



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS  
GEOESPACIAL PARA EL ESTUDIO DE  
SUELOS CONTAMINADOS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

**JULIO 2015**

**AUTOR:** ANTONIO HERNÁNDEZ CÁMARA

**TUTOR:** CELESTINO ORDÓÑEZ

1. RESUMEN.....	1
1.1. ABSTRACT.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. METALES PESADOS.....	3
3. OBJETIVOS.....	5
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
4.1. DATOS DE PARTIDA.....	6
4.2. ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	6
4.2.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO.....	6
4.2.2. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO.....	8
5. RESULTADOS.....	12
5.1. NIVELES DE REFERENCIA.....	12
5.2. RESULTADO DESCRIPTIVO.....	13
5.3 RESULTADO GEOESTADÍSTICO.....	16
5.3.1. VALORES ATÍPICOS ESPACIALES.....	16
5.3.2. PUNTOS CALIENTES (HOTSPOT).....	19
5.3.3. K DE RIPLEY.....	20
5.3.4. REGRESIÓN EXPLORATORIA.....	22
5.3.5. KRIGING.....	23
6. CONCLUSIONES.....	25
7. BIBLIOGRAFÍA.....	26
8. ANEXO I.....	27

## 1. RESUMEN

La contaminación por metales pesados en los suelos es un estudio que interesa para conocer las condiciones en las que se encuentra el medio ambiente, ya que la concentración de dichos metales influye en la calidad ambiental que afecta a las personas.

El presente trabajo llevará a cabo una serie de análisis descriptivos y geoespaciales que ayuden a entender el comportamiento de algunos metales pesados para una malla de puntos georeferenciados. El análisis de la distribución espacial y el conocimiento de las actividades antrópicas realizadas en la zona darán explicación a la localización de estos materiales en el terreno.

**Palabras Clave:** Metales pesados, Contaminación, Geoestadística, Distribución Espacial

### 1.1.ABSTRACT

Contamination in soils by heavy metals is a study interested to know the environment conditions, because the concentration of these metals infers on the environmental quality that affects people.

The study used descriptive and geospatial analysis to help understand the behavior of some heavy metals into grid squares of points. The analysis of the spatial distribution and knowledge of anthropogenic activities in the area will explain the location of these materials in the ground.

**Keywords:** Heavy metals, contamination, Geostatistics, Spatial Distribution

## 2. INTRODUCCIÓN

Desde años remotos, la minería es considerada una actividad mundialmente arraigada al ser humano. Esta labor, en distintas etapas de la historia ha despertado un gran interés por ser una disciplina muy ligada, entre otros aspectos, al comercio. La gran riqueza obtenida con la comercialización de algunos minerales, hizo crecer décadas atrás, el número de explotaciones mineras a un ritmo vertiginoso.

En aquella época, la ubicación de minas en un municipio o comarca se traducía en riqueza y prosperidad para la zona, siendo un reclamo importante para personas de áreas próximas, lo cual conllevaba un aumento de población. Pero el control de estas explotaciones no era tarea fácil y poco a poco se fueron regularizando las minas y pozos de extracción para tener un registro más exhaustivo de las tareas relacionadas con la metalurgia.

De acuerdo con todo el esplendor de la minería, la distribución de la concentración de metales en suelos ha sido siempre un tema bastante actual y estudiado en diversos períodos de tiempo y para distintos lugares. Se trata de un tema multidisciplinar que infiere en diferentes disciplinas académicas, interesando a ambientólogos, geólogos, geógrafos, ingenieros en minas y químicos, entre otros. Pero dicho interés también traspasa la frontera propiamente académica, por ser de relevante importancia para instituciones públicas, tanto a nivel municipal como a nivel autonómico o estatal.

El estudio que a continuación se lleva a cabo está centrado en una antigua zona minera en el Sur de la Península Ibérica. La extracción de Plomo (Pb) y otros compuestos como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la blenda ( $\text{ZnS}$ ), durante los siglos XVII-XVIII, convirtió esta zona en una importante área minera a escala provincial. Posteriormente, con la evolución de nueva maquinaria minera y la llegada del ferrocarril a la zona, el auge aún fue todavía mayor. Esta importancia de la industria minera propició que, en el área de estudio, también adquiriese relevancia la industria de la fundición.

Sin embargo, en los últimos años del siglo XIX, hubo una gran decadencia de la minería en dicho territorio debida, entre otros factores, a la segunda renovación tecnológica. La electrificación y modernización de las instalaciones, dejando en el olvido al vapor, hizo que muchos propietarios de las explotaciones mineras no fueran capaces de afrontar este cambio. Las profundidades a las que se debían descender para la extracción eran muy costosas y dejaron de ser tan rentables.

Por otro lado, el mercado hacía que el interés por un tipo de mineral u otro cambiase, favoreciendo a ciertas explotaciones y castigando a otras.

A lo largo de la historia, los altibajos de las extracciones mineras dan origen a que la actividad no sea persistente en el tiempo. Y aunque la actividad no sea constante, no se debe olvidar que la repercusión e impacto ambiental que unas extracciones mineras generan en el territorio son permanentes y de gran virulencia. Es por este motivo, donde se ve claro la necesidad de llevar a cabo estudios que ayuden a analizar el estado en el que se encuentran estas zonas con repercusión minera a lo largo de su historia. El análisis de los diferentes metales en el suelo ayudará también para entender el origen de la contaminación.

El uso de la Geoestadística y de los sistemas de información geográfica será importante para conocer la distribución espacial de metales pesados en suelos. En primer lugar, la Geoestadística nos servirá para analizar los diferentes datos que se tienen y poder entender la gran cantidad de información que estos poseen. Y en segundo lugar, los sistemas de información geográfica no ayudarán a representar todos estos datos espacialmente.

## **2.1 METALES PESADOS**

Se entiende por “metales pesados” a aquellos elementos que tienen una gravedad específica mayor que 5 y que poseen un valor atómico superior a 20. Aunque se trata de un término muy familiar, ha sido catalogado como ambiguo por algunas instituciones ya que la definición presenta algunas incoherencias de carácter científico. Por este motivo, también es usado el término “metales tóxicos”

Estarían dentro de este grupo los siguientes elementos de la tabla periódica: Aluminio (Al), Arsénico(As), Bario(Ba), Berilio(Be), Cadmio(Cd), Cobalto(Co), Cobre(Cu), Cromo(Cr), Estaño(Sn), Hierro(Fe), Manganeso(Mn), Mercurio(Hg), Molibdeno(Mo), Níquel(Ni), Plata(Ag), Plomo(Pb), Selenio(Se), Talio(Tl), Vanadio(V), Zinc(Zn).

Para el siguiente proyecto solo se analizarán los datos correspondientes a los metales: Cu, Pb; Zn; Ag; As; Cd; Sb.

### ***Cadmio (Cd)***

Es un metal que puede encontrarse en la corteza terrestre con un contenido medio de 0.1 mg/Kg <sup>(1)</sup>. Hay que destacar que se trata de un metal con un valor de toxicidad elevado. Si bien es cierto que puede aflorar tanto en rocas ígneas y sedimentarias en una similar proporción, es

importante apuntar que rara vez se encontrará el metal en su forma pura en la naturaleza. Tiene una vinculación muy grande con otro metal pesado el Zn, compartiendo, incluso, estructuras similares. Por último, también está asociado fuertemente con el Pb, y es en las extracciones de estos dos metales donde se puede encontrar mayor porcentaje de Cd.

### **Zinc (Zn)**

Puede considerarse como uno de los metales menos comunes que presentan una distribución uniforme entre las rocas magmáticas. En cambio, para el grupo de rocas sedimentarias se refleja un mayor porcentaje de representación en los suelos arcillosos. Su rango medio oscila entre 60 y 89 mg / kg <sup>(1)</sup>. La contaminación por este metal deriva de la acción antrópica a través de la industria y prácticas agrícolas.

### **Cobre (Cu)**

Se trata de un metal muy presente en la sociedad y tiene una producción mundial que ha ido creciendo a lo largo del tiempo. Sus valores medios en los suelos varían entre 14 y 109 mg / kg <sup>(1)</sup> y tiene una menor presencia en suelos arenosos. La presencia de este metal en el medioambiente puede explicarse tanto por factores humanos como por otros procesos de carácter natural (Incendios forestales, descomposición vegetal..), sin embargo, se produce un aumento de los valores del cobre en zonas vinculadas con actividades mineras.

### **Plata (Ag)**

Este metal posee unas características geoquímicas parecidas al Cobre, aunque su presencia en los suelos es mucho menor, estando su promedio entre 0.05 y 0.13 mg / kg <sup>(1)</sup>. Su presencia en la corteza terrestre es rara y se concentra principalmente en los basaltos y rocas ígneas. Al igual que muchos otros metales su presencia es mayor en zonas de desechos mineros.

### **Arsénico (As)**

Con presencia en más de 200 minerales, el Arsénico posee un valor medio en suelos de 6.83 mg / kg <sup>(1)</sup>. Es un metal que puede ser disuelto y absorbido por la materia orgánica. Posee una mayor representación en suelos sedimentarios. Su presencia también está relacionada a actividades industriales.

---

<sup>1</sup> Datos extraídos de KABATA-PENDIAS.A. "*Trace elements in soils and plants*".

### ***Antimonio (Sb)***

Este metal pesado presenta unas características geoquímicas parecidas al Arsénico, con el que presenta una estrecha relación. Tiene un valor medio de 0.2 mg/Kg <sup>(1)</sup> en la corteza terrestre que asciende a 4 mg/kg <sup>(1)</sup> en suelos arcillosos.

### ***Plomo (Pb)***

La forma más común en la que se presenta el plomo es la de sulfuro de plomo (Galena: PbS) teniendo una mayor repercusión en suelos formados por rocas ígneas y sedimentos arcillosos. Por otro lado, este metal se acumula cerca de la superficie del suelo.

El principal foco de contaminación de este metal se debe al proceso de fundición del mismo y ha sido uno de los mayores problemas metalúrgicos durante mucho tiempo, ya que se trata de un metal que ha sido extraído y explotado desde hace siglos.

## **3. OBJETIVOS.**

El presente estudio tiene como objetivo el analizar y representar espacialmente la concentración de metales pesados en el suelo para dar conocimiento de la distribución que estos presentan en el área de estudio.

A través del análisis geoestadístico se pretende dar respuesta a cómo los distintos elementos químicos están distribuidos a lo largo de la malla de puntos de la que partimos. Utilizando esta disciplina podemos representar los datos en diferentes gráficas y tablas que hagan más visibles y entendibles los valores registrados.

Por otro lado, el uso de GIS proporciona una gran variedad de herramientas de trabajo que hacen más fácil y entendible la distribución espacial de dichos elementos. A través de diferentes mapas, el estudio tiene como objetivo el simplificar la complejidad de algunos temas tratados. Es por esto, que se han llevado a cabo análisis descriptivos con el objetivo de conocer como los diferentes elementos estudiados se presentan en el terreno. Es decir, saber el nivel de concentración en el suelo, la relación con otros metales, el porqué de su presencia en la zona de estudio, etc.

Por último se busca dar respuesta a si los suelos analizados están dentro de los umbrales permitidos por las diferentes Administraciones Públicas que regulan estos parámetros.

#### **4. MATERIALES Y MÉTODOS.**

##### **4.1. DATOS DE PARTIDA**

En un primer momento se contaba con datos de concentración de 35 elementos químicos distintos en 126 puntos con sus correspondientes coordenadas X-Y. Después de la primera selección se creyó oportuno trabajar y analizar solo 7 de estos elementos (Cu;Pb;Zn;Ag;As;Cd;Sb). Se trata de elementos químicos con una alta vinculación a las actividades mineras y metalurgias, y además su presencia en el terreno tiene una gran repercusión en el medio ambiente. Posteriormente se han creado una serie de tablas con toda la información, tanto individual de cada elemento como del conjunto de datos, en formato Excel (.xlsx) las cuales se han transformado a un fichero (.csv) para poder exportar y trabajar con los datos conjuntamente tanto en el software estadístico "R", como en el potente software GIS "ArcGis".

