden ser de origen antropogénico, estos se derivan de residuos peligrosos, procedentes de actividades industriales, minería e industria agrícola y residuos sólidos urbanos (Baena, 2008).

Algunos metales como cobre, selenio, zinc son esenciales para mantener un buen metabolismo en los seres vivos; sin embargo, en concentraciones más altas pueden conducir al envenenamiento, pudiendo darse por contaminación del agua, concentraciones en el aire o por la vía de la cadena alimenticia (González, 2009)

Entre los metales pesados más peligrosos están:

- El Zinc se encuentra en la familia número II B, su símbolo es Zn, tiene un número atómico 30 y peso atómico de 65,37. Es un metal maleable, dúctil y de color gris. Se estima que el Zinc está presente en la corteza terrestre en un 0,0005-0,002% ocupando el

puesto 23° de elementos más abundantes de la Tierra; es clasificado como un metal; una de sus aplicaciones más importantes es el galvanizado del acero, el único estado de oxidación que presenta es el $+2$. (EcuRed, 2000)

- El Cadmio es un elemento químico de número atómico 48 situado en el grupo IIB por debajo del Zinc, su símbolo es Cd, no se encuentra en la naturaleza en estado puro sino por afinidad química, está asociado con metales como el zinc, plomo y cobre, puede encontrarse en el aire, suelo, agua; es muy dúctil por lo que es muy adecuado para aleaciones metálicas. La mayor cantidad de cadmio se puede encontrar en la esfalerita, se encuentra asociado al zinc; el mayor uso de este metal es para la fabricación de baterías recargables y las sales del cadmio para la fotografía, fuegos artificiales, pintura fluorescente, vidrios y porcelana. (EcuRed, 2000)
- El Mercurio se encuentra en la familia IIB, tiene el símbolo Hg con número atómico de 80, peso atómico de 200,50 (g/mol). Este líquido, de aspecto blanco plateado a temperatura ambiente, tiene la capacidad de formar amalgamas con varios metales, incluyendo oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio. En sus compuestos, el mercurio generalmente se encuentra en estados de oxidación $+1$ y $+2$. El mercurio se encuentra como sulfuro Hg, con frecuencia como rojo de cinabrio y con menos abundancia como metal cinabrio negro; es usado en interruptores eléctricos como material líquido de contacto, tacómetros, barómetros y termostatos. (EcuRed, 2000)
- El elemento químico plomo lleva como símbolo Pb, con un número atómico de 82 y peso atómico de 207,19 u y actúa con valencia $+2$, $+4$; tiene un color gris-azulado que existe en pequeñas cantidades en la corteza terrestre y está asociado al zinc. Puede encontrarse en depósitos formados por rocas ígneas, típicamente en calizas y dolomitas. Los minerales

asociados pueden incluir galena, esfalerita y pirita. Se utiliza en la fabricación de baterías, municiones, productos metálicos y en láminas para protección contra los rayos X.

Aunque el plomo en sí mismo no se degrada, sus compuestos pueden ser transformados por la luz natural, el aire y el agua. (EcuRed, 2000)

- El arsénico, cuyo símbolo químico es As, tiene un número atómico de 33 y un peso de 74,922 u. Este elemento es ampliamente distribuido en la naturaleza y es uno de los pocos minerales disponibles con una pureza de 99,9999% o más. (Lenntech B.V, 1998)
Este metal suele encontrarse típicamente en la superficie de las rocas en combinación con azufre, manganeso, hierro, cobalto, níquel, plata o estaño. En estado sólido, ha sido utilizado en la fabricación de materiales para láseres y como agente acelerador en la producción de varios dispositivos. Además, el óxido de estaño se emplea en la fabricación de vidrio. (EcuRed, 2000)

2.3 Fuentes de contaminación de los metales pesados

La contaminación por metales pesados es un problema ambiental que puede tener diversas fuentes. A continuación, se enumeran algunas de las fuentes de contaminación de metales pesados:

- **Actividades industriales:** Las actividades industriales, como la minería y la fundición de metales, son conocidas por liberar metales pesados al ambiente (Lambert et al., 2015).
- **Agricultura:** El uso excesivo de fertilizantes y enmiendas del suelo puede contribuir a la liberación de metales pesados, como el cadmio, en el suelo (Kabata-Pendias, 2011).
- **Vertederos y residuos sólidos:** Los vertederos y la gestión inadecuada de residuos sólidos pueden ser fuentes significativas de contaminación por metales pesados (Alloway, 2013).

- Descargas industriales y urbanas: Las descargas de aguas residuales industriales y urbanas pueden contener concentraciones elevadas de metales pesados, afectando cuerpos de agua cercanos (Mohan et al., 2014).
- Emisiones Atmosféricas: Las emisiones atmosféricas, especialmente aquellas provenientes de la quema de combustibles fósiles, pueden transportar metales pesados y depositarlos en el suelo y el agua (Alloway, 2013).

2.4 Impactos de la contaminación de metales pesados en el medio ambiente y salud humana

La contaminación por metales pesados tiene impactos significativos tanto en el medio ambiente como en la salud humana, algunos impactos se presentan a continuación:

Medio Ambiente

- Toxicidad en suelo y agua: La contaminación por metales pesados puede resultar en la toxicidad del suelo y del agua, afectando la flora y la fauna (Alloway, 2013).
- Bioacumulación en organismos acuáticos: Los metales pesados pueden bioacumularse en organismos acuáticos, afectando la cadena alimentaria y provocando impactos negativos en los ecosistemas acuáticos (Meyer et al., 2014).
- Alteración de ciclos biogeoquímicos: La contaminación por metales pesados puede alterar los ciclos biogeoquímicos naturales en el suelo, afectando la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Kabata-Pendias, 2011).

Salud Humana

- Contaminación del agua potable: La presencia de metales pesados en el agua potable puede tener efectos adversos para la salud humana, causando problemas gastrointestinales y daño a órganos internos (World Health Organization, 2011).
- Toxicidad a corto y largo plazo: La exposición a metales pesados, como el plomo y el mercurio, puede tener efectos tóxicos a corto plazo (por ejemplo, envenenamiento agudo) y a largo plazo (por ejemplo, daño neurológico) (Grandjean & Landrigan, 2014).
- Impacto a la calidad del aire: La inhalación de partículas contaminadas con metales pesados en el aire puede contribuir a problemas respiratorios y cardiovasculares en la población expuesta (Hettige et al., 2018).

2.5 Geoquímica

La Geoquímica estudia el origen, distribución y evolución de los elementos químicos en la Tierra que se encuentran formando las rocas (y sus derivados) seres vivos, el agua y la atmósfera; teniendo, así como objetivo determinar la abundancia de los elementos en la naturaleza para desarrollar la teoría sobre el origen y la estructura de nuestro planeta y del universo. (SGM, 2000)

(Gibson, 1949) Fundamentó cuatro principios de la geoquímica:

1. Contenidos de los elementos en la Tierra.
2. Movimiento y dispersión de los elementos en los minerales, rocas y diversas capas terrestres a lo largo del espacio y el tiempo.
3. Establecimiento de los principios y estándares que regulan la cantidad y distribución individual de los elementos.

4. Variabilidad en la distribución de isótopos, proceso de mineralización y tipos de cambios en las rocas.

La aplicación de la geoquímica en la industria minera ha avanzado en los siguientes aspectos fundamentales:

- Identificación de depósitos en áreas inexploradas.
- Definición y marcación de regiones ricas en minerales y zonas metalogénicas.
- Exploración de metales en áreas circundantes a depósitos conocidos, determinando su extensión, repetición y nuevos cuerpos minerales.

2.6 Movilidad de metales pesados en el suelo

Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos en el mismo, pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli et al., 2004).

Los metales pesados adicionados a los suelos se redistribuyen y reparten lentamente entre los componentes de la fase sólida (Sposito et al., 1983; McGrath y Cegarra, 1992; Han et al., 2003). Dicha redistribución se caracteriza por una rápida retención inicial y posteriores reacciones lentas, dependiendo de las especies del metal, propiedades del suelo y tiempo (Brummer et al., 1988; Han y Banin, 1997, 1999; Han et al., 2001, 2003).

La movilidad relativa de los elementos traza en suelos es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea y difiere de si su origen es natural o antrópico (Karczewska, 1996; Ma y Uren, 1998; Wilcke et al., 1998; Burt et al., 2003) y, dentro de este último, al tipo de fuente antrópica (Davis et al., 1994; Griffin, 1991; Burt et al., 2003).

Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son: (Sauquillo et al., 2003):

- Características del suelo: pH, potencial REDOX, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de cambio, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, etc.
- Origen y método de deposición de los metales: naturaleza de la contaminación.
- Factores ambientales relevantes: acidificación, cambios en las condiciones de oxidación-reducción, fluctuaciones de temperatura y humedad, entre otros.

2.7 Métodos de muestreo y análisis de metales pesados

Los métodos de muestreo y análisis de metales pesados son esenciales para evaluar la presencia y concentración de estos elementos en diversas matrices ambientales. A continuación, se describen algunos métodos comunes:

Muestreo

- Muestreo de agua: Para el muestreo de agua, es crucial seguir protocolos estandarizados. La toma de muestras debe realizarse en diferentes puntos y profundidades para obtener una representación precisa (American Public Health Association, 2017).
- Muestreo de suelo: En el muestreo de suelo, se pueden emplear técnicas como la subdivisión del área en cuadrículas y la recolección de muestras en diferentes profundidades para caracterizar la distribución de metales pesados (Alloway, 2013).
- Muestreo de aire: El muestreo de aire para metales pesados a menudo se realiza utilizando colectores de partículas, seguido por análisis químicos en laboratorio (Harrison, 2008).

Análisis

- Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA): La EAA es un método común para analizar la concentración de metales pesados en muestras líquidas, como agua y soluciones de suelo (Frías et al., 2018).
- Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS): La ICP-MS es altamente sensible y se utiliza para analizar metales pesados en diversas matrices, incluyendo agua, suelo y biota (Matusiewicz, 2019).
- Especiación química: El análisis de especiación química permite distinguir las formas químicas específicas de los metales pesados, lo cual es crucial para comprender su movilidad y toxicidad (Borgese et al., 2016).

2.8 Interpolación geoestadística como herramienta para estimar concentraciones

La interpolación geoestadística, respaldada por metodologías avanzadas como el semivariograma y el kriging, se ha consolidado como una herramienta esencial para la estimación precisa de concentraciones de metales pesados en áreas no muestreadas. Webster y Oliver (2007) definen la variabilidad espacial como crucial en este contexto, y el semivariograma, según Goovaerts (1997), emerge como una función que modela la dependencia espacial entre puntos de muestreo. El kriging, método basado en esta estructura de dependencia espacial (Cressie, 1993), permite estimar valores desconocidos de manera óptima.

En aplicaciones específicas a la contaminación por metales pesados, estudios como el de Cambardella et al. (1994) han demostrado la eficacia de la interpolación geoestadística en la evaluación detallada de la contaminación del suelo. Además, su utilidad en la estimación de riesgos para la salud ha sido destacada por Guo et al. (2018), quienes enfatizan la importancia de

mapear concentraciones para diseñar estrategias de mitigación en áreas contaminadas.

Asimismo, De Grujter et al. (2006) subrayan su papel crucial en el monitoreo continuo y detallado de concentraciones, facilitando la toma de decisiones informadas para la gestión ambiental.

En conjunto, la interpolación geoestadística se presenta como una herramienta integral, permitiendo una evaluación espacialmente explícita y precisa de la contaminación por metales pesados, fundamentando la toma de decisiones en la gestión ambiental

2.9 Conceptos básicos de la geoestadística

Para llevar a cabo la Geoestadística, se requiere un conjunto de datos que sean tanto fijos como continuos. Estos datos pueden incluir mediciones como valores de precipitación pluvial, niveles de contaminación atmosférica, contenido de oro en una mina, entre otros; se puede seleccionar puntos del espacio a criterio del investigador o puede seleccionar los sitios bajo algún esquema de muestreo probabilístico (Henaó, 2000).

La Geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Huijbregts, 1978) cuyo interés es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos. Según (Petitgas, 1996) define como una aplicación de la teoría de probabilidades a la estimación estadística de variables espaciales.

La Geoestadística se aplica en dos etapas:

- Análisis Estructural: Seleccionar el modelo apropiado para interpretar los datos disponibles.

- Utilización del modelo para realizar estimaciones: Durante esta fase, el investigador describe la variable observada utilizando las propiedades de los datos recopilados. (Petitgas, 1996).

En los diferentes softwares existen diferentes métodos de análisis geoestadísticos:

Kriging:

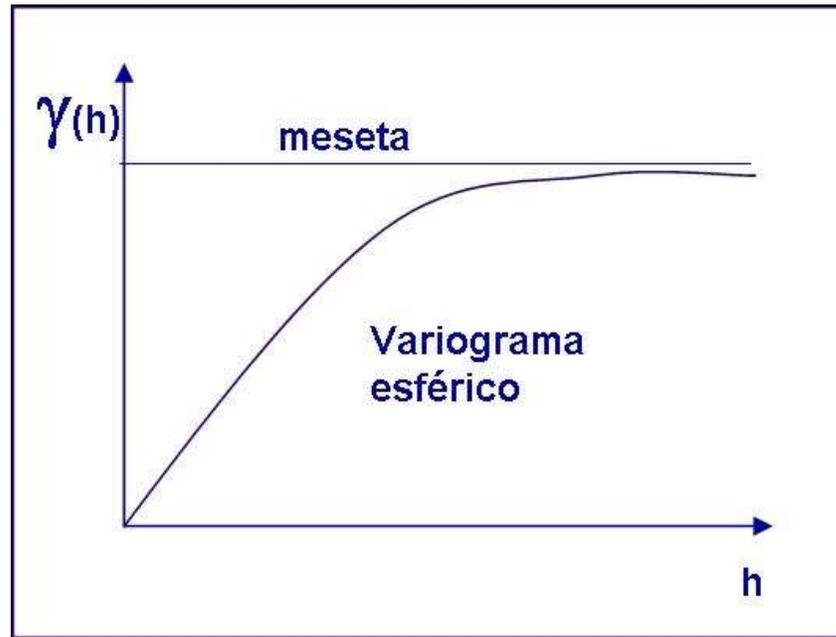
- Kriging Ordinario (Ordinary Kriging)
- Kriging Universal (Universal Kriging)
- Kriging Simple (Simple Kriging)
- Kriging Espacial (Spatial Kriging)
- Kriging de Bloques (Block Kriging)
- Inverse Distance Weighting (IDW)
- Spline Cúbico
- Tendencia Local
- Spline Regularizado (Regularized Spline)
- Natural Neighbor

2.10 Modelos geoestadísticos utilizados en la interpolación

En la interpolación geoestadística, se emplean diversos modelos para describir la variabilidad espacial y estimar valores en ubicaciones no muestreadas. A continuación, se presentan algunos modelos geoestadísticos comúnmente utilizados:

- Modelo esférico: Este modelo es mencionado por Cressie (1993), quien señala que asume que la correlación espacial se incrementa hasta alcanzar un límite máximo y luego se estabiliza.

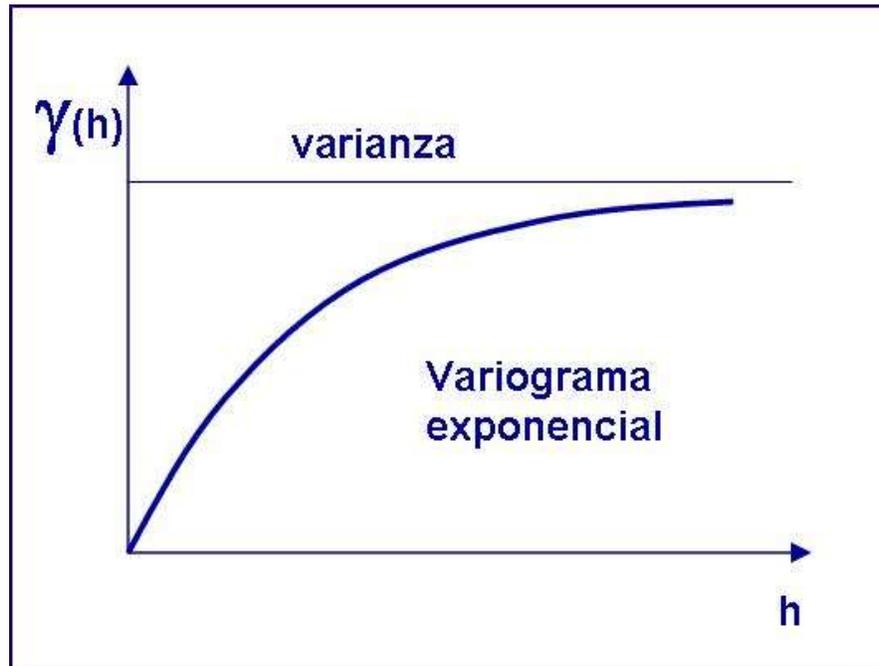
Figura. 6. Modelo de variograma esférico.



Fuente: Geoestadística aplicado a la estimación de recursos (Geocursos, 2022)

- Modelo exponencial: Goovaerts (1997) menciona el modelo exponencial, destacando que la correlación disminuye exponencialmente con la distancia, siendo útil cuando se espera una rápida disminución de la variabilidad.

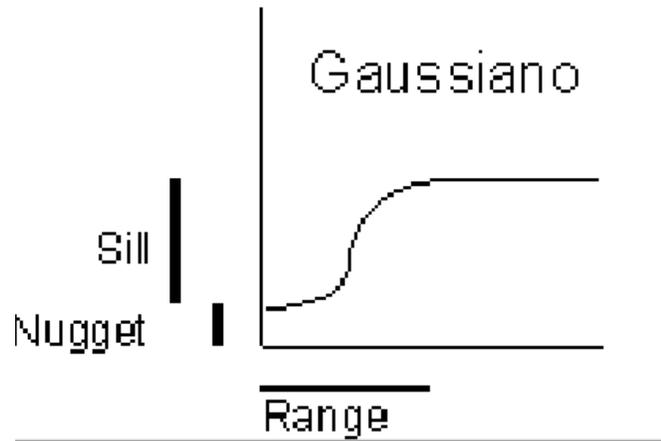
Figura. 7. Modelo de variograma exponencial.



Fuente: Geoestadística aplicado a la estimación de recursos (Geocursos, 2022)

- Modelo Gaussiano: Chiles y Delfiner (2012) hacen referencia al modelo gaussiano, indicando que considera que la correlación espacial sigue una distribución gaussiana, siendo aplicable en situaciones donde la continuidad espacial es importante.

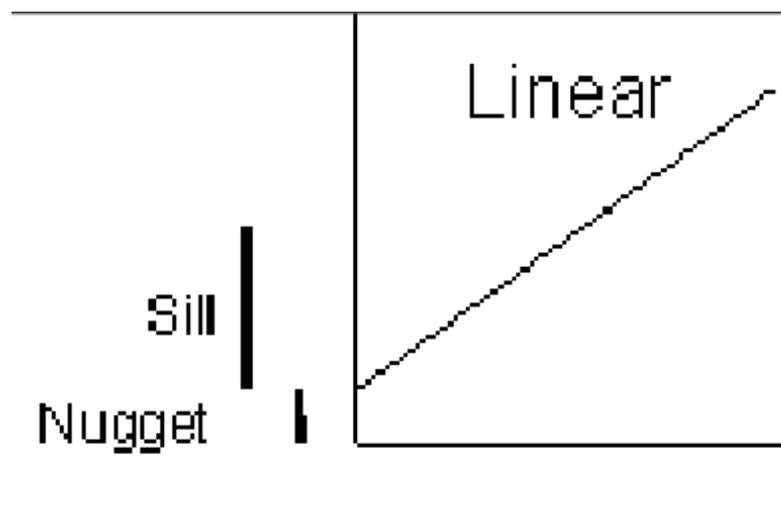
Figura. 8. Modelo de variograma Gaussiano.



Fuente: Modelos matemáticos aplicados a variogramas. (Geocursos, 2022)

- Modelo lineal: Christakos (2000) introduce el modelo de cópula, que incorpora la teoría de cópulas para describir las dependencias entre variables en el espacio, siendo útil para modelar dependencias espaciales no lineales.

Figura. 9. Modelo de variograma lineal.



Fuente: Modelos matemáticos aplicados a variogramas. (Geocursos, 2022)

2.11 Variables y parámetros relevantes en el análisis de concentraciones

En el análisis de concentraciones de metales pesados mediante métodos geoestadísticos, se consideran diversas variables y parámetros que son fundamentales para obtener resultados precisos y significativos. A continuación, se presentan algunas de las variables y parámetros relevantes:

Variables relevantes

- Variable dependiente (Concentración de metales pesados): La concentración de metales pesados en la muestra es la variable de interés y el foco principal del análisis (Chiles & Delfiner, 2012).
- Coordenadas espaciales: Las coordenadas geográficas o espaciales son esenciales para la geoestadística y la interpolación espacial.

Parámetros relevantes

- Semivariograma: El semivariograma es crucial para modelar la estructura de dependencia espacial de los datos.
- Rango del semivariograma: Indica la distancia a la cual la variabilidad espacial se estabiliza. Es un parámetro clave en modelos geoestadísticos como el esférico o exponencial.
- Efecto nugget: Representa la variabilidad a escalas más pequeñas que la distancia de muestreo y es importante para entender si existe variabilidad no estructurada (Chiles & Delfiner, 2012).
- Anisotropía: En presencia de variabilidad direccional, la anisotropía ajusta la forma y orientación del modelo a la realidad espacial (Goovaerts, 1997).

- Parámetros del modelo de interpolación: Incluyen los pesos asignados a las muestras circundantes en la predicción, los cuales dependen de la estructura del semivariograma (Cressie, 1993).
- Intervalo de confianza: Proporciona información sobre la incertidumbre asociada con las predicciones, siendo fundamental para la interpretación de los resultados (Webster & Oliver, 2007).

2.12 Métodos de validación de concentraciones

La validación de concentraciones de metales pesados es crucial para evaluar la precisión y confiabilidad de los modelos geoestadísticos utilizados en el análisis espacial.

Los métodos de validación más comunes son los siguientes:

- Validación cruzada: Este método implica la división del conjunto de datos en subconjuntos de entrenamiento y prueba. Posteriormente, se ajusta el modelo utilizando los datos de entrenamiento y se evalúa su desempeño utilizando el conjunto de prueba. Esta técnica proporciona una estimación confiable del rendimiento del modelo al evitar el sobreajuste a los datos de entrenamiento. (Cressie, 1993).
- Validación Bootstrap: La validación bootstrap consiste en realizar múltiples muestreos con reemplazo a partir de los datos disponibles para generar múltiples conjuntos de datos de prueba y entrenamiento. Este método proporciona intervalos de confianza y medidas de precisión del modelo (Webster & Oliver, 2007).

- Índices de precisión espacial: Se pueden utilizar índices específicos para evaluar la precisión espacial de los modelos, como el índice de similitud espacial o el índice de correlación espacial (Goovaerts, 1997).

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Diseño de muestreo y recolección de muestras de metales pesados

El presente proyecto, se basa en las muestras de análisis de metales pesados obtenidas en el año 2017, como parte del estudio titulado "Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé", realizado por Fernando Valencia.

Las muestras analizadas fueron recopiladas con el previo consentimiento de los propietarios de terrenos destinados a uso agrícola. La toma de muestras se llevó a cabo a una profundidad de treinta centímetros bajo la superficie del suelo (Figura. 11), lo que requirió realizar excavaciones correspondientes para garantizar la representatividad de los resultados.

Cada muestra, con un peso aproximado de tres kilogramos, fue cuidadosamente enfundada y etiquetada con un código secuencial de toma. Además, se registraron los datos de ubicación espacial utilizando el sistema de posicionamiento global (GPS) en el estándar WGS 84.

El proceso de obtención de las 106 muestras de suelo abarcó un periodo de 10 días (Figura. 12), durante los cuales se siguieron los protocolos establecidos para garantizar la integridad de las muestras y la precisión de los datos recopilados. Es relevante señalar que dos de las muestras fueron tomadas directamente sobre el material en el sitio de la relavera. Sin embargo, estas dos muestras fueron excluidas del análisis estadístico posterior, dado que no cumplían con los criterios establecidos para formar parte del estrato definido en el estudio.

Figura. 10. Zona de estudio.



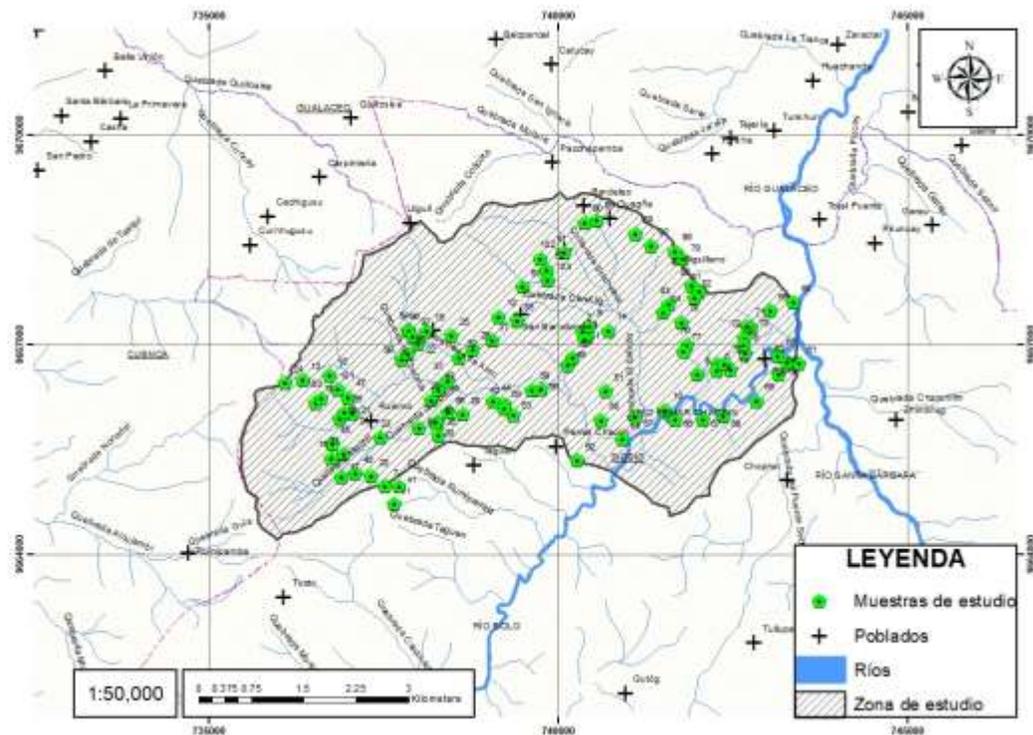
Fuente: Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé. (Valencia, 2017)

Figura. 11. Toma de muestras.



Fuente: Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé. (Valencia, 2017)

Figura. 12. Mapa de ubicación de muestras.



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Análisis de las muestras recolectadas

Valencia (2017) menciona que:

Las muestras, antes de someterse al análisis de laboratorio, fueron sometidas a una preparación que involucró los siguientes pasos:

- Se llevó a cabo el secado de las muestras de suelo utilizando un horno eléctrico.
- A continuación, se empleó un molino de suelos para realizar la reducción de tamaño del material recolectado.
- Posteriormente, se procedió al cuarteo de las muestras.

En el laboratorio, se realizaron ensayos con el objetivo de determinar la presencia de metales pesados (Pb, Zn, Cd). Las muestras de suelo fueron analizadas en el polarógrafo para

determinar los niveles de Cd, mientras que las concentraciones de Pb y Zn fueron identificadas mediante absorción atómica. Los resultados detallados se encuentran presentados en el Anexo 1.

3.3 Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos sienta las bases para comprender la distribución, variabilidad y patrones espaciales de los metales pesados (Pb, Cd, Zn), permitiendo así una selección adecuada de las técnicas de interpolación.

La base de datos se sometió a un proceso de limpieza y organización. Para el análisis exploratorio, se emplearon técnicas estadísticas descriptivas y gráficas, con el objetivo de revelar patrones y tendencias en los datos.

3.3.1 Distribución de Concentraciones

Se observó la distribución de concentraciones de metales pesados en la parroquia San Bartolomé. Las estadísticas descriptivas proporcionaron información sobre la media, mediana, desviación estándar y otros parámetros clave, trazando la variabilidad presente en los datos.

Se presenta un análisis de las concentraciones de plomo (Pb) en la región de estudio. La información estadística para las concentraciones de plomo se resume a continuación (Tabla 1):

Tabla 1. Estadística descriptiva del Pb.

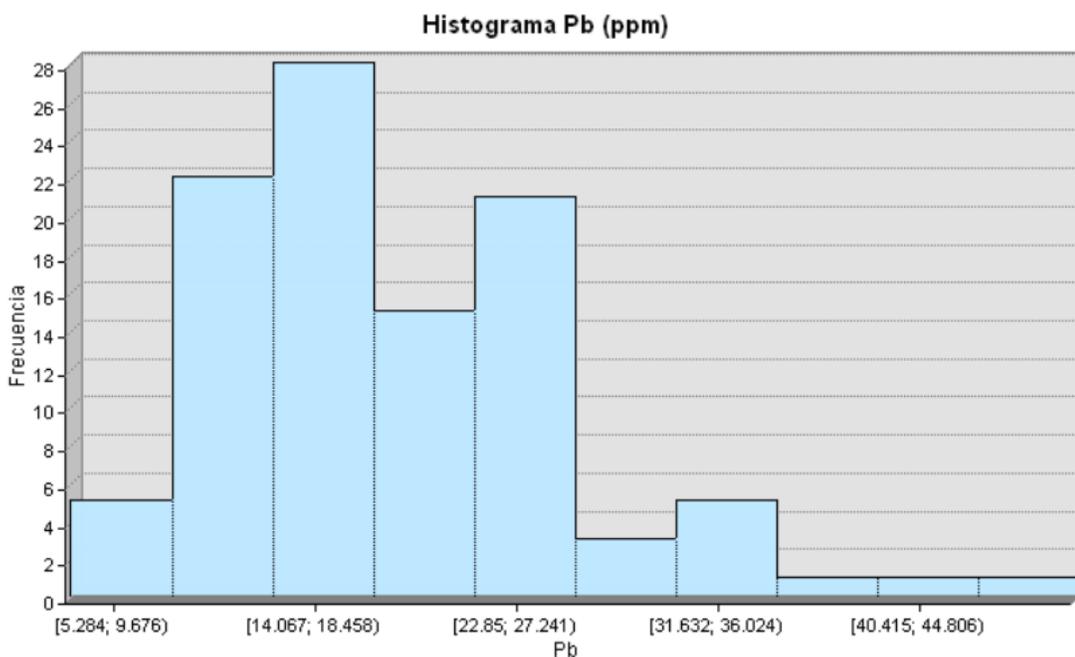
Pb (ppm)			
Muestras:	102	Oblicuidad:	1.0201
Min:	5.2844	Curtosis:	4.7614
Max:	49.198	1-st Cuartil:	13.695
Media:	19.291	Media:	17.894
Std. Dev:	7.6732	3-rd Cuartil:	23.971

Fuente: Elaboración propia.

La media (Media: 19.291 ppm) y la mediana (Media: 17.894 ppm) sugieren que la distribución puede estar ligeramente sesgada hacia la derecha debido a la influencia de valores

más altos. El rango intercuartílico (IQR) entre el primer y tercer cuartil (13.695 y 23.971, respectivamente) resalta la variabilidad en las concentraciones de plomo en la región (Figura. 13).

Figura. 13. Histograma del Pb (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

Se presenta un análisis de las concentraciones de cadmio (Cd) en la región de estudio. La información estadística para las concentraciones de cadmio se resume a continuación (Tabla 2):

Tabla 2. Estadística descriptiva del Cd.

