

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas

“Diseño y puesta en marcha de un Sistema de Información Geográfica de la Comunidad de Madrid para el estudio de la distribución de metales pesados”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERA CIVIL

Presentada por:

Mónica María Ludeña Ocampo

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2005

AGRADECIMIENTO

A todos los profesores de Ingeniería Civil
Al Dr. Rogelio de La Vega Panizo y a todos
los profesores de la E.T.S. de Ingenieros de
Minas - UPM
A Paola Romero y mis compañeros del
Programa Antonio de Ulloa

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y
Eithel Espinoza

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Dr. Rogelio de la Vega P.
DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eduardo de Miguel
VOCAL

Dr. Luis Iglesias M.
VOCAL

Ing. Angel de Las Heras M.
VOCAL

Dr. Isidoro Moyano E.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“ La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Mónica M. Ludeña O.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO 1	
1 GLOSARIO.....	1
CAPITULO 2	
2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	8
2.1. INTRODUCCIÓN A LOS SIG.....	8
2.2. COMPONENTES DE UN SIG	10
2.2.1. Equipos informáticos.....	10
2.2.2. Programas Informáticos.....	12
2.3 DATOS.....	13
2.3.1 Componente espacial.....	15
2.3.2 Componente temática.....	21
2.4 FUNCIONES DE UN SIG.....	24
2.4.1 Funciones para la adquisición de información.....	25
2.4.2 Funciones analíticas y de gestión de la información.....	27
2.4.3 Funciones para la presentación de la información.....	32
2.5 APLICACIONES DE LOS SIG.....	32
2.5.1 Aplicaciones de los SIG en el estudio del medio ambiente.....	36

CAPÍTULO 3

3	GEOQUÍMICA DE SUELOS.....	38
3.1	COMPOSICIÓN DEL SUELO.....	38
3.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS.....	39
3.3	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS SUELOS.....	41
3.3.1	Contenido en materia orgánica.....	42
3.3.2	Reacción del suelo. Ph.....	44
3.4	CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR METALES PESADOS.....	47
3.5	NIVELES DE FONDO Y REFERENCIA DE METALES PESADOS.....	53

CAPITULO 4

4	HERRAMIENTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL SIG.....	61
4.1	CARACTERÍSTICAS DE ARCGIS.....	61
4.2	COMPONENTES DE ARCGIS.....	64
4.3	MODELOS DE DATOS.....	70

CAPÍTULO 5

5	IMPLEMENTACIÓN DE UN SIG.....	73
5.1	METODOLOGÍA.....	73
5.2	TRATAMIENTO PREVIO DE LA INFORMACIÓN ESPACIAL.....	76
5.2.1	Adquisición.....	76
5.2.2	Digitalización de mapas.....	80
5.2.3	Transformación de coordenadas	83
5.2.4	Transformación de coordenadas	87
5.2.5	Calidad de la información. Análisis de errores.....	92
5.3	TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN ALFANUMÉRICA.....	94
5.3.1	Adquisición.....	94

5.3.2	Diseño de la base de datos alfanuméricos.....	96
5.4	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SIG.....	100
5.4.1	Manejo de la Información en ArcGis.....	100
5.4.2	Integración de las bases de datos espacial y alfanumérica.....	102
5.4.3	Creación de la topología.....	106
5.5	CONSTRUCCIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS Y CONSULTAS.....	108
5.6	POSIBLES ANÁLISIS.....	110

CAPITULO 6

6.	EXPLOTACIÓN DEL SIG.....	117
6.1	CONSTRUCCIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS Y CONSULTAS.....	117
6.2	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	125
6.2.1	Información alfanumérica tabular.....	126
6.2.2	Composiciones cartográficas.....	127

CAPÍTULO 7

7.	CONCLUSIONES.....	135
----	-------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ESTUDIO ECONÓMICO

CONTENIDO DE BASE TEMÁTICA Y ESPACIAL

VALORES DE FONDO Y REFERENCIA DE METALES PESADOS

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1: Modelos de datos <i>raster</i> y vectorial.....	16
Figura 2-2: Imagen vector. Límite de la Comunidad de Madrid.....	17
Figura 2-3: Imagen <i>raster</i> . Tipos de vegetación.....	17
Figura 2-4: Elementos de una base de datos relacional.....	23
Figura 2-5: Funciones de los Sistemas de Información Geográfica.....	25
Figura 2-6: Análisis de superposición.....	28
Figura 3-1: Perfiles del suelo.....	39
Figura 3-2: Esquema de la clasificación textural del suelo.....	40
Figura 3-3: Los metales pesados incorporados al suelo.....	52
Figura 3-4: Secuencia de los trabajos realizados.....	54
Figura 3-5: Mapa de Unidades Tipo.....	55
Figura 4-1: Componentes de ArcGis.....	63
Figura 4-2: Tipos de capas (layers) en ArcMap.....	68
Figura 4-3: Coberturas temáticas.....	71
Figura 5-1: Etapas de un proyecto relacionadas a las funciones del SIG.....	75
Figura 5-2: Transformación lineal y no lineal.....	84
Figura 5-3: Capas de información.....	88
Figura 5-4: Enlaces de desplazamientos en ArcMap.....	89
Figura 5-5: Tabla de Enlaces de Desplazamientos (Link Table).....	81
Figura 5-6: Características de las Unidades Geológicas.....	98
Figura 5-7: Visualización de capas de información en ArMap..	101
Figura 5-8: Tabla de atributos generada por ArcMap.....	104
Figura 5-9: Georreferenciación por medio de ArcGis.....	105
Figura 5-10: Operaciones con polígonos de GeoProcessing Wizard.....	109

Figura 5-11: Ejemplo de consulta espacial en un SIG.....	112
Figura 5-12: Consulta espacial Muestreo del IGME.....	114
Figura 5-13: Distribución de valor de fondo de Pb, Ag, Zn y Cd.....	115
Figura 6-1: Mapa temático 2.....	121
Figura 6-2: Cuadro de diálogo de la función de interpolación.....	125
Figura 6-3: Valores de Fondo de Plata (Ag) por Unidad Tipo Geológica.....	126
Figura 6-4: Mapa Temático 1.....	129
Figura 6-5: Municipios de Madrid en Unidades Tipo Geológicas.....	130
Figura 6-6: Interpolación a <i>raster</i> del contenido de Aluminio.....	131
Figura 6-7: Líneas de igual concentración de Aluminio.....	133
Figura 6-8: Distribución del Plomo dentro de la Comunidad de Madrid.....	134

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Modelos de representación de datos espaciales.....	20
Tabla 2-2: Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica.....	35
Tabla 3-1: Clasificación del suelo. U.S.D.A (Soil Survey Staff).....	44
Tabla 3-2: Clasificación del suelo según el p.H. U.S.D.A.....	46
Tabla 3-3: Número atómico y densidad de algunos metales pesados.....	48
Tabla 3-4: Concentración natural de metales pesados (mg /Kg).....	50
Tabla 3-5: Descripción de Unidades Tipo.....	56
Tabla 5-1: Información espacial del Sistema de Información Geográfica.....	78
Tabla 5-2: Propiedades de la imagen: Unidades Tipo Geológicas.....	81
Tabla 5-3: Propiedades de imagen. Tipos de vegetación.....	82
Tabla 5-4: Puntos de control para la transformación de coordenadas.....	85
Tabla 5-5: Propiedades de imagen rectificadas en ERDAS IMAGINE.....	87
Tabla 5-6: Contenido de la base de datos espacial y temática.....	97
Tabla 6-1: Valores de fondo por municipio.....	122
Tabla 6-2: Valores de referencia por municipio.....	123

INTRODUCCION

La Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Madrid y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) realizaron de forma conjunta un trabajo sobre metales pesados: *Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid*, publicado por el IGME en el año 2002. Los resultados obtenidos por el estudio antes mencionado servirán para la elaboración de la base de datos para la ejecución del presente proyecto.

Actualmente la Comunidad de Madrid cuenta con Sistemas de Información Geográfica en diversas áreas como el urbanismo, turismo y medio ambiente. Se pueden citar el Sistema de Información Geográfica de la Gerencia Municipal de Urbanismo y el de la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid.

El presente proyecto tiene como objetivo principal diseñar y poner en funcionamiento un Sistema de Información Geográfica, mediante el uso del Programa informático ArcGis, que permita estudiar la distribución natural de metales pesados en suelos de la Comunidad de Madrid.

El proyecto permitirá relacionar varios elementos como la hidrología, geología, ubicación de zonas industriales, la ubicación de vertederos, y tipos de vegetación con la distribución de metales pesados por medio de sus valores de referencia y fondo.

Este tipo de proyecto constituye una herramienta para la realización de Estudios de Impacto Ambiental dentro de la Comunidad de Madrid, que estén relacionados con la contaminación de suelos ya que será posible comparar espacial y numéricamente el contenido de metales pesados de forma natural y valores anómalos que provengan de algún tipo de actividad contaminante.

Para cumplir con el objetivo propuesto se utilizará como herramienta de diseño el programa ArcGis y además es necesario plantear algunos objetivos específicos:

- Recopilar y almacenar de forma eficaz toda la información referente a la Comunidad de Madrid que contribuya a la base de datos del proyecto.
- Crear una base de datos alfanumérica actualizada sobre distintos componentes de La Comunidad de Madrid. Crear una base de datos georreferenciada mediante el programa ArcGis.
- Manipulación de la información original almacenada para la creación de nuevos mapas temáticos y edición de resultados.

RESUMEN

Este proyecto tiene por objetivo diseñar y poner en marcha un Sistema de Información Geográfica para el estudio de la distribución natural de metales pesados en los suelos de la Comunidad Autónoma de Madrid mediante sus valores de fondo y referencia. Es posible relacionar varios elementos como la división municipal, hidrología, geología, ubicación de zonas industriales, ubicación de vertederos y tipos de vegetación con la distribución de metales pesados.

La mayor parte de la información utilizada proviene del estudio: *“Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid”*, realizado por La Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Madrid y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

La construcción del Sistema de Información Geográfica se realizó en tres etapas: entrada y edición de datos, operaciones de análisis y representación

de resultados. Se utilizó como herramienta de diseño el programa informático ArcGis. Se describieron todos los posibles análisis que se pueden realizar mediante el Sistema de Información Geográfica y se presentaron tres mapas temáticos: zonas de exclusión para el diseño del muestreo realizado por el IGME, asignación de valores de fondo y referencia de metales pesados por municipio y líneas de igual contenido de elementos traza.

ABSTRACT

This project has as object design and start a Geographical Information System for the study of the natural distribution of heavy metals in the soils of the Community of Madrid by means of the values of bottom and reference. It is possible to relate several elements as the municipal division, hydrology, geology, location of industrial parks, location of dumps and types of vegetation, to the distribution of heavy metals.

Most of the used information comes from the study: *“Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid”*, realized by The Council of Environment of the Community of Madrid and the Geological and Mining Institute of Spain (IGME).

The construction of the Geographical Information was realized in three stages: entry and edition of information, operations of analysis and representation of results. It was used as tool of design the software ArcGis.

There were described all the possible analyses that can be realized by means of the Geographical Information System and presented three thematic maps: zones of exclusion for the design of the sampling realized by the IGME, assignment of values of bottom and reference of heavy metals by municipality and lines of equal content of elements.