##### **4.2. ANÁLISIS DE LOS DATOS.**

###### **4.2.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO.**

A través del software libre "R" y "R COMMANDER" se han realizado un conjunto de estadísticos que van a ser útiles a la hora de analizar el comportamiento y patrón de nuestros datos. "R" es un lenguaje de programación que nos brinda la posibilidad de realizar distintos análisis dentro del entorno estadístico, así como la representación gráfica de los resultados obtenidos. Todos estos procesos se han realizado utilizando el paquete "Funciones. R" diseñado por los profesores Gil González y Ana Colubi para trabajar en estadística aplicada al análisis territorial.

Uno de los objetivos marcados en el proyecto, es conocer la distribución estadística de cada elemento a través de un conjunto de estadísticos que la caracterizan. Por tanto se ha intentado resumir los mismos utilizando una estadística descriptiva y elaborando, posteriormente, una tabla (Tabla.1) representada en el apartado 5, donde se reflejan los siguientes parámetros: Mínimo, Máximo, Media, Mediana, Primer Cuartil, Tercer Cuartil, Desviación Estándar, Varianza, Coeficiente de Variación, Asimetría y Curtosis.

Cada uno de los mencionados parámetros nos proporciona un tipo de información diferente. Detallando uno a uno, la Media nos proporciona una visión de los datos más centralizada,



dejando de lado los datos extremos del mínimo y del máximo. Por otro lado, los Cuartiles son los encargados de dividir los datos en tres valores (Q1, Q2 y Q3), correspondiendo al 25%, 50% y 75%. En cuanto a la Desviación Estándar nos proporciona la información necesaria para conocer cuánto tienden a alejarse los valores en relación a la media.

En el Coeficiente de Variación (CV) es donde se explica la heterogeneidad u homogeneidad de los datos. Un elevado Coeficiente se traduce en una heterogeneidad de los valores, mientras que un resultado más bajo nos indica la homogeneidad de estos.

Por último, la columna de Curtosis ayuda a conocer como se modifica la curva de distribución en relación con una curva estándar (normal).

Además, ha resultado necesario calcular los coeficientes de correlación entre los diversos metales, para tener conocimiento de sí entre los elementos existía algún tipo de relación lineal. Este valor está comprendido entre -1 y 1, ambos inclusive. Cuando el resultado  $|r|$  está cercano a 1, indica que existe una fuerte relación lineal o variabilidad entre los dos elementos. En consecuencia con esta explicación todos los valores poseen un valor de 1 entre ellos mismos. Si  $|r|$  está comprendido entre 0 y 1 se puede indicar que la variabilidad es débil. Se debe catalogar de variabilidad nula, a aquellos  $|r|$  que tengan un valor 0. Por el contrario, cuando los resultados obtenidos son de carácter negativo, se interpretará la variabilidad como inversa. Es decir, a medida que un elemento va creciendo el otro va disminuyendo. Los coeficientes obtenidos se registran en la Tabla 2 donde aparecen recogidos los coeficientes por cada par de elementos.

Por tal de tener una mejor representación de los datos y aprovechando el uso de otras herramientas en el software libre utilizado, se ha realizado una matriz de diagramas de dispersión Figura 1. En la Figura 1 se pueden observar tantas filas y columnas como de variables se poseen. Representadas en la diagonal del cuadro, se pueden apreciar una estimación Kernel de la densidad de las variables estudiadas. Si bien, es en el resto de casillas donde se representan los diagramas de dispersión correspondientes.

Analizando dicha gráfica se entiende que los datos representados en la segunda casilla (fila 1, columna 2) hacen referencia al diagrama de dispersión entre la variable Ag (eje de ordenadas) y As (eje de abscisas). En cambio, la casilla ubicada en la fila 2, columna 1, es la representación gráfica del diagrama de dispersión de la variable As (eje de las *y*) y Ag (ejes de las *x*).

Además de la información de la nube de puntos, se le ha indicado al programa que muestre las "Líneas de mínimos cuadrados", correspondientes a la regresión lineal de los diferentes elementos.

La última tarea realizada con “R”, ha sido la obtención de aquellos registros que pudieran considerarse “Outliers”. Este término se refiere a valores extremos o atípicos (*Freedman, Pisiani and Purves, 1978*). Es decir, se trata de un valor que es muy distinto a los otros que forman el conjunto de datos. Estos registros tienen una gran repercusión en el valor de la media, ya que si se eliminan aquellos valores estipulados como “outliers” la media se ve firmemente modificada.

Para poder desenmascarar aquellos valores anómalos se ha optado por utilizar las gráficas de cajas, donde se pueden observar estos valores de una forma clara y concisa. En estas gráficas se crea una caja para el conjunto de datos que presentan unos valores más cercanos. Es decir, se puede observar como la mayor parte de los registros están enmarcados en una caja, que podría ser denominada como el “cuerpo” de nuestro análisis. Por otro lado los “bigotes” nos muestran aquellos valores que no están comprendidos en la caja pero que no deberían ser catalogados como “outliers”. Por último, son los registros que están representados fuera de estos bigotes, los que deben señalarse como valores atípicos. Normalmente, los valores atípicos se deben a errores a la hora de tomar las muestras o de pasar los datos a la base de almacenamiento. Sin embargo, hay otros factores que pueden dar explicación a estos valores elevados, como la concentración de ciertos parámetros en un punto concreto. Dicha explicación se reflejará en el apartado de resultados.

#### **4.2.2 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO.**

El uso del software de pago ArcGis para el análisis geoestadístico es de gran relevancia, ya que el programa cuenta con una serie de herramientas bien diseñadas que ofrecen un amplio abanico de análisis y estudios que proporcionan una gran riqueza al proyecto final. El estudio realizado se ha centrado básicamente en el uso de la extensión “Geostatistical Analyst”, diseñada para dar respuesta espacial a aquellos elementos cargados previamente en el programa.

El objetivo de este análisis consiste en la representación gráfica, mediante mapas, de la distribución de los diferentes elementos químicos sobre el territorio. Posteriormente, con estos mapas, se podrá dar respuesta a los interrogantes que se presentan sobre porqué los elementos están más concentrados en una zona que en otra, y porqué presentan unos valores más elevados en unas zonas concretas que en otras.

Por este motivo, utilizando las distintas herramientas que se encuentran en ArctoolBox., se realiza el estudio correspondiente para poder localizar aquellos valores atípicos espaciales (Outliers). En el interior del maletín “Spatial Statistics Tools” están disponibles las herramientas “Mapping Cluster” donde se encuentra el script “Cluster and Outlier Analyst”.

El empleo de esta herramienta es bastante sencilla, ya que se debe indicar sobre qué capa se quiere analizar los registros, y como queremos analizarlos. En este caso, utilizamos la función que tiene en cuenta los valores de los elementos vecinos. A continuación, la capa de salida se modifica para mostrar exclusivamente los valores atípicos

El paso siguiente es obtener los puntos calientes (Hotspots) para cada malla de puntos. El análisis de puntos calientes, disponible en el mismo paquete de "tools" que el anterior, está asociado a la estadística  $G_i^*$  de Getis-Ord. Una vez cargada, en la capa de entrada, la malla de puntos de los elementos que se quieren analizar el programa dará salida a una nueva "feature class" (archivo). Es en su tabla de atributos, donde se puede apreciar los valores correspondientes a los nuevos campos generados por la herramienta: "puntuaciones Z" y "Valores-P". Cabe destacar que, por defecto, la capa de salida viene ya clasificada, mostrando un grupo de valores considerados "fríos", y otro grupo marcados como "calientes". También se señalan aquellos puntos "no significativos". Una vez plasmados los datos, se seleccionan aquellos puntos calientes que muestran un confianza de al menos un 95%, debido a que el resto de valores indicados no tienen ningún tipo de repercusión en este estudio.

La herramienta llama punto caliente a aquellos puntos que tienen un elevado valor, y que a su vez están rodeados por otros valores también elevados. El cálculo utilizado por ArcGis se muestra en las Ecuaciones 1,2 y 3(2):

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j}\right)^2}{n-1}}} \quad (1)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (2)$$

<sup>2</sup> ArcGis. (s.f.). "Ayuda del programa".

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (3)$$

Donde “Xi” es el valor de atributo de “j”; “Wij” es el peso espacial y “n” es igual al número total de valores.

Continuando con el análisis geoestadístico se utilizan dos herramientas para obtener algunos datos numéricos más. La herramienta “Regresión Exploratoria” ha sido utilizada para ver si la concentración de alguno de los metales pesados se puede explicar a partir de otros metales. Es decir, con una variable explicativa se intenta buscar la mejor variable dependiente.

Por otro lado, se realiza un estudio mediante la función K de Ripley para conocer si existen grupos en función de la distancia. El resultado es un conjunto de gráficas que serán analizadas en el apartado de resultados. El programa ArcGis ha realizado una modificación en la fórmula original empleando una transformación de la función K tal y como se refleja en la Ecuación 4. Donde “d” es la distancia; “n” el número total de valores; “A” el área total de los datos; “wi,j” el peso.

$$L(d) = \sqrt{\frac{A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n k_{i,j}}{\pi n(n-1)}} \quad (4)$$

Como se citó anteriormente, de vital importancia son las herramientas que la extensión “Geostatistical Analyst” brinda. En ella se pueden encontrar una serie de análisis estadísticos como: Histograma, NormalQQplot, Mapa de Voronoi, Análisis de tendencias y Semivariogramas

entre otros. Sin embargo, se utilizará el asistente de estadística “Statistical Wizard”, ya que proporciona el uso del método de interpolación del Krigeado.

A través de esta herramienta se generará una superficie estimada de la distribución de los datos que se tienen. Se ha seleccionado este tipo de interpolación, porque a diferencia de otras que el programa ofrece (IDW, Spline), el krigeado es una herramienta que tiene en cuenta la autocorrelación estadística de los datos. La fórmula usada se plasma en la Ecuación 5:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (5)$$

Donde  $Z(s_i)$  es el valor medio en la ubicación  $i$ ;  $\lambda_i$  ponderación desconocida para el valor medio de  $i$ ;  $s_0$  la ubicación de la predicción y  $N$  la cantidad de valores medios

Para poder obtener los resultados, se han de realizar unos datos previos que están muy bien marcados por el programa. En un primer paso, se deberá seleccionar la capa con la que se quiere trabajar, así como del elemento concreto que interesa estudiar. Una vez introducidos estos parámetros, el programa pide que se seleccione el método de interpolación, en este caso Krigeado. Posteriormente deberán seleccionarse el tipo de Kriging y la característica explicativa del mismo. En este caso, se seleccionó un Krigeado Ordinario. Será en este paso, donde se deberá indicar el tipo de transformación que se quiere aplicar a los datos.

Para poder aplicar la transformación oportuna, en relación a la normalidad de los datos, se usó la herramienta “Análisis de tendencias”, la cual proporciona una gráfica donde están representadas las variables X,Y,Z. Tras su previo estudio, se creyó oportuno realizar el krigeado con una transformación logarítmica.

En el tercer paso, se muestra la gráfica correspondiente al semivariograma. Si se desea, el programa también ofrece la gráfica de la covarianza. Es en este punto, donde se puede analizar la anisotropía, debiendo indicar si esta es verdadera o falsa, para una mejor definición del modelo de interpolación.

El último paso hace un resumen de diferentes gráficas estadísticas (Error, NormalQQplot, Predicción y el Error Estandarizado). Una vez hecho esto se muestra la distribución de los datos en la capa de salida.