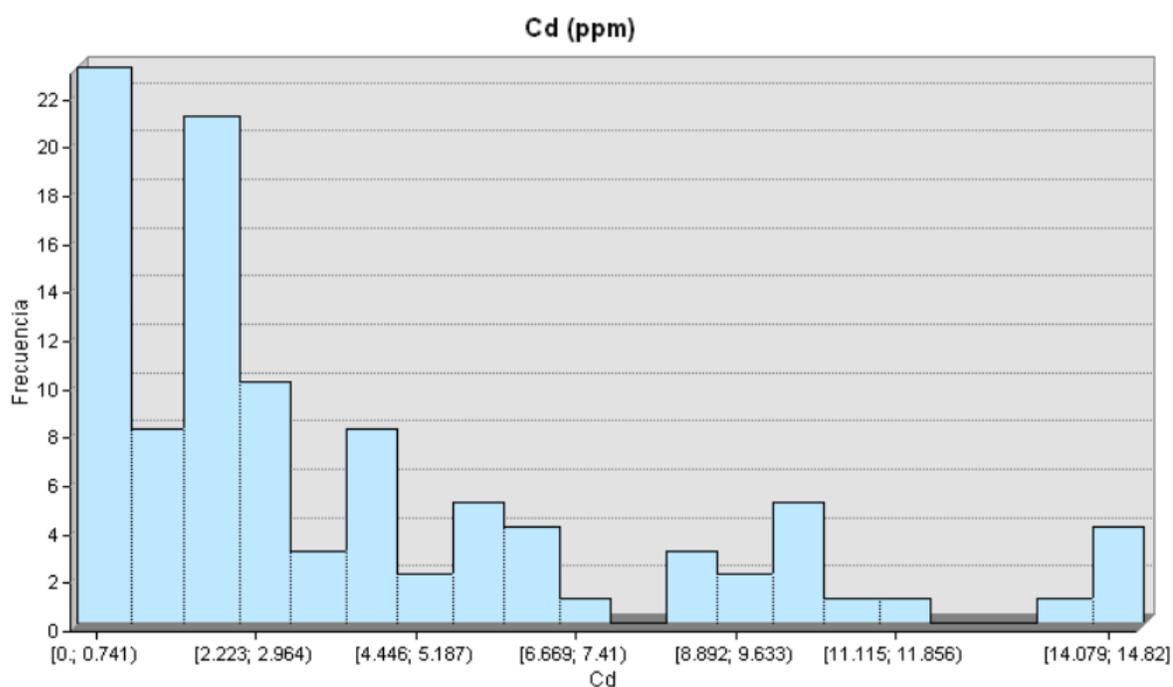
Cd (ppm)			
Muestras:	102	Oblicuidad:	5.4474
Min:	0	Curtosis:	35.581
Max:	14.820	1-st Cuartil:	1.4195
Media:	4.828	Media:	2.0594
Std. Dev:	10.151	3-rd Cuartil:	5.4802

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre la media (Media: 4.828 ppm) y la mediana (Media: 2.0594 ppm) indica la influencia de valores extremadamente altos, confirmando una asimetría positiva.

El rango de concentraciones de Cadmio (0 a 14.820) revela una amplia variabilidad en los datos. La dispersión, evidenciada por la diferencia entre el primer y tercer cuartil (1.4195 y 5.4802, respectivamente), destaca la heterogeneidad de las concentraciones en la región (Figura. 14).

Figura. 14. Histograma del Cd (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

Se presenta un análisis de las concentraciones de zinc (Zn) en la región de estudio. La información de las concentraciones de zinc se resume a continuación (Tabla 3):

Tabla 3. Estadística descriptiva del Zn.

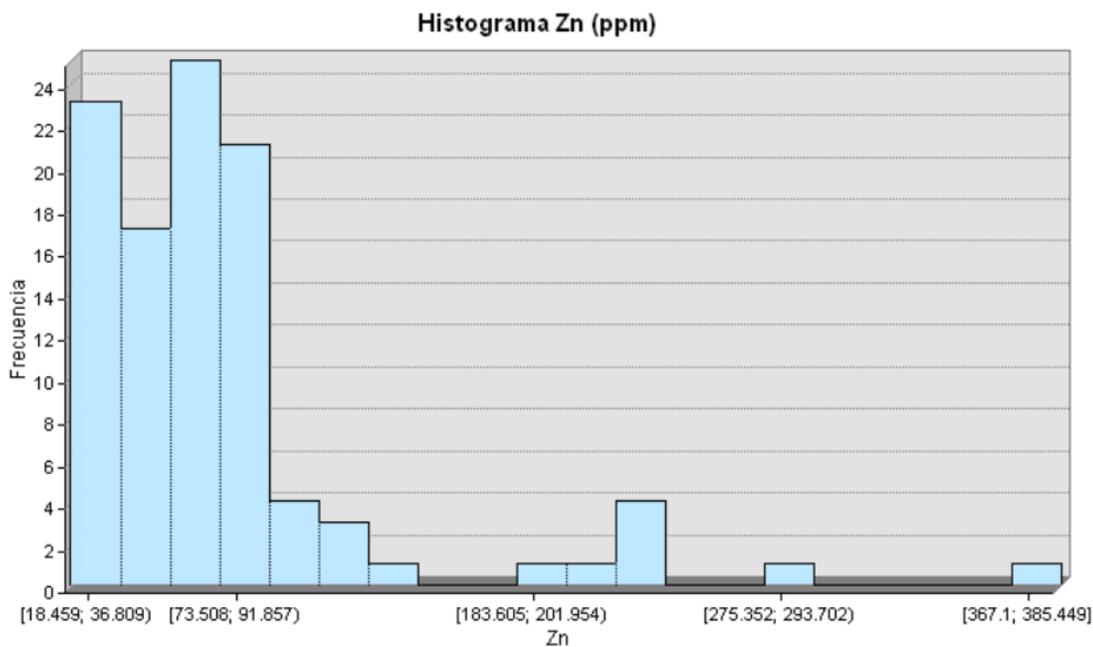
Zn (ppm)			
Muestras:	102	Oblicuidad:	2.7581
Min:	18.459	Curtosis:	12.237
Max:	385.45	1-st Cuartil:	40.82
Media:	75.004	Media:	65.513
Std. Dev:	57.728	3-rd Cuartil:	78.915

Fuente: Elaboración propia.

La media (Media: 75.004 ppm) es mayor que la mediana (Media: 65.513 ppm), indicando la influencia de valores más altos y reforzando la asimetría positiva. Esto indica la presencia de concentraciones considerablemente altas de Zinc en ciertas ubicaciones.

El rango (18.459 a 385.45) revela una amplia variabilidad en las concentraciones de Zinc en la región. La dispersión, evidenciada por la diferencia entre el primer y tercer cuartil (40.82 y 78.915), indica la heterogeneidad en los datos. (Figura.15)

Figura. 15. Histograma del Zn.



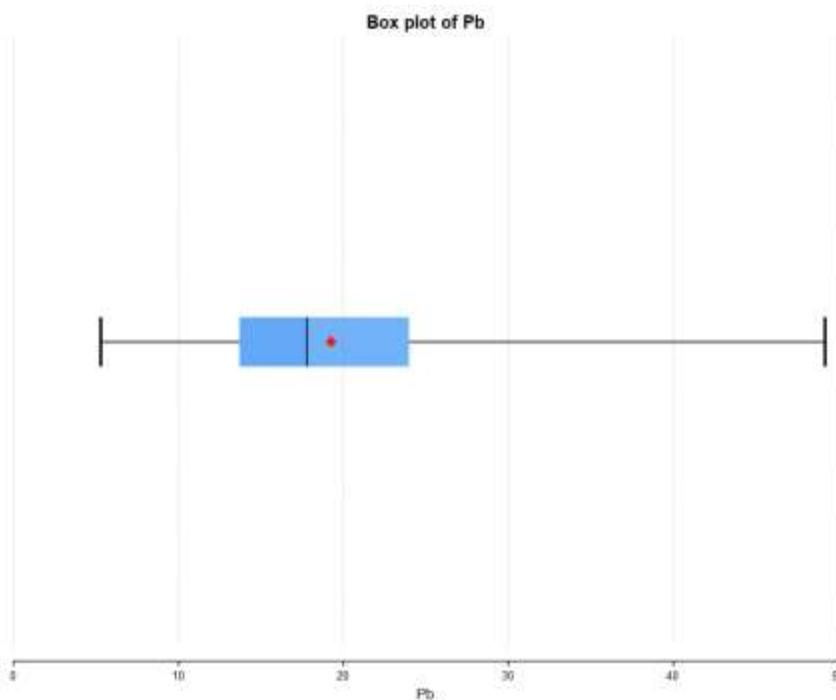
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Boxplots Espaciales

Se generaron boxplots espaciales para visualizar la distribución espacial de las concentraciones de metales pesados. Esta representación gráfica preliminar brinda una visión intuitiva de los patrones espaciales y posibles áreas de interés.

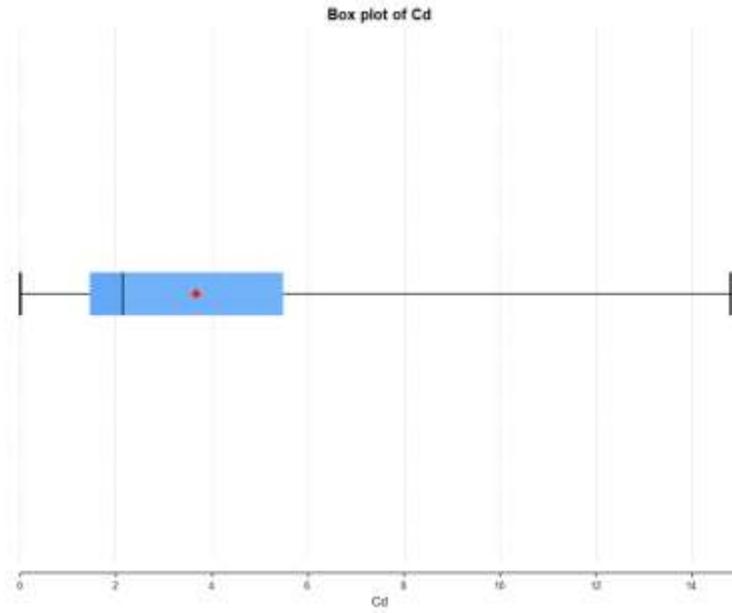
La "caja" del boxplot representa el rango intercuartílico (IQR) que va desde el primer cuartil (Q1) al tercer cuartil (Q3). La mediana se encuentra dentro de la caja para todos los elementos de estudio y se destaca el valor central de las concentraciones de Pb, Cd y Zn (Figura. 16, 17 y 18).

Figura. 16. Box plot del Pb.



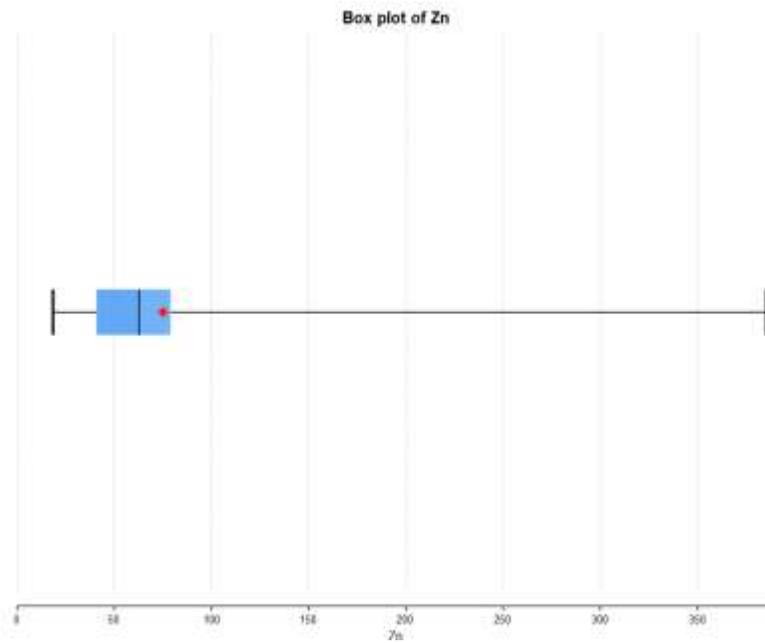
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 17. Box plot del Cd.



Fuente: Elaboración propia.

Figura. 18. Box plot del Zn.



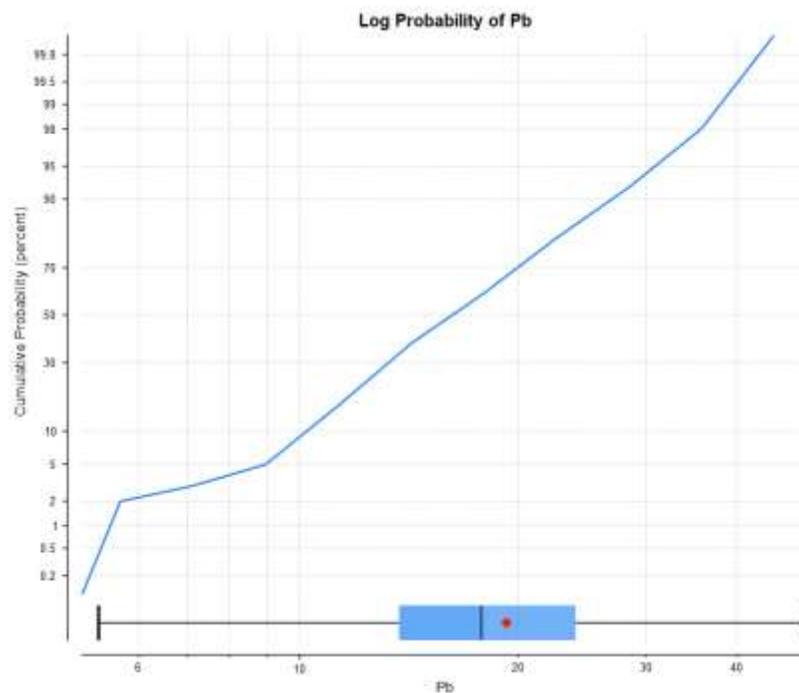
Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Log probability

El log probability se utiliza para cuantificar la incertidumbre asociada con las concentraciones de metales pesados. Al trabajar en la escala logarítmica, se simplifica el cálculo de intervalos de confianza y la propagación de incertidumbre a través del modelo, ofreciendo una visión más completa de la variabilidad espacial de los metales pesados.

El log probability para las concentraciones de Pb, presenta un valor mínimo de 5.28 y un máximo de 49.20. (Figura. 19)

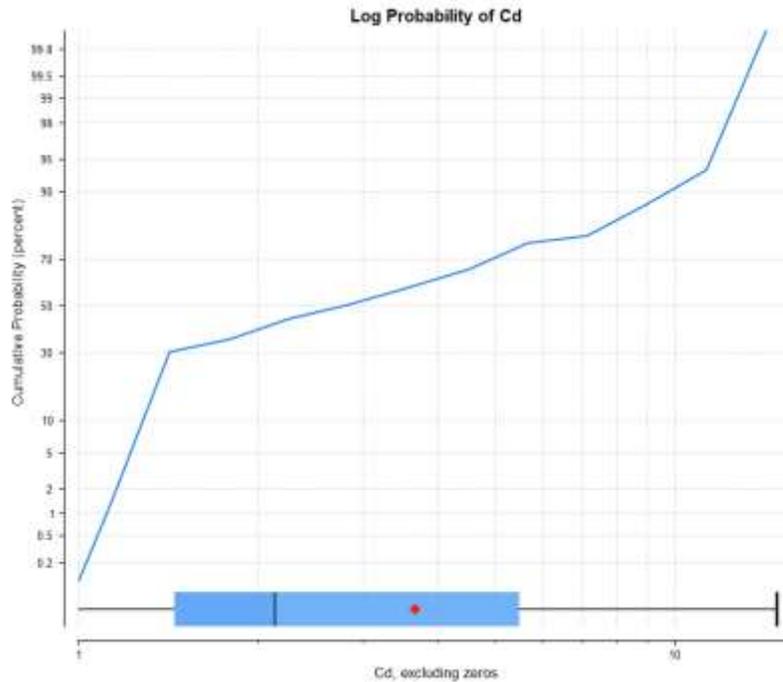
Figura. 19. Log probability del Pb.



Fuente: Elaboración propia.

El log probability para las concentraciones de Cd, presenta un valor mínimo de 0 y un máximo de 14.82. (Figura. 20)

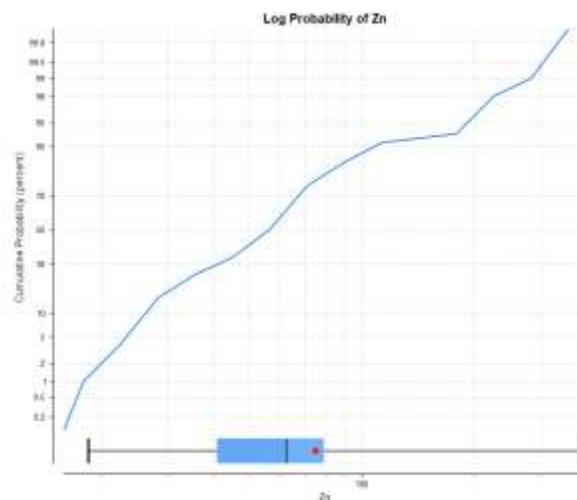
Figura. 20. Log probability del Cd.



Fuente: Elaboración propia.

El log probability para las concentraciones de Zn, presenta un valor mínimo de 18.459 ppm y un máximo de 385.45 ppm. (Figura. 21)

Figura. 21. Log probability del Zn



Fuente: Elaboración propia.

3.4 Interpolación geoestadística de las concentraciones de metales pesados

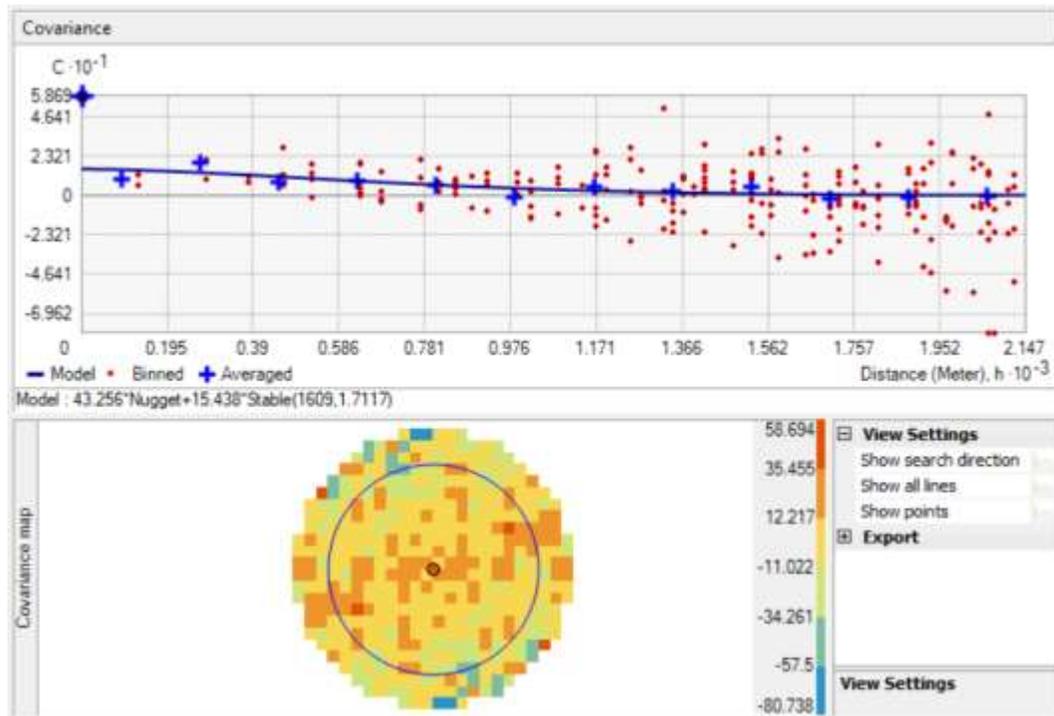
Se plantea la aplicación de varios métodos de interpolación para determinar cuál se ajusta mejor a las características espaciales y variabilidad de los datos en la Parroquia San Bartolomé. Los métodos seleccionados son el Kriging Simple, Kriging Ordinario, Inverso a la Distancia y Spline. Cada uno de estos métodos presenta características únicas que pueden proporcionar puntos valiosos sobre la distribución espacial de los metales pesados en la región.

3.4.1 Kriging simple

Kriging Simple modela la autocorrelación espacial, reconociendo que las observaciones cercanas geográficamente tienen una mayor influencia en la estimación que las más distantes. Esto permite capturar patrones espaciales más realistas en la distribución de las concentraciones de metales pesados. Al analizar el variograma experimental, que revela la variabilidad de los datos en función de la distancia, Kriging Simple ajusta su modelo para reflejar la dependencia espacial entre los puntos de muestreo.

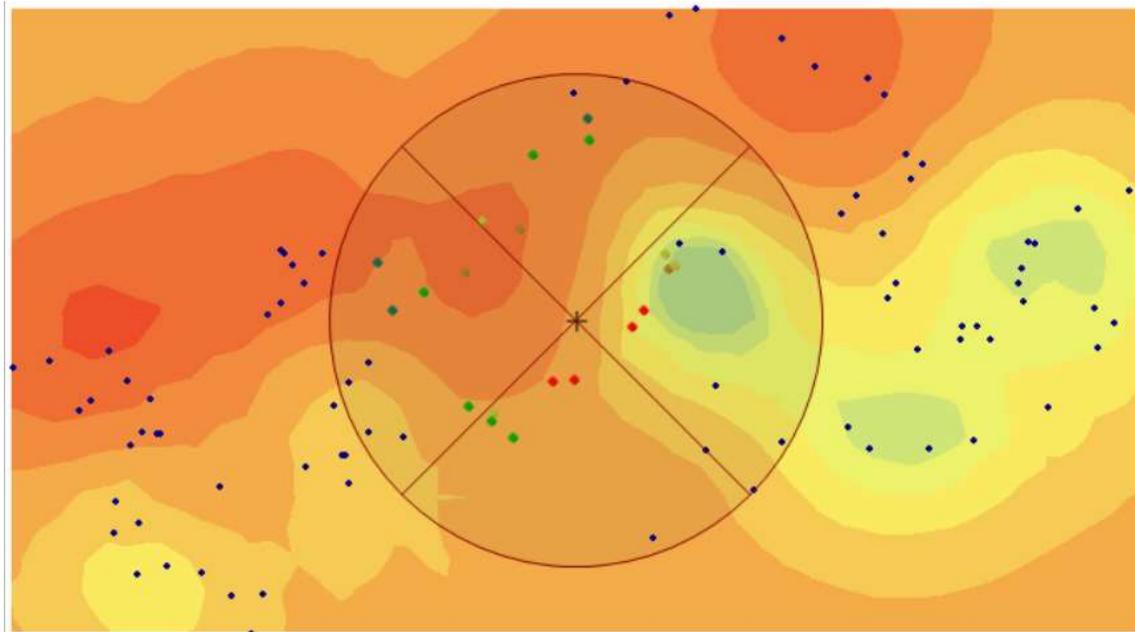
Kriging simple del Pb

Figura. 22. Mapa de covariancia Kriging Simple.



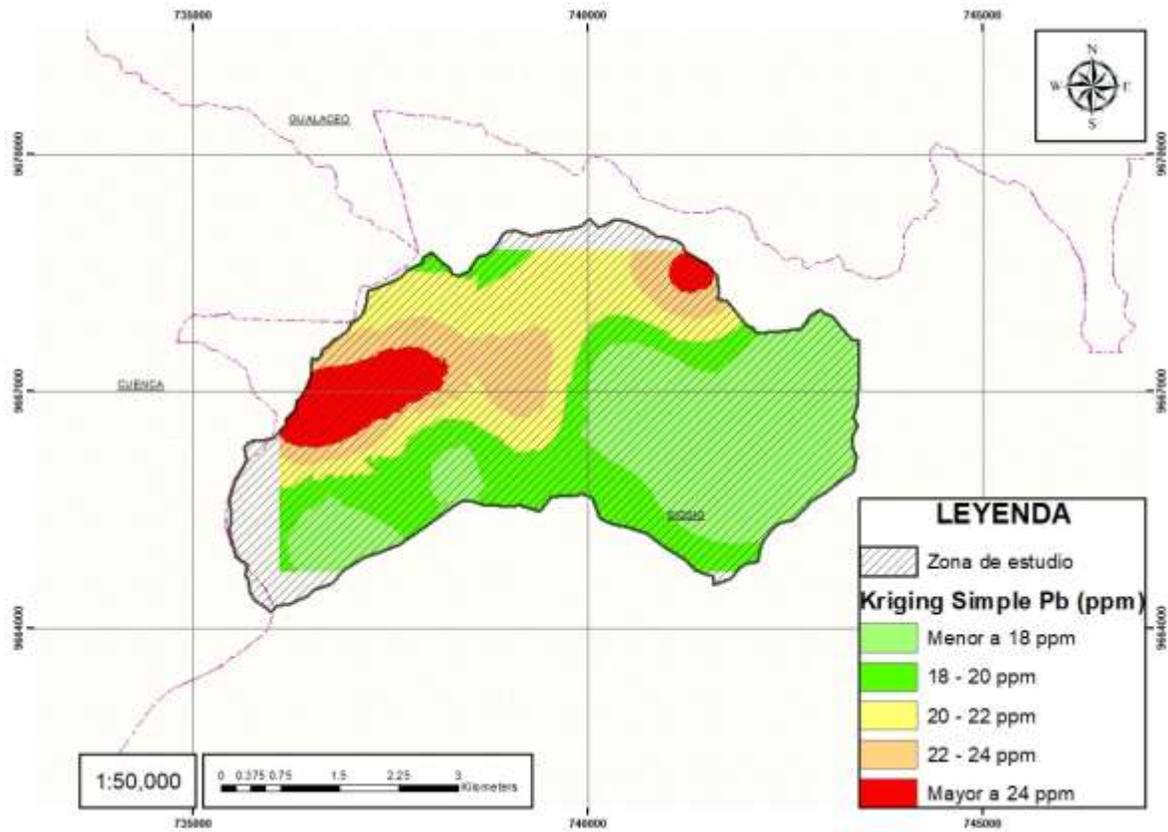
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 23. Elipsoide de búsqueda Kriging simple.



Fuente: Elaboración propia.

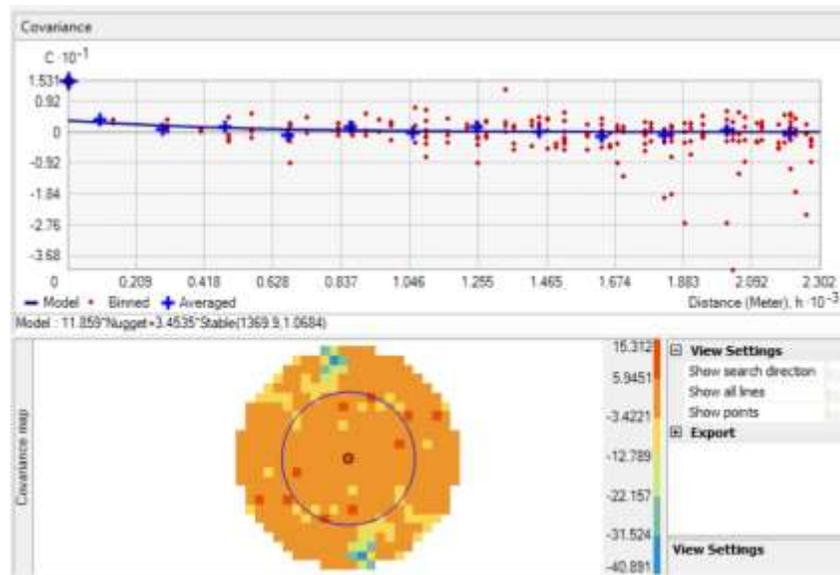
Figura. 24. Mapa de Kriging Simple para el Pb (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

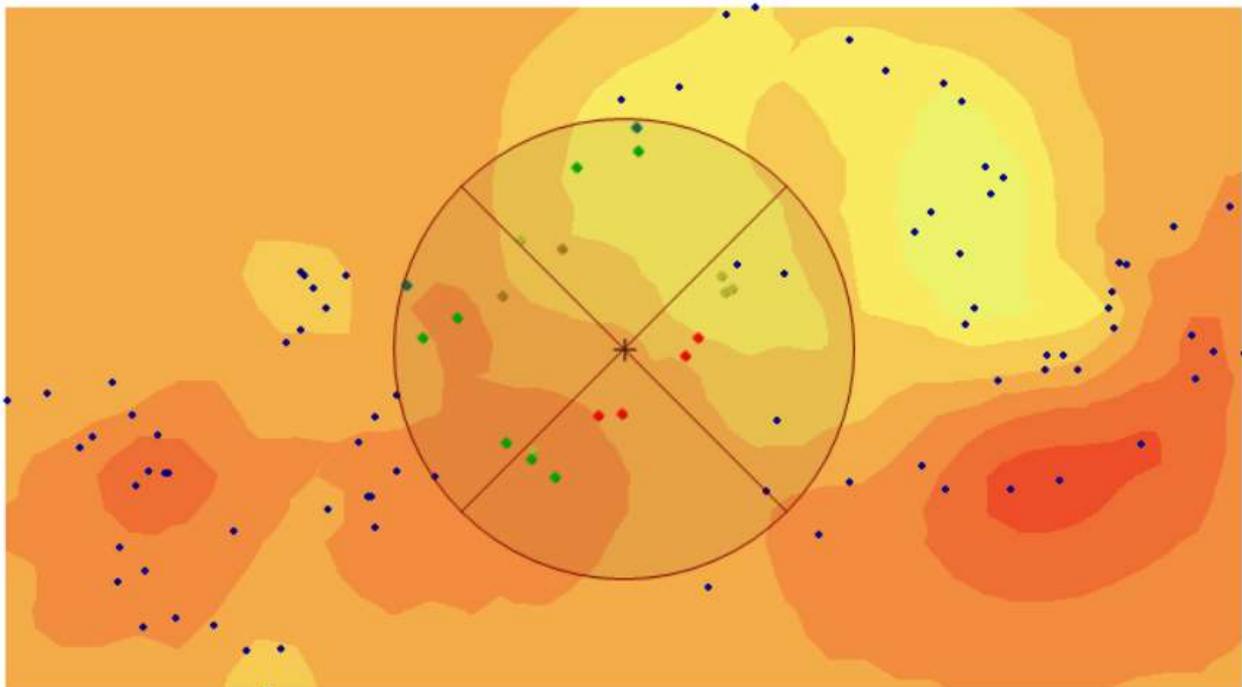
Kriging simple del Cd

Figura. 25. Mapa de covariancia del Kriging Simple Cd.



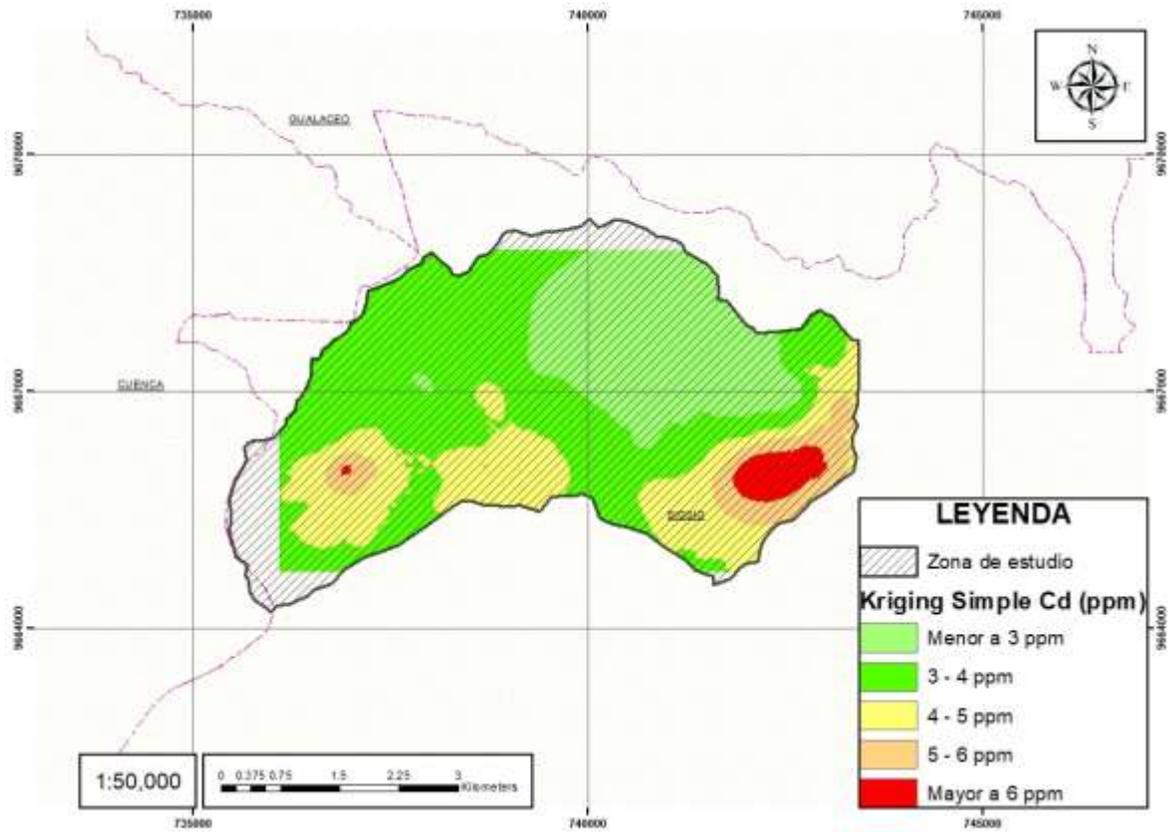
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 26. Elipsoide de búsqueda Kriging Simple Cd.