CAPITULO 1

1. GLOSARIO

ArcCatalog: Aplicación del programa informático ArcGis que permite explorar, localizar, organizar y administrar tanto datos geográficos como alfanuméricos (www.esri.es).

ArcGis: Programa informático creado y distribuido por la empresa ESRI que sirve para la construcción de Sistemas de Información Geográficos.

ArcMap: Aplicación del programa informático ArcGis que permite visualizar, editar, y analizar los datos (www.esri.es).

ArcToolbox: Aplicación del programa informático ArcGis que permite realizar conversiones entre formatos, cambios de proyección, y ajuste espacial (www.esri.es).

Atributo: Es una propiedad o característica de las entidades de una base de datos. Un atributo gráfico es un dato alfanumérico que caracteriza a una entidad gráfica (punto, línea, sólido, etc.) generalmente con características

sobre el estilo en el que se representa esa entidad, tal como color, ancho, trama, etc. (Moldes, 1995).

Base de datos: Conjunto de datos organizados e interrelacionados escrito sobre un soporte legible por ordenador. Formado por una o varias tablas, cada una de las cuales está organizada en registros (filas) y campos (columnas) (Moldes, 1995).

Buffering: Técnica que permite obtener el área de influencia de una entidad o un conjunto de entidades; es decir, el área que rodea a éstas, definida generalmente a través de una distancia (Moldes, 1995).

CAD (Computer Assisted Design): Sistema de dibujo y diseño por ordenador (Moldes, 1995).

CAM (Automated Mapping): Siglas inglesas de sistemas de cartografía automática (Moldes, 1995).

Capa (layer): Sistema de clasificación de entidades de un SIG o CAD que generalmente está asociado a un tipo de entidad (Moldes, 1995).

CPU (Central Processing Unit): Elemento del ordenador que dirige la secuencia de las operaciones e inicia las órdenes al ordenador para su ejecución (Moldes, 1995).

Datum: Modelo matemático de la esfera terrestre utilizado en los cálculos geodésicos (Moldes, 1995).

Digitalización: Es la captura de datos gráficos en técnica vectorial, aunque también es el proceso de captura de imágenes en técnica raster, e incluso la captura de datos alfanuméricos (Moldes, 1995).

Entidad: Objeto acerca del cual se recoge un dato. Ejemplos: una empresa, una persona, un país, etc. (Moldes, Javier. 1995).

Escáner: Periférico de entrada que permite la captura de una imagen en técnica raster (Moldes, 1995).

ESRI (Environmental Systems Research Institute): Empresa creadora del programa informático ArcGis.

Filtración: Consiste en optimizar el número de vértices de las líneas para que sean más fáciles de procesar y ocupen menos espacio, aproximándose lo mejor posible a su forma original. Se trata de eliminar algunos vértices cuando están muy próximos entre sí o bien eliminar vértices intermedios en tramos rectos (Moldes, 1995).

Fotogrametría: Procedimiento para obtener planos de grandes extensiones de terreno por medio de fotografías, tomadas generalmente desde una aeronave. (www.rae.es)

Geodatabase: Modelo de datos con el que trabaja el programa ArcGis, en el cual la información temática y espacial está almacenada en un solo fichero.

GeoProcessing Wizard: Herramienta de ArcMap que permite realizar diferentes operaciones con polígonos.

Georreferenciación (geocoding): Proceso por el cual se le asignan coordenadas a una entidad de la base de datos alfanumérica o bien se asocia un dato a una entidad ya referenciada geográficamente (Moldes, 1995).

GIS (Geographic Information System): Denominación Inglesa de Sistemas de Información Geográfica (Moldes, 1995).

GPS (Global Positioning System): El sistema Global de posicionamiento (GPS por sus siglas en inglés) es un sistema satelitario basado en señales de radio emitidas por una constelación de 21 satélites. El sistema permite el cálculo de coordenadas tridimensionales (www.nautigalia.com).

Join: Técnica de unión lateral de dos tablas de una base de datos basándose en la relación entre ambas a través de un campo común. También se utiliza este término (unión) para definir el proceso por el cual se unen dos redes de polígonos en una única red de tal forma que la red resultante cubre la zona en la cual tiene existencia cualquiera de las redes superpuestas (Moldes, 1995).

Metadato: Información adicional acerca de un dato, por ejemplo, la escala apropiada en la que se deben usar los datos, el reporte de exactitud, la descripción de lo que significa el nombre de un atributo, etc.

Píxel: Elemento individual de una imagen (un punto) en un terminal o pantalla de ordenador (Moldes, 1995).

Plotter: Es un dispositivo que conectado a un ordenador puede dibujar sobre papel cualquier tipo de gráfico mediante el trazado de líneas gracias a las

plumillas de las que dispone. Se utiliza para dibujo de planos de Arquitectura, Ingeniería, diseño industrial, etc. (<http://tradu.scig.uniovi.es>).

Polígonos Thiessen: Es el método de interpolación más simple, basado en la distancia euclidiana. Se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia. Es una de las funciones de análisis básicas en los SIG (www.encyclopedia.us.es).

Resolución: Medida de la nitidez con que se puede definirse una imagen en una pantalla de visualización o en una salida de impresora; normalmente se expresa en puntos por pulgada (dpi) para impresoras y en píxeles para monitores (Moldes, 1995).

SGBD: Sistema de Gestión de bases de datos

Shapefile: Es un formato de ficheros para GIS desarrollado por ESRI. Es un estándar de geometrías, especifica: puntos, líneas, polígonos, etc., está formado por tres ficheros: shp, shx, y dbf. (www.fing.edu.uy)

SI: Sistemas de Información

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SQL: Lenguaje de consulta estructurado

Tableta digitalizadora: Es una tablilla sobre la que se puede dibujar o escribir con un lápiz electrónico. Su ventaja sobre el ratón está en la precisión que podemos alcanzar. El nombre de tableta gráfica viene dado por su uso intensivo en aplicaciones gráficas, como el diseño asistido por ordenador (CAD-CAM) o en la manipulación de fotografías o imágenes de vídeo (<http://www.ciencia-ficcion.com>).

Técnica Raster: Técnica de representación de gráficos con ordenador que consiste en presentar un dibujo o una imagen con una matriz de puntos que recubre toda la imagen o el dibujo (Moldes, 1995).

Técnica Vectorial: Técnica de representación de entidades gráficas con ordenador; consiste en almacenar las colecciones de vectores que definen los trazos de un dibujo (Moldes, 1995).

Teledetección (percepción remoto): Es la ciencia de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, gracias a la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y la tierra (Chuvieco, 1996).

Topología: Una relación de vecindad entre las entidades de un Sistema de Información Geográfica (Moldes, 1995).

UTM: Sistema de referencia terrestre establecido en 1936 por la Unión Geodésica y Geofísica Internacional. Esta proyección divide la esfera terrestre en 60 planos o husos de proyección tangentes al ecuador. España está en los husos 29, 30 y 31 (European Datum 1950) (Moldes, 1995).

Zoom: Función típica de un sistema informático gráfico que posibilita la modificación del tamaño de las entidades dentro de una vista en la pantalla (Moldes, 1995).

CAPITULO 2

2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de herramientas para la adquisición, almacenamiento, análisis y edición de información espacial, que se estructura internamente como un sistema gestor de bases de datos georreferenciados.

Además, se puede definir a los SIG como un tipo muy especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes.

Esta nueva tecnología permite gestionar y analizar información espacialmente distribuida y resolver problemas sobre la distribución espacial efectuando las siguientes actividades:

- Superposiciones de mapas, transformaciones de escala y la representación gráfica
- Enlazar espacialmente las bases de datos alfanumérica, almacenadas en el sistema, con información georreferenciada y realizar consultas espaciales y alfanuméricas
- Realizar modelos conceptuales con datos que tengan un componente espacial
- Comparar eficazmente los datos espaciales a través del tiempo (análisis temporal).
- Integrar en el futuro, otro tipo de información complementaria que se considere relevante y que esté relacionada con la base de datos original.

La característica principal de los SIG es su capacidad de análisis, de generar nueva información de un conjunto previo de datos mediante su manipulación y reelaboración. Los SIG tienen mayor capacidad de análisis espacial que un sistema de diseño asistido por ordenador (CAD/CAM), por su capacidad de relacionar los elementos gráficos (puntos, líneas, polígonos), que también son manejados por un sistema CAD/CAM con los elementos alfanuméricos de una base de datos temáticos.

Las diferencias con los programas de cartografía asistida por ordenador estriban en su posibilidad de manejar más de un conjunto de elementos gráficos al mismo tiempo y, sobre todo, la capacidad de construir nuevos datos a partir de los ya existentes.

Los SIG forman parte del ámbito más extenso de los denominados Sistemas de Información (SI) que incluyen una base de datos, una base de conocimientos y un sistema de interacción con el usuario. Los mismos elementos se pueden encontrar en la organización general de un Sistema de Información Geográfica.

Las áreas de uso práctico de un Sistema de Información Geográfica son muy variadas, desde el inventario de recursos naturales y humanos hasta el control y la gestión de los datos catastrales y de propiedad urbana, la planificación y la gestión urbana y de los equipamientos, la cartografía y el control de grandes instalaciones, etc.

2.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.2.1 Equipos informáticos

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden ejecutarse en un amplio rango de ordenadores que incluyen tanto los equipos centralizados como las configuraciones individuales o de red.

Los elementos físicos básicos que se requieren son la unidad central de proceso (CPU), los periféricos de entrada, que permitan la introducción de información de tipo cartográfica como las tabletas digitalizadoras y los escáneres, y los periféricos de salida como las impresoras y plotters.

El CPU está compuesto de un procesador electrónico, una memoria de acceso rápido y un sistema de comunicación entre estos elementos y, también entre ellos y los periféricos.

Las tabletas digitalizadoras (de carácter vectorial) constituyen el mecanismo más usual para la entrada de datos espaciales. Están compuestas por un tablero plano sobre el cual se puede disponer un mapa de papel, en el interior se encuentra una red de hilos metálicos que pueden detectar magnéticamente la posición del cursor. Una lupa incorporada al cursor permite posicionarlo sobre un elemento del plano con mucha precisión e indicar que se desea registrar las coordenadas de ese lugar.

En los barredores ópticos o escáneres (de carácter *raster*) se coloca un mapa sobre una pantalla de cristal, se envía un rayo de luz muy fino y preciso, el cual es reflejado sucesivamente por una pequeña porción del mapa tratado. La luz reflejada es captada por el barredor óptico, que en función de su intensidad, codifica un valor numérico, al mismo tiempo que registra su posición espacial.

Los escáneres generan una imagen digital del mapa, que contiene el nivel de gris/ blanco, o el color, de cada punto del mapa. A partir de esta información digital, se reconstruye un mapa digital semejante al que existe en papel.

Como periféricos de salida se tiene la pantalla, las impresoras de tipo láser o de inyección a tinta.

2.2.2 Programas Informáticos

Los programas de manipulación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) constan de las herramientas y funcionalidades necesarias para almacenar, analizar y visualizar información geográfica.

Los componentes principales de un programa informático que permita construir un SIG son los siguientes:

- ✓ Sistema de manejo de base de datos
- ✓ Interfase gráfica con los usuarios para el fácil acceso a las herramientas
- ✓ Herramientas para captura y manejo de información georreferenciada
- ✓ Herramientas para soporte de consultas, análisis y visualización de datos geográficos.