## 5. RESULTADOS.

### 5.1. NIVELES DE REFERENCIA.

La concentración en porcentajes elevados (anómalos) de elementos químicos y sus compuestos en los suelos es lo que se denomina contaminación. Dicha presencia de elementos contaminantes, puede tener un origen natural o antropógeno. Es decir, en la naturaleza pueden existir elevadas cantidades de metales pesados que pueden proceder, en el mayor de los casos, de la roca madre que dio origen a los suelos. Aunque también se puede explicar por la actividad volcánica o del lixiviado de mineralizaciones (*Galán y Romero*). En el segundo de los casos, la actividad humana relacionada, entre otras, con la industria, agricultura y minería generan una serie de residuos con alto valor contaminante. En definitiva, se entenderá por elemento contaminante a aquel que tenga la capacidad de alterar negativamente las condiciones biológicas de los suelos.

Las características de los suelos tienen una gran importancia, ya que la presencia de metales pesados puede ser eliminada, hasta un cierto límite, por el propio suelo. Una vez que el límite es superado y el suelo no puede hacer frente a la depuración de estos metales, es cuando se habla de suelo contaminado.

Una definición más exacta de lo que se conoce como suelo contaminado es : *“aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente, y así se haya declarado mediante resolución expresa”*. (“REAL DECRETO 9/2005”)

Antes de dar explicación a los resultados obtenidos, se deben conocer los umbrales establecidos por las instituciones públicas que catalogan si un suelo puede definirse como contaminado en función del valor representativo de dicho metal en el propio suelo. Para ello se ha realizado una tabla (Tabla1) donde se representan los diferentes umbrales permitidos. (Aguilar et Al., 1999)

**Tabla1.** Umbral de contaminación propuestos para "Cu", "Pb", "Zn", "As", "Cd". Expresados en mg/Kg.

Elementos	Valores máximo permitidos	Investigación Recomendable	Investigación Obligatoria	Tratamiento Obligatorio	Valor de Intervención en Áreas Industriales
Cu	<100	100-300	300-500	>500	>1000
Pb	<200	200-400	400-500	>500	>2000
Zn	<300	300-500	500-1000	>1000	>3000
As	<20	20-30	30-50	>50	>300
Cd	<3	3-5	5-10	>10	>30

## 5.2. RESULTADO DESCRIPTIVO

El análisis estadístico realizado ha generado una serie de resultados que son plasmados en la Tabla2. En esta tabla destacan los valores estadísticos asociados al elemento químico "Pb", ya que este, presenta un valor máximo mucho mayor que el de los otros componentes estudiados. Bien es cierto, tal y como se hizo referencia en el apartado introductorio, la actividad minera de la zona estuvo muy ligada a este metal.

**Tabla2.** Resumen estadístico de las concentraciones: Cu;Pb;Zn;Ag;As;Cd;Sb

Elemento	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	1er Q	3er Q	Desv.Estándar	Varianza	CV	Asimetría	Cursosis
Cu	0	1600	186,476	58	12,75	183,75	297,2181	88338,62	1,5942	2,5406	7,1379
Pb	6	37270	5124,788	2297	600	5726	7745,5121	59992958,4	1,5113	2,6131	6,8781
Zn	0	1890	108,12	33,5	14,25	101	261,1857	68218,01	2,4156	5,2995	31,1496
Ag	0,1	29	2,11	0,4	0,1	2,35	4,294	18,43	2,0341	3,9303	18,1392
As	0	143,5	18,671	5,5	3	24,25	29,6659	880,7	1,5888	2,7241	7,6805
Cd	0,05	4,35	0,393	0,1	0,1	0,45	0,6433	41,38	1,6348	3,4736	14,4551
Sb	0	161	10,048	1,5	1,5	5,5	24,3421	592,54	2,4225	4,8246	25,8894

En lo referente al "Cu" y "Zn" se observa una distribución asimétrica, con una concentración de los datos cerca de la media y por encima de ella. Por el contrario, el arsénico "As" y la plata "Ag" presentan una mayor concentración de datos por debajo de la media y cercanos a esta.

La relación entre los distintos metales puede ser analizada mediante el coeficiente de correlación (Tabla3). De los 7 elementos químicos se observa que el Cobre (Cu) presenta una mayor relación con los siguientes metales: Cadmio (Cd) y Antimonio (Sb). Pero vuelve a ser representativo el alto coeficiente de correlación obtenido entre el Plomo (Pb) y la Plata (Ag) muy cercano a 1. También son representativos los valores por encima de 0.8 entre Cd-Sb y Ag-Arsénico (As). Por último en la tabla solo se observa un coeficiente inverso, es decir de signo

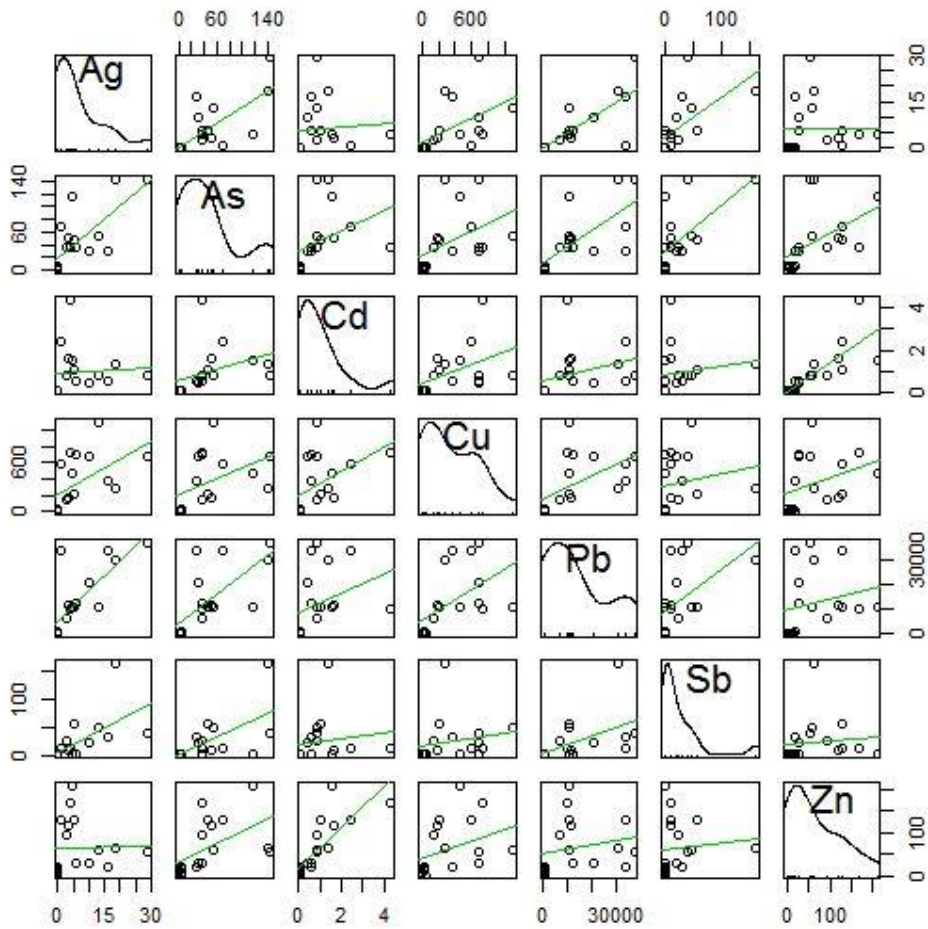
negativo, entre As-Sb, lo cual indica que a medida que hay más presencia de Arsénico el Antimonio disminuye y viceversa.

**Tabla 3.** *Coefficiente de Correlación para cada par de elementos químicos.*

	Cu	Pb	Zn	Ag	As	Cd	Sb
Cu	1						
Pb	0,4648585	1					
Zn	0,3596873	0,1172847	1				
Ag	0,3827227	0,9485894	0,1544417	1			
As	0,3860675	0,7763482	0,3217149	0,8461925	1		
Cd	0,7694502	0,4716183	0,6889961	0,3458454	0,3195372	1	
Sb	0,7682802	0,4981396	0,3973597	0,7730846	-0,5562806	0,8379825	1

El resultado gráfico de los anteriores valores puede verse en la Figura 1 que registra una matriz de diagramas de dispersión entre los distintos elementos llevados a estudio. Las nubes de puntos del diagrama muestra la relación existente entre un elemento y otro. En la diagonal del gráfico queda reflejada la estimación kernel de la densidad, siendo esta una estimación no paramétrica.





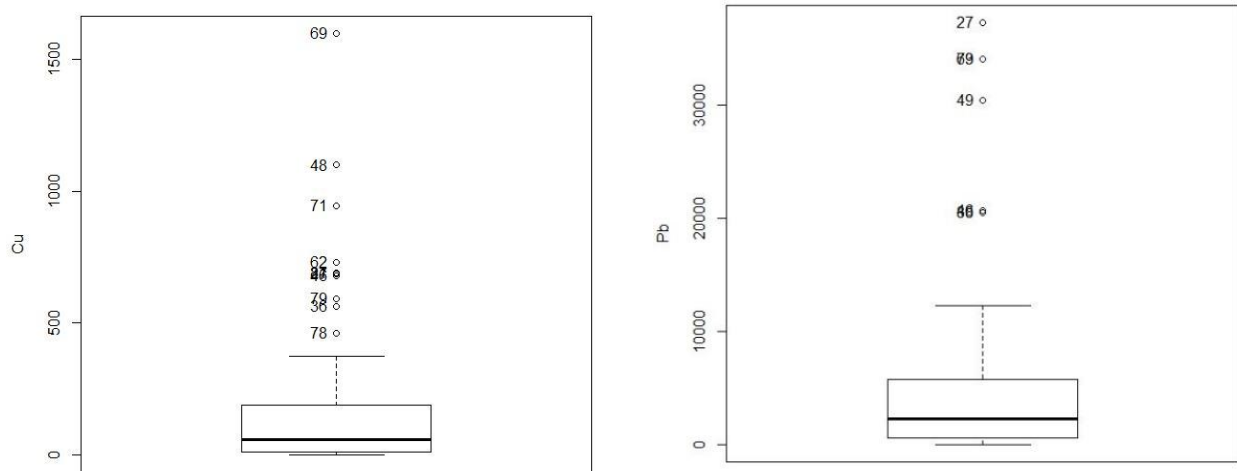
**Figura 1.** Matriz de diagramas de dispersión de las variables estudiadas.

Las últimas gráficas realizadas con “R” han sido las gráficas de cajas, para conocer aquellos valores denominados atípicos. En la Figura 2, se muestran los diagramas de cajas para Cu y Pb. El resto de diagramas están disponibles en el Anexo I.

En el primer diagrama, se cuenta con 10 elementos atípicos, de los cuales no se conoce el porqué de la discrepancia con el conjunto de datos. Podría tratarse, tanto de un error a la hora de transcribir los datos, como de una gran concentración de este metal por alguna circunstancia exacta. Son estos 10 valores los que están indicados por encima del bigote superior. El registro número 69, tiene un valor superior a 1500 que lo aleja mucho, tanto de la caja o cuerpo de la gráfica como del resto de valores fuera de rango.

Por otro lado, el diagrama referente al Pb, muestra 6 valores que se pueden catalogar de atípicos u outliers. Quedando 4 de estos valores muy lejanos al cuerpo de la gráfica, ya que el bigote superior no llegaría al valor 1500 y el último outlier está por encima de los 3500.

En las gráficas de cajas para los elementos “Zn” y “Sb”, también queda reflejado la lejanía del último valor outlier en comparación con el resto del cuerpo. En el resto de gráficas los valores atípicos se alejan menos del conjunto de datos.