Fuente: Elaboración propia.

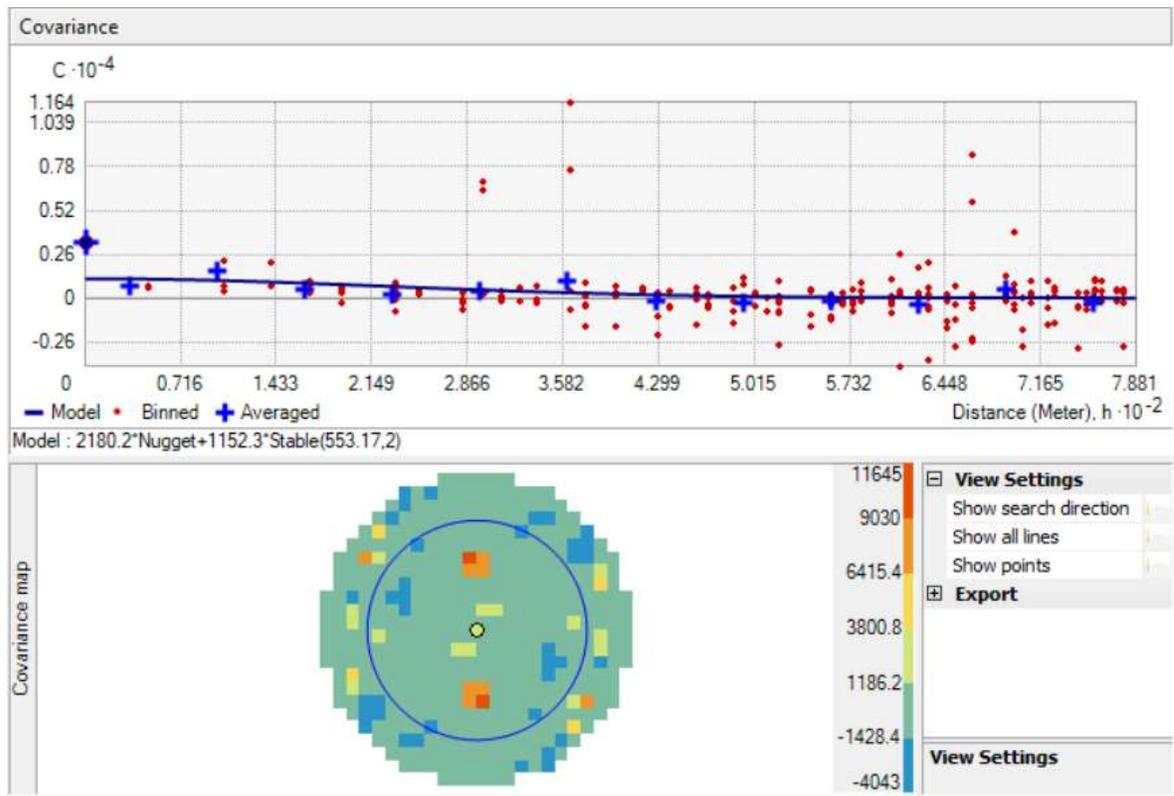
Figura. 27. Mapa de Kriging simple para el Cd (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

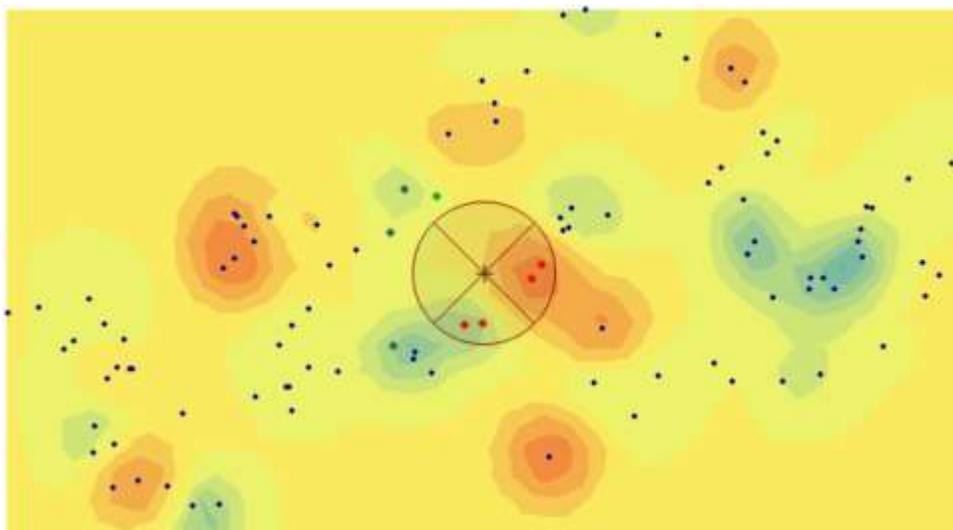
Kriging simple del Zn

Figura. 28. Mapa de covariancia Kriging Simple Zn.



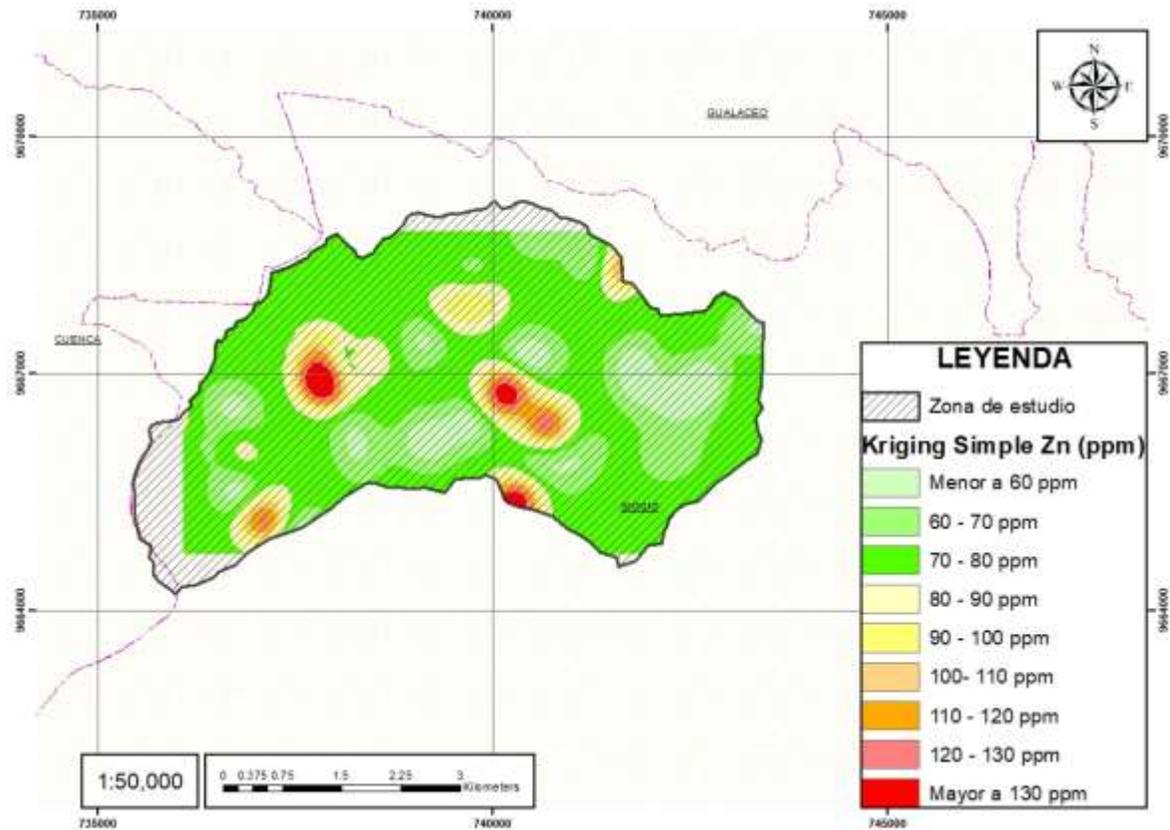
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 29. Elipsoide de búsqueda Kriging Simple Zn.



Fuente: Elaboración propia.

Figura. 30. Mapa de Kriging Simple para el Zn (ppm).



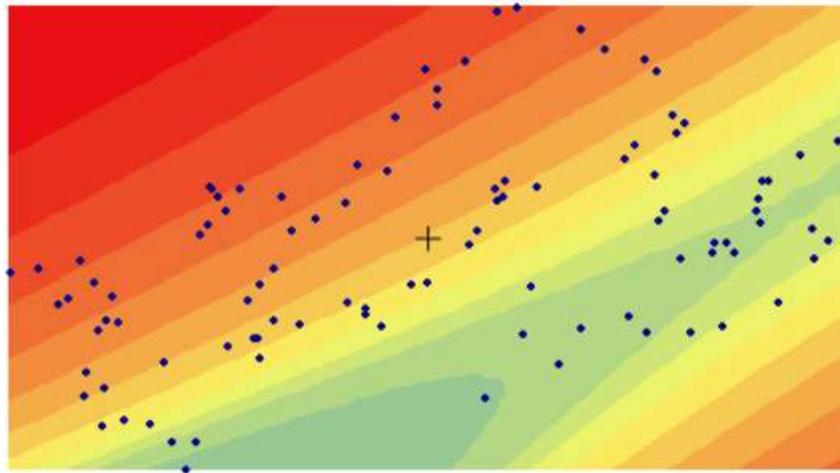
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Kriging Ordinario

Este método es particularmente útil cuando se espera que las concentraciones de metales pesados varíen de manera sistemática en función de la ubicación geográfica. El Kriging Ordinario busca capturar tanto la variabilidad local como la regional.

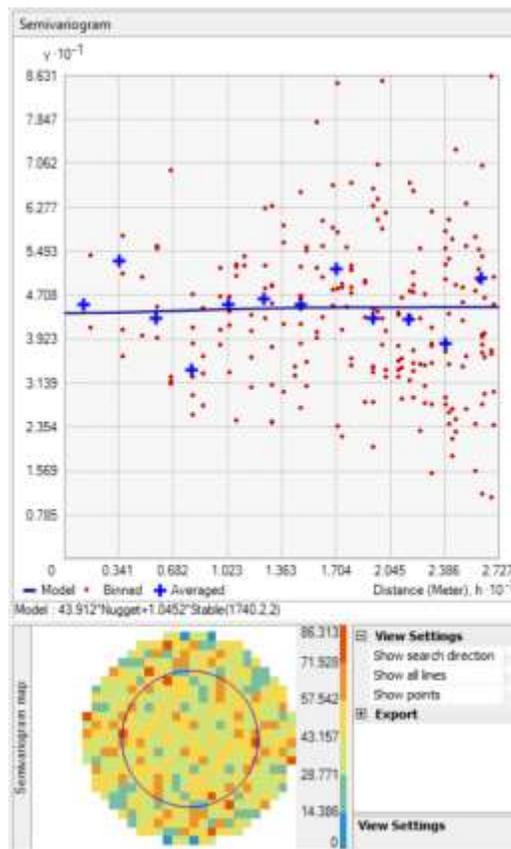
Kriging Ordinario del Pb

Figura. 31. Propiedades del método Kriging Ordinario para el Pb.



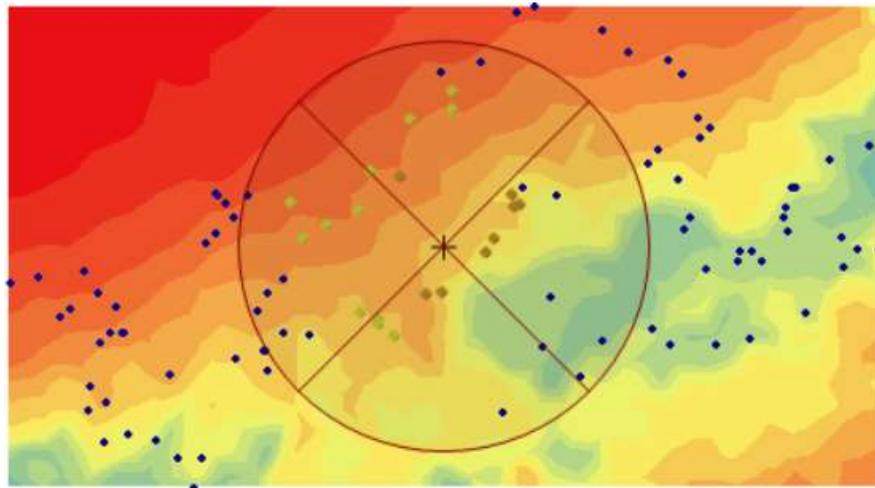
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 32. Mapa del semivariograma Kriging Ordinario del Pb.



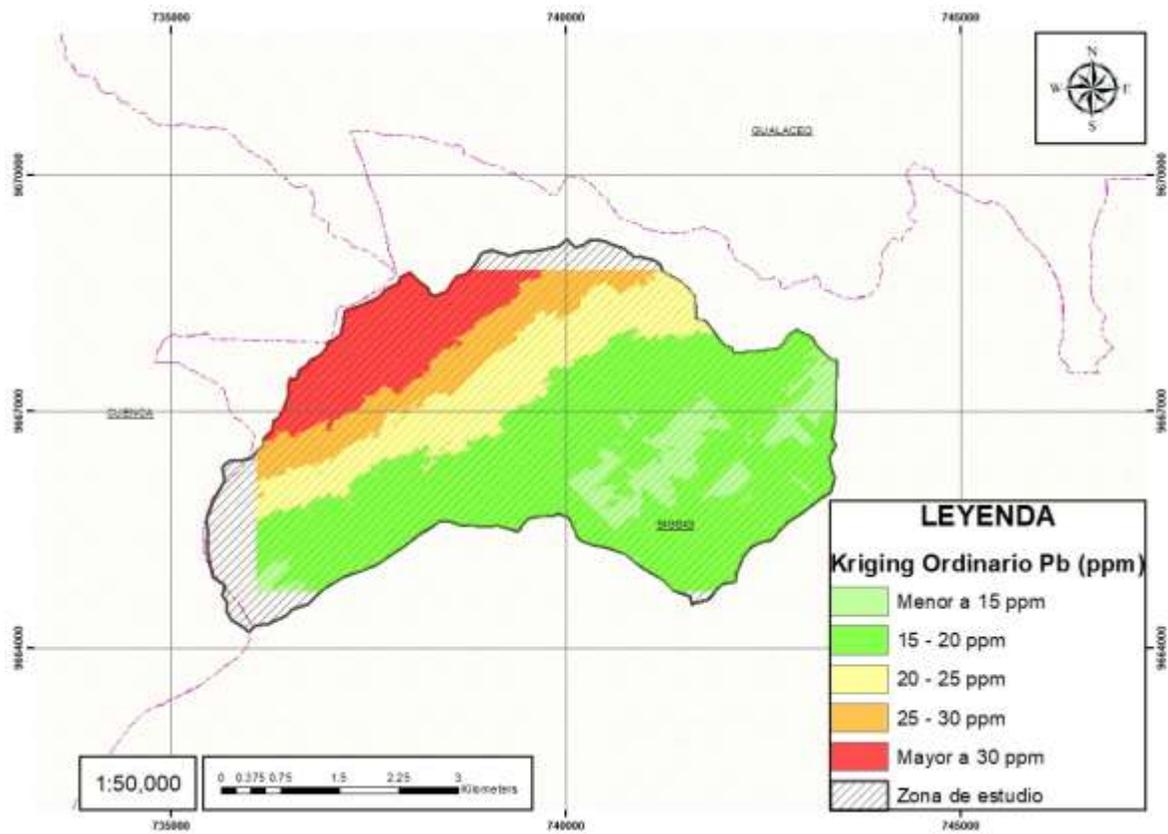
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 33. Elipsoide de búsqueda Kriging Ordinario Pb.



Fuente: Elaboración propia.

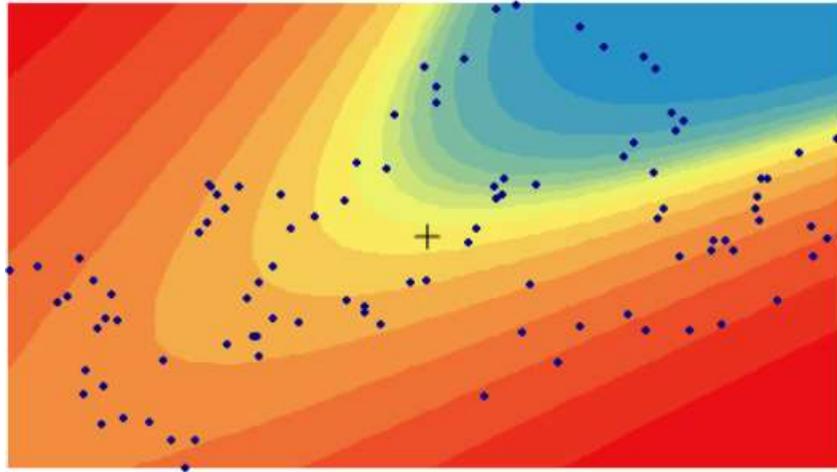
Figura. 34. Mapa del Kriging Ordinario Pb.



Fuente: Elaboración propia.

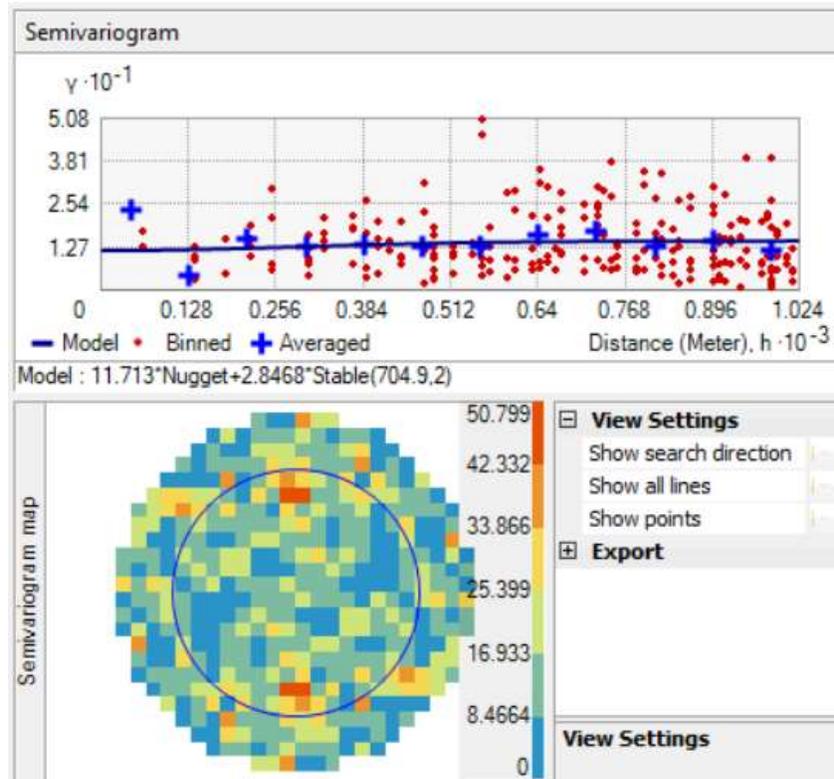
Kriging Ordinario del Cd

Figura. 35. Propiedades del método Kriging Ordinario para el Cd.



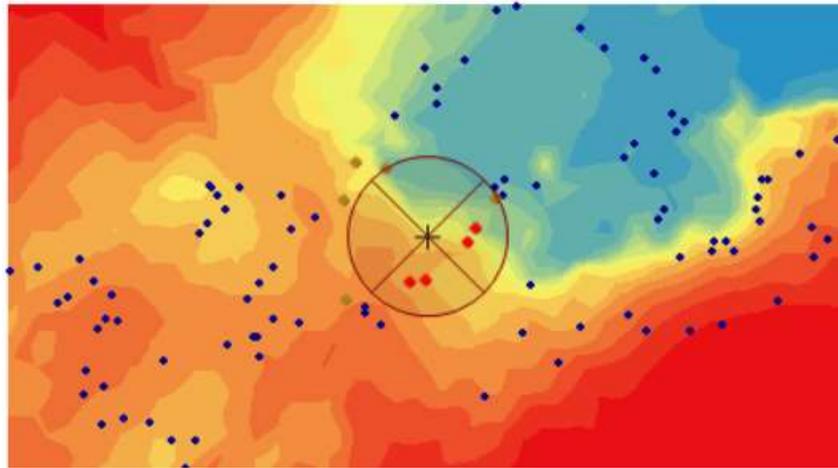
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 36. Mapa del semivariograma Kriging Ordinario Cd.



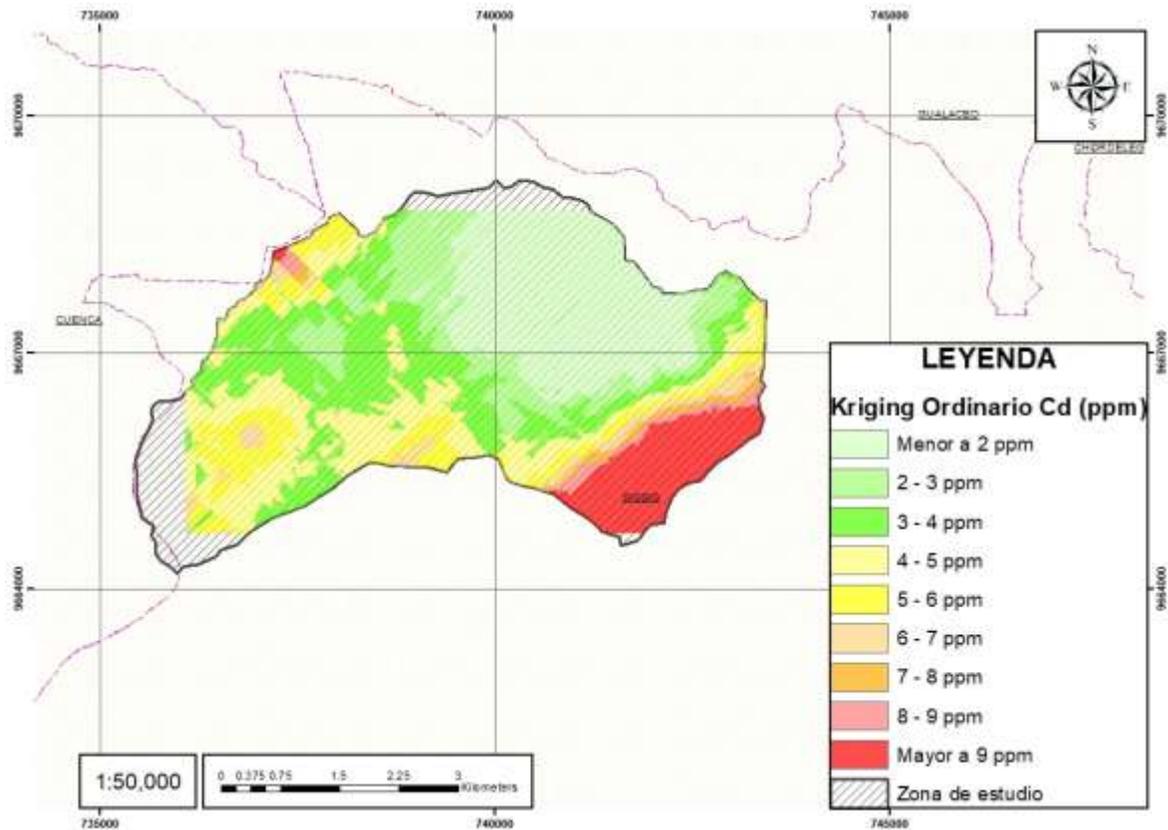
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 37. Elipsoide de búsqueda Kriging Ordinario Cd.



Fuente: Elaboración propia.

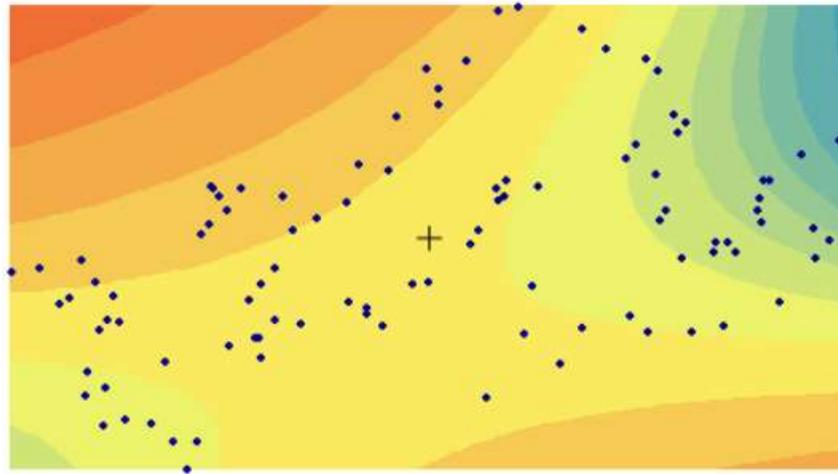
Figura. 38. Mapa del Kriging Ordinario para el Cd (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

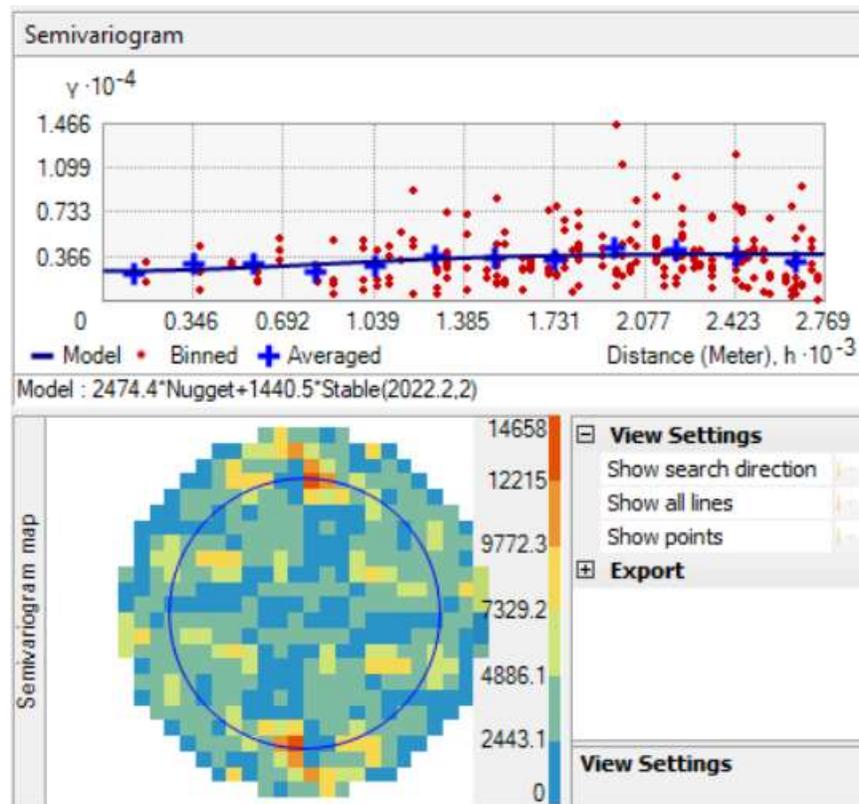
Kriging Ordinario del Zn

Figura. 39. Propiedades del método Kriging Ordinario para el Zn.



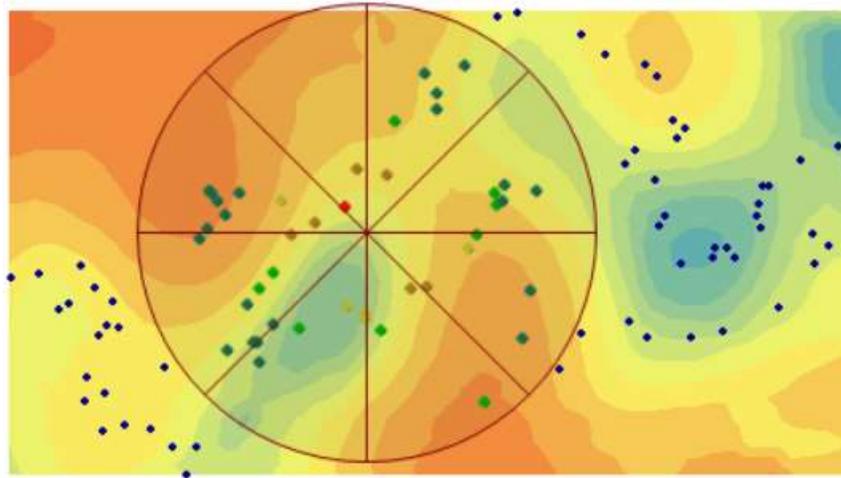
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 40. Semivariograma Kriging Ordinario para el Zn.



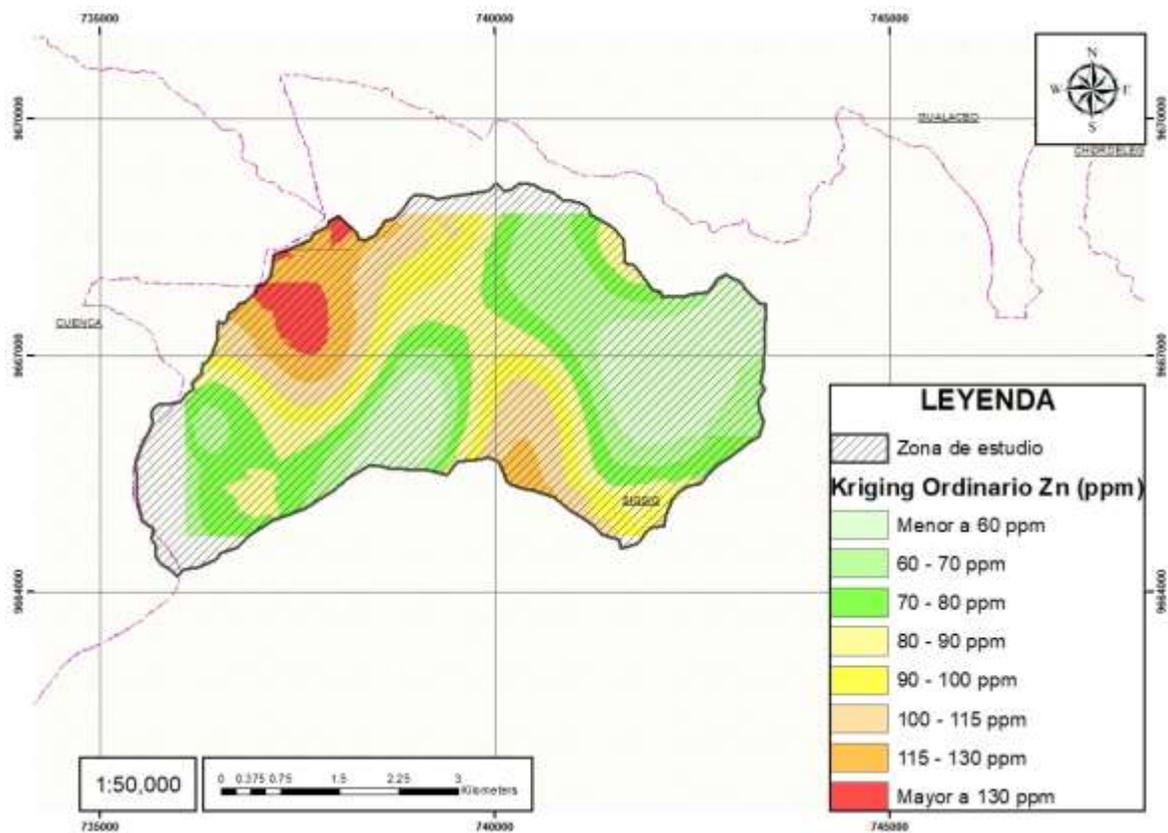
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 41. Elipsoide de búsqueda Kriging Ordinario para el Zn.