Los programas informáticos disponibles para manejar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden ser comerciales, de dominio público y de enseñanza.

Los SIG comerciales están elaborados y vendidos por empresas que los mantienen y desarrollan continuamente, entre ellos se puede mencionar: ARCGIS de ESRI (USA), IMAGINE de ERDAS (USA), MICROSTATION de INTERGRAPH (USA), etc.

Los programas de dominio público son elaborados por instituciones públicas y están disponibles de forma gratuita como por ejemplo el programa GRASS.

2.3 DATOS

Los datos representan el principal activo de cualquier Sistema de Información Geográfica (SIG), lo que significa que su eficacia se mide por el tipo, la calidad y la vigencia de los datos con los que opera.

La obtención de buenos datos puede absorber la mayor parte del presupuesto y del tiempo que se requiere para implementar un SIG. Previo a la utilización de cualquier herramienta SIG es recomendable plantearse dónde y cómo se obtendrá la información que integrará la base de datos, es decir, se debe estudiar la disponibilidad de datos geográficos con la que se cuenta.

“En España la posibilidad de disponer de datos en un formato digital es reducida” (Bosque, 1997). En el caso de los datos ambientales y del medio físico existen fuentes cartográficas y por lo tanto información georreferenciada, en formato analógico, que proporcionan información bastante detallada y precisa. “Los sensores remotos, tales como las fotos aéreas y la teledetección desde el espacio, constituyen una fuente esencial de datos para cuestiones medioambientales” (Chuvienco, 1990).

Un dato geográfico se puede descomponer en dos elementos, que se describen a continuación.

- 1) Componente espacial o soporte: Se refiere a una entidad geométrica sobre la cual se observa un fenómeno, puede ser puntual, lineal o poligonal.
- 2) Componente temática o atributo temático: Puede ser cualquier hecho que adopte diferentes modalidades en cada observación, por ejemplo la concentración de metales pesados en el suelo.

Existen dos grandes tipos de fuentes de datos: la observación directa de la realidad y el uso de fuentes secundarias como mapas analógicos, fotografías aéreas, imágenes tomadas por sensores remotos en formato digital y documentos numéricos que recogen informaciones temáticas, censales o de cualquier otro tipo.

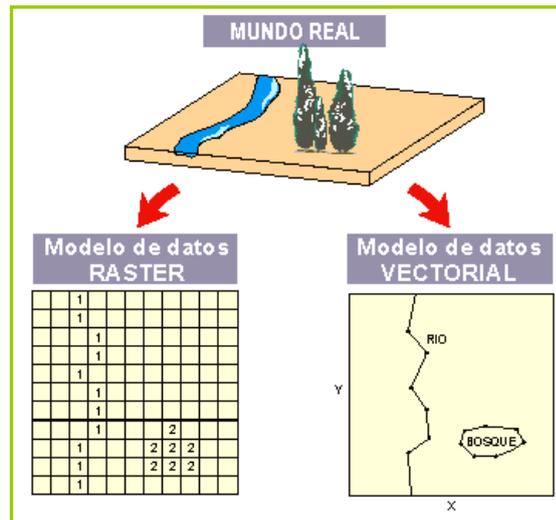
La componente espacial se puede adquirir a partir de datos geométricos existentes en soporte CAD (diseño asistido por ordenador), capturándola por digitalización, por vectorización de imágenes o con técnicas topográficas mediante estaciones totales y GPS (Global Position System) o por fotogrametría. Existen funciones en un SIG que permiten depurar los datos, estructurarlos topológicamente y asociarlos con las bases de datos alfanuméricas (componente temática).

La componente temática se obtiene a partir de documentos alfanuméricos almacenados en forma de base de datos.

2.3.1 Componente espacial

Como se mencionó previamente en el apartado 2.3, la componente espacial de un dato geográfico se refiere a una entidad geométrica sobre la cual se observa un fenómeno. Se puede codificar de dos maneras distintas: el modelo vectorial y el modelo *raster*. En la figura 2-1 se observa la representación de la realidad a través de los dos modelos.

Figura 2-1: Modelos de datos *raster* y vectorial



Fuente: <http://recursos.gabrielortiz.com>

Se describen en los siguientes apartados los dos tipos de modelos y además la comparación entre ellos analizando sus ventajas y desventajas.

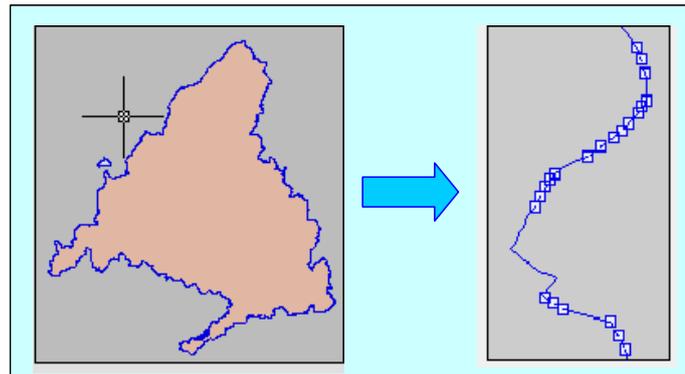
2.3.1.1 Modelo vector

En el modelo vector, la información sobre puntos, líneas y polígonos se almacena como una colección de coordenadas (x,y) , como ejemplo en la figura 2-2 se puede observar el límite de la Comunidad de Madrid como un conjunto de líneas.

La ubicación de una característica puntual puede describirse con un solo punto de coordenadas (x, y) , las características lineales se almacenan como un conjunto de puntos y finalmente las características poligonales, pueden guardarse como un circuito cerrado de coordenadas.

El modelo vectorial resulta extremadamente útil para describir características discretas, pero menos útil para describir características de variación continua.

Figura 2-2: Imagen vector. Límite de la Comunidad de Madrid

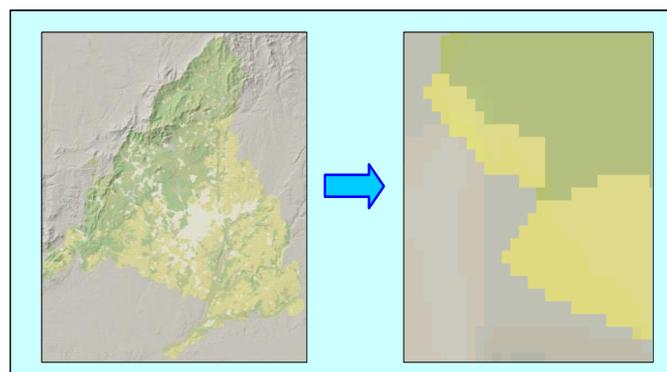


2.3.1.2 Modelo *raster*

En los sistemas *raster* el mapa se representa a base de celdas o píxeles de formas rectangulares o en células rectangulares o cuadradas, a cada una de las cuales se le asigna un valor.

En la figura 2-3 se puede observar los tipos de vegetación existentes en La Comunidad de Madrid como un conjunto de píxeles.

Figura 2-3: Imagen *raster*. Tipos de vegetación



En un modelo *raster* no se consideran explícitamente los objetos geográficos, sino que éstos surgen, de forma implícita, de la ordenación espacial de los valores de los píxeles. La topología de los objetos está contenida en la regularidad de la rejilla, la cual permite conocer cuáles son los vecinos de cada uno de los puntos del mapa y tener una idea de las relaciones espaciales existentes entre los elementos representados en el mapa.

Un elemento esencial de las imágenes *raster* es el tamaño del píxel ya que tiene asociado el número total de filas y columnas de toda la cuadrícula.

El tamaño del píxel establece la escala del mapa, es decir, la relación que existe entre una longitud de la realidad y su representación en el mapa. Cuanto más pequeño sea el píxel, más precisa será la representación de la realidad. Al mismo tiempo, cuanto más pequeño sea el píxel, mayor número de filas y columnas se necesitará para representar una misma porción del mapa y más laborioso será su tratamiento y análisis.

El criterio básico para establecer la escala de un mapa *raster* es el siguiente (Star y Estes, 1990): la longitud del píxel debe ser la mitad de la longitud más pequeña que sea necesaria representar de todas las existentes en la realidad.

2.3.1.3 Comparación del modelo *raster* y vector

El modelo *raster* tiene algunas ventajas respecto al modelo vector, por ejemplo, el tratamiento de los algoritmos es mucho más sencillo, facilita la captura de datos con un escáner, es más adecuado para las entradas de datos en forma de retícula como las imágenes digitales de teledetección y facilita los procesos de comparación entre mapas temáticos basados en el mismo tamaño de píxel.

Entre las desventajas que el modelo *raster* presenta se puede mencionar: mayor necesidad de almacenamiento que en los sistemas vectoriales, la representación de un recurso depende del tamaño del píxel por lo que se dificulta la representación de rasgos lineales como curvas de nivel, carreteras, etc.

En el modelo vector el mapa puede representarse en su resolución original con múltiples atributos, además, el cálculo de áreas y longitudes es más preciso que en el modelo *raster*, sin embargo, los datos espaciales de variación continua como imágenes de satélite no pueden ser representados. En la tabla 2-1 se resumen las principales características de los modelos vectorial y *raster*.

Tabla 2-1: Modelos de representación de datos espaciales

CARACTERÍSTICAS	VECTORIAL	RASTER
Orientación del modelo	Modelado de elementos discreto, con límites precisos	Modelado de objetos continuos (fields)
Fuentes de información	-Digitalización de mapas analógicos -Vectorización de mapas adquiridos por escáner. -Coordenadas de GPS -Documentos CAD	-Fotogramas aéreos -Imágenes de teledetección -Mapas e imágenes escaneadas -Mapas y documentos vectoriales convertidos en <i>raster</i>
Almacenamiento de los datos espaciales	-Puntos: coordenadas x, y -Líneas: vectores de coordenadas x, y conectadas -Polígonos: vectores cerrados	Coordenadas origen de filas y columnas y resolución del píxel. Cada celda o píxel se localiza por su fila y columna
Representación de los elementos	-Los puntos representan localizaciones (0D) -Las líneas objetos lineales (con longitud) (1D) -Los polígonos elementos con superficie (2D)	-Puntos: se representan por un píxel -Líneas: píxeles adyacentes con el mismo valor -Polígonos: píxeles contiguos con el mismo valor
Relaciones topológicas	-Líneas: se registra la conexión de líneas y nodos. -Polígonos: mantienen la adyacencia de polígonos respecto de las líneas	Los píxeles (celdas) vecinos se localizan fácilmente, avanzando o retrocediendo por las filas y columnas
Análisis geográfico	-Superposición topológica -Corredores y proximidad -Fusión de polígonos (dissolve) -Búsquedas espaciales y lógicas -Geocodificación por direcciones -Análisis de redes	-Coincidencia espacial- Proximidad -Análisis de superficies -Dispersión -Análisis de rutas óptimas -Modelado de fenómenos físicos
Representación cartográfica	Adecuado para cartografía de elementos con contornos y posición precisos (0D; 1D; 2D). No es muy apropiada para fenómenos continuos	Adecuada para imágenes y fenómenos continuos, cuyos atributos varían gradualmente (2D, 2,5 D). No es apropiada para representar puntos y líneas (0D; 1D)

Fuente: Zeiler, M. (1999)

2.3.2 Componente temática

La componente temática se almacena en forma de base de datos. Para diseñarla se debe hacer un análisis previo de la información que se va a incluir en ella y así definir conceptualmente las relaciones entre los diversos elementos que la integran.