**Figura 2.** Diagrama de Cajas para Cobre (Cu) y Plomo (Pb)

### 5.3 RESULTADO GEOESTADÍSTICO

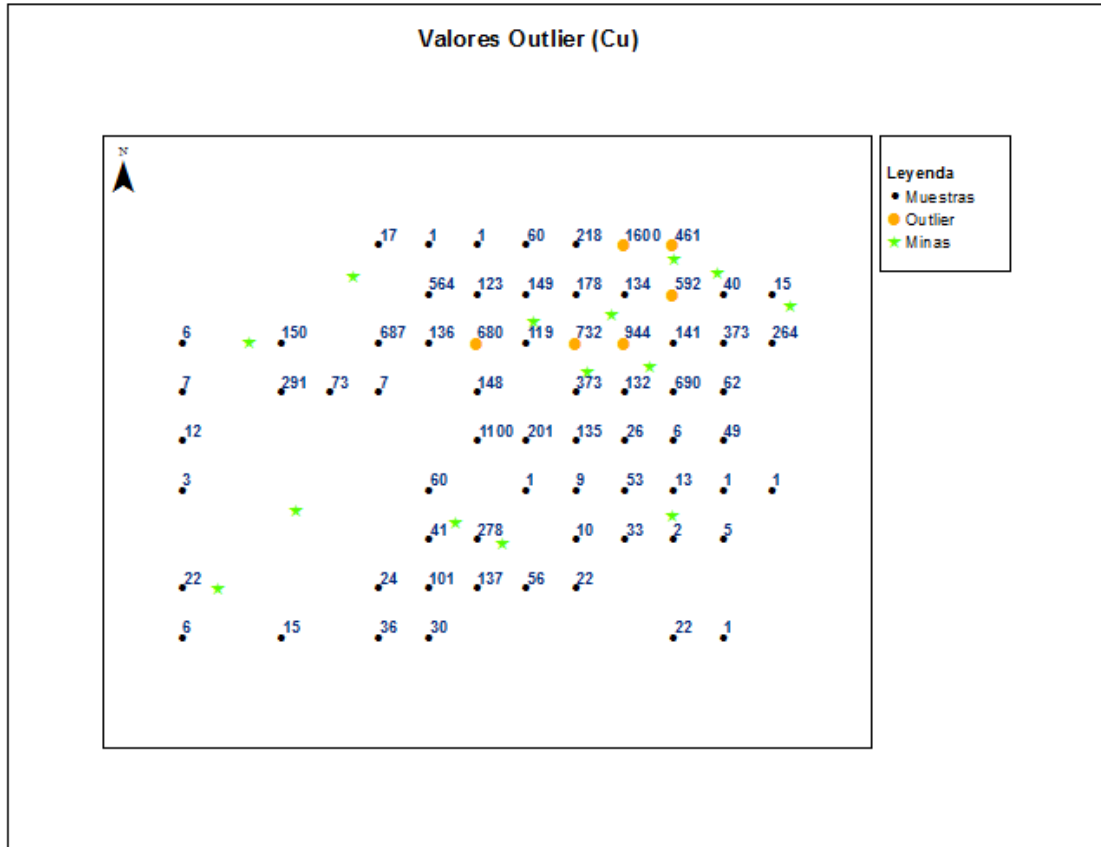
#### 5.3.1. VALORES ATÍPICOS ESPACIALES.

Los análisis realizados en ArcGis, han dado un conjunto de resultados que serán explicados a continuación. Como se citó previamente, se buscó dar continuidad a las estadísticas ya realizadas, por eso el primer análisis que se llevó a cabo fue el de buscar los valores outliers o atípicos espaciales. Los resultados se plasman en unos mapas finales, donde se pueden localizar espacialmente a los puntos que poseen valores por encima del conjunto.

En la Figura 3 y 4, están representados dichos valores para los elementos de Cobre y Plomo. Se ha decidido mostrar estos para poder compararlos con la figura 1. Como en el caso anterior, el resto de mapas se encuentran anexados al final del trabajo.

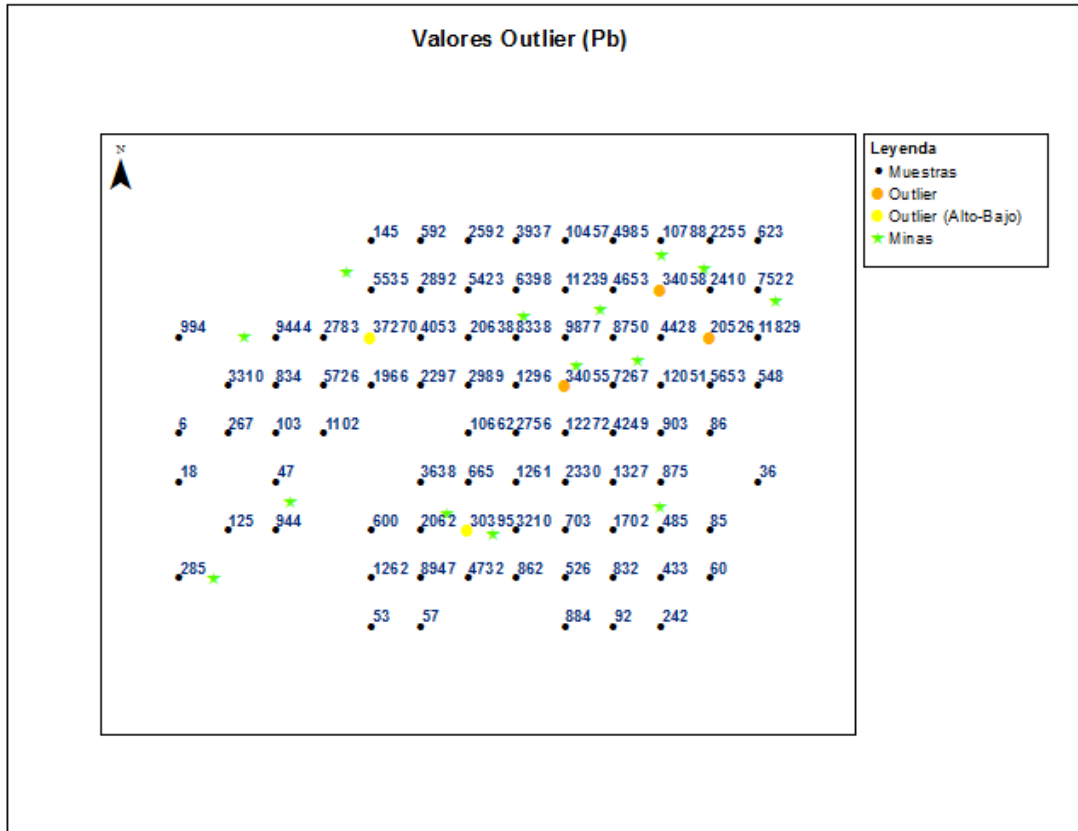
Puede observarse en la Figura 3, que se han identificado como outliers 6 puntos, mientras que en el diagrama de cajas (Figura 1) los puntos eran 10. Esta diferencia a la hora de determinar

que valores son atípicos y cuáles no, se debe a que la herramienta empleada con el entorno ArcGis tiene en cuenta el valor de los vecinos. Cabe destacar que estos 6 valores atípicos espaciales coinciden con 6 registrados como outliers no espaciales.



**Figura 3.** Representación de la distribución espacial de “Outliers” para “Cu”

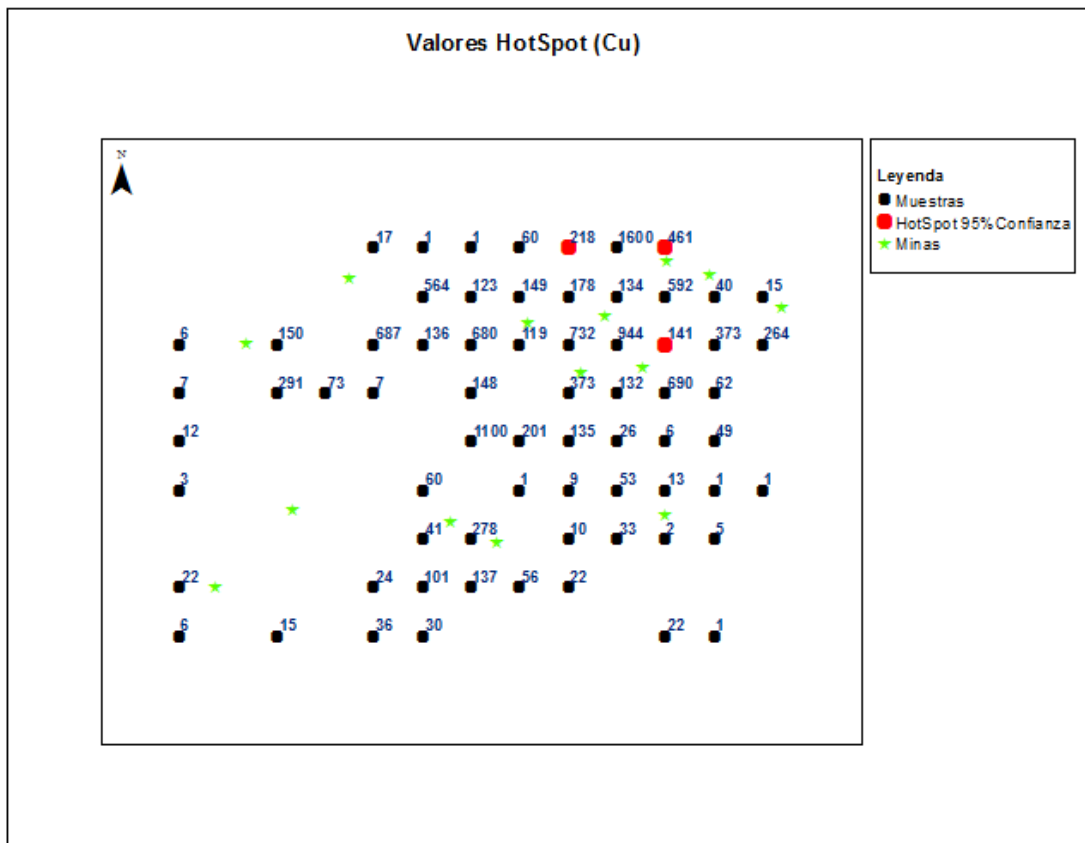
Lo mismo ocurre con la Figura 4, donde se han marcado un total de 3 valores atípicos mientras que en la Figura 1 se indicaban 6.