Fuente: Elaboración propia.

Figura. 42. Mapa del Kriging Ordinario para el Zn (ppm)



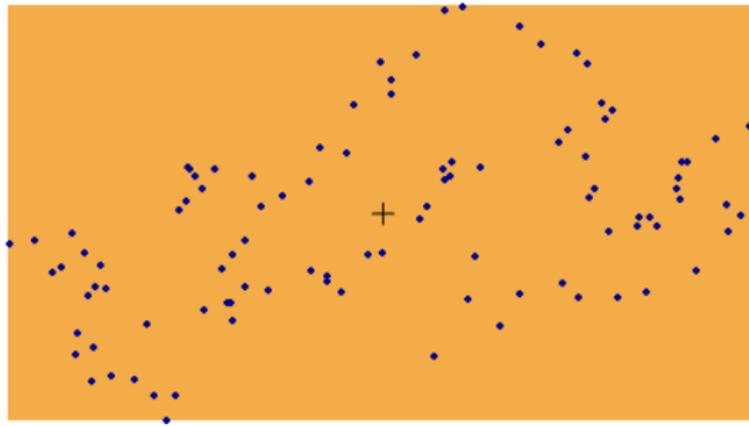
Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Kriging Universal

El Kriging Universal es una variante avanzada de la técnica de Kriging que integra múltiples fuentes de información, como datos de muestreo, datos auxiliares y tendencias espaciales, para realizar interpolaciones más precisas. Esta metodología se adapta especialmente bien a situaciones en las que la variabilidad espacial puede ser explicada por diversas fuentes.

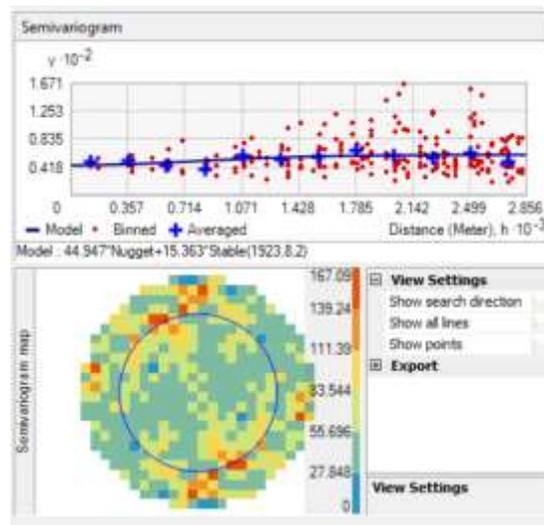
Kriging Universal del Pb

Figura. 43. Propiedades del método Kriging Universal para el Pb.



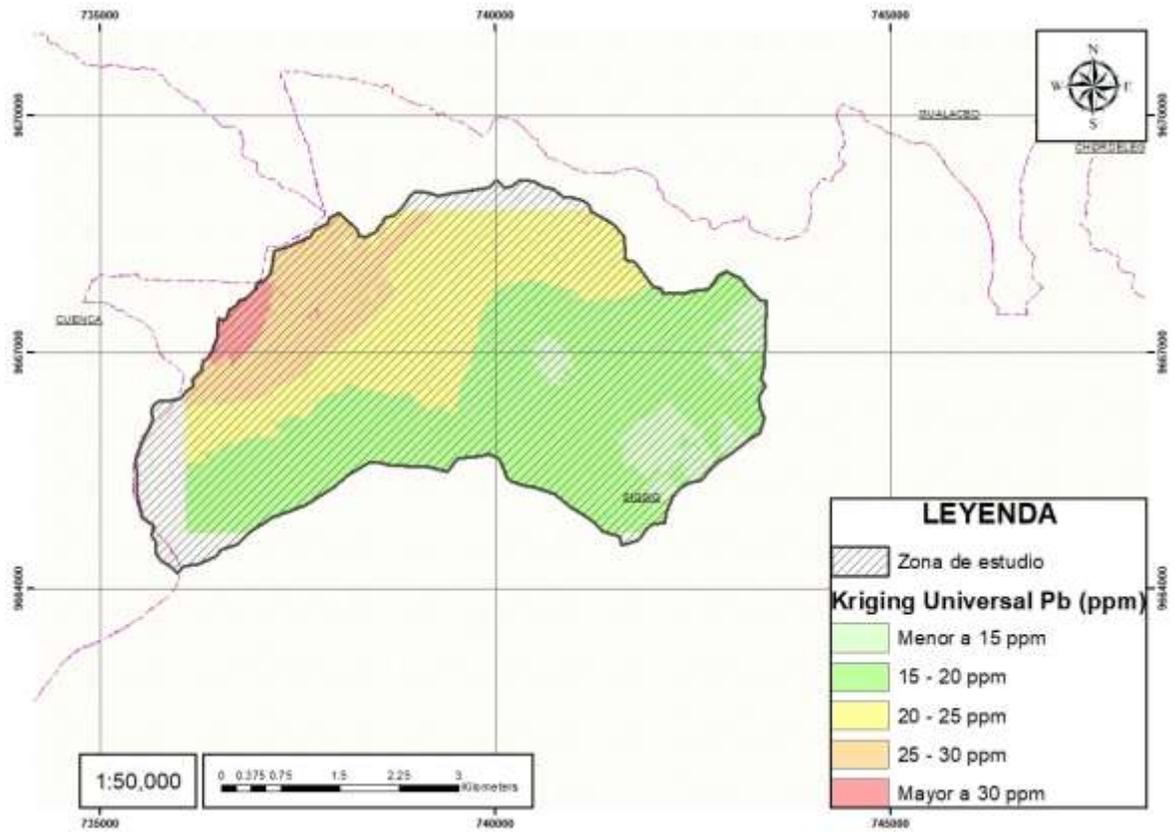
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 44. Semivariograma Kriging Universal para el Pb.



Fuente: Elaboración propia.

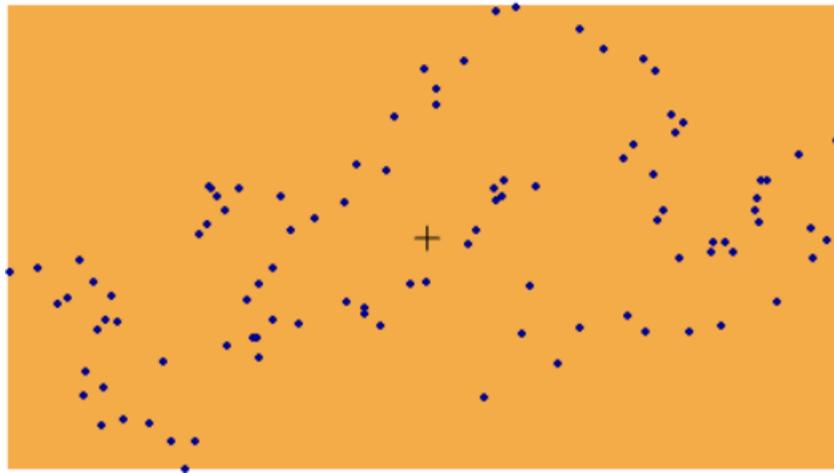
Figura. 45. Mapa de Kriging Universal para el Pb (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

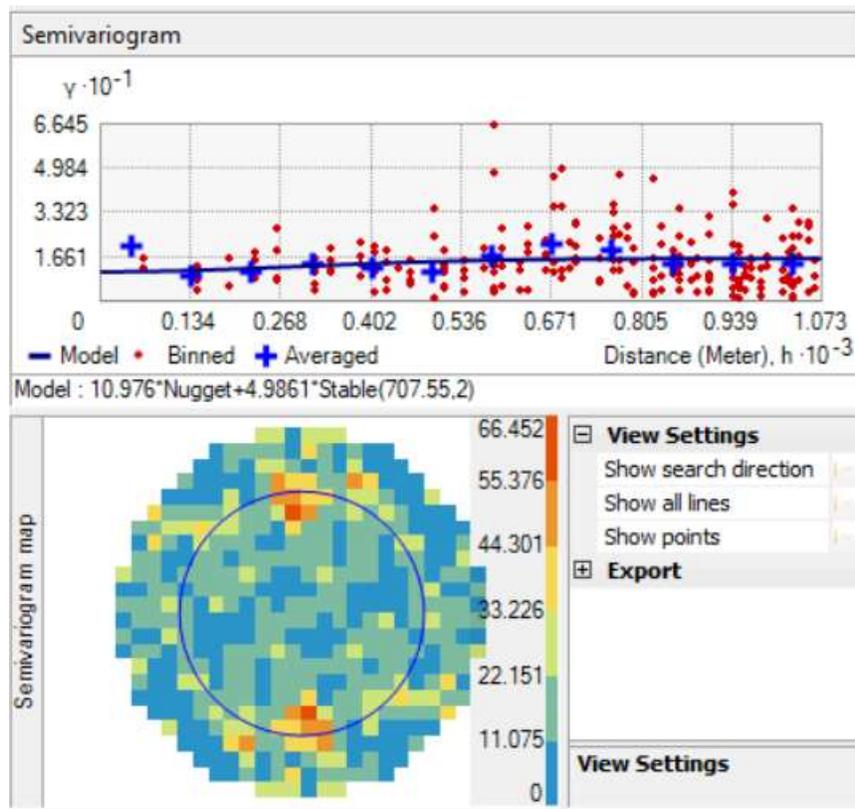
Kriging Universal del Cd

Figura. 46. Propiedades del método Kriging Universal para el Cd.



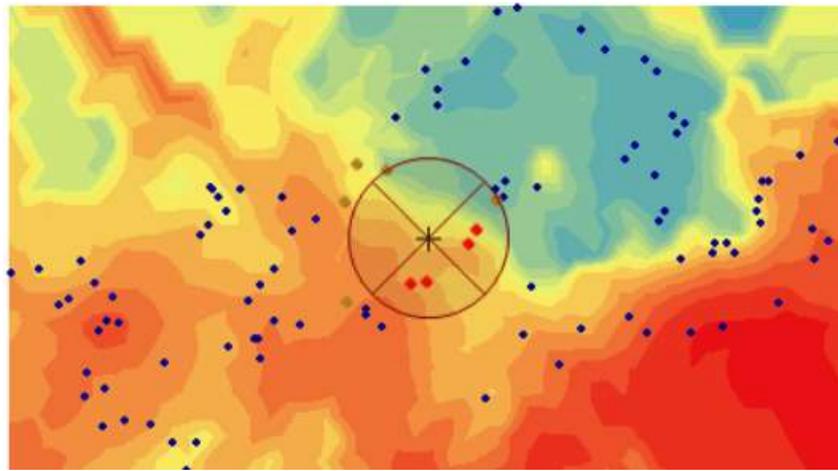
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 47. Semivariograma Kriging Universal para el Cd



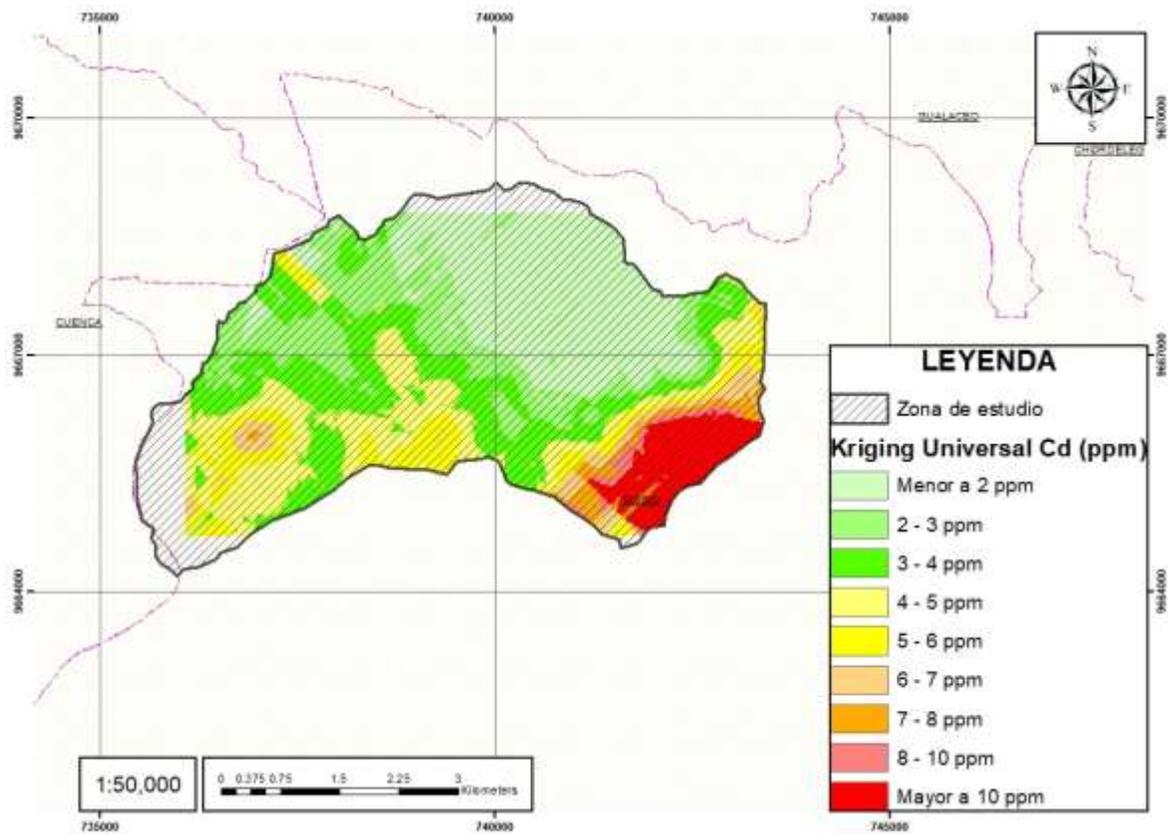
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 48. Elipsoide de búsqueda Kriging Universal para el Cd.



Fuente: Elaboración propia.

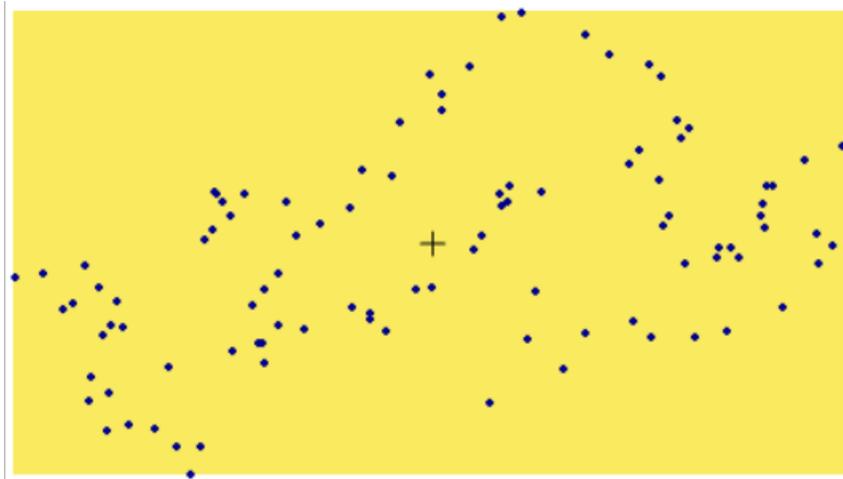
Figura. 49. Mapa de Kriging Universal para el Cd (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

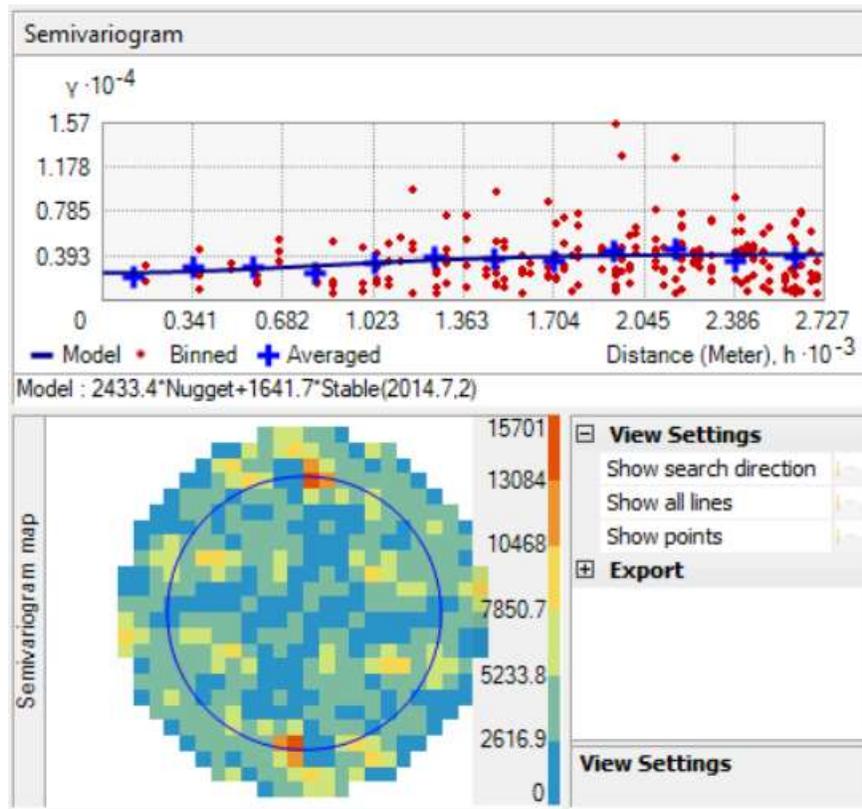
Kriging Universal del Zn

Figura. 50. Propiedades del método Kriging Universal para el Zn.



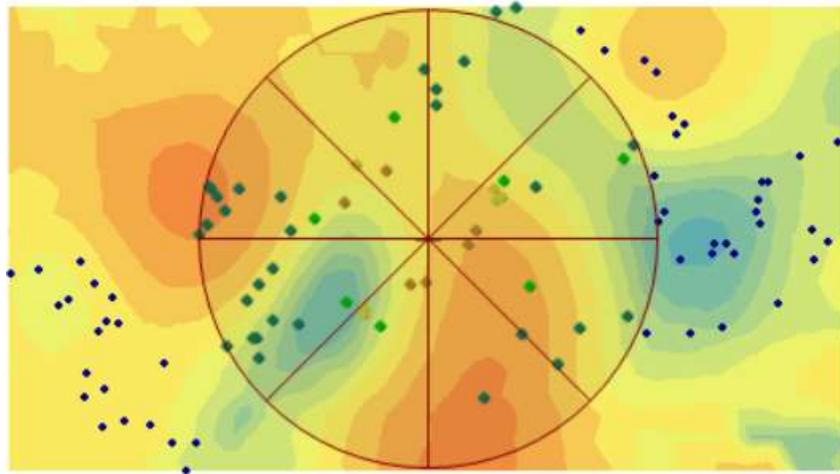
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 51. Semivariograma Kriging Universal para el Zn.



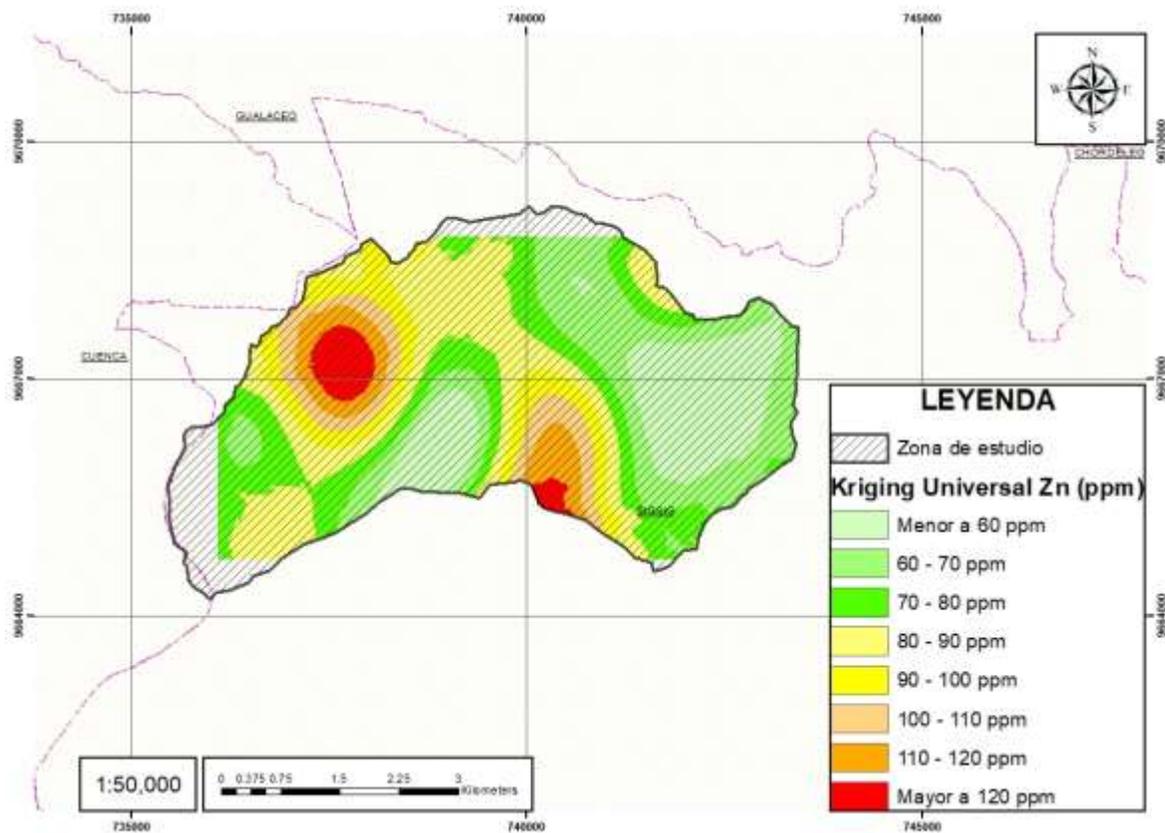
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 52. Elipsoide de búsqueda Kriging Universal para el Zn.



Fuente: Elaboración propia.

Figura. 53. Mapa de Kriging Universal para el Zn (ppm).



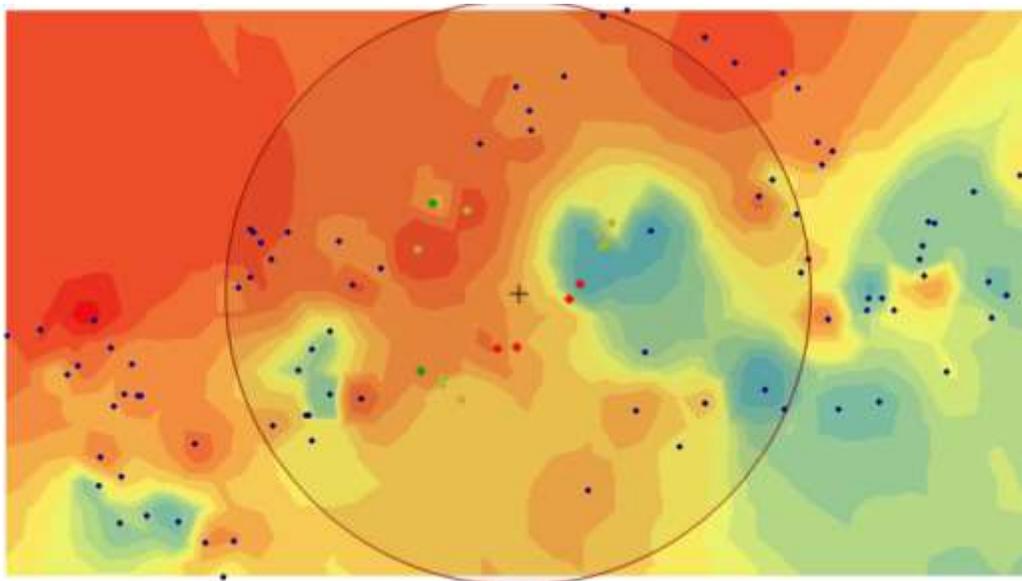
Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Inverso de la distancia

El método Inverso a la Distancia asigna pesos a los puntos de muestreo en función de la inversa de la distancia. Esta técnica supone que los valores más cercanos tienen una influencia mayor en la estimación que aquellos más lejanos. Es una aproximación común y sencilla que puede ser efectiva en áreas con patrones espaciales simples.

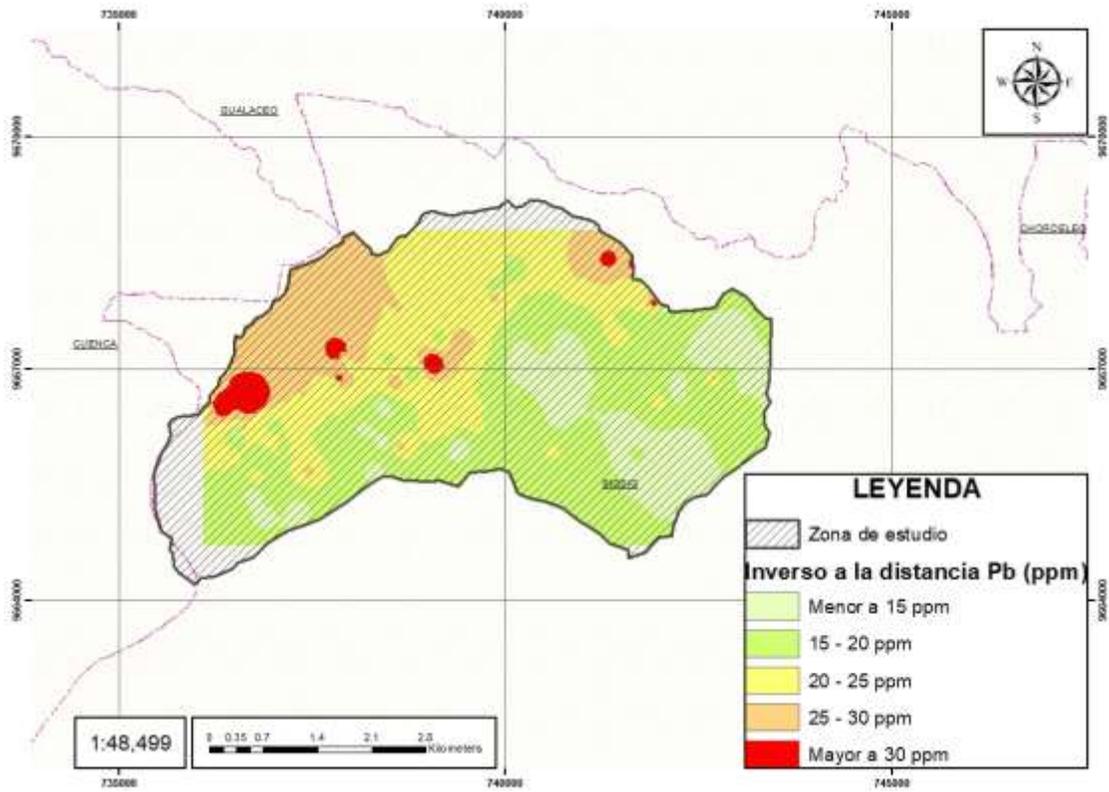
Inverso de la distancia del Pb

Figura. 54. Elipsoide de búsqueda Inverso de la distancia para el Pb.



Fuente: Elaboración propia.

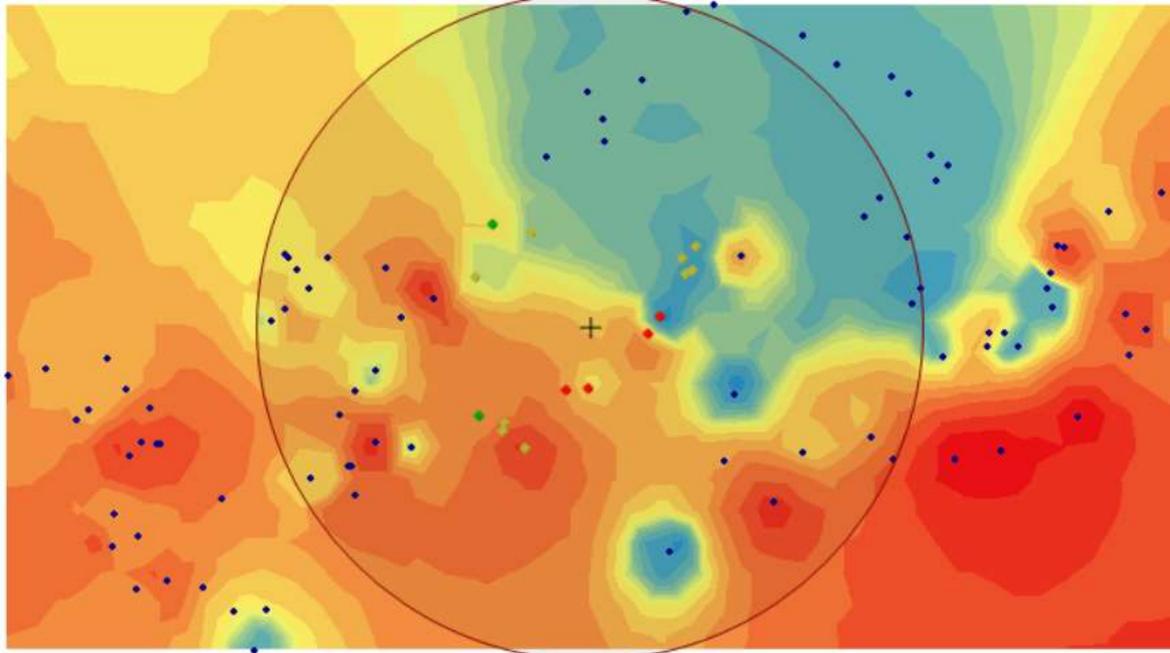
Figura. 55. Mapa del Inverso de la distancia para el Pb (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

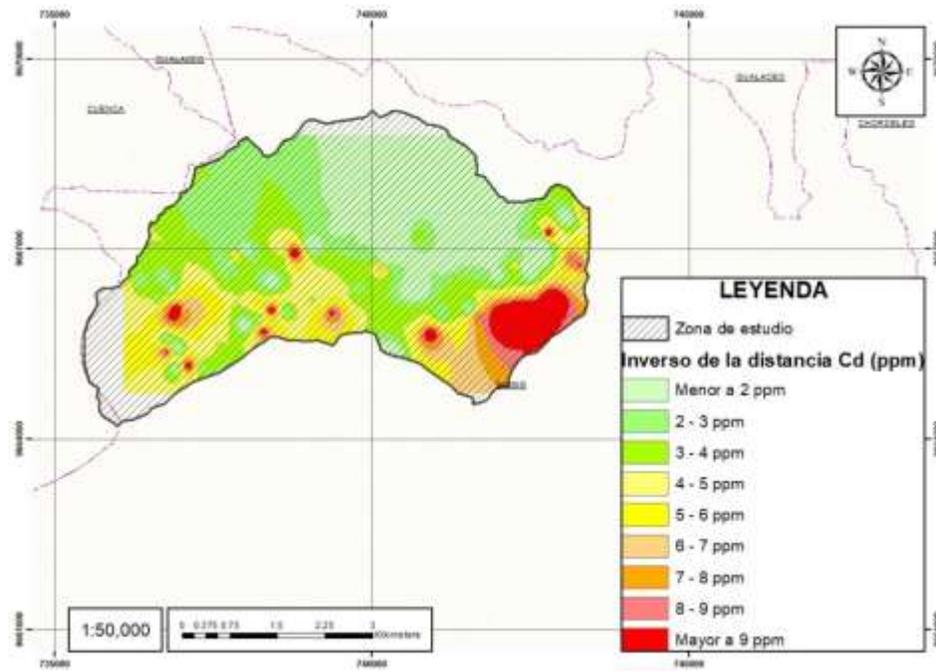
Inverso de la distancia del Cd

Figura. 56. Elipsoide de búsqueda Inverso de la distancia para el Cd.