Los objetivos del diseño de la base de datos son los siguientes:

- Asegurar que todos los datos necesarios para satisfacer los requerimientos del usuario están almacenados en la base de datos.
- Eliminar la redundancia de datos intentando que el espacio previsto para almacenar la información sea el mínimo, sin perder claridad o información.
- Suministrar una forma clara para entender la organización de los datos.
- Dar respuesta a todas las preguntas que en el proceso de diseño se han definido.

Las modalidades existentes de bases de datos son: tabular o fichero simple, jerárquica, en red, relacional y orientada a objetos.

En la actualidad la organización de la base de datos más empleado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) comerciales es la denominada relacional cuya objetivo es asegurar la independencia de los programas del usuario de la base de datos específica; es decir, del formato físico de almacenamiento de los datos.

La ventaja principal del empleo de una base de datos relacional es la facilidad de implementarla y su flexibilidad, ya que las nuevas tablas o las nuevas filas de datos se añaden sin ningún problema.

Las bases de datos relacionales representan la información según el método entidad–relación, el cual utiliza una serie de elementos:

- Conjunto de entidades que son los objetos relevantes para la base de datos a elaborar
- Los Atributos que son las características o variables asociadas a cada entidad
- Las relaciones que son los mecanismos de cualquier orden que permiten relacionar unas entidades con otras

Los elementos del enfoque entidad – relación se emplean para representar gráficamente la situación de la realidad que se desea incluir en la base de datos para comprender los problemas que se desean tratar.

En una base de datos relacional los datos se almacenan formando las llamadas relaciones que son unas tablas rectangulares formadas por filas (registros) y columnas (campos) como se representa en la figura 2-4.

Figura 2-4: Elementos de una base de datos relacional

Características de Unidades Geológicas							
	Campo 1	Campo 2	Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	
Identificador	Unidades Geológicas	pH	Materia Orgánica (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	
1	Tipo 1	5,84	3,85	74,30	16,4	7,20	Registro 1
2	Tipo 2	5,85	2,36	80,50	11,4	6,70	Registro 2
3	Tipo 3	6,41	0,82	76,00	12,1	12,80	Registro 3
4	Tipo 4	8,28	1,54	59,80	26,2	14,20	Registro 4
5	Tipo 5	7,78	1,69	49,60	24,9	25,50	Registro 5
6	Tipo 6	7,34	1,48	67,20	20,1	13,30	Registro 6

Una base de datos relacional está compuesta por varias tablas que a su vez deben ser un conjunto único; no pueden existir ninguna tabla con dos filas iguales. Para conseguir esto una de las columnas constituye un atributo especial, el identificador de la fila/registro.

El identificador es único para cada registro y es un elemento no redundante, por lo tanto, no se puede eliminar sin destruir la tabla o relación, sirve para referirse a otras tablas, y así relacionar dos conjuntos de datos diferentes.

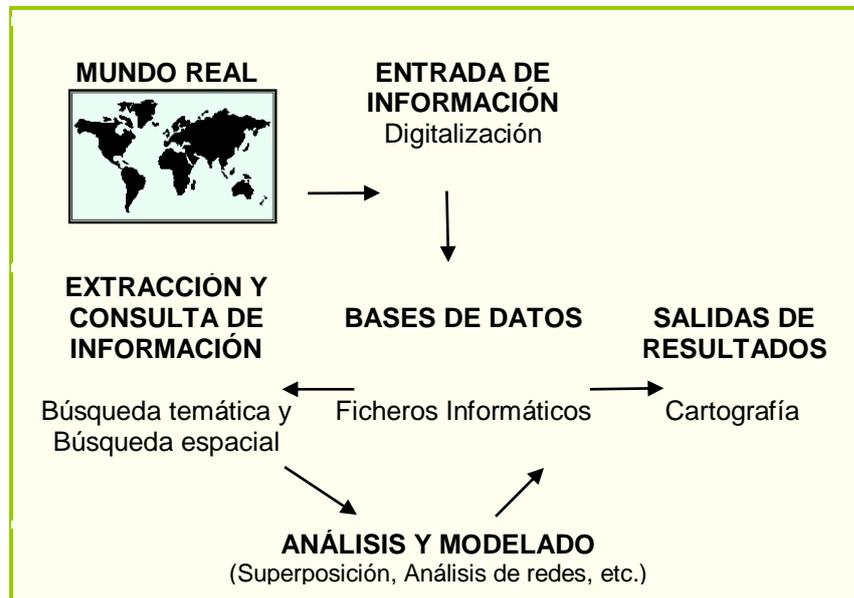
En cualquier tipo de Sistema de Gestión de Bases de Datos (SGBD) se pueden diferenciar dos grandes componentes: los programas básicos que controlan el acceso a los datos y gestionan su almacenamiento y las formas de comunicación con el usuario, el segundo componente es el lenguaje de interrogación a la base de datos; el más desarrollado y extendido es el lenguaje SQL (lenguaje de consulta estructurado).

2.4 FUNCIONES DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Desde el punto de vista informático un Sistema de Información Geográfica cuenta con cuatro componentes lógicos que se presentan esquematizados en la figura 2-5.

- Funciones para la entrada de información
- Funciones analíticas
- Funciones para la salida, representación gráfica y cartográfica de la información
- Funciones de gestión de la información espacial

Figura 2-5: Funciones de los Sistemas de Información Geográfica



Fuente: Sistemas de Información Geográfica (BOSQUE, Joaquín)

2.4.1 Funciones para la adquisición de información

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) cuentan con funciones para la adquisición de información que son los procedimientos que permiten convertir la información geográfica del formato analógico (mapas) al formato digital para ser manipulados por el ordenador.

La introducción de datos incluye la conversión de datos procedentes de los mapas, la observación sobre el terreno, las imágenes procesadas obtenidas mediante satélites y fotografías aéreas en datos digitales compatibles.

Además de los mecanismos de entrada propiamente dichos (digitalización), los SIG cuentan también con procedimientos que permiten eliminar errores o redundancias en la información incorporada a la base de datos espacial y alfanumérica

La toma directa de datos de la realidad geográfica es el procedimiento más seguro para conseguir generar una base de datos fiable, pero implica altos costes monetarios y de tiempo.

Las fuentes secundarias de información son las más usadas a pesar de los problemas que se presentan en la conversión de datos representados en mapas analógicos al formato digital y, en concreto, al modelo de datos vectorial.

Las etapas a seguir en el proceso de conversión de datos al modelo vectorial son los siguientes:

- Digitación o digitalización de la información cartográfica analógica
- Etiquetado de cada objeto geográfico digitalizado con un identificador unívoco
- Asignación de la información temática a cada objeto geográfico digitalizado y correctamente identificado.

La fase de digitalización de la información cartográfica se puede llevar a cabo de diversas maneras, mediante digitalización vectorial semiautomática y la vectorización de datos espaciales disponibles en formato *raster*.

En la digitalización vectorial semiautomática se crea un fichero informático con las coordenadas de los límites de los objetos espaciales existentes en el mapa fuente, es decir, es un documento analógico.

Se debe identificar los objetos espaciales que existen en el mapa fuente, asociándoles un nombre único y luego empleando una tableta de digitalización, se obtienen las coordenadas *x* e *y* de cada punto o de los vértices de los segmentos lineales. Cada objeto espacial debe quedar identificado con un nombre, de esta forma se crea un fichero o ficheros de coordenadas de todos los objetos espaciales existentes.

2.4.2 Funciones analíticas y de gestión de la información

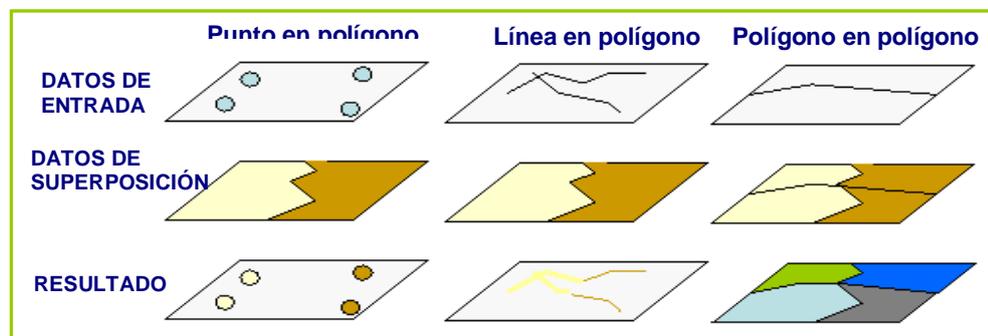
Los elementos más característicos de un Sistema de Información Geográfica (SIG) son las funciones analíticas que facilitan el procesamiento de los datos de modo que sea posible obtener mayor información de la que inicialmente se disponía.

Las funciones de análisis tratan conjuntamente los datos cartográficos y sus atributos temáticos mediante las herramientas de recuperación,

superposición, vecindad y conectividad. (Aronoff, 1989; Comas y Ruiz, 1993). Cada una de estas herramientas se puede dividir como se señala a continuación:

- Recuperación: Recuperación filtrada, consulta e interrogación de la base de datos, reclasificación, mediciones y estadística espacial
- Superposición: Superposición geométrica, superposición lógica de atributos y superposición aritmética de atributos. En la figura 2-6 se representa la operación de superposición que es una de las funciones de análisis de los SIG.
- Vecindad: Contenido, filtrado, poligonación o polígonos thiessen, generación de isolíneas, interpolación y modelos digitales del terreno
- Conectividad: Contigüidad, proximidad, difusión espacial y análisis de redes

Figura 2.6 Superposición



Fuente: Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza

Las operaciones más comunes incluyen la superposición de diferentes mapas temáticos, la adquisición de información estadística sobre los atributos, el cambio de escala, la adaptación de los datos a las nuevas proyecciones, el cálculo de nuevas superficies y perímetros, entre otras.

2.4.2.1 Funciones analíticas con datos vectoriales

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) vectoriales permiten realizar las siguientes funciones analíticas (Bosque, 1997):

- Análisis estadístico de la componente temática de los datos geográficos:
análisis de variables temáticas y análisis espacial

- Análisis espacial
 - Mapas de puntos: Análisis de centro medio y centro de gravedad, distancia típica y radio dinámico, elipse de variabilidad, análisis del vecino más próximo, etc.

 - Redes: descripción de aristas, medidas de la cohesión, determinación de las distancias y recorridos, medidas de la accesibilidad topológica, análisis de proximidad y accesibilidad, etc.

 - Polígonos: análisis de contigüidad, autocorrelación espacial, comparación de mapas, etc.

- Modelado cartográfico: superposición de polígonos, generación de áreas de influencia o análisis de vecindad, etc.
- Búsqueda y recuperación de información de una base de datos geográfica.

La recuperación de información temática se puede efectuar, de dos formas diferentes (Cebrián y Mark, 1986): mediante especificación simbólica o nominal y utilizando una condición simbólica. Mientras que, la búsqueda espacial, se puede realizar de tres maneras (Cebrián y Mark, 1986): especificando un dominio espacial, mediante condición geométrica o topológica y por muestreo espacial.