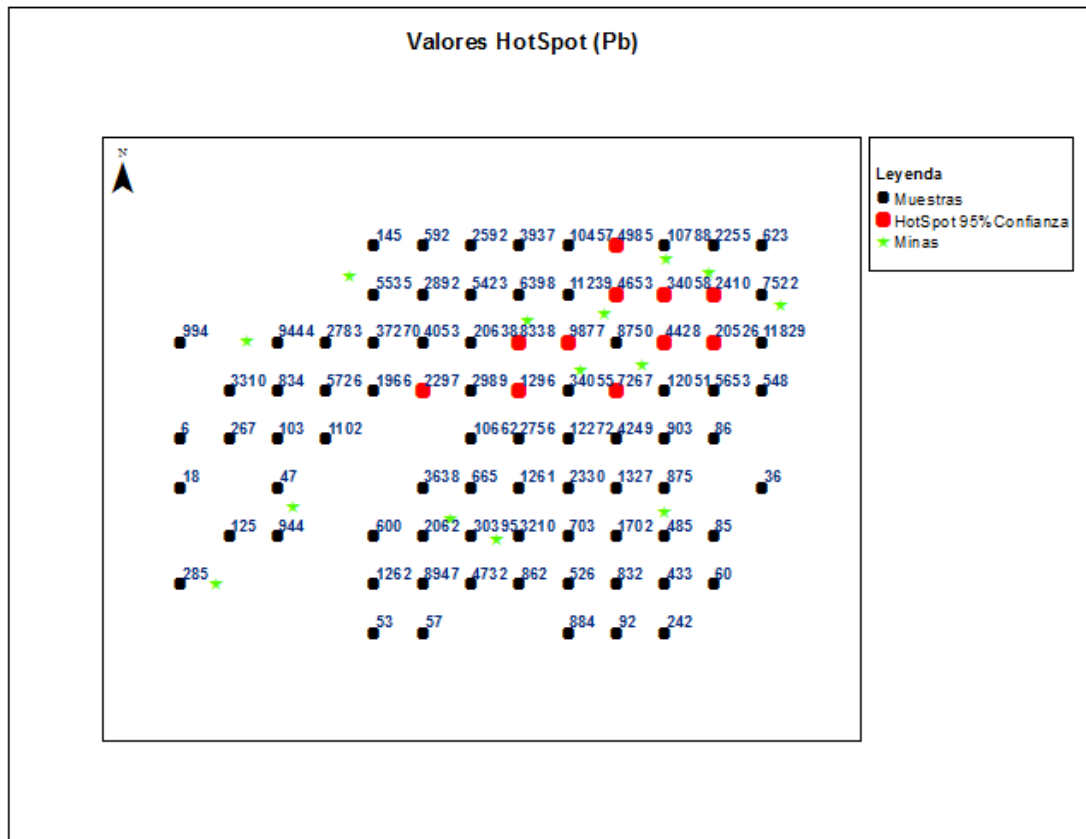
**Figura 4.** Representación de la distribución espacial de “Outliers” para “Pb”

### 5.3.2. PUNTOS CALIENTES (HOTSPOT)

Antes de realizar el mapa de distribución, mediante interpolación, de los metales se analizaron los diferentes puntos calientes para cada elemento. Es en este apartado donde se observa que en una gran parte de ellos, los puntos calientes se sitúan en el Noreste de la zona de estudio. Como muestra de esta distribución espacial, la Figuras 5 y 6 reflejan los “Hotspot” para los metales Cu y Pb. Debe destacarse el gran número de puntos calientes determinados en la Figura 6, lo que afirma la importante presencia de plomo en la zona. Estos puntos, como ya se explicó anteriormente, poseen un elevado valor y a su vez están rodeados por vecinos con un valor también elevado.



**Figura 5.** Representación de la distribución espacial de “HotSpot” para “Cu”



**Figura 6.** Representación de la distribución espacial de “HotSpot” para “Pb”

### 5.3.3. K DE RIPLEY

Para seguir evaluando la distribución espacial de los datos, se realiza un estudio utilizando la función K de Ripley, que trabaja de una forma distinta a las herramientas utilizadas anteriormente. Como resultado se han obtenido 7 gráficas (Figura 7) que intentan explicar la dependencia espacial usando para ello el agrupamiento (Clustered) y la dispersión de la entidad (Dispersed).

Se podría interpretar en dichas gráficas que los datos presentan una tendencia al agrupamiento a medida que avanzan las distancias, ya que en todos los casos se muestra una clara dispersión en las distancias cortas. Pero se debe de tener en cuenta que la distancia entre los puntos de la malla dista de 1 km, por este motivo no se debiera dar mucha credibilidad a los datos inferiores a dicha distancia.

En las gráficas del Plomo, Zinc, Arsénico y Antimonio se debe resaltar que sus líneas rojas (K

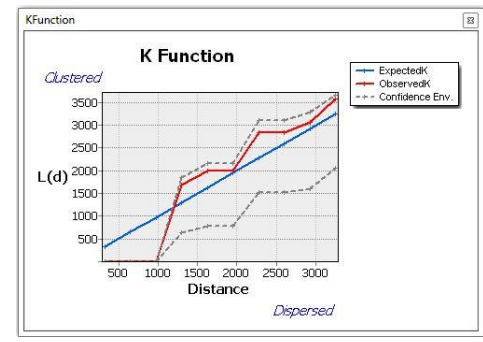
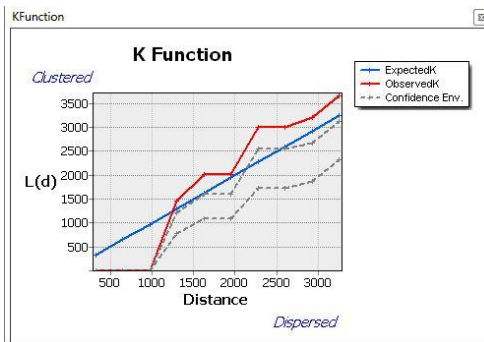
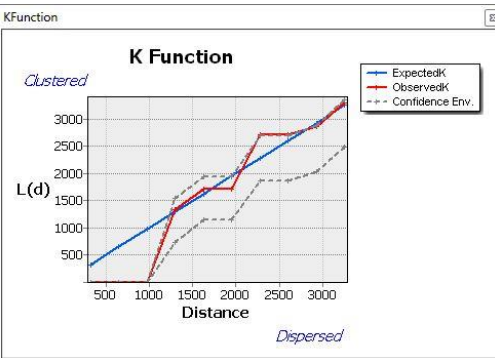
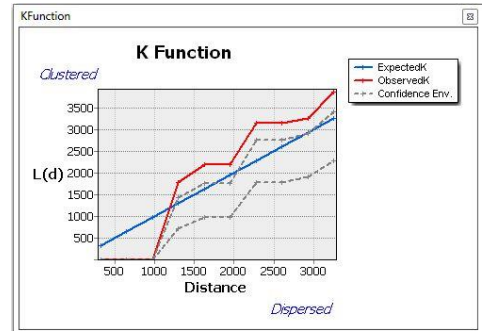
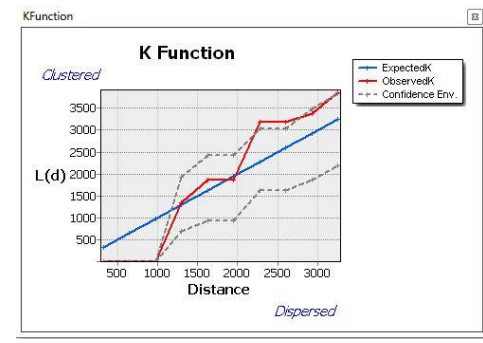
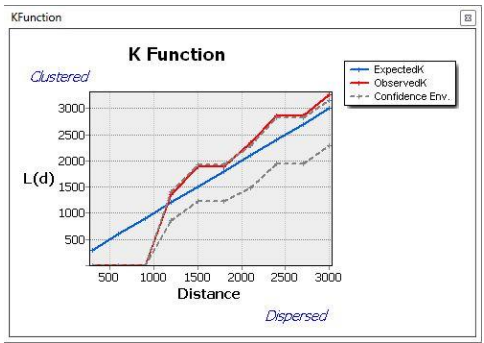
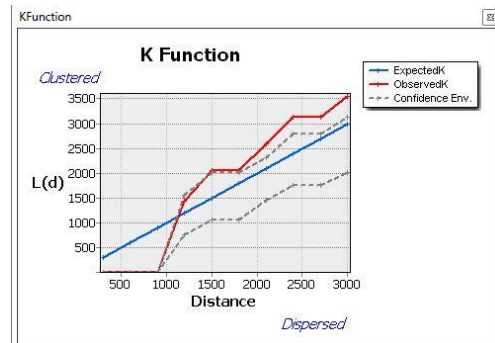


Figura 7. Gráficas K de Ripley (Cu;Pb;Zn;Ag;As;Cd;Sb)

obtenida) están dentro del intervalo de confianza, mientras que en el resto de los casos, las líneas están fuera de este intervalo. Es por esto, que el agrupamiento estaría mejor explicado en los elementos dentro del intervalo que los que están fuera del mismo. Además las líneas rojas solo presentan un ligero descenso en la parte central de la gráfica para los metales As y Zn, aunque como puede apreciarse el descenso es ínfimo

### 5.3.4. REGRESIÓN EXPLORATORIA

Otro aspecto a estudiar dentro del trabajo es la regresión exploratoria, donde a través del informe que proporciona la herramienta se puede evaluar la información acerca de la relación significativa de las variables.

En la muestra de los resultados (Tabla 3), se registran los porcentajes de significación, positivos y negativos, entre los distintos metales estudiados. Si tomamos como ejemplo los metales “Cu” y “Pb”, se puede observar que el primero de ellos presenta un elevado porcentaje de significación con los metales “Pb” y “Cd”. En el caso segundo, el mayor porcentaje corresponde a “Cu” y “As”.

Si se comparan estos datos con los obtenidos con el coeficiente de correlación, se puede observar un elevado coeficiente entre los elementos “Cu-Cd” y “Pb-As”, siendo estos de 0.7694 y 0.7763 respectivamente. Sin embargo, llama la atención el bajo coeficiente de correlación entre “Cu-Pb”, solo del 0.4648, en comparación al 100% obtenido en la regresión exploratoria. Este hecho explicaría las verdaderas diferencias existentes a la hora de utilizar diversos métodos. Por este motivo, es bueno emplear varios de ellos y contrastarlos.

**Tabla 3.** Regresión exploratoria para el conjunto de metales.

	Cu		Pb		Zn		Ag		As		Cd	
	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa
<b>Cu</b>												
<b>Pb</b>	100	0										
<b>Zn</b>	25,81	74,19	0	100								
<b>Ag</b>	3,23	96,77	0	100	16,13	83,87						
<b>As</b>	22,58	77,42	100	0	58,06	41,94	67,74	32,26				
<b>Cd</b>	100	0	70,97	29,03	100	0	35,48	64,52	100	0		
<b>Sb</b>	48,39	51,61	16,13	83,87	87,1	12,9	0	100	100	0	0	100

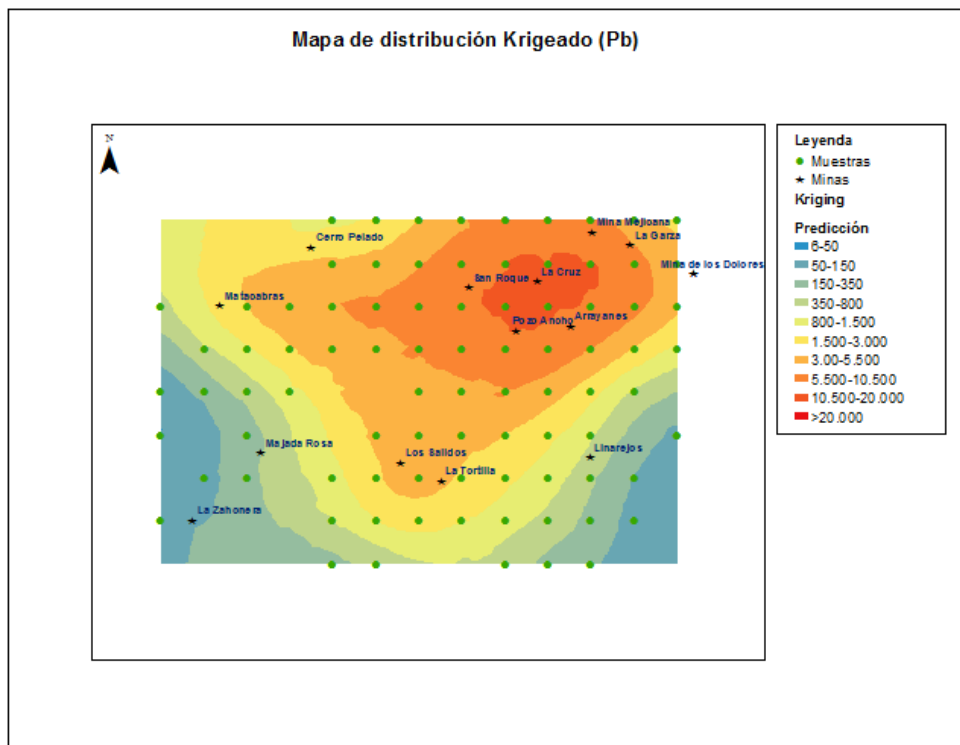


### 5.3.5. KRIGING

La última herramienta utilizada en ArcGis, es la encargada de ofrecer un mapa de interpolación de los metales en el territorio de estudio. Como se ha ido observando a lo largo del estudio, el patrón de distribución seguido por los diferentes metales tiene su mayor peso en el Noreste. Es en esta zona, donde los metales presentan un mayor peso, como ya se viera en los puntos calientes.