Fuente: Elaboración propia.

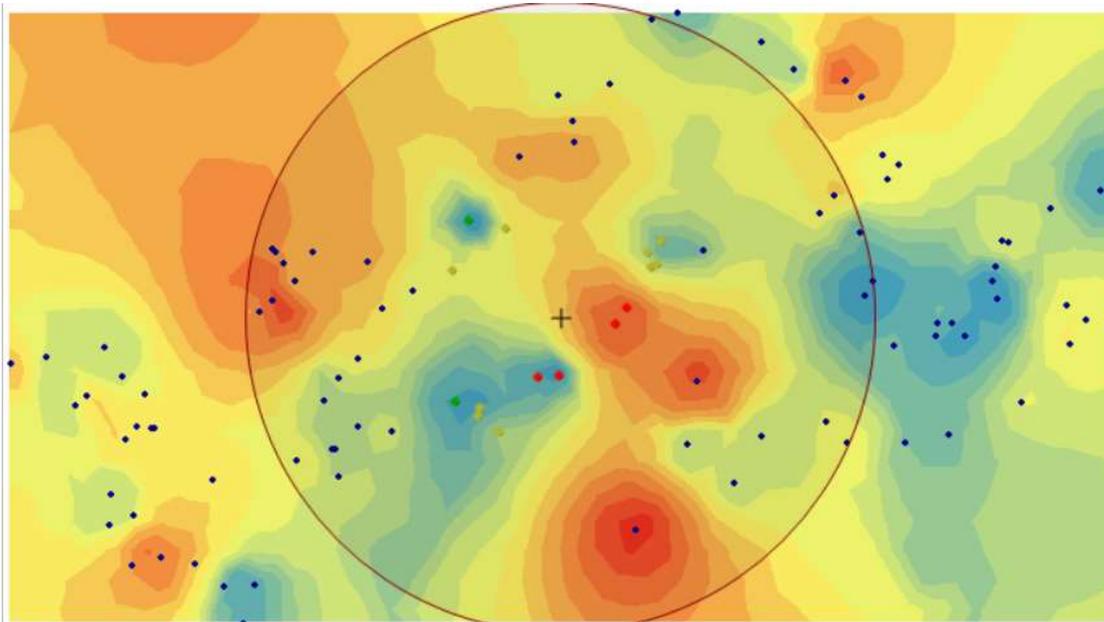
Figura. 57. Mapa del Inverso de la distancia para el Cd.



Fuente: Elaboración propia.

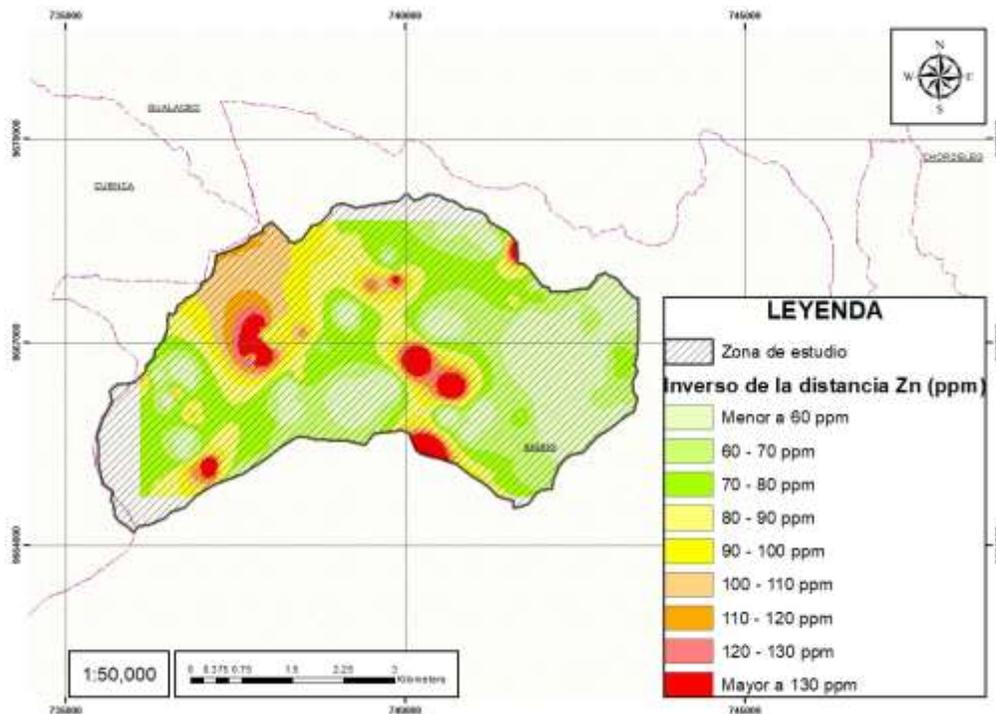
Inverso de la distancia del Zn

Figura. 58. Elipsoide de búsqueda Inverso de la distancia para el Zn.



Fuente: Elaboración propia.

Figura. 59. Mapa del Inverso de la distancia para el Zn (ppm).



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

RESULTADO Y ANÁLISIS

4.1 Análisis de las concentraciones de metales pesados obtenidas

Se ha explorado la distribución espacial de elementos como el Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Zinc (Zn).

Para determinar las concentraciones de los metales pesados se aplicaron métodos como Kriging Simple, Kriging Ordinario, Kriging Universal e Inverso a la Distancia, cada uno con sus ventajas y desventajas. La diversidad de técnicas aplicadas se diseñó para capturar la complejidad de la distribución espacial de los metales pesados, teniendo en cuenta la variabilidad en la concentración de estos elementos en diferentes puntos de muestreo.

4.1.1 Análisis para el Plomo (Pb)

En los cuatro métodos de interpolación (Figura. 24, 34, 45 y 55) se marcó una alta concentración entre 25 a 30 ppm en la zona Noroeste (NW) del área de estudio, esto debido a la presencia de la antigua mina “Armenonic” y su relavera, este valor del Plomo en todos los mapas de concentración de Pb va disminuyendo conforme se avanza hacia el Sureste (SE) indicando valores menores a 15 ppm.

La anisotropía de las muestras está muy marcada en sentido Noreste (NE)-Suroeste (SW).

4.1.2 Análisis para el Cadmio (Cd)

En los métodos de interpolación (Figura. 27, 38, 49 y 57) se evidenció la presencia de varias zonas anómalas en la parte central y sur de la zona de estudio, estos valores son mayores a

8 ppm, en la parte Norte se puede ver una baja concentración de este metal pesado inferior a los 5 ppm.

4.1.3 Análisis para el Zinc (Zn)

En los mapas de interpolación (Figura. 30, 42, 53, 59) se observó la dispersión del Zinc en la parte NW y SE de la zona de estudio, estos valores son mayores a 100 ppm lo que se justifica por estar en la parte de incidencia de la antigua mina y relavera, en la zona central y en la parte Este los valores de Zinc son menores a 60 ppm.

4.2 Comparación de las interpolaciones realizadas

En esta etapa se busca analizar las fortalezas y limitaciones de cada técnica utilizada, con el objetivo de identificar cuál de ellas proporciona la representación más precisa y exacta de la distribución espacial de los elementos analizados.

4.2.1 Comparación de las interpolaciones para el Pb.

Como se pudo observar en las figuras (24, 34, 45 y 55) existe una gran similitud entre la interpolación por Kriging Ordinario y Kriging Universal, en los dos métodos existe una zona marcada de la anisotropía en sentido NE-SW, los métodos Inverso a la Distancia y Kriging Simple generan elipsoides de las zonas de mayor concentración del metal pesado y no se marca de forma definida la dirección de la anisotropía.

4.2.2 Comparación de las interpolaciones para el Cd.

Mediante la inspección visual de las figuras (27, 38, 49 y 57) se destaca que en el método de interpolación Inverso a la Distancia existe una mayor correlación con respecto a los valores de las muestras, este método genera elipsoides de búsqueda con un cierto radio para las zonas de

mayor concentración (valores mayores a 8 ppm), los métodos de Kriging Simple, Ordinario y Universal presentan una similitud en la forma de presentación de la concentración de metales pesados siendo la zona Sur del área de estudio la de mayor presencia de valores altos (mayores a 5 ppm).

4.2.3 Comparación de las interpolaciones para el Zinc

Las figuras (30, 42, 53 y 57) nos permite evidenciar que el Zinc es el metal pesado con mayor abundancia en la zona de estudio, la interpolación por Kriging Ordinario y Kriging Universal presentan una gran similitud en la representación gráfica de la concentración del Zn presentando valores mayores a 100 ppm en la parte NW y SE de la zona de estudio, por otro lado el Kriging Simple y el Inverso a la Distancia presentan varios elipsoides de diferente radio en la parte central para representar las concentraciones de Zn mayores a 100 ppm.

4.3 Evaluación de la precisión y exactitud de los métodos de interpolación

4.3.1 Precisión de los métodos de estimación

La precisión se evaluó mediante comparaciones detalladas entre las estimaciones interpoladas y los datos de muestreo reales. Se examinó la capacidad de cada método para replicar con precisión las concentraciones de metales pesados en ubicaciones específicas, permitiendo así una evaluación cuantitativa de las interpolaciones.

Tabla 4. Tabla de precisión de la interpolación para los metales pesados.

Metal Pesado	Método de Interpolación	Precisión de la interpolación
	Kriging Simple (Figura.60)	La interpolación por Kriging Simple presentó una precisión en la interpolación mayor al 80 %, en la figura 60 se puede ver la correspondencia que presentó en función a las muestras de análisis, un factor evidente en este método es que no existió una suavización en la presentación de las interpolaciones.
Plomo (Pb)	Kriging Ordinario (Figura. 61)	La interpolación por el método de Kriging Ordinario presentó una precisión mayor al 50 %, en la figura 61 se puede ver la no correspondencia entre las muestras y el kriging ordinario, se sobreestimaron los valores en la parte norte de la zona de estudio generando cuerpos más grandes.
	Kriging Universal (Figura. 62)	La interpolación por el método de Kriging Universal presentó una precisión mayor al 90 %, en la figura 62 se pudo ver que existe una correspondencia entre las muestras de análisis y los cuerpos generados por Kriging Universal, también se pudo verificar que en

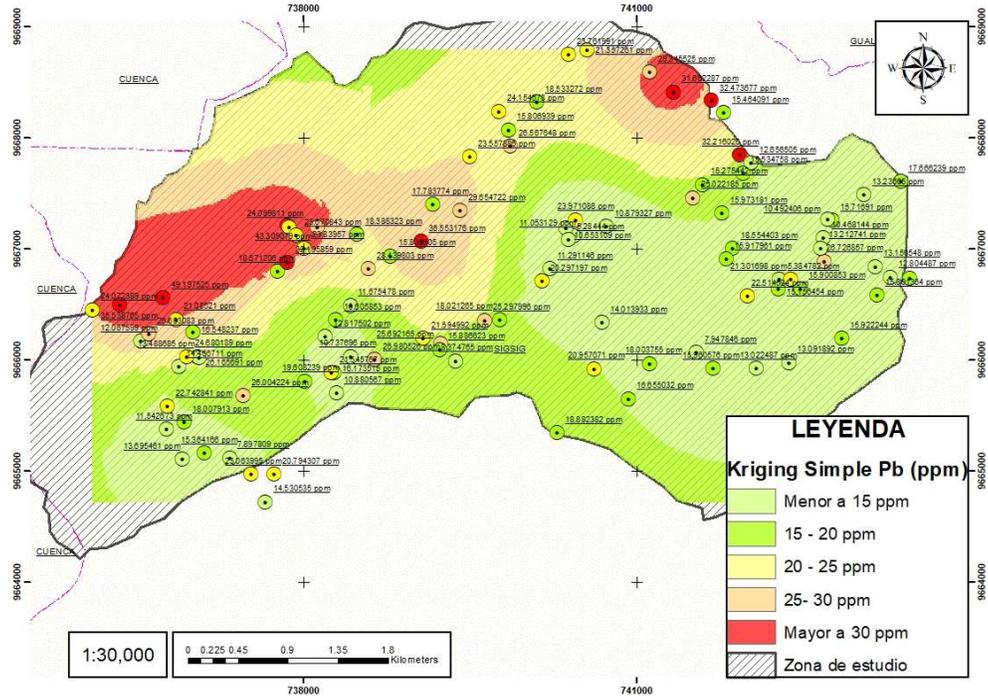
	este método se representa la anisotropía de las muestras (NE-SW).
Inverso a la Distancia (Figura. 63)	La interpolación por el método del Inverso a la Distancia presentó una precisión mayor al 90 %, en la figura 63 se pudo verificar la correspondencia entre los valores de las muestras y las elipses generadas por el método de interpolación.
Kriging Simple (Figura. 64)	La interpolación por Kriging Simple presentó una precisión en la interpolación mayor al 70 %, en la figura 66 se pudo ver la correspondencia que presento en función a las muestras de análisis, las partes de mayor concentración zonas de alta presencia de Cadmio se encuentra en la zona Sur, este método suaviza la estimación obviando en algunos sectores zonas con valores altos.
Cadmio (Cd) Kriging Ordinario (Figura. 65)	La interpolación por el método de Kriging Ordinario presentó una gran diferencia con respecto a las muestras, en la figura 65 se pudo ver la no correspondencia entre las muestras y el kriging ordinario, se sobreestimaron los valores en la parte Norte y

	Este de la zona de estudio generando cuerpos de gran ley en donde no hay muestras.
Kriging Universal (Figura. 66)	La interpolación por el método de Kriging Universal presentó una baja precisión, en la figura 66 se pudo ver que no existe una correspondencia entre las muestras de análisis y los cuerpos generados por Kriging Universal, en la parte Norte se calculó valores altos en donde no hay zonas de muestreo.
Inverso a la Distancia (Figura. 67)	La interpolación por el método del Inverso a la Distancia presentó una precisión mayor al 95 %, en la figura 67 se pudo verificar la correspondencia entre los valores de las muestras y las elipses generadas por el método de interpolación.
Zinc (Zn) Kriging Simple (Figura. 68)	La interpolación por Kriging Simple presentó una precisión en la interpolación mayor al 90 %, en la figura 68 se pudo ver la correspondencia que presenta en función a las muestras de análisis, las partes de mayor concentración zonas de alta presencia de Zinc se encuentran dispersas en toda la parte de estudio.

Kriging Ordinario (Figura. 69)	La interpolación por el método de Kriging Ordinario presentó una precisión mayor al 80% con respecto a las muestras, en la figura 69 se pudo ver la correspondencia entre las muestras y el kriging ordinario, se sobreestimaron los valores en la parte Norte de la zona de estudio.
Kriging Universal (Figura. 70)	La interpolación por el método de Kriging Universal presentó una alta precisión, en la figura 70 se pudo ver que existe una correspondencia entre las muestras de análisis y los cuerpos generados por Kriging Universal.
Inverso a la Distancia (Figura. 71)	La interpolación por el método del Inverso a la Distancia presentó una precisión mayor al 90 %, en la figura 71 se pudo verificar la correspondencia entre los valores de las muestras y las elipses generadas por el método de interpolación.

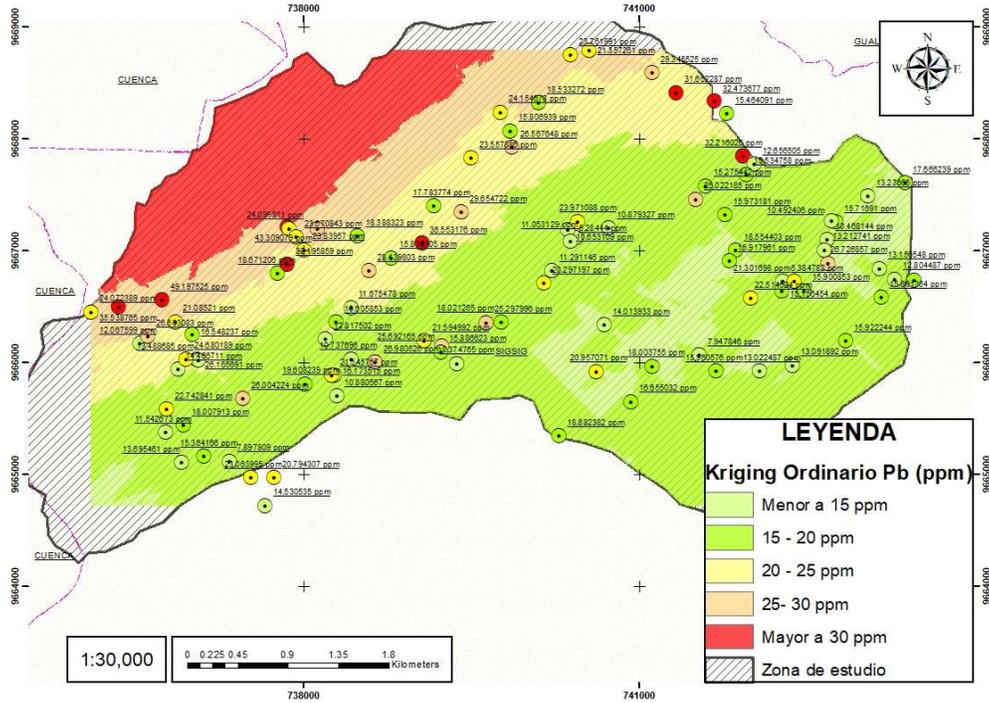
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 60. Mapa de inspección visual de Kriging Simple Pb.



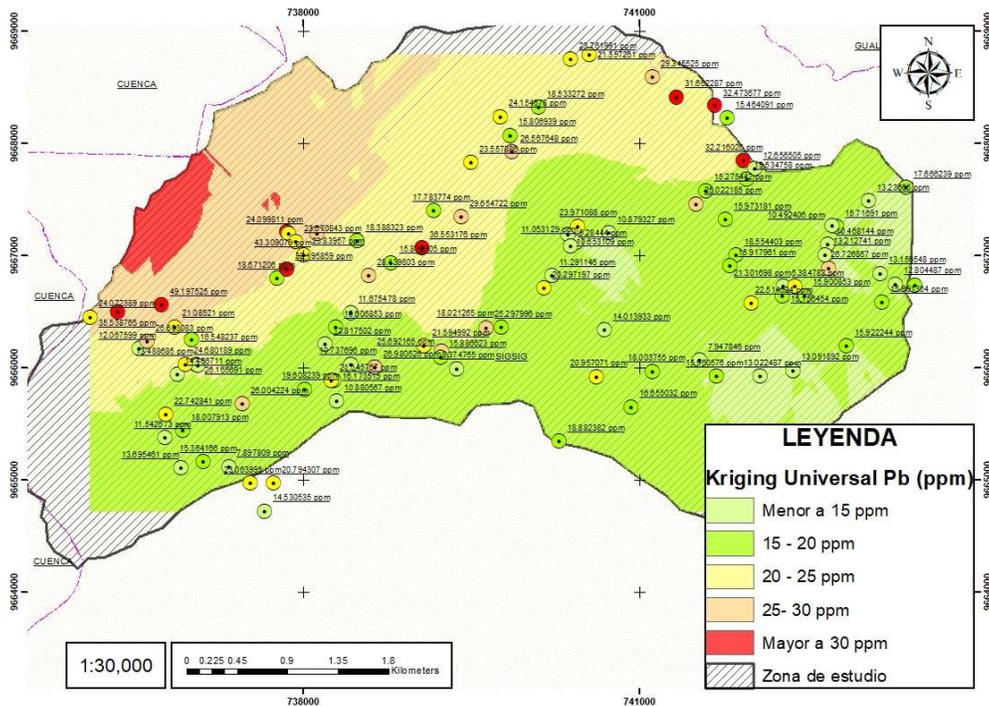
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 61. Mapa de inspección visual de Kriging Ordinario Pb.



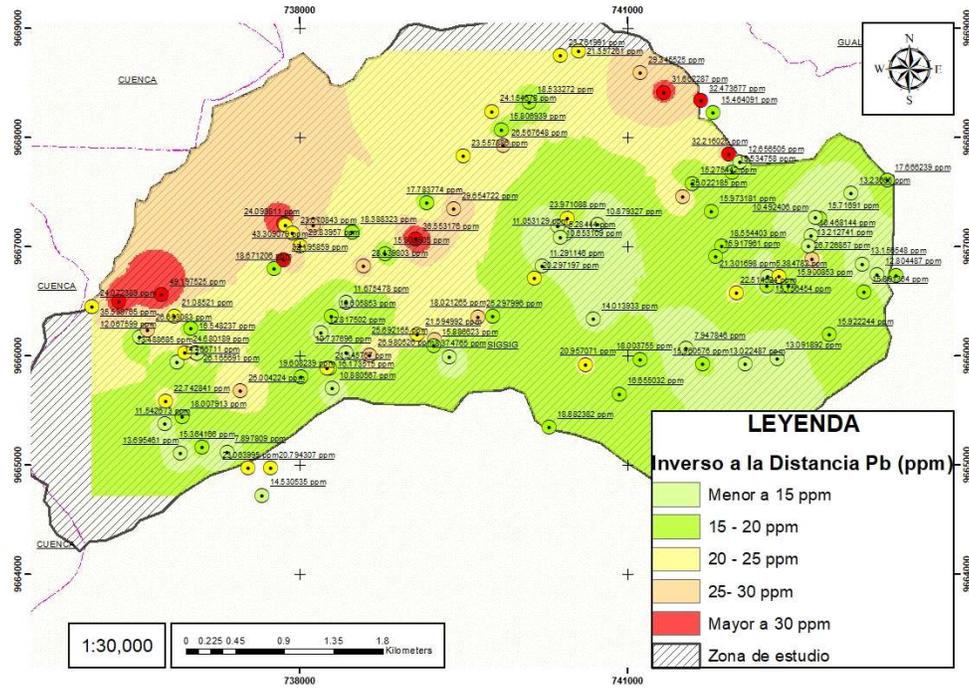
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 62. Mapa de inspección visual de Kriging Universal Pb.



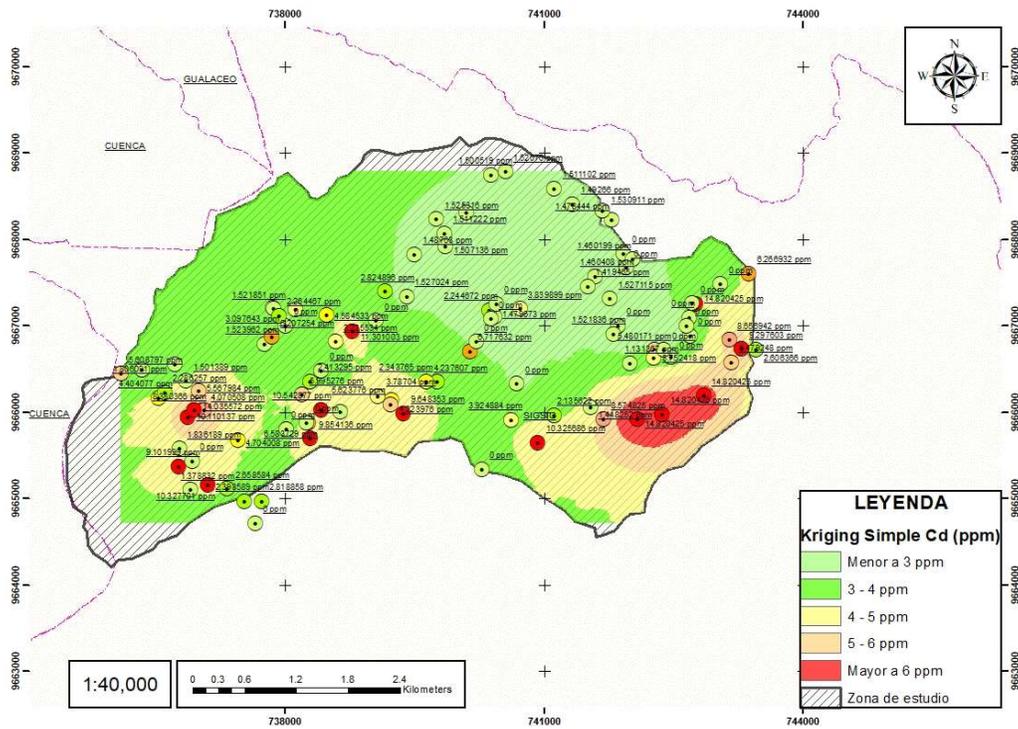
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 63. Mapa de inspección visual de Inverso a la Distancia Pb.



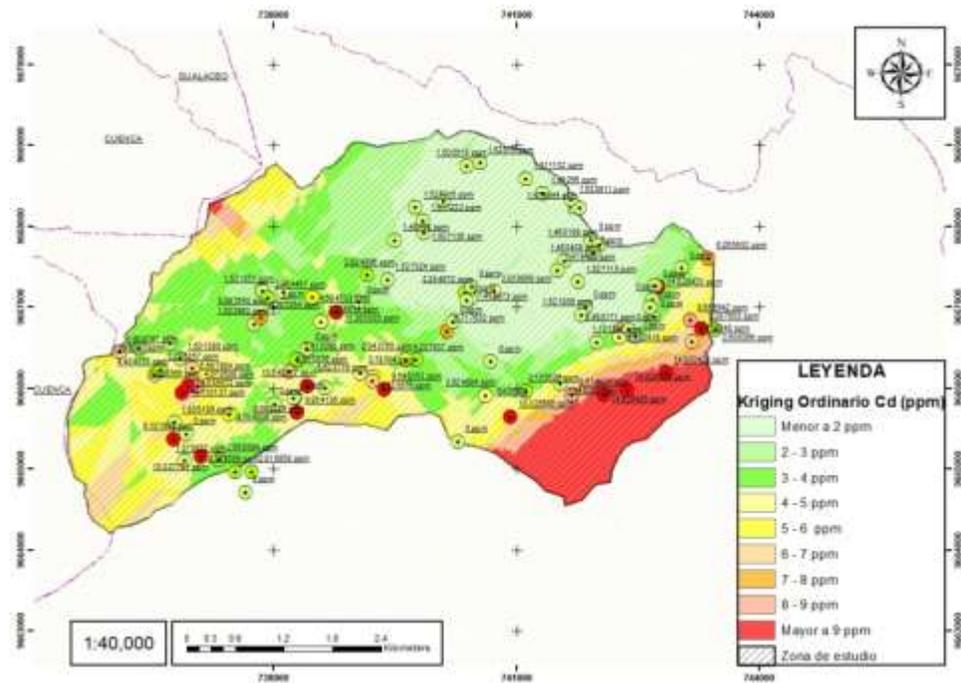
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 64. Mapa de inspección visual de Kriging Simple Cd.



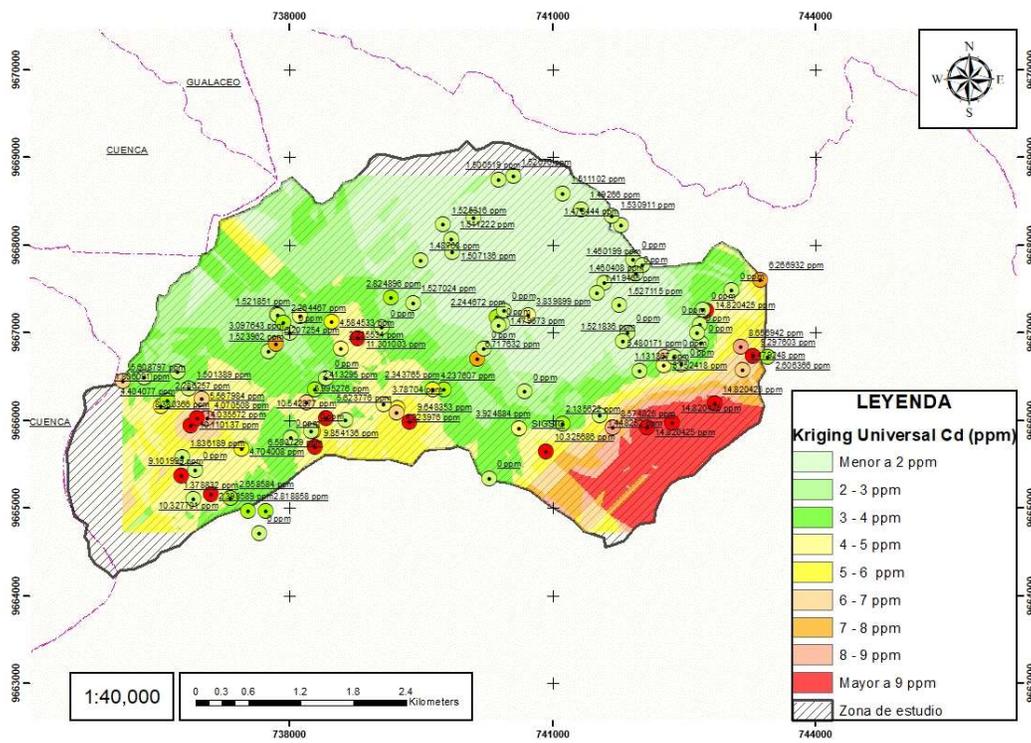
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 65. Mapa de inspección visual de Kriging Ordinario Cd.



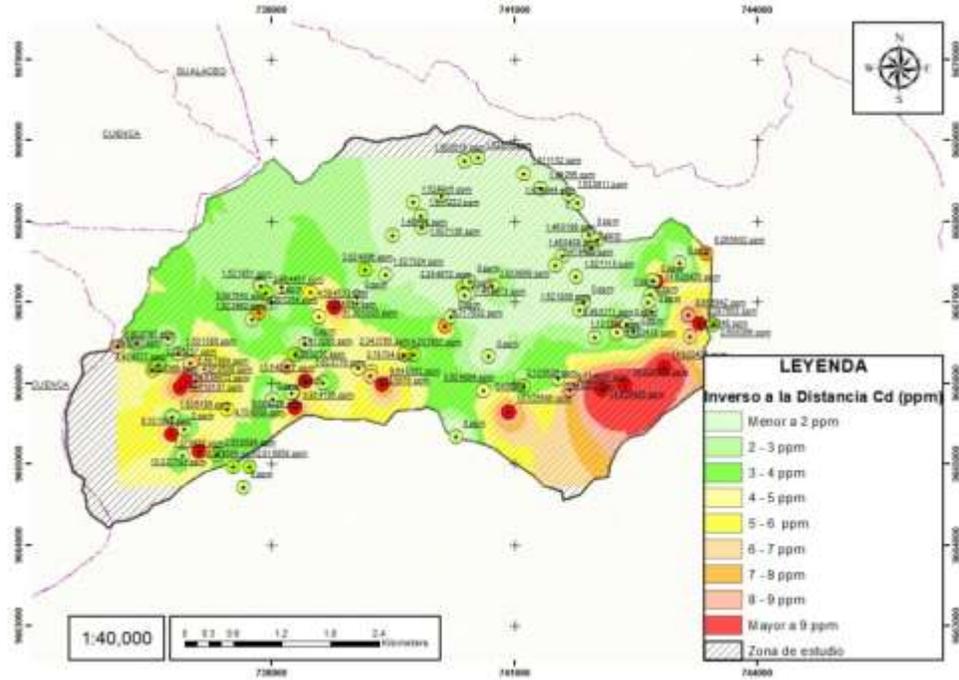
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 66. Mapa de inspección visual de Kriging Universal Cd.