2.4.2.2 Funciones analíticas con datos *raster*

Entre las funciones analíticas que se pueden ejecutar en una imagen *raster* se pueden mencionar, el análisis estadístico de todos los valores temáticos incluidos en el conjunto de píxeles y la obtención del valor temático más representativo o el menos representativo.

En cuanto a la información espacial se puede determinar la posición geográfica de los píxeles considerados en términos de coordenadas *raster*: filas y columnas; estudiar la variación de las posiciones espaciales de los píxeles; analizar la forma y el tamaño de los objetos geográficos que se

delinean sobre el mapa, estudiar la distancia y proximidad a uno o varios píxeles de referencia.

Los análisis operativos que se pueden realizar con datos *raster* son los siguientes (Berry, 1987):

- Reclasificación de los valores temáticos de un mapa: Permiten realizar búsquedas y extracción selectiva de la información de la base de datos *raster*
- Superposición de mapas. Se considera el mismo píxel de los distintos mapas fuente, es decir los píxeles que se encuentran en la misma posición. Se genera un conjunto de valores temáticos sobre los cuales se puede realizar operaciones para generar el valor característico de cada píxel
- Cálculo de distancias y de conectividad o camino más corto entre puntos. Se puede calcular la distancia entre dos lugares como el número de píxel que separa un punto de otro (distancia *raster*)
- Filtrado de mapas. La vecindad inmediata de cada píxel genera un conjunto de píxeles cada uno de ellos con su propio valor temático. La operación de filtrado consiste en determinar el valor del píxel central en el

nuevo mapa en función de los valores que adoptan los píxeles de la vecindad y el propio píxel de referencia

2.4.3 Funciones para la presentación de la información

Las funciones para la salida, representación gráfica y cartográfica de la información, se refieren a las actividades que sirven para mostrar al usuario los propios datos incorporados en la base de datos del SIG, y los resultados de las operaciones analíticas realizadas sobre ellos. Permiten obtener mapas, gráficos, tablas numéricas y otro tipo de resultados en diferentes soportes que incluyen papel, pantallas gráficas u otros.

2.5 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Las primeras aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) dependieron de las necesidades locales, y por tanto fueron distintas entre sí, en los diferentes lugares en que se aplicaron.

En la Europa continental se incidió especialmente en los sistemas catastrales y en las bases de datos medioambientales. Las mayores inversiones de un SIG en Gran Bretaña fueron hechas en sistemas de empresas de servicios y en la creación de una base topográfica, en Canadá se realizó una aplicación forestal, en Japón se utilizó los SIG en sistemas para el control y modernización de posibles cambios medioambientales, mientras que en

Estados Unidos se realizó un proyecto para facilitar la realización y descripción del censo de 1980.

Los (SIG) pueden ser utilizados para la gestión y la toma de decisiones en algunos sectores, tales como: en la cartografía automatizada, en la gestión territorial, en planificación urbana, en la gestión de recursos mineros, en la ingeniería de tránsito, estudios demográficos, gestión de recursos naturales y medio ambiente.

Los SIG pueden ser utilizados en las entidades públicas para la construcción y mantenimiento de *planos digitales de cartografía* que son actualizados periódicamente.

En la *gestión territorial* facilitan labores de mantenimiento de infraestructuras, mobiliario urbano y permiten realizar una optimización en los trabajos de desarrollo, mantenimiento y gestión de redes de electricidad, gas, agua, teléfonos y alcantarillados.

Los SIG también son utilizados en la evaluación de las capacidades de uso del territorio en *planes de ordenación del territorio* cuyo objetivo es determinar la capacidad de recibir algún tipo de actividad humana en cada punto de una región. En este tipo de aplicación, se establece una valoración cuantitativa de cada píxel de la zona de estudio, para ello, se genera una base de datos digital que contiene la información de las condiciones

existentes de la región como la topografía, la litología, los tipos de suelos, precipitaciones, temperaturas, vegetación natural, la ocupación humana del suelo en el presente, etc.

Además, Los SIG constituyen una herramienta en la *planificación urbana y regional* mediante el diseño y gestión de ordenanzas del uso del suelo, la gestión de parques naturales, la gestión municipal de licencias de obras, gestión del mobiliario urbano y señalización. También pueden ser aplicados a la gestión del catastro urbano, registros de la propiedad, registros de productores, seguridad pública y en la gestión pública de estadísticas y censos (Moldes, 1995).

Otra aplicación importante de los SIG son las *explotaciones mineras* de gas, petróleo y carbón, ya que permiten investigar las zonas más propicias para la explotación minera y la obtención de los horizontes del terreno para la investigación de los filones mineros.

En la *ingeniería de transportes* el uso de los SIG facilita el diseño de planes de tráfico, evaluación de la red vial, optimización de los recorridos de los sistemas de acopio y distribución, gestión de líneas de transportes, incluyendo gestión de material, turnos, enlaces y horarios (Moldes, 1995).

En *demografía* las aplicaciones que tienen los SIG se basan en la utilización de las variables características demográficas, y en concreto su distribución

espacial, para la toma de decisiones. Se pueden citar como ejemplos el análisis para la implantación de negocios o servicios públicos y la zonificación electoral.

En la gestión de recursos naturales los SIG permiten realizar: controles de bosques, control de animales salvajes, agricultura y su incidencia en la contaminación de las aguas y el suelo (Bosque, 1997).

La tabla 2-2 resume algunas de las aplicaciones que tienen actualmente los SIG diferenciado tres subsistemas: Físico natural, socio- económico y jurídico- administrativo.

Tabla 2-2: Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica

SUBSISTEMAS	TEMAS	EJEMPLOS
Físico natural	Clima	Modelización de variables microclimáticas, estudios atmosféricos.
	Biología / Ecología	Delimitación de hábitat potencial de especies animales.
	Geomorfología / Geología	Búsqueda de localizaciones de extracciones minerales.
	Hidrología	Evolución de superficie embalsada.
	Riesgos naturales	Procesos de erosión, evaluación de impacto ambiental.
	Territorio	Proyectos de cartografía básica digitalizada.
Socio – económico	Espacios naturales	Protección y conservación de sistemas naturales.
	Población y sociedad	Análisis de densidades urbanas, evolución de usos de suelo.
Socio - económico	Infraestructuras	Sistema de apoyo a estaciones de servicio.
	Servicios públicos	Distribución de equipamiento educativo.
	Actividad primaria	SIG para la ordenación de las explotaciones agrarias.

SUBSISTEMAS	TEMAS	EJEMPLOS
	Actividad industrial	Búsqueda de localización de actividades industriales.
	Actividad comercial	Gestión de redes de oficinas bancarias, estudios de mercado.
	Actividad turística	Mapa de recursos y rutas turísticas.
Jurídico - administrativo	Gestión	Control de tráfico.

Fuente: Técnicas de desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (ARCILA, Manuel)

2.5.1 Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en el estudio del medio ambiente

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son frecuentemente utilizados en el estudio del medio ambiente ya que proporcionan una ayuda fundamental en trabajos tales como repoblaciones forestales, planificación de explotaciones agrícolas, estudios de representatividad, caracterización de ecosistemas, estudios de fragmentación, estudios de especies, entre otros.

Facilitan la evaluación del impacto ambiental en la ejecución de proyectos ya que permite establecer la sensibilidad de cada punto del territorio ante una intervención humana concreta y con ello medir el posible impacto de las distintas actividades localizadas por el hombre (Bosque, 1997).

Si los SIG se integran con sistemas de adquisición de datos permiten el análisis en tiempo real de la concentración de contaminantes permitiendo tomar las precauciones del caso.

Entre los diversos ejemplos que en España que se pueden mencionar sobre la aplicación de los SIG en el medio ambiente tenemos: la cartografía de zonas de riesgo de inundación de Málaga del Servicio de Protección Civil, el sistema de información ambiental de Andalucía de la Dirección General de Planificación de la agencia de medio ambiente y el estudio de impacto ambiental en la construcción de una vía rápida en Pontevedra (Centro de Supercomputación de Galicia).

CAPITULO 3

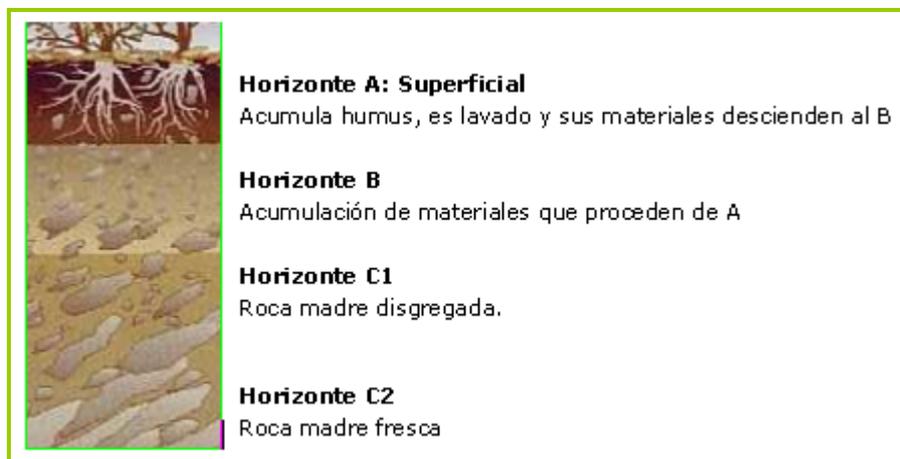
3. GEOQUÍMICA DE SUELOS

3.1 COMPOSICIÓN DEL SUELO

El suelo es una combinación de materia mineral, materia orgánica, agua y aire que se desarrolla en respuesta a interacciones ambientales complejas entre diferentes partes de la Tierra.

El suelo evoluciona de manera gradual hasta un estado de equilibrio con el entorno, es dinámico y sensible a prácticamente todos los aspectos de su entorno por ejemplo cambios ambientales, como el clima, la cubierta vegetal o la actividad animal.

Las características de los suelos difieren en función de los aspectos geológicos, fisiográficos, y climáticos de una región. Estas condicionan sus perfiles típicos en cuanto al desarrollo y extensión de los diferentes horizontes (A-C). En la figura 3-1 se observan los perfiles del suelo.

Figura 3-1: Perfiles del suelo

Fuente: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente (ECHARRI, Luis)

3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS

Entre las características físicas que presenta el suelo se tiene: profundidad, porosidad, textura, estructura, pedregosidad y las características hídricas.

Se describirá solamente la textura ya que “su conocimiento es importante en estudios de metales pesados porque los distintos procesos de adsorción de estos elementos están determinados en gran parte por los filosilicatos laminares y oxihidróxidos metálicos presentes en la fracción arcilla” (De Miguel et al, 2002)

La textura de un suelo está expresada por la distribución del tamaño de las partículas sólidas que lo componen, es decir, por su composición granulométrica.

3.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS SUELOS

Los suelos están constituidos de materia mineral (pequeñas partículas de roca meteorizada), materia orgánica, agua y aire, como se mencionó en el apartado 3.1. La porción de cada uno de estos componentes varía mucho de un tipo de suelo a otro.