Si se intenta dar explicación al porque la contaminación de estos metales es mayor en este punto, se debe buscar información en el mismo terreno. Es decir, se deberá saber qué tipo de actividades se llevaron a cabo en las coordenadas de dichos puntos.

Analizando la actividad de la zona, se ha observado que han existido alrededor de 10 focos, entre pozos y minas, ligados a la minería en los cuadrantes donde el kriging presenta un mayor valor. Como se explicó en la parte introductoria del trabajo, la zona ha estado muy ligada a la industria de la metalurgia, destacando la extracción de plomo. Por este motivo, en la Figura 8, se presenta el mapa de distribución del Plomo mediante el método de interpolación del Kriging.



**Figura 8.** Distribución espacial interpolada para los valores de "Pb" mediante Kriging

Para el resto de los elementos estudiados, se observa como en el caso anterior, que la distribución espacial está centrada en la parte superior izquierda de la hoja. En el Kriging

realizado para el Zinc y la Plata, se aprecia una distribución con tres zonas de concentración de metales, rompiendo un poco el patrón que siguen los otros elementos.

Por el contrario, el arsénico muestra un krigeado mucho más suave, ya que posee una zona de concentración de metales, y a medida que nos alejamos de este foco la concentración va disminuyendo considerablemente. Lo mismo ocurre con el antimonio, ya que su krigeado está básicamente representado por dos rangos de concentración.

El Cadmio por último encuentra una única zona de fuerte concentración, a partir de este punto los valores descienden bruscamente.

## 6. CONCLUSIÓN

La elaboración de este trabajo tenía como objetivo el utilizar diferentes métodos geoestadísticos que aportaran información de la distribución espacial de unos metales en concreto. Por otro lado, también se ha querido dar respuesta gráfica a esos análisis.

En un primer lugar, se puede decir que la presencia de unos determinados metales en la malla de puntos de la que se ha partido, tiene mucha relación con la actividad humana que se ha ido desarrollando a lo largo de la historia. De este modo, se puede señalar, que la explotación de minas dedicadas al Plomo, ha hecho que este elemento esté significativamente presente en el suelo. Además, las estrechas relaciones entre los diferentes metales, hace que estos últimos también adquieran importancia en el estudio.

En los valores estudiados se han enmarcado aquellos registros que presentaban anomalía en comparación con el conjunto de valores de su metal. Aunque alguno de esos valores atípicos pudiera darse por un mal registro a la hora de tomar los datos, cabe señalar que la fuerte presencia de actividades relacionadas con la minería, tanto extracción como fundición explican la aparición de estos valores.

En lo referente a la geología, la zona está prácticamente representada por pizarras y granitos de época Carbonífera. También son destacables los sedimentos triásicos. Era justamente en este tipo de rocas en las que se daban mayor concentración de estos metales.

Por último cabe destacar que en el territorio español los indicadores que muestran a partir de qué valor un metal pasa a considerarse contaminante está regulado por las diferentes Comunidades Autónomas, ya que son estas las encargadas de realizar estudios que determinen que nivel de presencia natural tienen los distintos elementos químicos. Observando los umbrales establecidos en la Tabla 1, se puede apuntar que el suelo en la zona de estudio sí que podría ser catalogado como contaminado en lo relativo al Cobre y Plomo, ya que estos valores son rebasados por los datos que se disponen. En cambio, la cantidad de Zinc, Antimonio y Cadmio estarían dentro del umbral permitido. Si bien, cabe mencionar que se han tratado los datos como pertenecientes al grupo de área industrial. En caso de analizar los datos como suelo agrícola, solo el nivel de Cadmio sería aceptable.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Aguilar, J; Dorronsoro, C.; Galán, E. & Gómez Ariza, J.L. (1999): “*Los criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado en Andalucía y la metodología y técnica de toma de muestras y análisis para su investigación.*” Universidad de Sevilla.

Azcárate, J.E. 1977.” *Mapa geológico y memoria explicativa de la hoja 905*”, escala 1:50.000. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid

Burger, M. Román, D. (2010). “*Plomo Salud y Ambiente. Experiencia en Uruguay*”. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

Delgado Rodríguez, J. (2010). “*Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca baja del río Guadiana*”. Universidad de Huelva

Galán Huertos, E.; Romero Baena, A. “*Contaminación de Suelos por Metales Pesados*”. Universidad de Sevilla.

Herrera Marcano, Teodoro. “*La contaminación con Cadmio en suelos agrícolas*”. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela

J. Martínez, J. Llamas, E. de Miguel, J. Rey, M.C. Hidalgo. (2007). “*Determination of the geochemical background in a metal mining site: example of the mining district of Linares (South Spain)*”

Kabata-Pendias, Alina. “*Trace elements in soils and plants*”. 4th ed.

Ministerio de Medioambiente. (2007). “*Guía Técnica de aplicación del RD 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados*”

Sierra Aragón, M. (2005). “*Los criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado en Andalucía y la metodología y técnica de toma de muestras y análisis para su investigación*”. Universidad de Granada.

**ANEXO I**



**Figura 1.** Diagrama de cajas para los elementos “Zn”, “Ag”

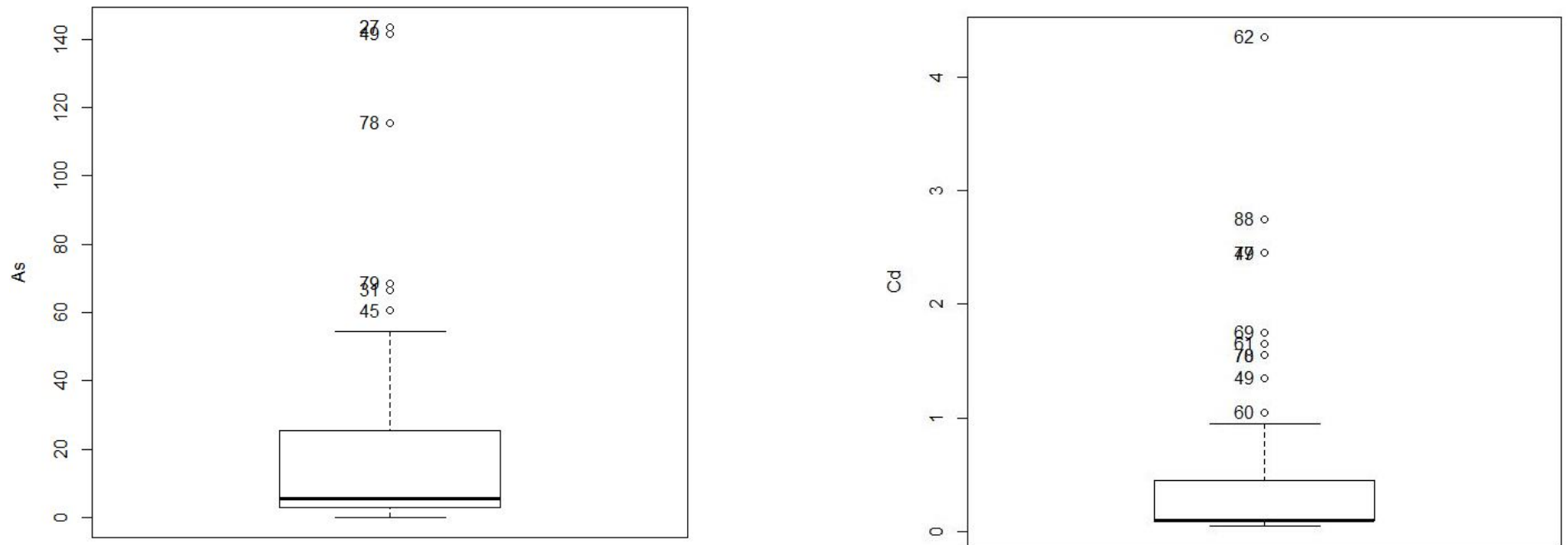


Figura 2. Diagrama de cajas para los elementos "As", "Cd"

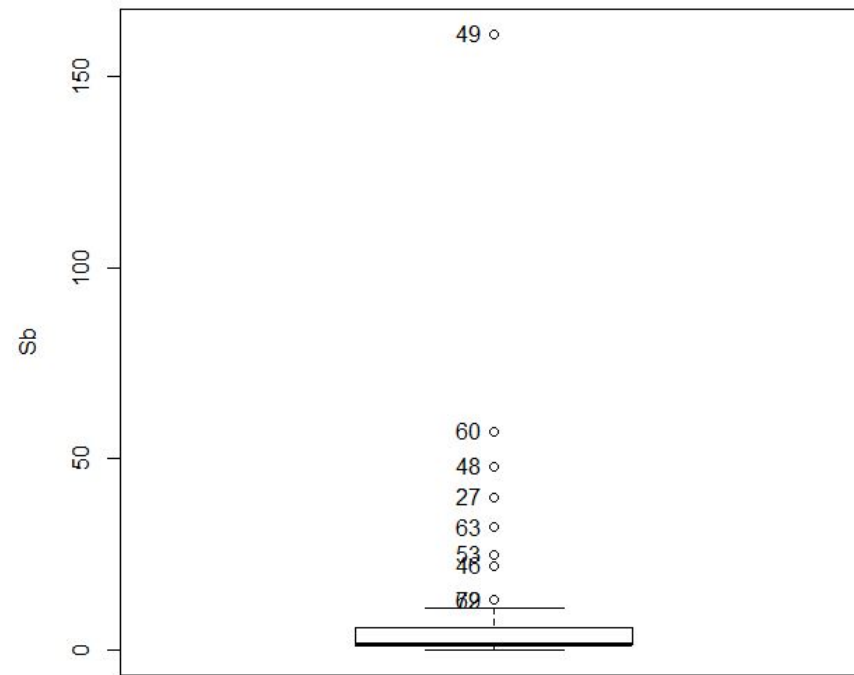


Figura 3. Diagrama de cajas para "Sb"

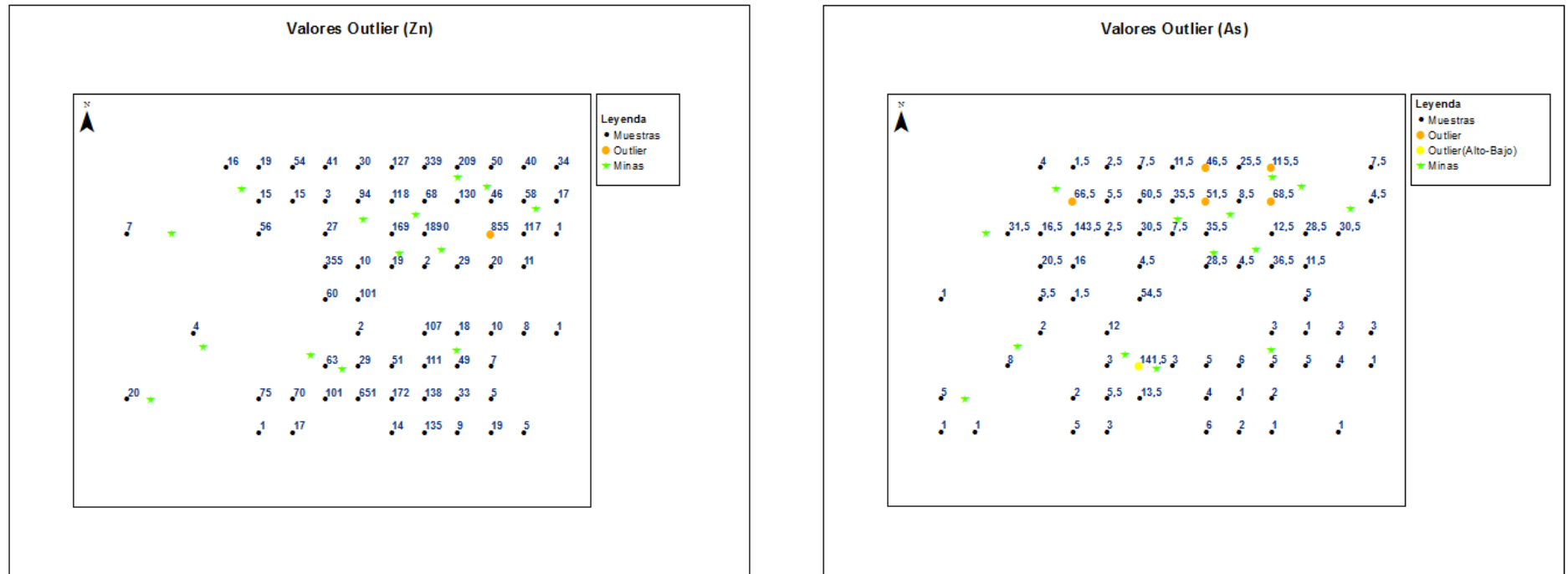


Figura 4. Representación de la distribución espacial de Outliers para los elementos "Zn", "As"