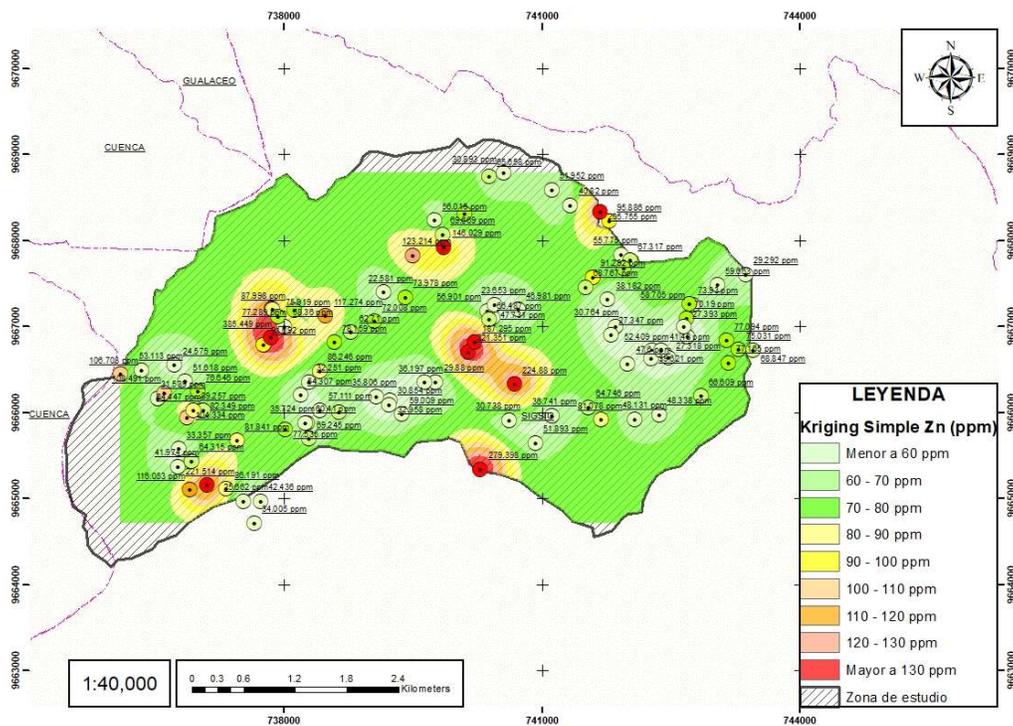
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 67. Mapa de inspección visual de Inverso a la Distancia Cd.



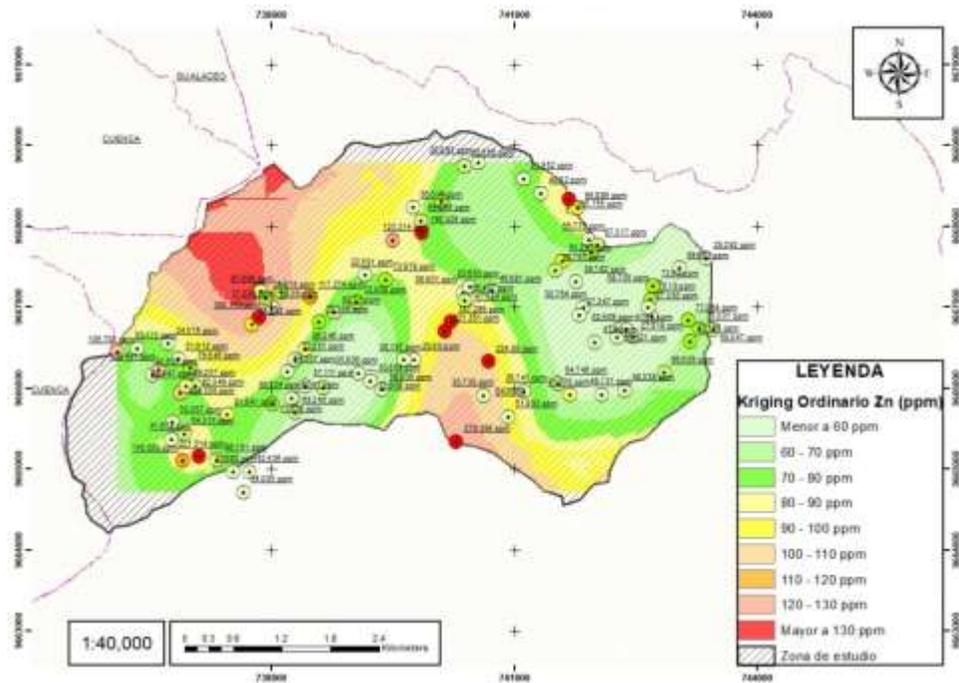
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 68. Mapa de inspección visual de Kriging Simple Zn.



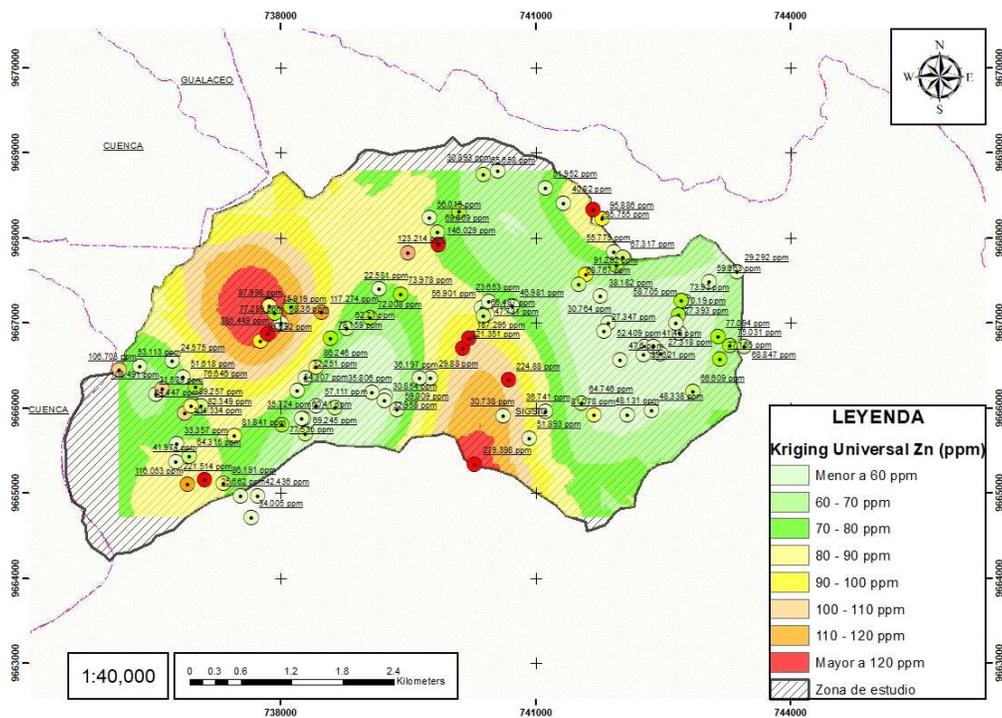
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 69. Mapa de inspección visual de Kriging Ordinario Zn.



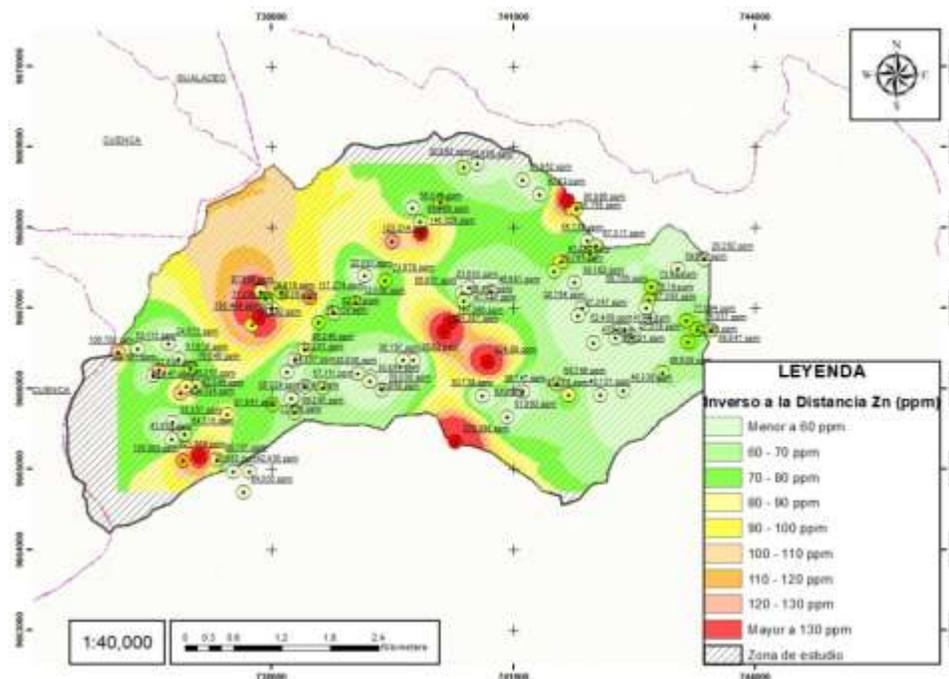
Fuente: Elaboración propia.

Figura. 70. Mapa de inspección visual de Kriging Universal Zn.



Fuente: Elaboración propia.

Figura. 71. Mapa de inspección visual del Inverso a la Distancia Zn.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Exactitud de los métodos de interpolación

La exactitud, se evaluó en términos de qué tan cerca están las estimaciones interpoladas de los valores verdaderos. Este proceso incluyó la comparación de las predicciones con datos proporcionados por el software, facilitando una medida objetiva de la capacidad de cada método para generalizar más allá de las ubicaciones de muestreo conocidas.

Exactitud por el valor Mean

El software GIS proporciona un valor de mean, que mientras este se más cercano a 0 la exactitud del método será mayor.

En la Tabla 5 se presenta la columna Mean, en donde se puede observar que para el Pb y el Zn el método de interpolación más exacto es el Kriging Universal ya que este valor tiende a 0

siendo 0.01 y 0.06 respectivamente, para el Cadmio el valor Mean es de 0.007 correspondiente al Inverso a la Distancia.

Tabla 5. Exactitud de los métodos de interpolación.

Metal	Método de Interpolación	Exactitud en la interpolación (Mean)
Pesado	Kriging Simple	0.12
	Kriging Ordinario	0.02
	Kriging Universal	0.01
	Inverso a la Distancia	0.36
Plomo (Pb)	Kriging Simple	0.01
	Kriging Ordinario	0.03
	Kriging Universal	0.01
	Inverso a la Distancia	0.007
Cadmio (Cd)	Kriging Simple	0.9
	Kriging Ordinario	0.5
	Kriging Universal	0.06
	Inverso a la Distancia	1.64
Zinc (Zn)	Kriging Simple	0.9
	Kriging Ordinario	0.5
	Kriging Universal	0.06
	Inverso a la Distancia	1.64

Fuente: Elaboración propia.

Exactitud por la predicción y el error estándar

Otra metodología para evaluar la exactitud del método de interpolación es la validación de la estimación mediante el uso del software GIS, esta validación nos arrojó una tabla en donde se

pueden ver las predicciones del valor a interpolar y el error estándar que existe entre la muestra original y el valor estimado.

En la tabla 6 se puede ver la comparativa entre las diferentes metodologías para el metal pesado Pb.

Tabla 6. Exactitud predicción y error estándar del Pb.

PUNTO	X	Y	Z	Pb	KRIGING SIMPLE		KRIGING ORDINARIO		KRIGING UNIVERSAL		INVERSO A LA DISTANCIA
					Predicted	StdError	Predicted	StdError	Predicted	StdError	Predicted
1	740432	9667117	2580.31	11.05	14.96	2.28	16.91	1.59	14.52	1.16	11.05
2	740363	9667191	2586.38	10.65	15.44	2.32	17.24	1.60	15.06	1.18	10.65
3	740387	9667087	2586.42	5.28	15.04	2.27	17.55	1.59	14.85	1.14	5.28
4	742286	9666728	2479.91	5.38	16.20	2.19	15.34	1.57	14.78	0.94	5.38
5	742276	9666640	2471.71	15.16	16.19	2.22	15.18	1.61	14.62	0.96	15.16
6	742692	9666891	2425.8	26.73	15.95	2.17	15.09	1.60	14.24	0.90	26.73
7	737528	9664975	2979.38	23.06	17.61	2.51	15.64	1.86	16.13	1.43	23.06
8	741995	9666578	2462.5	22.51	16.52	2.47	16.08	1.61	15.10	1.11	22.51
9	740451	9667265	2573.2	23.97	15.55	2.40	16.95	1.60	14.84	1.23	23.97
10	741542	9666069	2338.08	7.95	15.68	2.71	15.18	1.81	14.09	1.47	7.95
11	737659	9664724	3000	14.53	18.01	2.82	15.61	2.05	16.63	1.93	14.53
12	739162	9667404	2832.2	17.78	23.01	2.71	22.97	1.70	22.58	1.48	17.78
13	736350	9666500	3120	35.54	25.38	2.63	27.60	2.01	25.07	1.66	35.54
14	740728	9667205	2560	10.88	15.36	2.66	16.54	1.62	14.23	1.37	10.88
15	736733	9666562	3060.56	49.20	26.42	2.59	28.25	1.92	26.54	1.43	49.20
16	736767	9665380	2955.38	11.54	17.43	2.49	18.29	2.05	16.61	1.45	11.54
17	736911	9665111	2947.94	13.70	16.58	2.57	17.16	2.14	15.56	1.55	13.70
18	736534	9666172	3091.93	12.07	22.73	2.39	23.85	1.83	22.51	1.20	12.07
19	738123	9667197	2924.09	25.26	24.38	2.34	25.56	1.72	23.96	1.16	25.26
20	737336	9665121	2956.18	7.90	17.09	2.44	15.62	1.73	15.93	1.21	7.90
21	737049	9666029	2962.39	26.17	20.60	2.17	21.25	1.54	20.16	0.93	26.17
22	738009	9667011	2936.8	23.84	24.19	2.17	25.26	1.56	23.62	1.00	23.84
23	737457	9665681	2878.85	26.00	19.01	2.68	18.34	1.57	17.55	1.20	26.00
24	736103	9666456	3161.76	24.07	24.01	2.91	28.84	2.14	24.88	2.09	24.07
25	738486	9667133	2910.81	18.39	22.59	2.54	23.70	1.72	22.62	1.21	18.39

26	738786	9666940	2775.56	15.84	22.20	2.53	21.86	1.59	21.51	1.21	15.84
27	739058	9667069	2784.66	36.55	23.24	2.63	21.62	1.61	21.72	1.32	36.55
28	738645	9666008	2663.23	26.98	18.07	2.43	17.34	1.67	16.55	1.10	26.98
29	738195	9666212	2746.78	12.82	17.29	2.34	19.25	1.57	16.95	1.06	12.82
30	738278	9665888	2723.6	16.17	17.36	2.22	17.09	1.60	16.09	1.07	16.17
31	737065	9666028	2959.89	13.49	20.50	2.19	20.76	1.54	19.78	0.94	13.49
32	738586	9666824	2765.87	28.44	21.17	2.46	21.57	1.60	20.59	1.12	28.44
33	736929	9665443	2930.58	18.01	17.57	2.32	18.09	1.81	16.56	1.13	18.01
34	738018	9665813	2764.33	19.61	17.96	2.49	16.90	1.61	16.70	1.16	19.61
35	738296	9665704	2761.33	10.88	17.67	2.48	16.99	1.70	16.46	1.28	10.88
36	738423	9666035	2680	10.74	17.44	2.22	17.86	1.56	16.50	0.98	10.74
37	738424	9666493	2773.66	11.68	18.88	2.41	19.74	1.56	18.60	1.05	11.68
38	736876	9665945	2984.08	14.47	19.32	2.16	19.32	1.65	18.25	0.92	14.47
39	736949	9666034	2984.62	24.68	20.86	2.10	21.55	1.57	20.68	0.89	24.68
40	737113	9665165	2946.31	15.36	16.71	2.41	16.57	1.95	15.73	1.24	15.36
41	737734	9664976	2954.48	20.79	18.18	2.68	16.03	1.94	16.61	1.59	20.79
42	739237	9666151	2617.26	25.69	19.55	2.39	18.62	1.70	18.66	1.23	25.69
43	738295	9666362	2763.07	16.61	18.68	2.37	20.33	1.57	18.84	1.07	16.61
44	739077	9666196	2638.95	21.59	19.74	2.44	18.27	1.73	18.55	1.18	21.59
45	736779	9665585	2957.14	22.74	18.10	2.44	19.21	1.89	16.91	1.31	22.74
46	738252	9665889	2725.83	21.55	17.43	2.23	17.67	1.60	16.55	1.07	21.55
47	737004	9666253	2989.39	16.55	22.36	2.26	23.69	1.59	22.51	1.03	16.55
49	740147	9666714	2530.08	20.30	16.31	2.58	16.72	1.67	14.88	1.29	20.30
50	740217	9666825	2548.9	11.29	16.09	2.46	17.63	1.59	15.41	1.18	11.29
51	740689	9666340	2485.23	14.01	16.40	2.86	15.24	1.69	14.50	1.50	14.01
52	740281	9665350	2433.38	18.88	18.83	3.21	16.43	2.03	17.00	2.29	18.88
53	739371	9665995	2648.21	8.37	18.71	2.57	17.82	1.81	17.99	1.43	8.37
54	740930	9665655	2373.45	16.66	17.80	2.87	15.57	1.86	15.53	1.76	16.66
55	740621	9665922	2435.32	20.96	18.04	2.81	15.06	1.79	15.72	1.59	20.96
56	739767	9666366	2495.24	18.02	18.69	2.66	16.08	1.76	16.46	1.38	18.02

57	741120	9665970	2360	18.00	16.75	2.74	14.48	1.78	14.65	1.51	18.00
58	739635	9666361	2518.86	25.30	19.60	2.59	17.83	1.70	18.14	1.31	25.30
59	739230	9666098	2639.9	15.89	19.28	2.40	17.94	1.79	18.31	1.31	15.89
60	743376	9667611	2320	17.67	16.92	3.03	14.96	2.15	13.91	2.21	17.67
61	743458	9666736	2343.07	15.62	16.59	2.72	16.46	2.39	14.81	1.85	15.62
62	743284	9666747	2344.35	12.80	16.13	2.48	15.52	2.05	14.35	1.46	12.80
63	743148	9666845	2320	13.16	15.74	2.39	14.88	1.82	14.04	1.17	13.16
64	743168	9666586	2360.2	15.89	16.35	2.53	15.37	1.98	14.26	1.45	15.89
65	742850	9666198	2362.88	15.92	16.38	2.89	15.56	2.08	13.97	1.73	15.92
66	741690	9665927	2336.44	15.96	15.58	2.72	15.61	1.83	13.85	1.56	15.96
67	742078	9665928	2349.69	13.02	15.59	2.76	14.50	1.83	13.22	1.61	13.02
68	742369	9665981	2374.1	13.09	16.21	2.82	16.01	1.88	14.24	1.66	13.09
69	743048	9667493	2374.91	13.24	15.93	2.71	15.68	1.99	14.39	1.59	13.24
70	742763	9667261	2423.89	15.72	15.45	2.33	15.21	1.76	14.18	1.13	15.72
71	742718	9667270	2436.98	10.49	15.39	2.34	15.71	1.64	14.37	1.11	10.49
72	742682	9667103	2432.95	10.47	15.30	2.19	15.09	1.57	13.99	0.94	10.47
73	742659	9667009	2430.6	13.21	15.63	2.15	15.26	1.53	14.21	0.89	13.21
74	742475	9666644	2454.51	15.90	16.30	2.23	15.39	1.65	14.74	0.95	15.90
75	742390	9666731	2472.75	21.30	16.17	2.16	15.19	1.54	14.66	0.89	21.30
76	741862	9667007	2569.06	18.55	17.09	2.47	14.75	1.58	15.19	1.16	18.55
77	741807	9666913	2551.62	15.92	17.07	2.52	14.59	1.59	15.08	1.22	15.92
78	741770	9667324	2598.67	15.97	17.95	2.43	16.01	1.58	16.33	1.14	15.97
79	741788	9668231	2680	15.46	22.52	2.64	21.19	1.82	21.74	1.51	15.46
80	741928	9667848	2640	32.22	20.06	2.43	18.96	1.66	18.94	1.22	32.22
81	742033	9667776	2639.87	12.66	19.06	2.48	18.92	1.66	18.21	1.25	12.66
82	741955	9667684	2606.09	15.53	18.73	2.40	17.26	1.59	17.35	1.16	15.53
83	741597	9667581	2560.01	15.28	19.61	2.48	18.09	1.59	18.49	1.20	15.28
84	741506	9667462	2548.37	25.02	19.04	2.59	17.47	1.59	17.56	1.28	25.02
85	739415	9667350	2775.15	29.65	22.75	2.73	22.34	1.62	21.46	1.41	29.65
86	741677	9668342	2684.15	32.47	23.46	2.68	21.97	1.88	22.71	1.57	32.47

87	741335	9668417	2718.25	31.66	24.45	2.76	22.37	1.84	23.07	1.60	31.66
88	741119	9668596	2743.1	29.35	24.22	2.89	23.91	1.82	23.40	1.76	29.35
89	740554	9668792	2752.73	21.36	21.91	2.88	27.82	1.93	22.75	1.88	21.36
90	740388	9668754	2772.64	23.76	21.47	2.86	27.31	1.97	22.24	1.85	23.76
91	740100	9668324	2751.43	18.53	20.85	2.72	25.41	1.74	21.02	1.50	18.53
92	739851	9668076	2763.14	15.81	20.97	2.52	22.99	1.77	20.58	1.39	15.81
93	739499	9667834	2778.32	23.56	21.95	2.73	23.20	1.74	21.47	1.50	23.56
94	737856	9667216	2959.58	43.31	25.53	2.35	28.04	1.75	25.73	1.32	43.31
96	737873	9667203	2954.41	24.10	25.48	2.31	29.42	1.75	26.26	1.29	24.10
97	737932	9667124	2921.6	23.67	25.09	2.19	26.77	1.65	24.88	1.14	23.67
98	737768	9666799	2976.76	18.67	23.39	2.50	23.68	1.58	22.83	1.17	18.67
99	737854	9666878	3000	32.20	23.99	2.32	24.54	1.57	23.41	1.08	32.20
100	736613	9666238	3083.92	26.60	23.35	2.25	23.97	1.76	22.77	1.06	26.60
101	736856	9666369	3052.71	21.09	24.12	2.28	25.85	1.71	24.13	1.06	21.09
102	739757	9668241	2840.32	24.15	20.98	2.65	25.29	1.94	21.56	1.60	24.15
103	739862	9667928	2688.3	26.57	20.84	2.57	22.34	1.66	19.79	1.36	26.57

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7 se puede ver la comparativa entre las diferentes metodologías para el metal pesado Cd.

Tabla 7. Exactitud predicción y error estándar del Cd.

PUNTO	X	Y	Z	Cd	KRIGING		KRIGING		KRIGING		INVERSO A LA
					SIMPLE (ppm)	StdError	ORDINARIO (ppm)	StdError	UNIVERSAL (ppm)	StdError	DISTANCIA (ppm)
					Predicted	StdError	Predicted	StdError	Predicted	StdError	Predicted
1	740432	9667117	2580.31	11.053	2.19	1.32	1.63	1.35	1.51	1.40	1.48
2	740363	9667191	2586.38	10.653	2.21	1.35	1.45	1.38	1.43	1.45	2.24
3	740387	9667087	2586.42	5.2844	2.16	1.34	1.73	1.37	1.61	1.43	0.00
4	742286	9666728	2479.91	5.3848	3.01	1.34	2.30	1.34	2.39	1.44	5.48
5	742276	9666640	2471.71	15.156	3.45	1.36	3.16	1.36	3.04	1.46	3.75
6	742692	9666891	2425.8	26.727	3.04	1.38	3.15	1.38	2.56	1.53	0.00
7	737528	9664975	2979.38	23.064	3.25	1.46	3.69	1.55	3.24	1.66	2.40
8	741995	9666578	2462.5	22.515	3.27	1.49	3.05	1.57	3.07	1.79	1.13
9	740451	9667265	2573.2	23.971	2.21	1.39	1.46	1.42	1.54	1.53	0.00
10	741542	9666069	2338.08	7.9478	4.26	1.52	5.47	1.77	5.28	1.90	1.45
11	737659	9664724	3000	14.531	2.83	1.53	3.48	1.73	2.41	1.91	0.00
12	739162	9667404	2832.2	17.784	3.09	1.52	2.80	1.70	2.64	1.87	2.82
13	736350	9666500	3120	35.539	3.53	1.50	4.23	1.68	3.61	1.83	1.98
14	740728	9667205	2560	10.879	2.71	1.51	1.45	1.63	1.97	1.85	3.84
15	736733	9666562	3060.56	49.198	3.37	1.49	3.87	1.61	3.13	1.80	1.81
16	736767	9665380	2955.38	11.543	4.58	1.45	5.42	1.56	5.09	1.68	9.10
17	736911	9665111	2947.94	13.695	3.85	1.48	4.25	1.67	4.35	1.81	1.38
18	736534	9666172	3091.93	12.068	4.16	1.43	4.79	1.51	4.52	1.67	4.40
19	738123	9667197	2924.09	25.264	3.21	1.42	2.81	1.50	2.81	1.63	3.58
20	737336	9665121	2956.18	7.8978	3.81	1.46	3.82	1.57	4.00	1.71	2.66
21	737049	9666029	2962.39	26.166	5.80	1.29	6.12	1.32	6.84	1.40	4.07
22	738009	9667011	2936.8	23.84	2.92	1.36	2.57	1.33	2.57	1.44	0.00

23	737457	9665681	2878.85	26.004	4.34	1.55	4.68	1.76	4.60	2.01	4.70
24	736103	9666456	3161.76	24.072	3.80	1.55	4.80	1.82	4.16	2.00	5.61
25	738486	9667133	2910.81	18.388	3.83	1.50	3.51	1.66	3.96	1.86	4.58
26	738786	9666940	2775.56	15.839	4.55	1.48	4.23	1.63	4.81	1.77	11.30
27	739058	9667069	2784.66	36.553	3.35	1.52	3.36	1.67	3.43	1.85	0.00
28	738645	9666008	2663.23	26.981	4.30	1.48	4.15	1.56	4.30	1.78	1.75
29	738195	9666212	2746.78	12.818	4.10	1.43	4.24	1.48	4.33	1.64	6.00
30	738278	9665888	2723.6	16.174	4.39	1.32	4.56	1.32	4.82	1.40	6.58
31	737065	9666028	2959.89	13.489	5.78	1.31	5.90	1.33	6.65	1.43	8.38
32	738586	9666824	2765.87	28.44	3.97	1.48	3.64	1.62	4.05	1.76	3.23
33	736929	9665443	2930.58	18.008	4.17	1.42	5.01	1.46	4.64	1.59	0.00
34	738018	9665813	2764.33	19.608	3.64	1.48	3.98	1.56	3.66	1.76	0.00
35	738296	9665704	2761.33	10.881	4.81	1.45	4.73	1.50	4.96	1.67	9.85
36	738423	9666035	2680	10.738	4.85	1.39	4.60	1.39	4.94	1.50	10.54
37	738424	9666493	2773.66	11.675	3.44	1.46	3.30	1.52	2.94	1.71	0.00
38	736876	9665945	2984.08	14.467	6.03	1.37	6.42	1.34	7.02	1.48	10.11
39	736949	9666034	2984.62	24.68	6.22	1.30	6.41	1.26	7.06	1.33	14.04
40	737113	9665165	2946.31	15.364	4.45	1.45	4.08	1.51	4.45	1.65	10.33
41	737734	9664976	2954.48	20.794	3.12	1.50	3.63	1.65	3.00	1.80	2.82
42	739237	9666151	2617.26	25.692	4.53	1.37	5.46	1.46	5.46	1.52	4.22
43	738295	9666362	2763.07	16.606	3.54	1.43	3.56	1.45	3.57	1.60	2.41
44	739077	9666196	2638.95	21.595	4.31	1.45	4.44	1.55	4.52	1.69	3.79
45	736779	9665585	2957.14	22.743	4.48	1.45	5.64	1.54	5.25	1.70	1.84
46	738252	9665889	2725.83	21.546	4.22	1.32	4.49	1.32	4.72	1.40	0.00
47	737004	9666253	2989.39	16.548	4.91	1.40	5.26	1.38	5.45	1.53	5.57
49	740147	9666714	2530.08	20.297	3.40	1.48	2.92	1.60	3.38	1.77	6.72
50	740217	9666825	2548.9	11.291	2.74	1.45	2.05	1.51	2.33	1.67	0.00
51	740689	9666340	2485.23	14.014	2.86	1.57	2.21	1.82	2.29	2.04	0.00
52	740281	9665350	2433.38	18.882	3.11	1.62	5.25	2.00	3.50	2.20	0.00

53	739371	9665995	2648.21	8.3748	4.97	1.47	6.11	1.64	6.05	1.77	9.65
54	740930	9665655	2373.45	16.655	4.86	1.56	5.67	1.87	5.78	2.03	10.33
55	740621	9665922	2435.32	20.957	3.73	1.56	3.56	1.80	3.58	1.98	3.92
56	739767	9666366	2495.24	18.021	3.69	1.50	3.18	1.65	3.44	1.81	2.34
57	741120	9665970	2360	18.004	3.82	1.54	4.11	1.77	3.79	1.95	2.14
58	739635	9666361	2518.86	25.298	3.88	1.48	3.61	1.62	3.86	1.77	4.24
59	739230	9666098	2639.9	15.887	4.66	1.37	5.02	1.49	5.17	1.53	5.62
60	743376	9667611	2320	17.666	4.17	1.58	5.97	2.01	6.60	2.17	6.27
61	743458	9666736	2343.07	15.62	4.64	1.50	6.09	1.82	5.13	1.92	2.61
62	743284	9666747	2344.35	12.804	5.40	1.42	6.05	1.49	5.96	1.57	9.30
63	743148	9666845	2320	13.157	5.22	1.44	5.71	1.50	6.03	1.67	8.66
64	743168	9666586	2360.2	15.891	5.21	1.47	6.67	1.60	6.38	1.75	5.48
65	742850	9666198	2362.88	15.922	6.80	1.57	9.70	1.86	9.49	2.08	14.82
66	741690	9665927	2336.44	15.961	5.45	1.52	7.31	1.76	6.93	1.89	8.57
67	742078	9665928	2349.69	13.022	7.28	1.54	11.06	1.80	11.16	1.95	14.82
68	742369	9665981	2374.1	13.092	7.41	1.55	11.06	1.76	10.99	1.96	14.82
69	743048	9667493	2374.91	13.237	3.55	1.53	3.17	1.77	3.86	1.95	0.00
70	742763	9667261	2423.89	15.717	4.12	1.37	3.39	1.43	3.95	1.53	14.82
71	742718	9667270	2436.98	10.492	3.69	1.37	2.93	1.42	3.53	1.53	0.00
72	742682	9667103	2432.95	10.468	2.91	1.34	2.71	1.32	2.90	1.41	0.00
73	742659	9667009	2430.6	13.213	2.79	1.34	2.53	1.33	2.36	1.44	0.00
74	742475	9666644	2454.51	15.901	3.20	1.38	3.53	1.39	3.14	1.53	0.00
75	742390	9666731	2472.75	21.302	3.00	1.33	2.80	1.31	2.40	1.41	0.00
76	741862	9667007	2569.06	18.554	2.20	1.45	1.36	1.52	1.30	1.68	0.00
77	741807	9666913	2551.62	15.918	2.46	1.46	1.35	1.54	1.36	1.70	1.52
78	741770	9667324	2598.67	15.973	2.07	1.47	0.95	1.54	1.12	1.72	1.53
79	741788	9668231	2680	15.464	2.40	1.49	1.43	1.61	1.93	1.78	1.48
80	741928	9667848	2640	32.216	1.92	1.42	0.56	1.50	0.78	1.61	0.00
81	742033	9667776	2639.87	12.657	2.06	1.42	1.45	1.52	1.44	1.64	1.46

82	741955	9667684	2606.09	15.535	1.91	1.42	1.27	1.47	1.27	1.59	0.00
83	741597	9667581	2560.01	15.275	2.10	1.46	0.98	1.53	1.22	1.68	1.46
84	741506	9667462	2548.37	25.022	2.26	1.48	1.07	1.60	1.31	1.77	1.42
85	739415	9667350	2775.15	29.655	2.82	1.53	1.55	1.72	1.77	1.90	1.53
86	741677	9668342	2684.15	32.474	2.47	1.50	2.19	1.69	2.52	1.81	1.53
87	741335	9668417	2718.25	31.662	2.53	1.53	1.07	1.74	1.40	1.89	1.49
88	741119	9668596	2743.1	29.346	2.66	1.56	1.11	1.82	1.50	2.00	1.51
89	740554	9668792	2752.73	21.357	2.69	1.54	1.42	1.77	1.51	1.92	1.52
90	740388	9668754	2772.64	23.762	2.67	1.53	1.67	1.75	1.79	1.89	1.50
91	740100	9668324	2751.43	18.533	2.53	1.54	1.50	1.70	1.40	1.91	1.51
92	739851	9668076	2763.14	15.807	2.42	1.44	1.66	1.53	1.71	1.61	1.51
93	739499	9667834	2778.32	23.558	2.63	1.54	1.95	1.75	1.99	1.95	1.49
94	737856	9667216	2959.58	43.309	2.99	1.34	2.65	1.40	2.50	1.51	3.10
96	737873	9667203	2954.41	24.1	2.94	1.32	2.72	1.39	2.55	1.47	1.52
97	737932	9667124	2921.6	23.671	2.92	1.31	2.73	1.28	2.64	1.33	2.26
98	737768	9666799	2976.76	18.671	3.29	1.46	3.49	1.56	3.44	1.74	1.52
99	737854	9666878	3000	32.196	3.39	1.40	3.01	1.41	2.97	1.54	6.21
100	736613	9666238	3083.92	26.603	4.06	1.39	4.41	1.41	4.10	1.54	2.29
101	736856	9666369	3052.71	21.085	4.02	1.41	4.37	1.42	4.00	1.55	1.50
102	739757	9668241	2840.32	24.155	2.56	1.50	1.85	1.63	1.83	1.78	1.53
103	739862	9667928	2688.3	26.568	2.42	1.48	1.59	1.57	1.60	1.73	1.51

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8 se puede ver la comparativa entre las diferentes metodologías para el metal pesado Zn.