Los silicatos minerales son estructuras poliméricas en las que la unidad fundamental es un átomo de silicio rodeado tetraédricamente de cuatro átomos de oxígeno, estos a su vez están unidos a otros átomos de silicio, de manera que la estructura resultante es una red extendida

La meteorización de los silicatos minerales de las rocas puede involucrar reacciones químicas con agua y ácidos, en las que ocurren sustituciones iónicas. Estas reacciones producen sustancias que constituyen una clase de materiales conocidos como minerales de arcilla. Por definición un mineral que tenga un tamaño de partícula menor a 2 μm es un componente de la fracción arcillosa de un suelo.

Entre las características químicas del suelo se tiene: el contenido de materia orgánica, el pH, contenido de carbonato cálcico, disponibilidad de elementos nutritivos para las plantas y contenido en sales solubles.

En los siguientes apartados se describirá el contenido de materia orgánica y la reacción del suelo pH.

3.3.1 Contenido en materia orgánica

La influencia del contenido en materia orgánica se ejerce fundamentalmente en las capas superiores del suelo y decrece con la profundidad.

La materia orgánica del suelo se presenta en aspectos bien diferenciados:

- Materia orgánica claramente visible, constituida por el sistema radical de las plantas y la fauna edáfica
- Materia orgánica constituyente de los microorganismos del suelo
- Restos vegetales parcialmente descompuestos, aún es reconocible su estructura
- Materia orgánica totalmente transformada, de tonos pardos o negruzcos que constituye el humus

El humus se deriva principalmente de las plantas fotosintéticas, algunos de cuyos componentes se descomponen por la participación de microorganismos que viven en el suelo. La parte del humus de color negro

consiste de ácidos húmicos y fúlvicos, los cuales son solubles en disoluciones alcalinas debido a la presencia de los grupos ácido.

El contenido de materia orgánica influye sobre las propiedades de los suelos en distintas formas: constituye una fuente de nutrientes, por lo que influye positivamente en la productividad del suelo, representa un medio de cultivo para los microorganismos edáficos y contribuye a la estabilidad de la estructura del suelo

“La materia orgánica del suelo desempeña un importante papel en los procesos de retención de metales pesados debido a su elevada capacidad de intercambio catiónico, constituye una de las superficies del suelo con mayor poder de adsorción y complejación de metales” (De Miguel et al, 2002).

El Soil Survey Staff (1951) recomienda una clasificación de los suelos, según su contenido de materia orgánica, que se detalla en la tabla 3-1.

Tabla 3-1: Clasificación del suelo. U.S.D.A (Soil Survey Staff)

% MATERIA ORGÁNICA (*)	CLASIFICACIÓN DEL SUELO
0 – 2,5	Muy deficiente en materia orgánica
1,75 – 3,25	Deficiente en materia orgánica
2,5 – 5,0	Algo deficiente en materia orgánica
4,0 – 6,0	Con contenido normal en materia orgánica
5,0 – 10,0	Con contenido apreciable en materia orgánica
8,0 – 12,0	Gumífero
> 10,0	Muy gumífero

(*) en los 10 cm superiores. Fuente: Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Ministerio de Medio Ambiente.

3.3.2 Reacción del suelo. pH

El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno (hidrogeniones, H⁺) en una solución.

La medida de los hidrogeniones en solución es un valor indicativo de la acidez total del suelo, dada la estrecha relación existente entre las fases líquida y sólida del suelo: si se produce un desequilibrio, parte de los hidrogeniones adsorbidos pasan a la solución del suelo, o viceversa, hasta que se establece el equilibrio, es decir, la medida del pH indica el grado de acidez de la solución del suelo (los iones hidrógeno en solución), pero no la acidez total del suelo, ya que no se miden los iones hidrógeno que se encuentran adsorbidos en la superficie de las micelas coloidales.

La importancia del pH en el suelo se debe a la influencia que el ambiente más o menos acidificante o basificante puede tener sobre las condiciones de desarrollo de las plantas o de los microorganismos edáficos, y a motivos indirectos, debido a su intervención sobre otras características del suelo:

- Influye en la velocidad y calidad de los procesos de humificación y mineralización, a través de su influencia sobre los microorganismos del suelo
- Influye en el estado de determinados nutrientes, caracterizando su grado de asimilabilidad por los vegetales y la productividad del suelo
- El grado de acidez del suelo puede determinar toxicidades, al poder hacer fácilmente asimilables sustancias tóxicas en grandes cantidades para los vegetales
- Condiciona la estructura del suelo: en suelos muy básicos los coloides electronegativos (arcillas, humus, complejos ferro y ferrisilíceos) están dispersos, mientras que en ambientes de pH muy bajo serán los coloides electropositivos los que estarán dispersos

Dada la interrelación de los iones hidrógeno con el complejo adsorbente del suelo (partículas coloidales), los suelos arcillosos o ricos en materia orgánica tienen mayores reservas de acidez o de alcalinidad que los suelos arenosos

o pobres en materia orgánica. Los valores de pH superiores a 7 indican generalmente la presencia de carbonatos libres de calcio o magnesio, mientras que los superiores a 8,5 indican generalmente una presencia de sodio intercambiable.

“El pH, como medida de acidez del suelo, es un parámetro determinante del comportamiento de los distintos metales pesados, así como en la reactividad de diversas superficies de carga variable del suelo que influyen en los procesos de retención de contaminantes” (De Miguel et al, 2002).

Existen diversas clasificaciones del suelo respecto a los valores de pH. En la tabla 3-2 se encuentra la clasificación propuesta por U.S.D.A (Soil Survey Staff, 1951).

Tabla 3-2: Clasificación del suelo según el p.H. U.S.D.A (Soil Survey)

VALORES DEL pH DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO	CLASIFICACIÓN DEL SUELO
< 4,5	suelos extremadamente ácidos
4,5 – 5,0	suelos muy fuertemente ácidos
5,1 – 5,5	suelos fuertemente ácidos
5,6 – 6,0	suelos medianamente ácidos
6,1 – 6,5	suelos ligeramente ácidos
6,6 – 7,3	suelos neutros
7,4 – 7,8	suelos medianamente básicos
7,9 – 8,4	suelos moderadamente básicos
8,5 – 9,0	suelos fuertemente básicos
> 9,1	suelos muy fuertemente básicos

Fuente: Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Ministerio de Medio Ambiente.

3.4 CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR METALES PESADOS

Se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 gr/cm^3 cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos).

Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0,1 %. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados como: As, B, Ba y Se.

Dentro de los metales pesados se pueden distinguir dos grupos: Los oligoelementos que son requeridos en pequeñas cantidades para que los organismos completen su ciclo vital, pero que pasado cierto umbral se vuelven tóxicos y los metales pesados sin función biológica conocida que resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos.

La tabla 3-3 reúne algunos metales pesados señalando su número atómico y densidad.

Tabla 3-3: Número atómico y densidad de algunos metales pesados

DESCRIPCIÓN	ELEMENTO	SIMBOLO	NÚMERO ATÓMICO	DENSIDAD (g/cm ³)
Oligoelementos o micronutrientes	Cobalto	Co	27	8,9
	Cromo	Cr	24	7,19
	Cobre	Cu	29	8,96
	Molibdeno	Mo	42	10,2
	Manganeso	Mn	25	7,43
	Níquel	Ni	28	8,9
	Zinc	Zn	30	7,14
	Arsénico ⁽¹⁾	As	33	5,72
	Boro ⁽¹⁾	B	5	2,34
Metales pesados sin función biológica conocida	Cadmio	Cd	48	8,7
	Mercurio	Hg	80	13,5
	Plomo	Pb	82	11,3
	Antimonio ⁽¹⁾	Sb	51	6,62
	Bario	Ba	56	3,5

(1): semimetal con propiedades intermedias entre las de un metal y las de un no-metal.

Fuente: Química Ambiental, Colin Baird

De manera natural, los metales pesados contenidos en el material original al meteorizarse, se concentran en los suelos. Estas concentraciones naturales de metales pueden llegar a ser tóxicas para el crecimiento de las plantas, además pueden ocasionar efectos tóxicos para los animales que las consumen.

Las fuentes antropogénicas, actividades humanas, que han ejercido un efecto considerable en la concentración y movilidad de los metales en suelos son las siguientes:

- Residuos domésticos, productos químicos agrícolas y lodos residuales

- Generación de electricidad y otras actividades industriales
- Actividades de minería: la extracción de las menas, el procesado preliminar, la evacuación de los residuos y transporte de los productos semi-procesados

En áreas mineras, las capas superiores de suelos minerales presentan concentraciones elevadas de cobre, níquel, arsénico, selenio, hierro y cadmio. Los metales asociados con áreas altamente industrializadas, incluyen arsénico, cadmio, cromo, hierro, níquel, plomo, zinc y mercurio.

En la tabla 3-4 se resume la composición en metales pesados de diferentes medios.

Tabla 3-4: Concentración natural de metales pesados (mg /Kg)

ELEMENTO	GRANITOS	BASALT O	ESQUISTO	CALIZA	ARENISCA	SUELOS
Ag	0,04	0,1	0,07	0,12	0,25	0,05
Al (*)	7,7	8,8	8,8	9	4,3	7,1
As	1,5	1,5	13	1	1	6
Cd	0,09	0,13	0,22	0,028	0,05	0,35
Co	1,0	35	19	0,1	0,3	8
Cr	4	90	90	11	35	70
Cu	13	90	39	5,5	30	30
Fe (*)	2,7	5,6	4,8	1,7	2,9	4
Hg	0,08	0,012	0,012	0,18	0,29	0,06
Mn	400	1500	850	620	460	1000
Mo	2	1	2,6	0,16	0,2	1,2
Ni	0,5	150	68	7	9	50
Pb	24	3	23	5,7	10	35
Se	0,05	0,05	0,5	0,03	0,01	0,4
Sn	3,5	1	6	0,5	0,5	4
Zn	52	100	120	20	30	90

(*): Contenido en tanto por ciento. Fuente: Mas y Azcue, 1993.

Los metales pesados se acumulan en la capa superficial del suelo, por tanto pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas y cultivos.

Los materiales húmicos tienen una gran afinidad por los cationes de metales pesados, e interaccionan con estos cuando se encuentran en el agua que está en contacto, por medio de un proceso de intercambio iónico.

El enlace de los cationes metálicos ocurre en gran parte por la formación de los complejos entre éstos y los grupos – COOH y – OH de los ácidos húmicos y fúlvicos.

Los riesgos producidos por la contaminación son función, fundamentalmente, de:

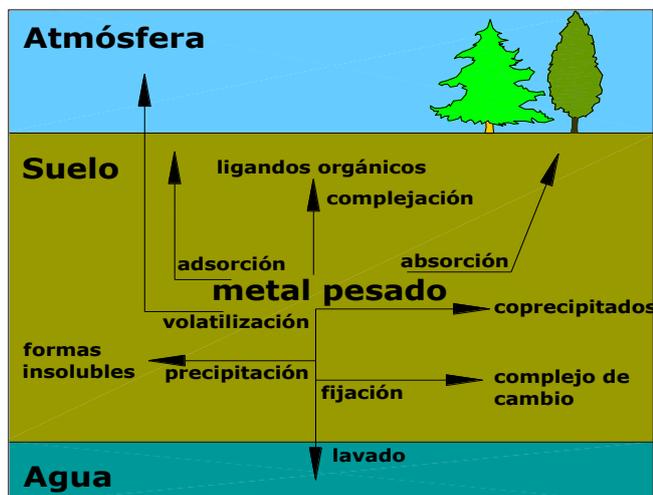
- la toxicidad
- el carácter acumulativo de cada elemento, bioacumulación.