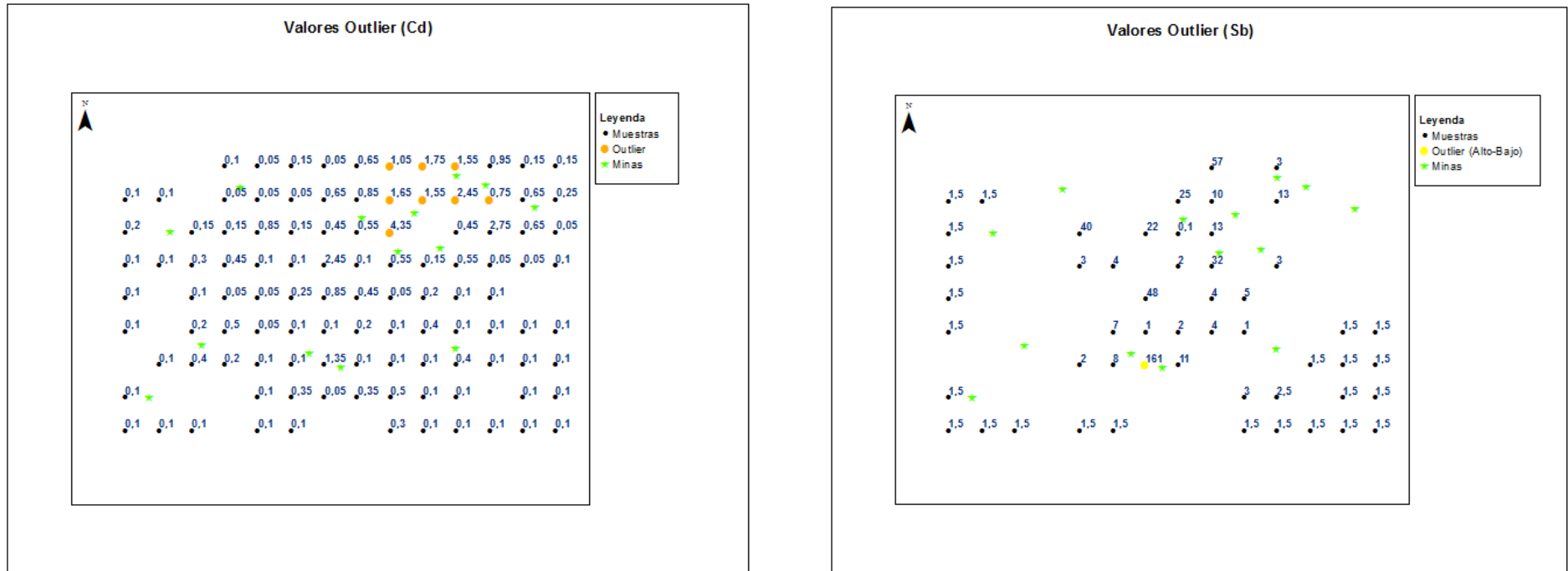


Figura 5. Representación de la distribución espacial de Outliers para los elementos "Cd", "Sb"

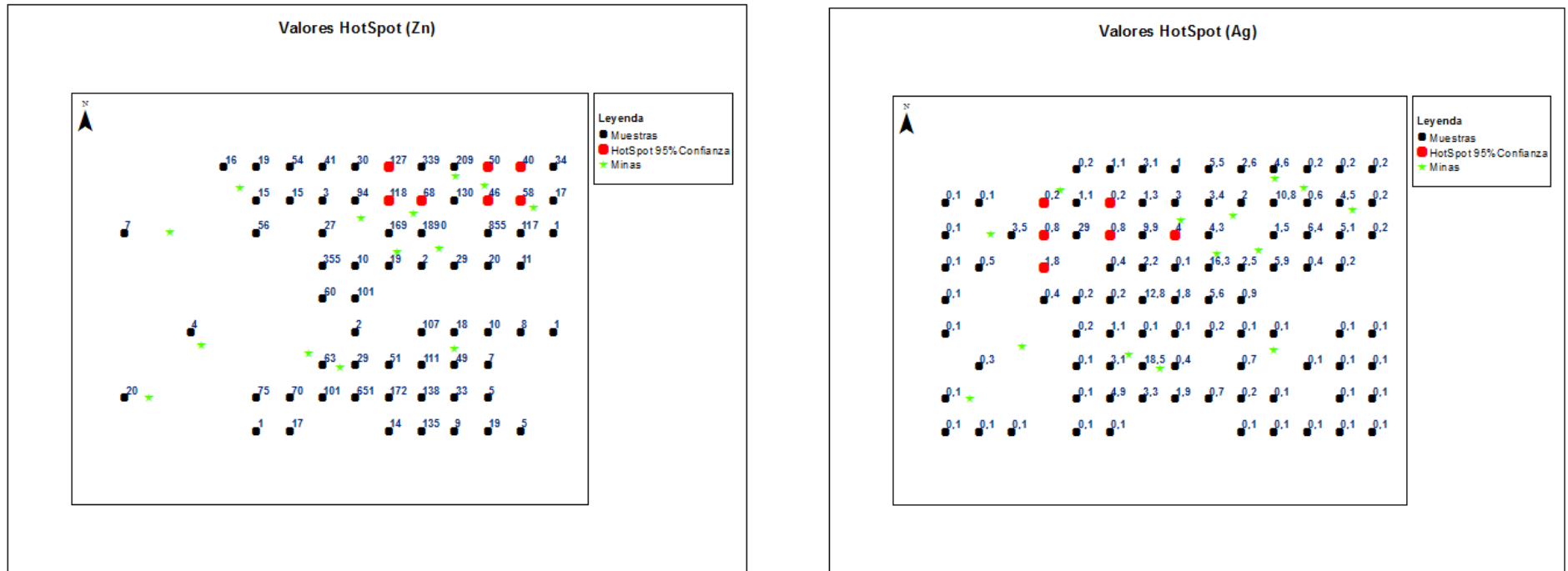


Figura 6. Representación de la distribución espacial de "HotSpot" para "Zn", "Ag"

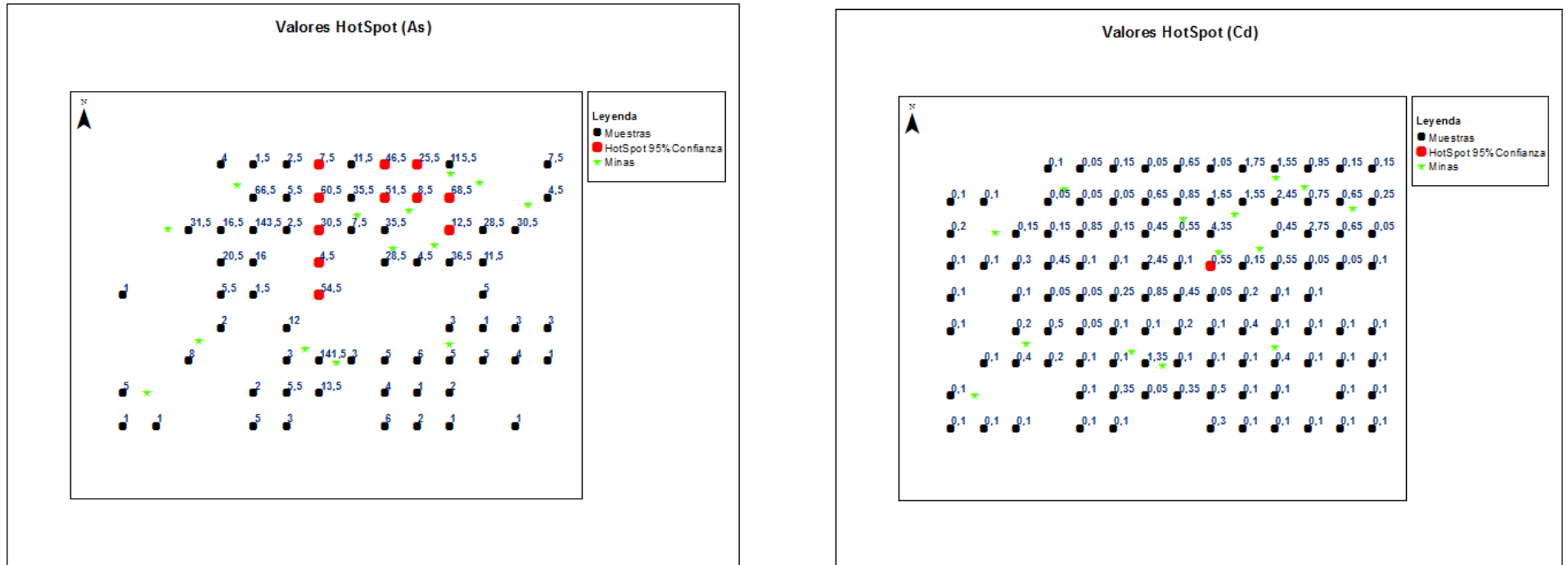
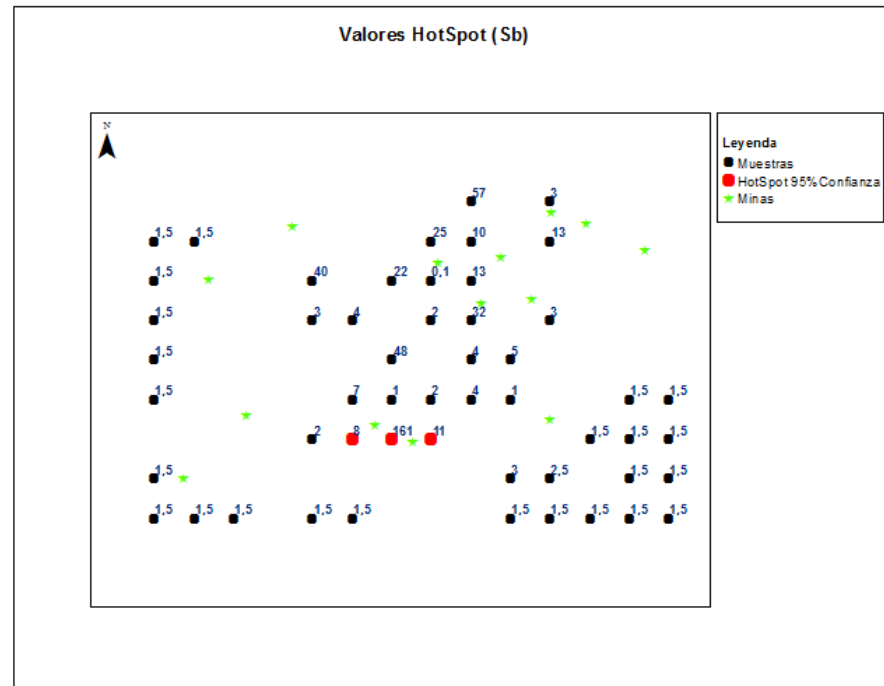