Tabla 8. Exactitud predicción y error estándar del Zn.

PUNTO	X	Y	Z	Zn	KRIGING		KRIGING		KRIGING		INVERSO A LA
					SIMPLE (ppm)		ORDINARIO (ppm)		UNIVERSAL (ppm)		DISTANCIA (ppm)
					Predicted	StdError	Predicted	StdError	Predicted	StdError	Predicted
1	740432	9667117	2580.31	47.73	61.8	20.4	85.75	16.9	52.73	0.48	47.73
2	740363	9667191	2586.38	56.9	59.54	20.85	84.22	17.04	61.9	0.57	56.9
3	740387	9667087	2586.42	66.49	69.53	20.99	87.61	16.75	71.49	0.66	66.49
4	742286	9666728	2479.91	52.41	51.35	21.42	44.23	14.84	57.41	0.52	52.41
5	742276	9666640	2471.71	39.62	52.23	21.66	44.48	15.12	44.62	0.4	39.62
6	742692	9666891	2425.8	18.46	47.19	23.58	50.53	14.34	23.46	0.18	18.46
7	737528	9664975	2979.38	25.66	55.41	24.44	71.57	18.96	30.66	0.26	25.66
8	741995	9666578	2462.5	47.6	59.27	26.47	45.18	16.55	52.6	0.48	47.6
9	740451	9667265	2573.2	23.65	52.49	22.3	79.96	17.61	28.65	0.24	23.65
10	741542	9666069	2338.08	64.75	71.44	25.9	62.13	19.62	69.75	0.65	64.75
11	737659	9664724	3000	34.01	54.29	26.19	61.09	23.38	39.01	0.34	34.01
12	739162	9667404	2832.2	22.58	58.46	26.31	79.07	19.82	27.58	0.23	22.58
13	736350	9666500	3120	53.11	69.36	26.05	73.66	20.69	58.11	0.53	53.11
14	740728	9667205	2560	46.98	59.82	26.49	74.84	18.86	51.98	0.47	46.98
15	736733	9666562	3060.56	24.57	56.37	25.95	81.4	18.75	29.57	0.25	24.57
16	736767	9665380	2955.38	41.97	64.17	24.08	80.87	18.52	46.97	0.42	41.97
17	736911	9665111	2947.94	116.05	105.96	25.42	85.22	19.58	121.05	1.16	116.05
18	736534	9666172	3091.93	31.54	69.89	24.26	68.3	16.73	36.54	0.32	31.54
19	738123	9667197	2924.09	77.29	82.82	24.41	119.09	16.93	82.29	0.77	77.29
20	737336	9665121	2956.18	86.19	92.52	25.14	77.75	17.16	91.19	0.86	86.19
21	737049	9666029	2962.39	82.35	79.29	20.42	79.11	15.04	87.35	0.82	82.35
22	738009	9667011	2936.8	58.36	117.7	22.37	121.29	15.48	63.36	0.58	58.36
23	737457	9665681	2878.85	81.84	77.97	27.43	78.98	17.34	86.84	0.82	81.84

24	736103	9666456	3161.76	106.7	82.18	26.5	80.6	24.67	111.7	1.07	106.7
25	738486	9667133	2910.81	117.27	88.34	26.67	95.07	17.35	122.27	1.17	117.27
26	738786	9666940	2775.56	62.71	73.77	25.55	72.06	17.41	67.71	0.63	62.71
27	739058	9667069	2784.66	72.01	69.37	26.6	69.79	18.51	77.01	0.72	72.01
28	738645	9666008	2663.23	62.18	66.78	26.12	50.52	16.31	67.18	0.62	62.18
29	738195	9666212	2746.78	54.31	58.74	24.68	77	15.56	59.31	0.54	54.31
30	738278	9665888	2723.6	60.41	60.6	20.98	61.35	16.08	65.41	0.6	60.41
31	737065	9666028	2959.89	64.45	78.88	20.9	79.65	15.14	69.45	0.64	64.45
32	738586	9666824	2765.87	78.16	78.09	25.73	78.95	16.4	83.16	0.78	78.16
33	736929	9665443	2930.58	64.31	73.13	24.04	80.42	16.23	69.31	0.64	64.31
34	738018	9665813	2764.33	77.53	70.64	25.85	68.85	17.07	82.53	0.78	77.53
35	738296	9665704	2761.33	69.25	67	24.51	57.24	18.01	74.25	0.69	69.25
36	738423	9666035	2680	57.11	59.93	23.48	58.9	15.36	62.11	0.57	57.11
37	738424	9666493	2773.66	86.25	71.09	25.41	75.53	15.62	91.25	0.86	86.25
38	736876	9665945	2984.08	104.33	81.57	23	74.73	14.54	109.33	1.04	104.33
39	736949	9666034	2984.62	89.26	81.49	20.02	76.66	14.56	94.26	0.89	89.26
40	737113	9665165	2946.31	221.51	121.93	24.51	82.74	17.16	226.51	2.22	221.51
41	737734	9664976	2954.48	42.44	54.35	25.35	64.63	20.58	47.44	0.42	42.44
42	739237	9666151	2617.26	32.96	48.85	21.58	53.62	17.43	37.96	0.33	32.96
43	738295	9666362	2763.07	32.25	61.71	23.75	77.95	15.45	37.25	0.32	32.25
44	739077	9666196	2638.95	35.81	52	24.39	48.1	16.89	40.81	0.36	35.81
45	736779	9665585	2957.14	33.36	57.86	24.76	76.84	16.82	38.36	0.33	33.36
46	738252	9665889	2725.83	35.72	60.83	21.05	62.75	16.09	40.72	0.36	35.72
47	737004	9666253	2989.39	76.65	73.05	23.46	81.6	15.64	81.65	0.77	76.65
49	740147	9666714	2530.08	221.35	139.54	24.89	98.06	17.73	226.35	2.21	221.35
50	740217	9666825	2548.9	187.29	134.73	24.31	96.64	17.18	192.29	1.87	187.29
51	740689	9666340	2485.23	224.88	125.05	27.36	102.38	20.13	229.88	2.25	224.88
52	740281	9665350	2433.38	279.4	145.52	27.46	124.32	27.32	284.4	2.79	279.4
53	739371	9665995	2648.21	59.01	58.08	24.77	64.24	19.2	64.01	0.59	59.01

54	740930	9665655	2373.45	51.89	63.31	27.12	97.45	22.22	56.89	0.52	51.89
55	740621	9665922	2435.32	30.74	64.82	27.23	110.77	20.68	35.74	0.31	30.74
56	739767	9666366	2495.24	29.88	56.39	24.91	85.54	18.67	34.88	0.3	29.88
57	741120	9665970	2360	36.74	60.97	27.14	84.02	20.01	41.74	0.37	36.74
58	739635	9666361	2518.86	36.2	52.93	24.82	76.34	18.27	41.2	0.36	36.2
59	739230	9666098	2639.9	30.85	49.6	21.35	54.17	17.73	35.85	0.31	30.85
60	743376	9667611	2320	29.29	58.53	27.16	53.04	25.67	34.29	0.29	29.29
61	743458	9666736	2343.07	68.85	73.35	25.36	63.4	22.02	73.85	0.69	68.85
62	743284	9666747	2344.35	75.03	74.77	22.46	62.67	18.95	80.03	0.75	75.03
63	743148	9666845	2320	77.09	73.71	24.84	59.79	16.83	82.09	0.77	77.09
64	743168	9666586	2360.2	77.17	75.12	25.3	63.07	18.75	82.17	0.77	77.17
65	742850	9666198	2362.88	66.61	71.72	27.42	61.26	21.5	71.61	0.67	66.61
66	741690	9665927	2336.44	81.08	73.89	25.8	61.03	20.38	86.08	0.81	81.08
67	742078	9665928	2349.69	48.13	63.84	26.71	59.41	20.86	53.13	0.48	48.13
68	742369	9665981	2374.1	48.34	63.27	26.86	57.87	21.4	53.34	0.48	48.34
69	743048	9667493	2374.91	59.66	66.2	26.88	54.37	20.33	64.66	0.6	59.66
70	742763	9667261	2423.89	58.7	67.07	22.28	53.12	16.25	63.7	0.59	58.7
71	742718	9667270	2436.98	73.93	67.38	22.26	53.05	16.27	78.93	0.74	73.93
72	742682	9667103	2432.95	70.19	57.71	21.03	51.23	14.94	75.19	0.7	70.19
73	742659	9667009	2430.6	27.39	51.14	21.59	50.35	14.51	32.39	0.27	27.39
74	742475	9666644	2454.51	27.32	48.23	23.14	46.82	14.91	32.32	0.27	27.32
75	742390	9666731	2472.75	41.48	48.09	20.95	45.21	14.62	46.48	0.41	41.48
76	741862	9667007	2569.06	30.76	49.25	24.2	47.97	16.69	35.76	0.31	30.76
77	741807	9666913	2551.62	27.35	50.04	24.4	47.67	17.3	32.35	0.27	27.35
78	741770	9667324	2598.67	38.18	60.06	26.1	55.93	16.66	43.18	0.38	38.18
79	741788	9668231	2680	95.89	105.15	25.17	87.8	19.88	100.89	0.96	95.89
80	741928	9667848	2640	55.77	70.84	23.44	77.76	17.56	60.77	0.56	55.77
81	742033	9667776	2639.87	67.32	70.53	22.84	73.79	17.85	72.32	0.67	67.32
82	741955	9667684	2606.09	78.92	71.27	23.22	70.51	16.89	83.92	0.79	78.92

83	741597	9667581	2560.01	91.29	75.61	24.65	64.24	17.47	96.29	0.91	91.29
84	741506	9667462	2548.37	68.77	73.46	24.8	59.87	18.28	73.77	0.69	68.77
85	739415	9667350	2775.15	73.98	69.32	26.53	78.45	19.32	78.98	0.74	73.98
86	741677	9668342	2684.15	205.75	114.27	25	87.34	20.49	210.75	2.06	205.75
87	741335	9668417	2718.25	40.82	70.62	26.47	80.65	20.81	45.82	0.41	40.82
88	741119	9668596	2743.1	51.95	62.73	26.76	74.44	22.18	56.95	0.52	51.95
89	740554	9668792	2752.73	30.89	60.01	25.5	67.47	23.28	35.89	0.31	30.89
90	740388	9668754	2772.64	65.66	64.18	25.48	70.33	22.95	70.66	0.66	65.66
91	740100	9668324	2751.43	73.28	73.46	26.99	73.27	19.89	78.28	0.73	73.28
92	739851	9668076	2763.14	69.67	84.97	23.33	80.74	18.89	74.67	0.7	69.67
93	739499	9667834	2778.32	123.21	94.08	27.18	86.96	20.01	128.21	1.23	123.21
94	737856	9667216	2959.58	226.56	116.6	21.52	130.74	18.29	231.56	2.27	226.56
96	737873	9667203	2954.41	88	116.4	20.86	130.1	17.96	93	0.88	88
97	737932	9667124	2921.6	75.92	118.41	19.65	126.87	16.6	80.92	0.76	75.92
98	737768	9666799	2976.76	91.69	143.86	24.54	121.02	17.17	96.69	0.92	91.69
99	737854	9666878	3000	385.45	153.92	22.76	122.43	16.3	390.45	3.85	385.45
100	736613	9666238	3083.92	108.49	70.06	23.36	70.33	15.84	113.49	1.08	108.49
101	736856	9666369	3052.71	51.62	65.05	23.82	79.36	16.04	56.62	0.52	51.62
102	739757	9668241	2840.32	56.02	71.69	25.49	84.98	20.52	61.02	0.56	56.02
103	739862	9667928	2688.3	146.03	95.96	24.91	79.27	18.59	151.03	1.46	146.03

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Implicaciones de los resultados para la gestión de la contaminación de metales pesados

La identificación de patrones espaciales y la evaluación de la calidad de las interpolaciones generadas por diversos métodos geoestadísticos permitieron extraer conclusiones fundamentales para la gestión de la contaminación.

Algunas medidas que se pueden proponer en función a los mapas generados son las siguientes:

- Monitoreo continuo en las zonas de mayor concentración.
- Zonificación para la gestión.
- Remediación del suelo.
- Restauración ambiental.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La exploración y comparación de métodos de interpolación, Kriging Simple, Kriging Ordinario, Inverso a la Distancia y Kriging Universal, permitió conocer la forma en que trabajan estas técnicas, para el caso de estudio estos son los que más se ajustaron a las necesidades del proyecto.

El análisis exploratorio de las concentraciones de metales pesados, basado en el análisis de las muestras tomadas en campo, permitió la observación de las zonas de mayor concentración de Pb, Cd y Zn, la presencia anómala está en la parte Noroeste de la zona de estudio (valores de Pb: mayores a 30 ppm; valores de Zn: mayores a 100 ppm; valores del Cd: mayores a 7 ppm) y guarda relación con la existencia de la antigua mina “Armenonic” y su planta de beneficio, la anisotropía de las muestras está muy marcada en sentido Noreste-Suroeste.

Los métodos de Kriging Simple, Kriging Ordinario y Kriging Universal mostraron coherencia en la identificación de tendencias generales de concentración de metales pesados en la zona de estudio. Las áreas con altas concentraciones y las variaciones espaciales fueron consistentemente reflejadas por estos métodos, A pesar de la correlación en las tendencias generales, se observaron discrepancias en detalles locales. En algunas ubicaciones específicas, los resultados de Kriging Simple e Inverso a la Distancia difirieron de aquellos obtenidos mediante Kriging Ordinario y Kriging Universal.

Kriging Universal destacó al integrar información adicional y adaptarse a la complejidad de la variabilidad espacial de los metales pesados. Su capacidad para considerar múltiples fuentes

de datos resultó en una mayor consistencia y precisión en comparación con Kriging Simple, Kriging Ordinario e Inverso a la Distancia.

Por la inspección visual y los valores mean (0.01: Pb y 0.06: Zn) el método que se ajusta para el Pb y el Zn es el Kriging Universal, por otro lado, el valor mean del Cd: 0.007 nos sugiere que el modelo de dispersión a usarse es el del Inverso a la Distancia.

El análisis de la exactitud de predicción y error estándar de los métodos de interpolación (tablas 6, 7 y 8) nos indican al igual que el valor Mean que las estimaciones óptimas para la determinación de metales pesados son: Kriging Universal para el Pb y el Zn ya que arrojan valores de predicción similares con respecto a los datos de las muestras originales, el Cadmio presenta una variación significativa y un error alto por lo que se opta por escoger el método de Inverso a la Distancia, este no presenta una variación entre la predicción y los valores originales.

Recomendaciones

Se recomienda expandir y mantener un programa continuo de monitoreo ambiental en la Parroquia San Bartolomé.

Se sugiere la recopilación adicional de datos de campo para validar y mejorar la precisión de las interpolaciones. La inclusión de nuevos puntos de muestreo en áreas estratégicas proporcionará una validación de los resultados obtenidos y permitirá ajustes más precisos en la interpretación de la distribución espacial de los metales pesados.

Ampliar el monitoreo para incluir la calidad del agua, especialmente en fuentes cercanas a áreas con concentraciones elevadas de metales pesados. La evaluación del agua complementará la comprensión de las rutas de dispersión y proporcionará información crucial sobre los posibles impactos en los recursos hídricos locales.

BIBLIOGRAFÍA

- Alloway, B. J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (3rd ed.). Springer.
- ATLAS GEOLÓGICO MINERO DE ECUADOR. (2017). Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. Obtenido de <https://www.geoinvestigacion.gob.ec/atlas/Atlas-2017.pdf>
- Baena, E. G. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, 48-60.
- Chiles, J. P., & Delfiner, P. (2012). Geostatistics: Modeling spatial uncertainty (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Dr. Martín Díaz, D. R. (2009). GEOESTADISTICA APLICADA: Estimación Espacial. Obtenido de http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/gest/Presentaciones/CG6_2009.pdf
- EcuRed. (2000). Obtenido de <https://www.ecured.cu/Ars%C3%A9nico>
- García, C. G. (2008). Geoestadística. Obtenido de http://ocw.upm.es/proyectos-de-ingenieria/sistemas-de-informacion-geografica-tecnicas-cuantitativas-para-gestion-de-datos/contenidos/WEB/TEORIA/07exploracion_de_datos.pdf
- González, J. P. (10 de 2009). Contaminación y Fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de Suelos y Agua. Obtenido de Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo: <https://www.redalyc.org/html/939/93911243003/>

- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press.
- Harrison, R. M. (2008). Atmospheric particulate matter: research needs for the next decade. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(9), 1097-1103.
- Henao, R. G. (2000). INTRODUCCION A LA GEOESTADISTICA. Obtenido de ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/projects/Cursos_Talleres/Curso_R/DOCUMENTOS/LIBRO%20DE%20GEOESTADISTICA.pdf
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press.
- Lambert, R., Grant, C., & Sauvé, S. (2015). Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers. *Science of The Total Environment*, 532, 287-294.
- Mohan, S. V., Nithila, P., & Reddy, S. J. (2014). Estimation of heavy metal in drinking water and development of heavy metal pollution index. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 49(12), 1387-1398.
- Peralta, I. R. (2018). Determinación de la Dispersión Geoquímica de Pb en Sedimentos de afluentes del área de incidencia del proyecto minero Loma Larga. Obtenido de <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8227>
- Valencia, F (2017) “Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé”. Obtenido de <https://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/download/57/51/138>
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- World Health Organization. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization.

Anexos

*Anexo. 1. Resultados de laboratorio.**(Tomado de: Zonificación de metales pesados, Valencia (2017).*

QUIMICOS		Fecha: 2014/06/10
ORDEN No.: N/A	FECHA RECEPCIÓN:	FECHA DE ENTREGA:
CODIGO LAB: N/A	CLIENTE: Fernando Valencia	DIRECCIÓN: Universidad del Azuay
RUC/CEDULA: N/A	MUESTRA: Suelos	CANTIDAD: 104 muestras
CONDICION DE LA MUESTRA: Ambiente	MUESTREADO POR: Cliente	ANALISIS SOLICITADO: Pb, Cd, Zn

RESULTADOS

Muestra	Plomo	Cadmio	Zinc
	LD 0.41 ppm	LD 0.01 ppm	LD 0.02 ppm
1	11.053	1.480	47.731
2	10.653	2.245	56.901
3	5.284	< LD	66.487
4	5.385	5.480	52.409
5	15.156	3.752	39.621
6	26.727	< LD	18.459
7	23.064	2.399	25.662
8	22.515	1.131	47.600
9	23.971	< LD	23.653
10	7.948	1.448	64.746
11	14.531	< LD	34.055
12	17.784	2.825	22.581
13	35.539	1.983	53.113
14	10.879	3.840	46.981

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS.
El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.

Av. 24 de Mayo 7- 77 y Heras Maiz.
Teléfono: (593) 31 609-1000
Cuenca - Ecuador

www.azuay.edu.ec



REPORTE DE RESULTADOS QUÍMICOS

Código: SGCUDAL-F-004
Versión: 3
Fecha: 2014/06/10

Muestra	Plomo	Cadmio	Zinc
	LD 0.41 ppm	LD 0.01 ppm	LD 0.02 ppm
15	49.198	1.806	24.575
16	11.543	9.102	41.974
17	13.695	1.379	116.053
18	12.068	4.404	31.539
19	25.264	3.578	77.289
20	7.898	2.659	86.191
21	26.166	4.071	82.349
22	23.840	< LD	58.360
23	26.004	4.704	81.841
24	24.072	5.609	106.703
25	18.388	4.585	117.274
26	15.839	11.301	62.710
27	36.553	< LD	72.008
28	26.981	1.749	62.184
29	12.818	5.995	54.307
30	16.174	6.584	60.410
31	13.489	8.380	64.447
32	28.440	3.226	78.159
33	18.008	< LD	64.315
34	19.608	< LD	77.535
35	10.881	9.854	69.245

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS.
El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.





REPORTE DE RESULTADOS QUÍMICOS

Código: SGCUDAL-F-004
Versión: 3
Fecha: 2014/06/10

Muestra	Plomo	Cadmio	Zinc
	LD 0.41 ppm	LD 0.01 ppm	LD 0.02 ppm
36	10.738	10.543	57.111
37	11.675	< LD	86.246
38	14.467	10.110	104.334
39	24.680	14.036	89.257
40	15.364	10.328	221.514
41	20.794	2.819	42.436
42	25.692	4.224	32.958
43	16.606	2.413	32.251
44	21.595	3.787	35.806
45	22.743	1.836	33.357
46	21.546	< LD	35.724
47	16.548	5.568	76.646
48	23.589	< LD	75.656
49	20.297	6.718	221.351
50	11.291	< LD	187.295
51	14.014	< LD	224.880
52	18.882	< LD	279.398
53	8.375	9.648	59.009
54	16.655	10.326	51.893
55	20.957	3.925	30.738
56	18.021	2.344	29.880

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS.
El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.




**REPORTE DE RESULTADOS
QUÍMICOS**

 Código: SGCUDAL-F-004
 Versión: 3
 Fecha: 2014/06/10

Muestra	Piomo	Cadmio	Zinc
	LD 0.41 ppm	LD 0.01 ppm	LD 0.02 ppm
57	18.004	2.136	36.741
58	25.298	4.238	36.197
59	15.887	5.624	30.854
60	17.666	6.267	29.292
61	15.620	2.606	68.847
62	12.804	9.298	75.031
63	13.157	8.657	77.094
64	15.891	5.479	77.165
65	15.922	14.820	66.609
66	15.961	8.575	81.078
67	13.022	76.127	48.131
68	13.092	27.291	48.388
69	13.237	< LD	59.663
70	15.717	63.251	58.705
71	10.492	< LD	73.930
72	10.468	< LD	70.190
73	13.213	< LD	27.393
74	15.901	< LD	27.318
75	21.302	< LD	41.480
76	18.554	< LD	30.764
77	15.918	1.522	27.347

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS.
 El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.




**REPORTE DE RESULTADOS
QUÍMICOS**

 Código: SGCUDAL-F-004
 Versión: 3
 Fecha: 2014/06/10

Muestra	Plomo	Cadmio	Zinc
	LD 0.41 ppm	LD 0.01 ppm	LD 0.02 ppm
78	15.973	1.527	38.182
79	15.464	1.478	95.886
80	32.216	< LD	55.775
81	12.657	1.460	67.317
82	15.535	< LD	78.915
83	15.275	1.460	91.292
84	25.022	1.419	68.767
85	29.655	1.527	73.978
86	32.474	1.531	205.755
87	31.662	1.493	40.820
88	29.346	1.511	51.952
89	21.357	1.521	30.893
90	23.762	1.501	65.658
91	18.533	1.513	73.284
92	15.807	1.511	69.669
93	23.558	1.488	123.214
94	43.309	3.098	226.564
96	24.100	1.522	87.998
97	23.671	2.264	75.919
98	18.671	1.524	91.692
99	32.196	6.207	385.449

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS.
El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.





**REPORTE DE RESULTADOS
QUÍMICOS**

Código: SGCUDAL-F-004
Versión: 3
Fecha: 2014/06/10

Muestra	Plomo	Cadmio	Zinc
	LD 0.41 ppm	LD 0.01 ppm	LD 0.02 ppm
100	26.603	2.286	108.491
101	21.085	1.501	51.618
102	24.155	1.525	56.016
103	26.568	1.507	146.029
105	871.731	1.507	26372.919
106	127.522	1.488	4649.471

OBSERVACIONES:

Abreviaturas:

LD: Limite de detección

ppm: gramos/tonelada

N/A: No Aplica

Técnico Responsable

Directora de Calidad

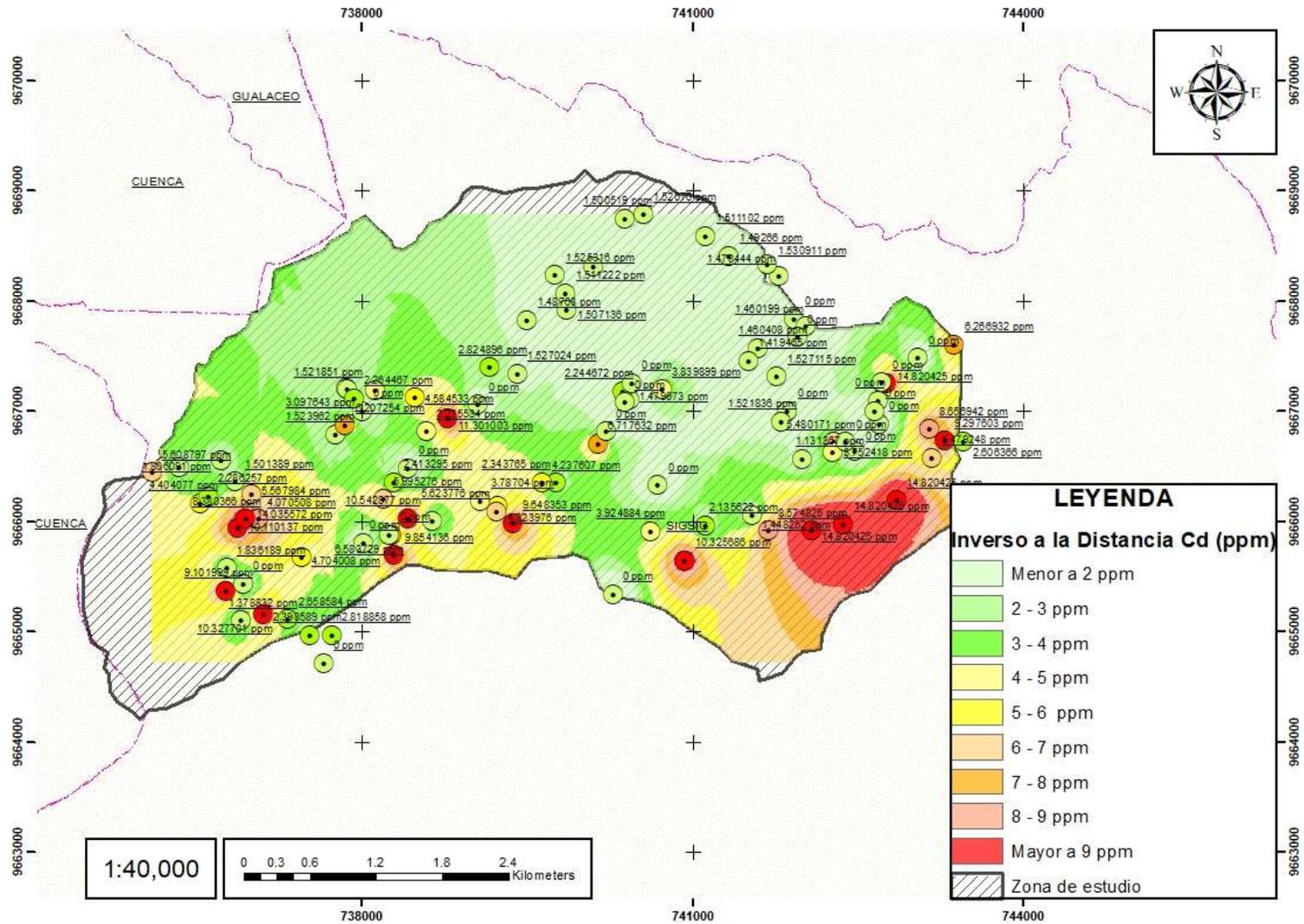
Director Técnico



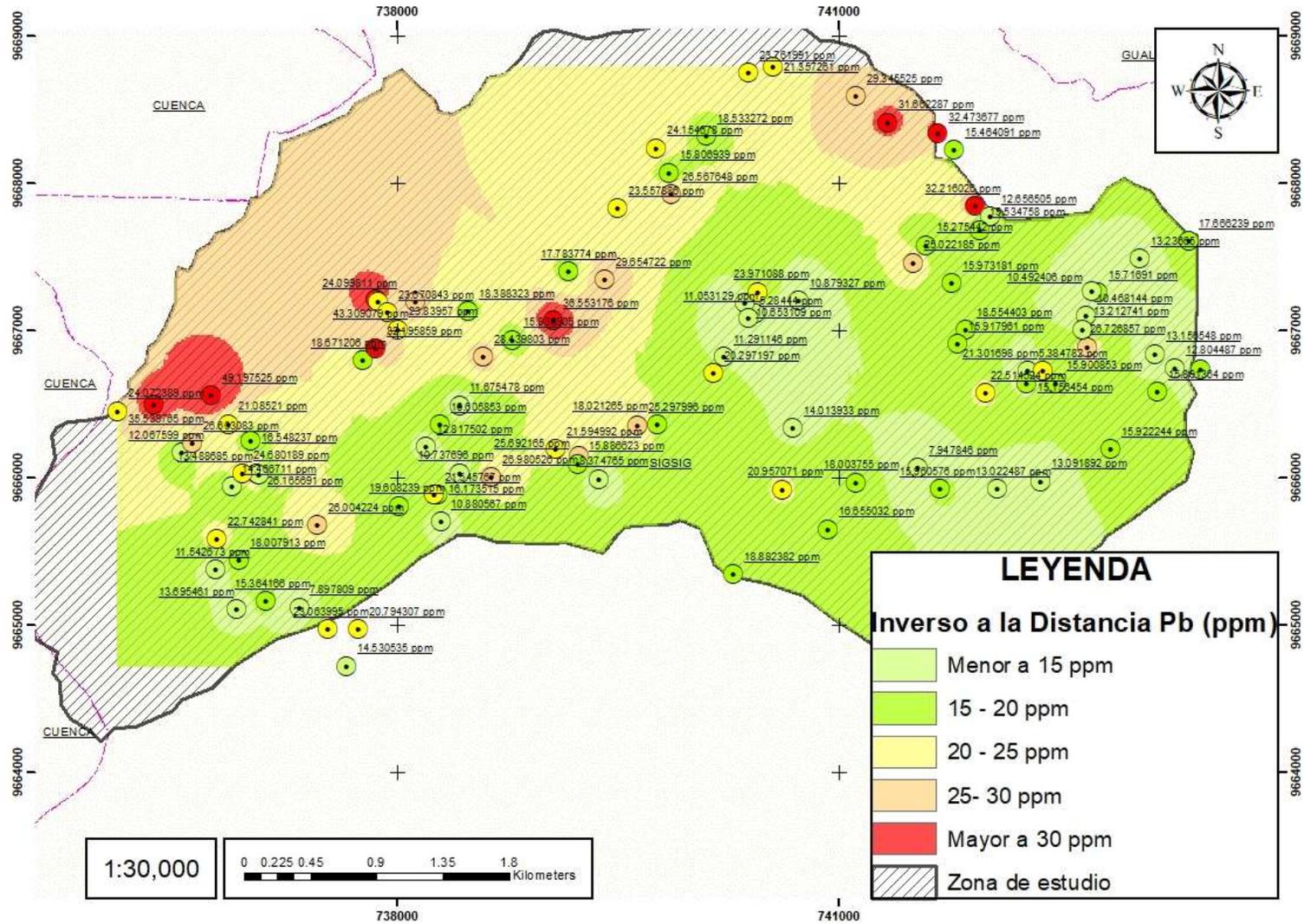
Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS.
El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.