El concepto de bioacumulación se refiere a la acumulación de contaminantes en los organismos y el índice de bioacumulación se expresa por la relación entre la cantidad de un contaminante en el organismo y la concentración de ese contaminante en el suelo.

Es muy útil calcular los valores normales que presentan los suelos naturales, no contaminados. A partir de este fondo geoquímico se puede establecer los umbrales mínimos que pueden representar contaminación.

Para el reconocimiento de la contaminación se utilizan los *niveles de referencia* que conllevan sistemas de alerta, vigilancia y control. Por encima de estas guías se encuentran los *niveles de intervención* que obligan ya a tomar medidas correctoras.

Figura 3-3: Los metales pesados incorporados al suelo



Los metales pesados quedan retenidos en el suelo por medio de tres vías: por adsorción en las superficies de las partículas minerales, por complejación con las sustancias húmicas en partículas orgánicas y por reacciones de precipitación.

Igual que muchos otros compuestos químicos, los iones de metales pesados a menudo son adsorbidos sobre la superficie de las partículas, en especial las orgánicas que están suspendidas en el agua, en lugar de estar simplemente disueltos como iones libres o como complejos con biomoléculas solubles, como en el caso de los ácidos fúlvicos

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías, como se esquematiza en la figura 3-3:

- 1) Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas
- 2) Pueden pasar a la atmósfera por volatilización
- 3) Pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas

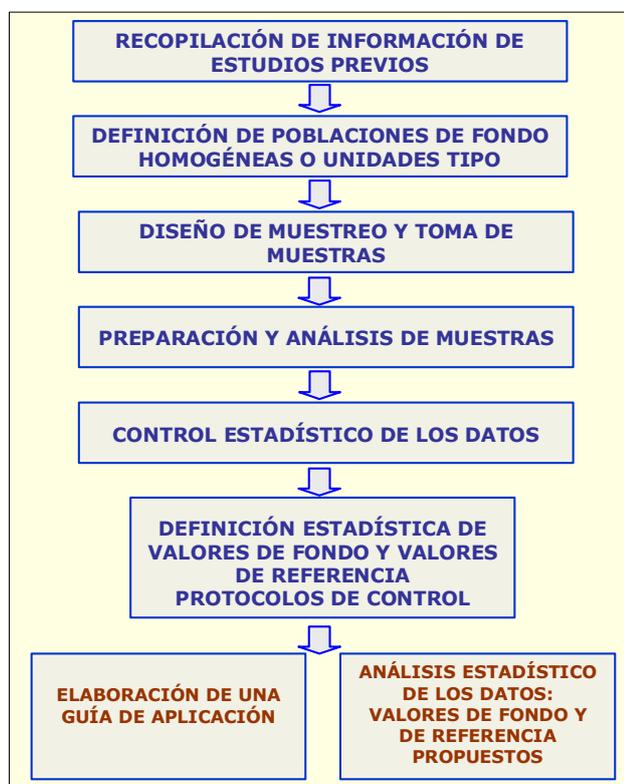
3.5 NIVELES DE FONDO Y DE REFERENCIA DE METALES PESADOS

Como se señaló anteriormente, el presente proyecto se apoya en el estudio realizado por La Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Madrid y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) sobre metales pesados: *Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid.*

La metodología y los resultados obtenidos en este estudio publicado por el IGME constituyen la principal fuente de datos tanto espaciales como alfanuméricos que formarán parte de la base de datos del Sistema de Información Geográfica (SIG) que se diseñará posteriormente.

La figura 3-4 sintetiza las diferentes etapas de este estudio que además serán descritas en el apartado siguiente

Figura 3-4: Secuencia de los trabajos realizados



Fuente: Publicación del IGME “Determinación de Niveles de fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid”

Son siete las etapas del estudio: *“Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid”* que se desarrollan a continuación:

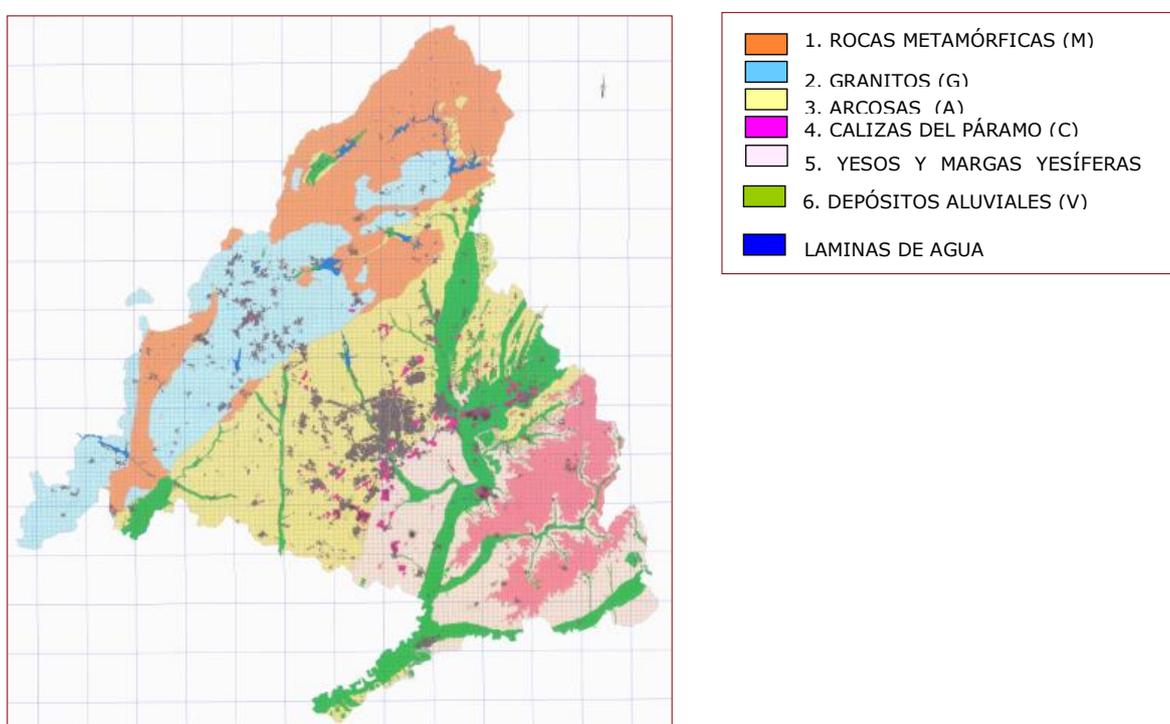
1) Recopilación de información

Se recopiló información a partir de estudios ya existentes de las principales características físico-químicas y mineralógicas de los suelos de la Comunidad de Madrid

2) Definición de poblaciones de fondo homogéneas o “unidades tipo”

Se establecieron seis unidades tipo que agrupan poblaciones de suelos homogéneas desde el punto de vista geoquímico, como se observa en la figura 3-5.

Figura 3-5: Mapa de Unidades Tipo



Fuente: Publicación del IGME “Determinación de Niveles de fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid”

Las unidades tipo geológicas son:

- Unidad tipo 1: rocas metamórficas
- Unidad tipo 2: granitos

- Unidad tipo 3: arcosas
- Unidad tipo 4: calizas del páramo
- Unidad tipo 5: yesos y margas yesíferas
- Unidad tipo 6: depósitos aluviales

Dentro de estas poblaciones homogéneas quedaron excluidas de las estaciones de muestreo todas las áreas urbanas o industriales, incluyendo un área circundante de seguridad de 1 km

Se detalla las características de cada una de las unidades tipo resumidas en la tabla 3-5

Tabla 3-5: Descripción de Unidades Tipo

Unidades Geológicas	Era - Período Geológico	Tipo de Roca	Asociaciones de suelos	Extensión (ha)	Característica del relieve
Tipo 1	Precámbrico Cámbrico Ordovícico	Metamórficas Esquistos Gneises Pizarras Cuarzitas	Cambisoles húmicos Leptosoles dístricos Leptosoles úmbricos Luvisoles	145 368	Relieve acusado
Tipo 2		Graníticas Manchas de Lehm granítico	Cambisoles húmicos Cambisoles dístricos Leptosoles dístricos Leptosoles úmbricos Leptosoles líticos	146 569	Afloramientos rocosos
Tipo 3	Terciarios Paleógeno Neógeno	Arcosas, Arenas arcósicas	Luvisoles háplicos Luvisoles cálcicos Luvisoles crómicos, Cambisoles eútricos, Cambisoles calcáricos	208 884	Relieve colinados y alomados

Unidades Geológicas	Era - Período Geológico	Tipo de Roca	Asociaciones de suelos	Extensión (ha)	Característica del relieve
Tipo 4	Mioceno superior Plioceno	Conglomerados , Areniscas, Arcillas Margas Caliza del páramo	Luvisoles cálcicos Luvisoles crómicos Leptosoles rendsínicos Leptosoles líticos	63 358	Relieve de páramo
Tipo 5		Yesos tableados Yesos masivos Yesos detríticos Arcillas Margas yesíferas	Gypsisoles cálcicos, Regosoles gypsicos, Calcisoles háplicos, Regosoles calcáricos, Leptosoles líticos	113 397	Relieve alomado
Tipo 6		Depósitos aluviales	Fluvisol éútrico, Fluvisol calcárico, Cambisoles gleicos, Regosoles	111 754	Terrazas bajas, medias y altas

Fuente: Publicación del IGME "Determinación de Niveles de fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid"

3) Diseño del muestreo y toma de muestras

La unidad muestral, como unidad a la que se refieren los resultados de concentraciones elementales contempla los siguientes aspectos: profundidad a la que se recupera, fracción granulométrica que constituye la muestra, muestra única o compuesta, número y disposición espacial de los incrementos maestres que constituyen la muestra y la masa que en general se define en términos de volumen.

Los valores de fondo y referencia de la Comunidad de Madrid se refieren a la capa de suelo que se extiende entre la superficie hasta una profundidad de 0,20 m. La fracción granulométrica que se disgrega para obtener la muestra de análisis es menor a 2 mm.

La muestra de campo se definió como compuesta, fue la reunión de cinco testigos (incrementos maestres) tomados en el centro y los extremos de una cruz griega de 1 m de brazo mediante una sonda tipo Edelman.

Los puntos o estaciones de muestreo considerados en las seis unidades tipo de terreno definidas para la Comunidad de Madrid se han dispuesto según una malla cuadrada de 3 000 m de lado, excluyendo todas aquellas áreas que quedaban dentro de zonas urbanas e industriales o muy próxima a las mismas (1 000 m), así como vertederos y puntos potencialmente contaminados.

4) Preparación y análisis de muestras

La etapa previa al análisis incluye la preparación física de las muestras, para las determinaciones químicas elementales y para los análisis edafológicos básicos: pH, textura y materia orgánica, así como la preparación de las muestras para análisis por medio de la disgregación.

En el análisis de muestras, las concentraciones de los elementos estudiados se determinaron por Espectrometría de Masas con Plasma por Corriente Inducida.

Los resultados de las características edafológicas de cada unidad tipo se reúnen en el anexo A como parte de la base de datos temática.