Figura 7. Representación de la distribución espacial de "HotSpot" para "As", "Cd"



**Figura 8.** Representación de la distribución espacial de “HotSpot” para “Sb”

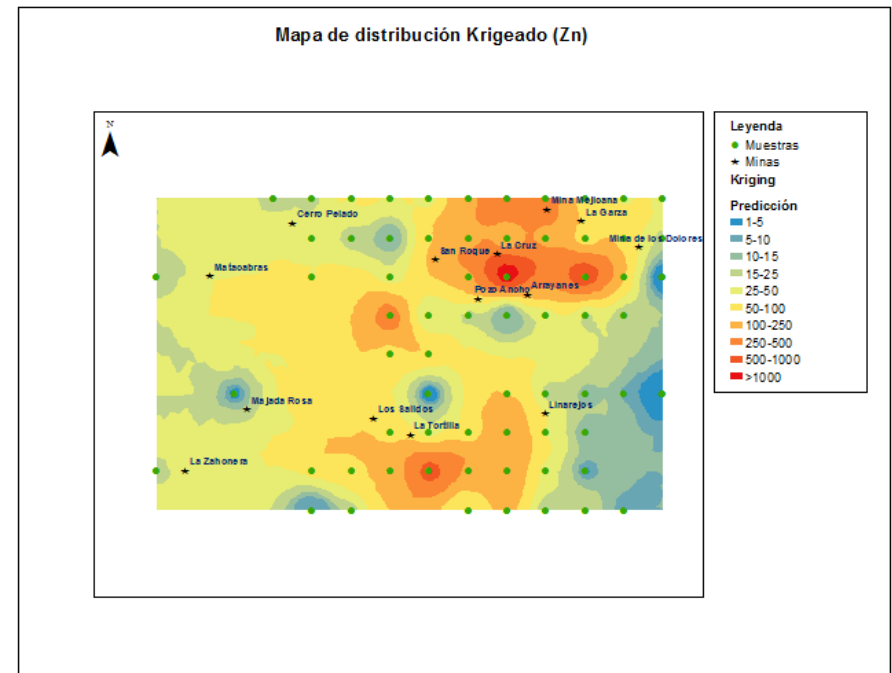
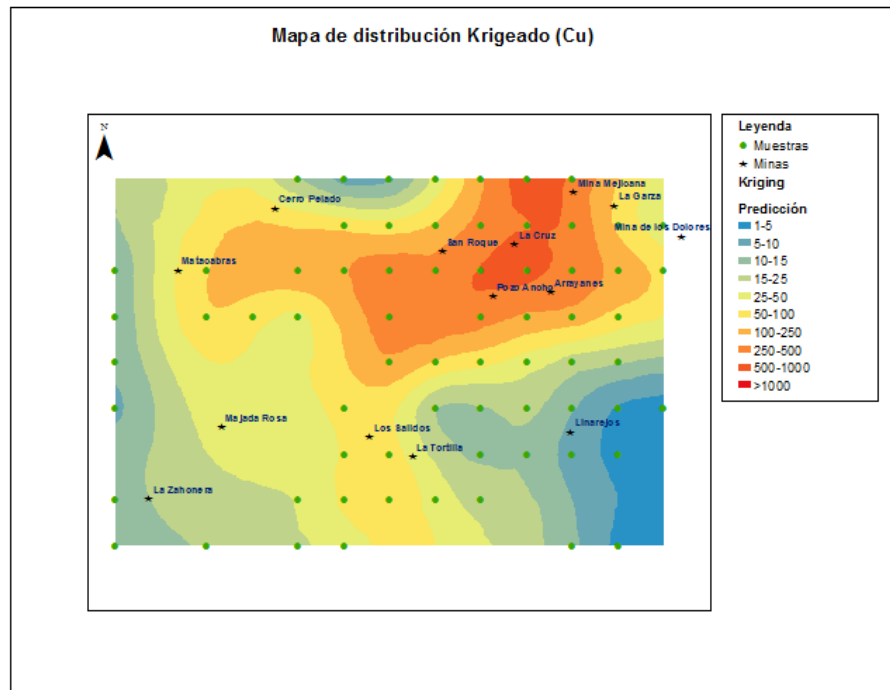
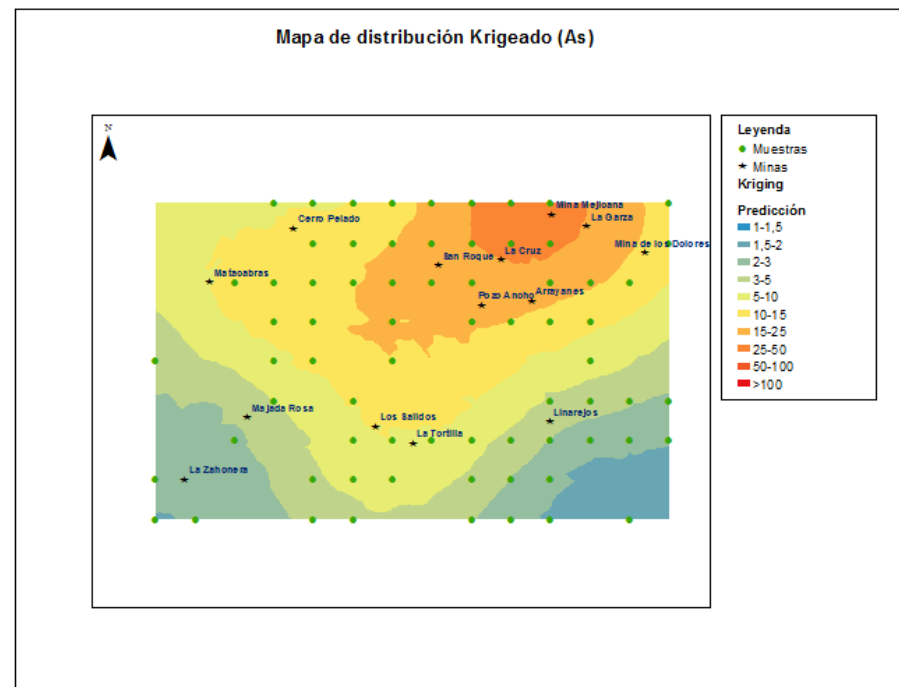
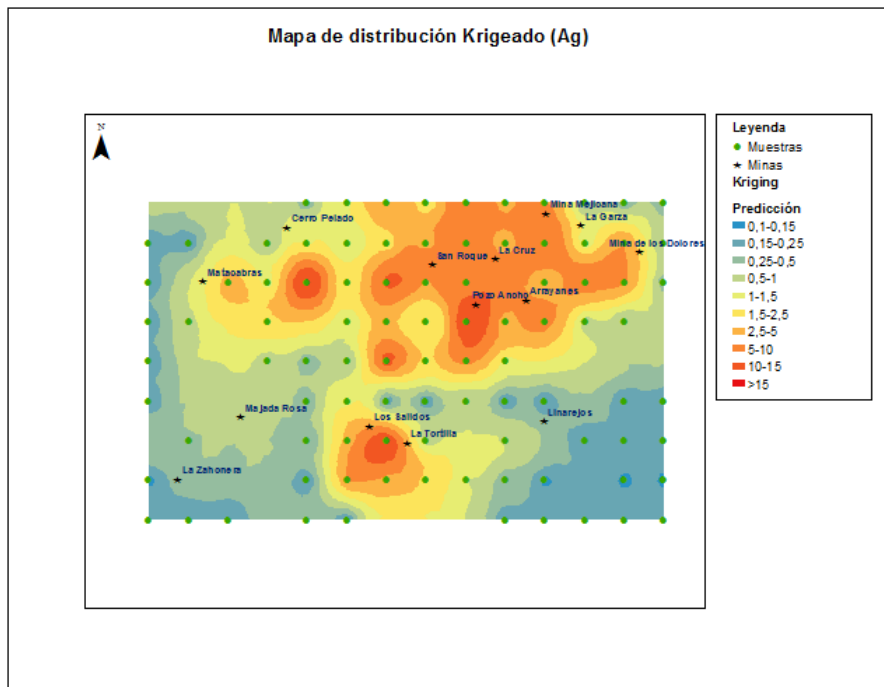


Figura 9. Distribución espacial interpolada para los valores de "Cu", "Zn" mediante Kriging



**Figura 10.** Distribución espacial interpolada para los valores de "Ag","As" mediante Krigeado

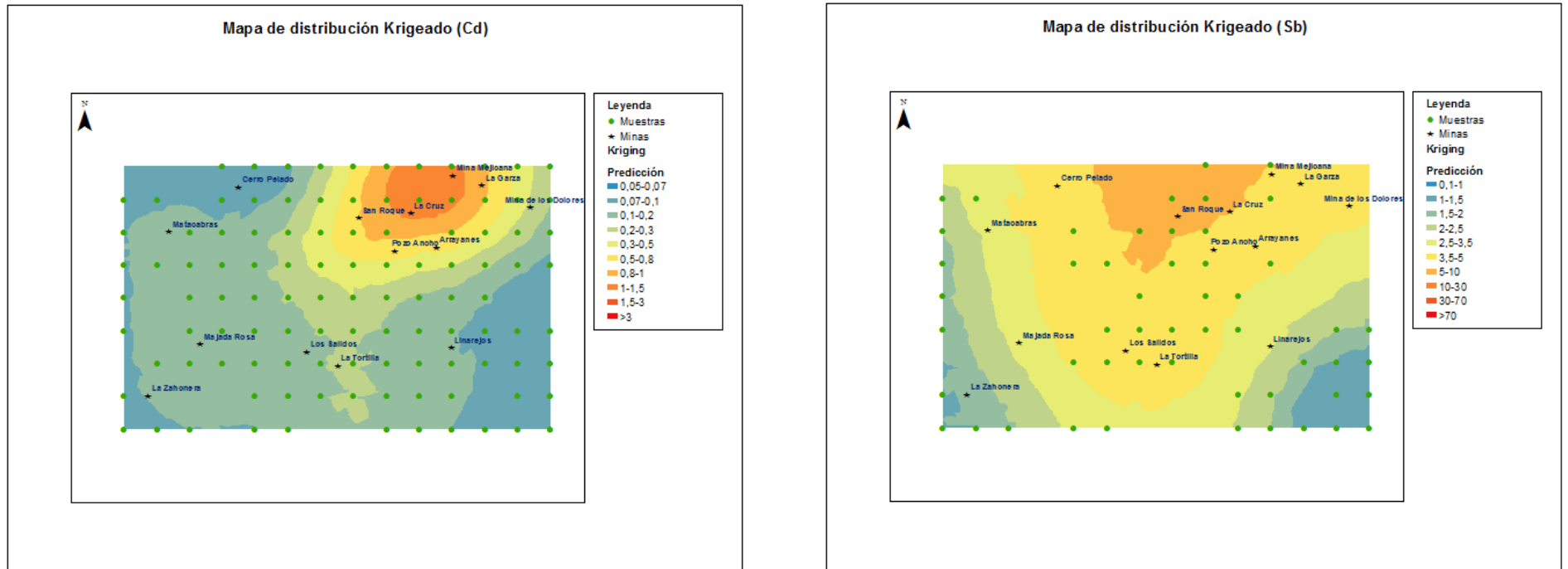


Figura 11. Distribución espacial interpolada para los valores de "Cd", "Sb" mediante Krigado