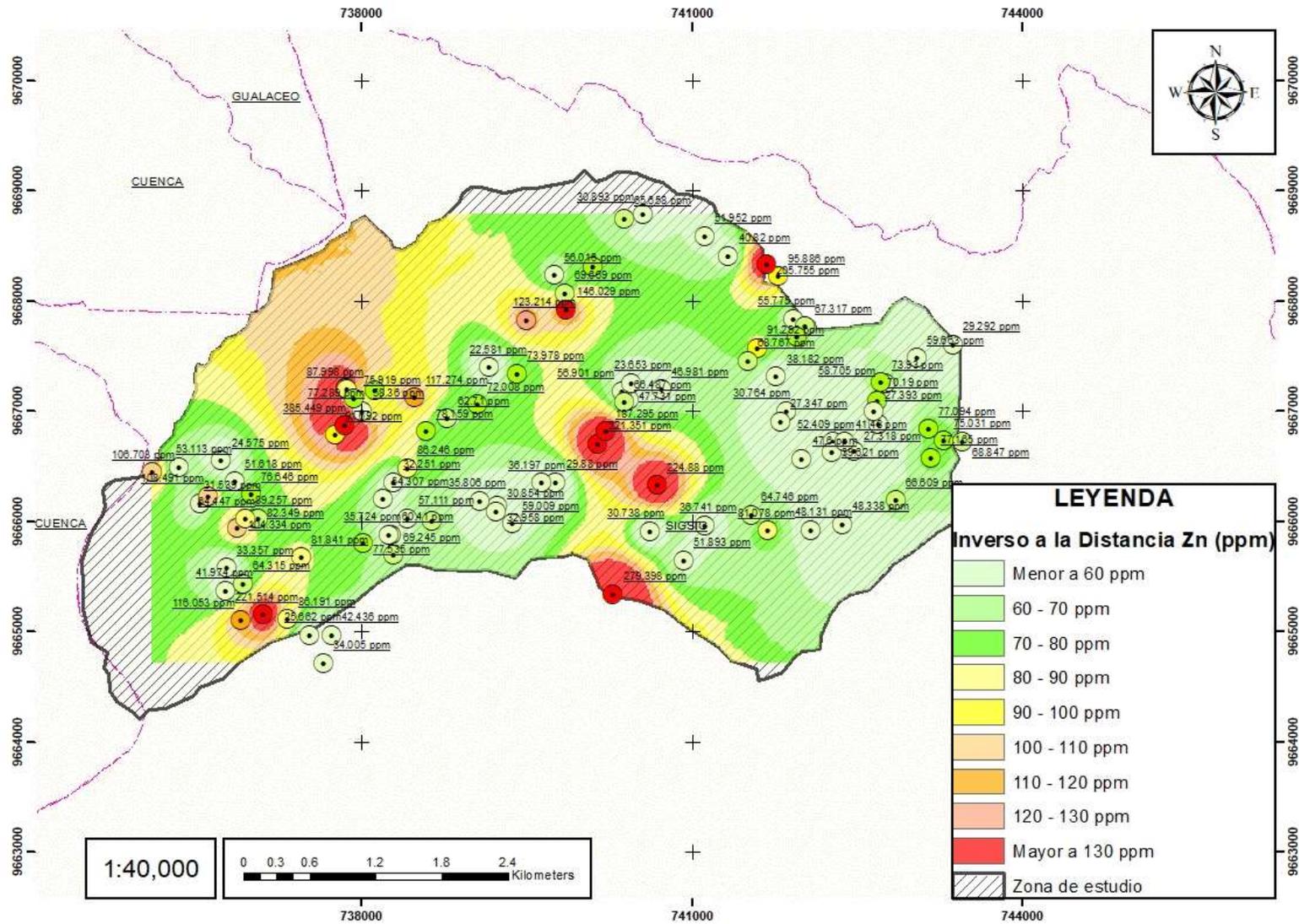
Anexo. 2. Validación método Inverso a la Distancia Cd.



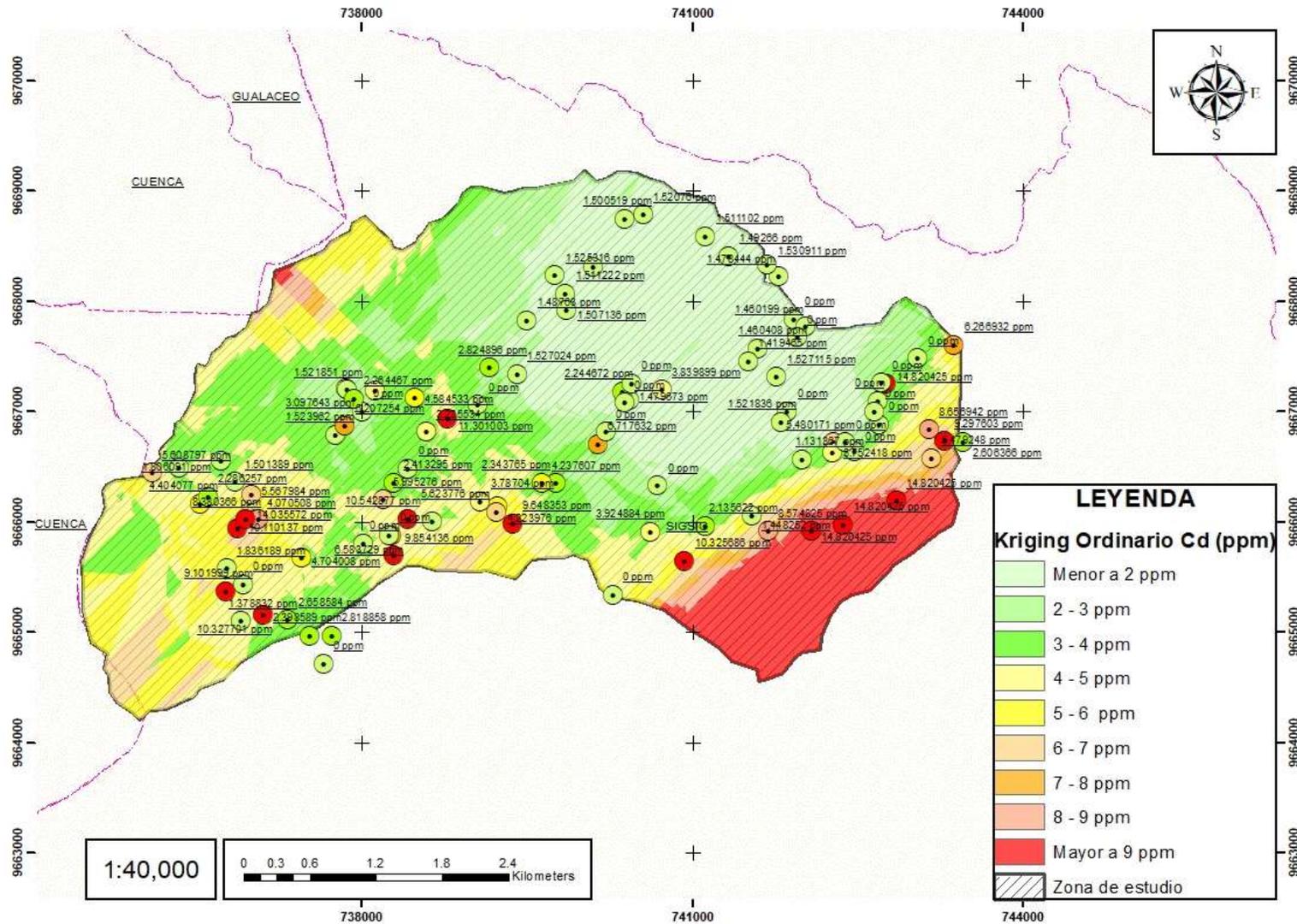
Anexo. 3. Validación método Inverso a la Distancia Pb.



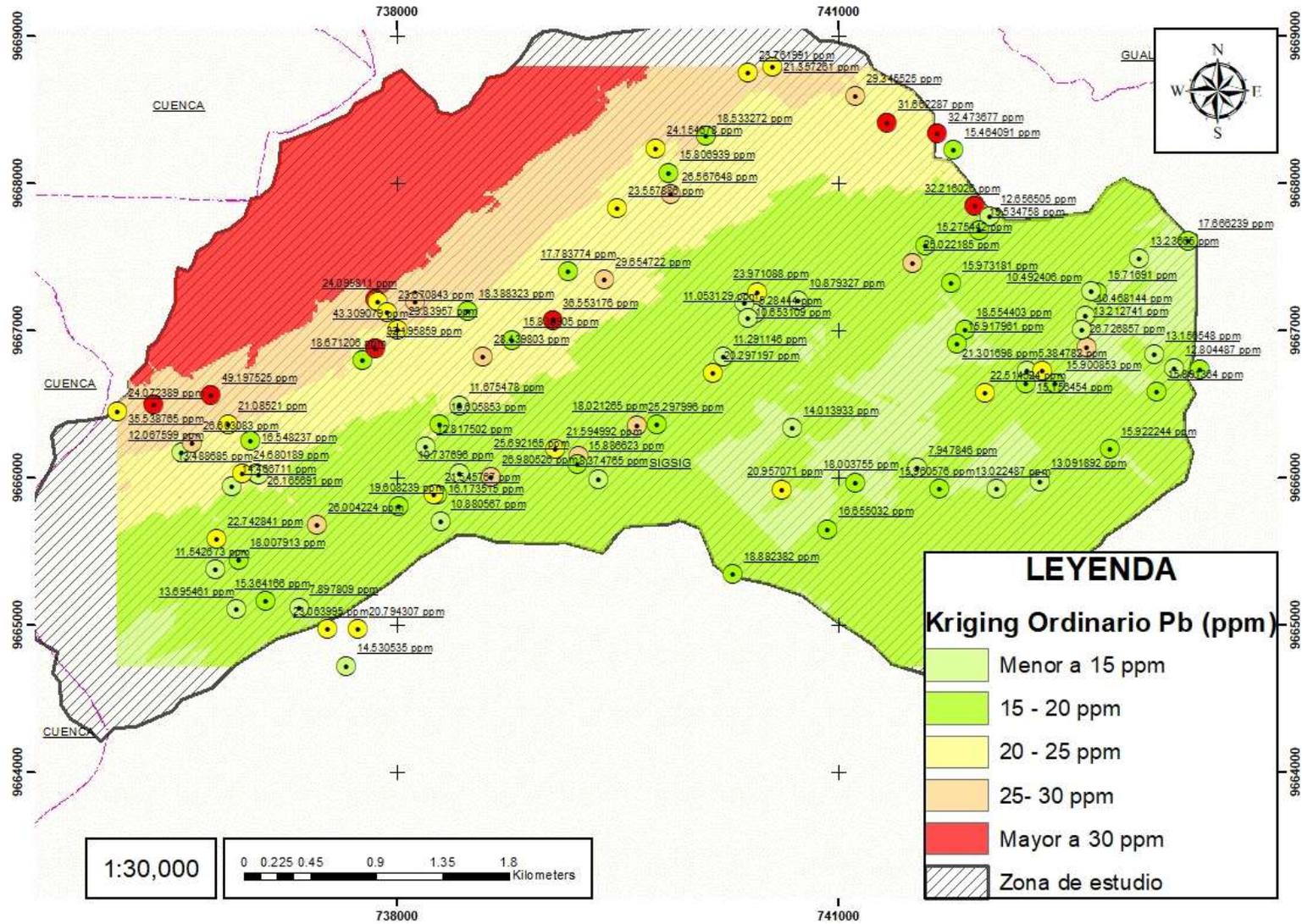
Anexo. 4 Validación método Inverso a la Distancia Zn.



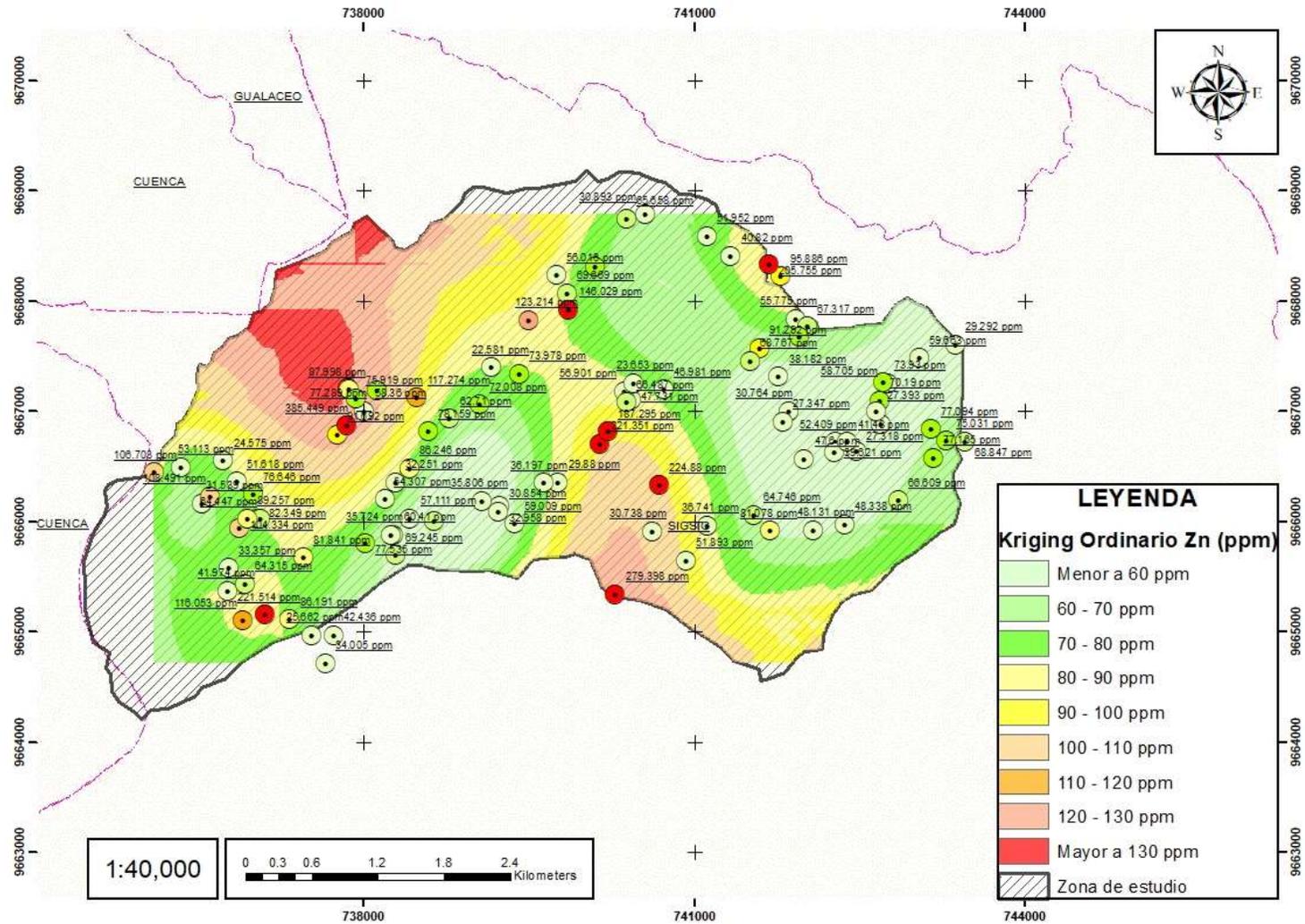
Anexo. 5 Validación método Kriging Ordinario Cd.



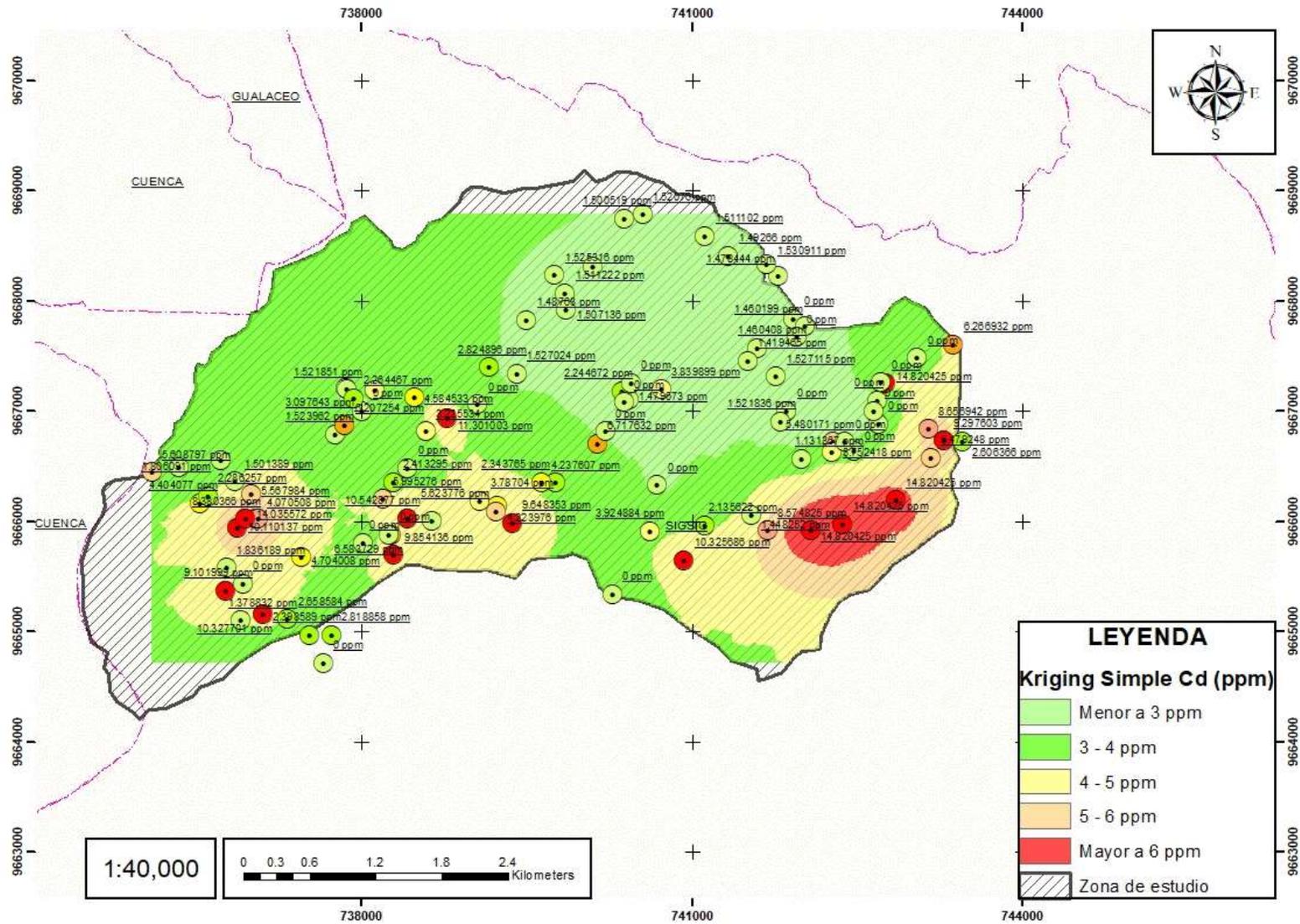
Anexo. 6. Validación método Kriging Ordinario Pb.



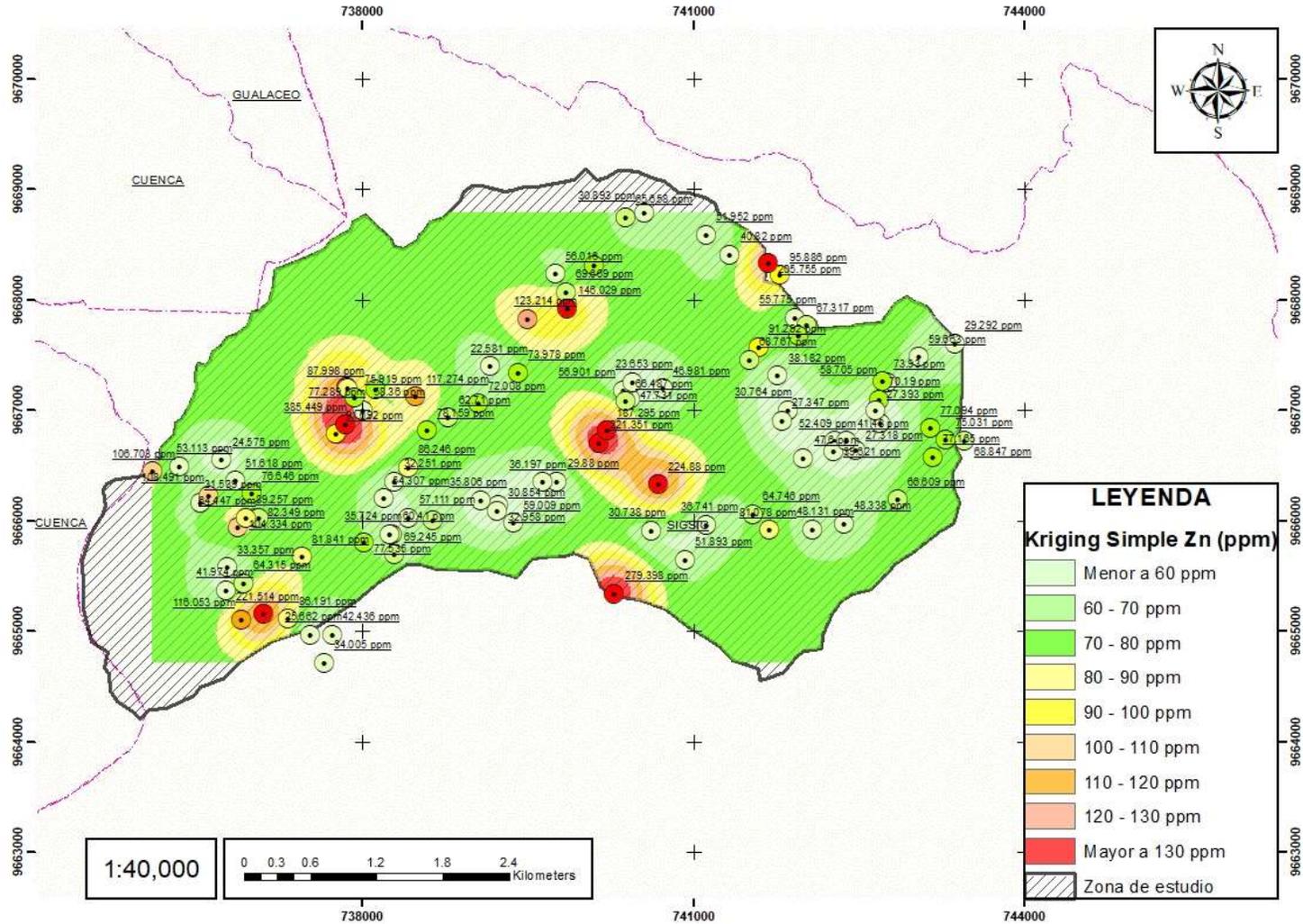
Anexo. 7. Validación método Kriging Ordinario Zn.



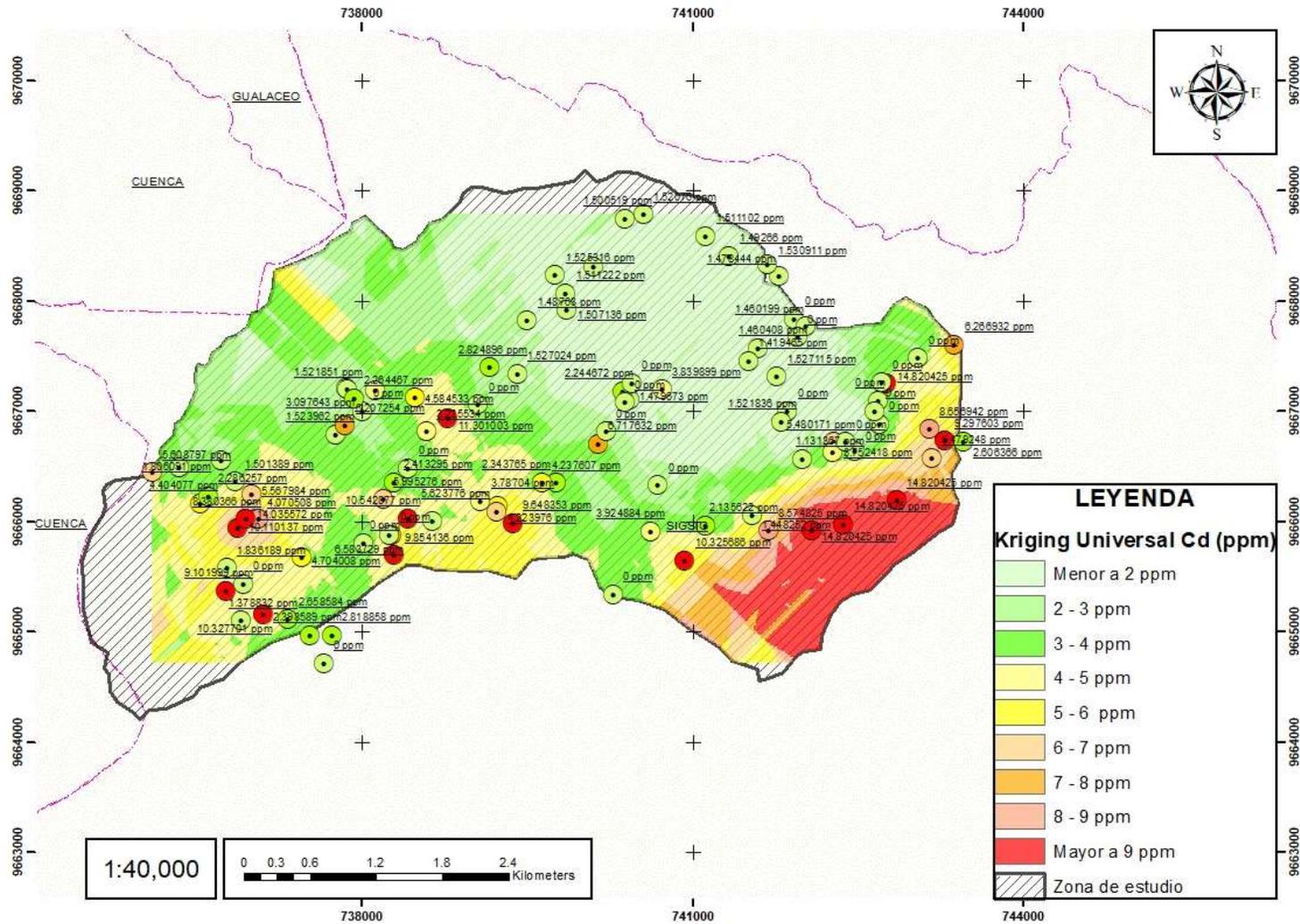
Anexo. 8. Validación método Kriging Simple Cd.



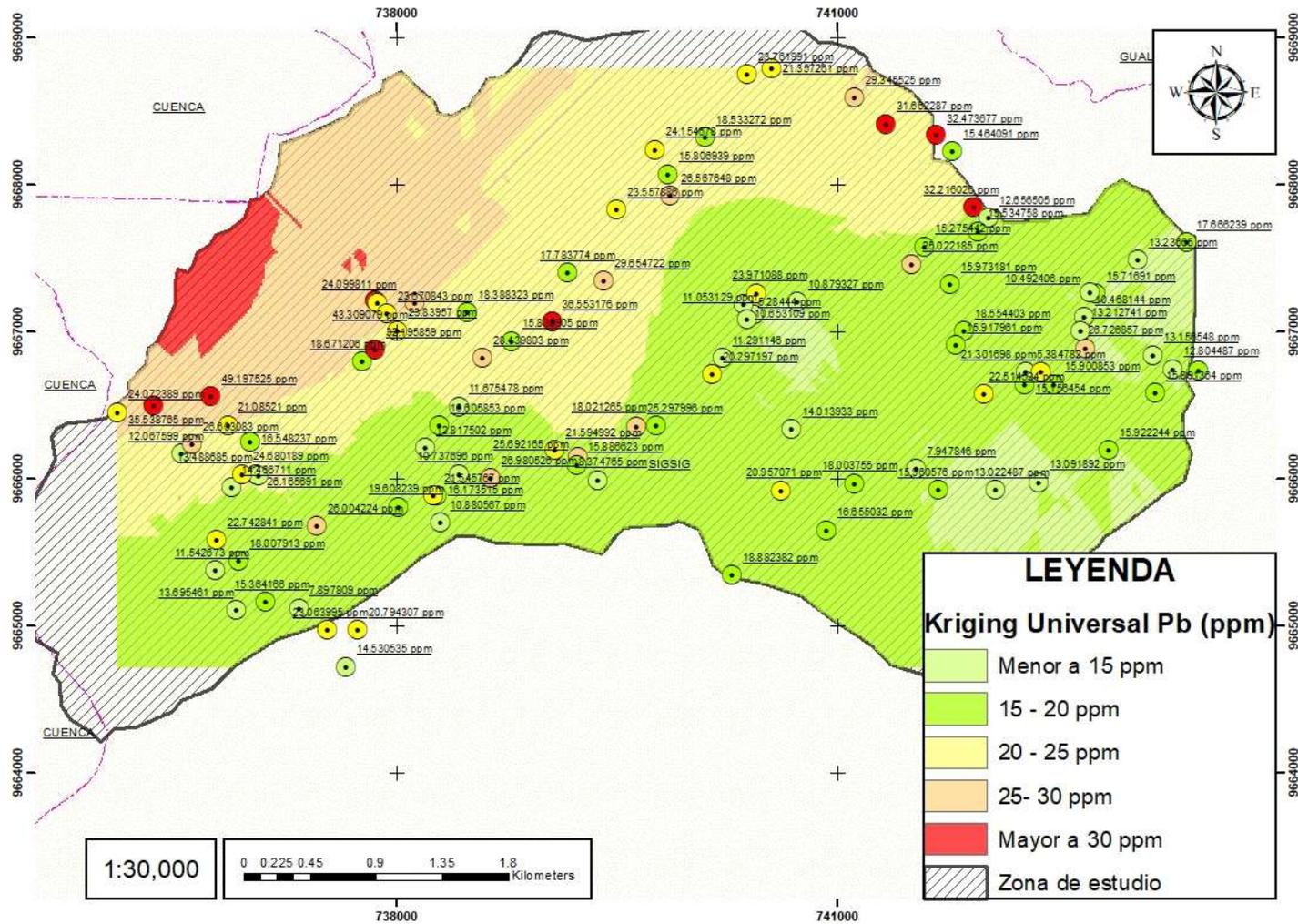
Anexo. 10 Validación método Kriging Simple Zn.



Anexo. 11. Validación método Kriging Universal Cd.



Anexo. 12 Validación método Kriging Universal Pb.



Anexo. 13. Validación método Kriging Universal Zn.