5) Control estadístico de los datos

En esta etapa los resultados de los análisis obtenidos del laboratorio fueron interpretados mediante técnicas estadísticas de tratamiento de datos para la detección de muestras potencialmente no naturales que no fueron descartadas durante la fase de muestreo y su reclasificación de una de las poblaciones de suelos definidas a otra.

6) Definición estadística de Valores de Fondo y Valores de Referencia.

Protocolos de Control

Los valores de fondo caracterizan la situación real de los suelos naturales de una región en el momento de su estudio. Consecuentemente, dichos valores de fondo describen la distribución de valores de concentración de los diferentes elementos químicos en los suelos de una región no afectados por actividades antrópicas.

Se denomina valor de referencia a un valor tal que su superación por una unidad muestral de la población actual caracterizada sea poco probable y que, por tanto, si no ha habido modificaciones de las condiciones de muestreo, sea también poco probable su superación por unidad muestral obtenida posteriormente.

El estudio publicado por el IGME se considera como valor de referencia principal la cota superior del percentil 99 % con un 95 % de confianza.

Los valores de control son aquellos que permiten decidir si una muestra posterior pertenece a la población de fondo muestreada originalmente

7) Análisis estadístico de los resultados

En esta etapa se ordenó y se hizo una descripción de la información recopilada, se definieron los niveles de fondo, de referencia y control mediante la aplicación de criterios geoquímicos y estadísticos para cada uno de los 15 elementos.

Los resultados finales de este estudio se incluyen en el Anexo

CAPITULO 4

4. HERRAMIENTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Para la ejecución del presente proyecto se utilizará el programa ArcGis en su versión ArcInfo, producido y distribuido por la empresa ESRI (Environmental Systems Research Institute). La licencia del programa pertenece a la Universidad Politécnica de Madrid.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE ARCGIS

El sistema ArcGIS™ es un conjunto de herramientas para la construcción y manipulación de un Sistema de Información Geográfica (SIG), con varios componentes básicos: ArcGis Desktop que es un conjunto integrado de aplicaciones SIG avanzadas; ArcSDE™, que es una interfaz para integrar el SIG con grandes bases de datos multiusuario y ArcIMS™, orientado a la distribución de datos y servicios por Internet.

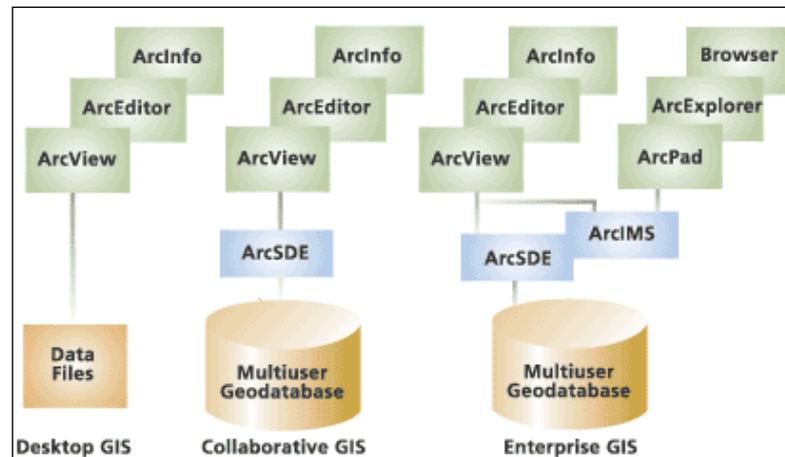
ArcGis usa distintos modelos de datos SIG, para representar la geografía y proporciona todas las herramientas necesarias para crear y trabajar con datos geográficos, incluye herramientas para la edición y automatización de datos, actividades basadas en mapas, administración de datos, análisis geográfico, organización de datos y aplicaciones para Internet.

ArcGis comprende tres niveles de funcionalidad:

- ArcView: Niveles de funcionalidad muy limitados para edición gráfica y ciertas capacidades limitadas de análisis.
- ArcEditor: Todas las funciones incluidas en ArcView, más capacidad completa de edición gráfica y creación de bases de datos cartográficas.
- ArcInfo: Es la versión completa de ArcGis, con todas las capacidades de edición gráfica y de análisis geográfico.

Se observa en la figura 4-1 los distintos componentes de ArcGis Desktop.

Figura 4-1: Componentes de ArcGis



Fuente: <http://www.esri.com>

ArcGis es uno de los Sistemas de Información Geográfica vectoriales más conocido que puede considerarse como un paquete integrado de programas especializados en el manejo de la información geográfica. Las principales características que presenta son las siguientes:

- ✓ Permite la automatización, gestión y visualización de datos geográficos y asociados. Permite trabajar con datos provenientes de posicionadores de satélite, estaciones totales y equipo geodésico
- ✓ Se puede integrar a los datos de un mapa de vectores (coordenadas x, y), imágenes *raster* tales como fotografías, documentos escaneados, imágenes satélite, dibujos CAD, datos de vídeo, sonido, etc.

- ✓ Posee la capacidad de integrar los datos espaciales y temáticos dentro de su propia arquitectura o bien puede asociarlos directamente con los datos almacenados en los principales gestores de bases de datos relacionales

ArcGis, en su versión ArcInfo, tiene dos componentes, el módulo Arc y el módulo Info. El primero manipula la base de datos espacial, es decir, maneja las coordenadas y la topología y está capacitado para manejar los datos de localización geográfica. El módulo Info es un sistema de gestión de base de datos relacionales encargado de almacenar y manejar los atributos o variables temáticas (modelo relacional). Existe una estrecha relación entre estos dos componentes establecida a través del identificador unívoco de cada objeto geográfico que aparece en las dos bases de datos (la temática y la espacial), de manera que los cambios en un aspecto repercutan en el otro.

4.2 COMPONENTES DE ARCGIS

El programa informático ArcGis cuenta con tres aplicaciones: ArcCatalog, ArcMap y ArcToolbox.

Aplicación ArcCatalog

En ArcCatalog es posible: explorar, localizar, organizar y administrar tanto datos geográficos como alfanuméricos, además permite crear metadatos.

Permite explorar información, es decir, navegar a través de mapas y datos, es muy parecido al explorador de *Windows*. El usuario puede seleccionar una carpeta, base de datos (database) o un servicio de Internet en la ventana Catalog tree para examinar la lista de datos geográficos usando la vista anticipada (preview tab), además cuenta con herramientas, similares a los sistemas CAD (diseño asistido por computadoras), ubicadas en la barra de geografía (geography toolbar) para realizar acercamientos y explorar la información.

ArcCatalog ayuda al usuario a localizar mapas y datos por medio de sus herramientas, es posible buscar formatos de datos específicos o mapas que cubren una determinada área. Las herramientas de búsqueda utilizan los metadatos para evaluar si la fuente de datos satisface el criterio de localización establecido por el usuario.

La aplicación ArcCatalog ayuda a organizar y administrar todos los datos SIG, es posible administrar o manejar la fuente de datos, se puede utilizar el cuadro de diálogo de propiedades (properties dialog box) para definir el sistema de coordenadas de un shapefile, generar la topología o añadir un atributo a la tabla.

Permite ver y crear metadatos, información adicional, como por ejemplo porqué los datos fueron creados, la escala apropiada en la que se deben

usar los datos, el reporte de exactitud, la descripción de lo que significa el nombre de un atributo, etc. ArcCatalog tiene un editor de metadatos que se puede utilizar para documentar los datos.

Aplicación ArcMap

ArcMap proporciona el entorno para trabajar con datos georreferenciados que se organizan en forma de un proyecto y se almacenan en el ordenador en un fichero *mxd*. Permite visualizar, editar, y analizar los datos.

Para la visualización y presentación, ArcMap permite navegar por la base de datos como en un explorador de archivos. Desde ArcMap se puede visualizar directamente ficheros CAD, imágenes digitales, ficheros *raster* e imágenes de satélite, permitiendo integrar todas estas fuentes de información en una misma vista.

Permite establecer la proyección con sus parámetros, mostrar datos procedentes de varias fuentes en distintas proyecciones, establecer relleno de fondo y símbolos del borde, establecer la altura, manipular directamente símbolos y etiquetas en la tabla de contenidos, mostrar unidades de mapa y de distancia, añadir retículas como sistemas de referencia del mapa, crear capas gráficas adicionales, convertir datos en gráficos, establecer una escala de referencia, entre otros.

Para la edición de mapas, ArcMap cuenta con herramientas tipo CAD (dibujo asistido por computadoras) que permiten al usuario el trazado de paralelas, perpendiculares, conexión de vértices a intersecciones, definición de curvas, utilización de coordenadas relativas y absolutas y otras muchas operaciones.

ArcMap incluye un editor de objetos multiusuario completamente integrado llamado Object Editor que tiene herramientas para el ingreso y actualización de datos geográficos y de sus atributos.

Para el análisis de los datos ArcMap, cuenta con funciones para la generación de áreas de influencia, selecciones espaciales o por atributos, análisis de redes y otras operaciones.

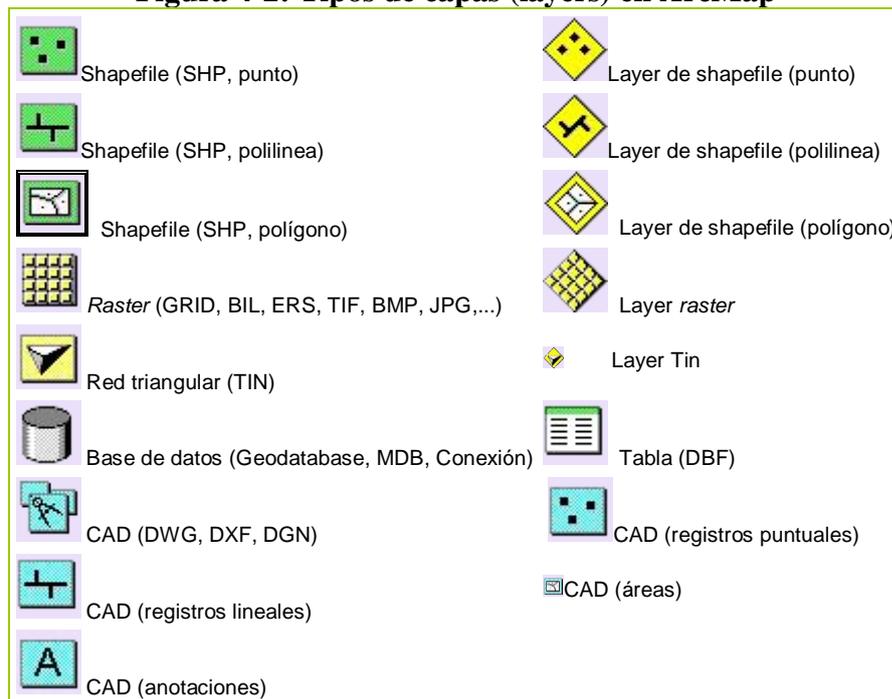
ArcMap permite trabajar sobre diferentes componentes dentro de un proyecto:

- Propiedades del mapa, propiedades de visualización, propiedades de las capas de elementos vectoriales y capas *raster*.
- Interacción con el mapa, tipos de selección.
- Simbología para elementos vectoriales y elementos *raster* (estilos)
- Edición y gestión de símbolos (estilos), etiquetas de elementos automáticas y manuales

- Edición de formas, coberturas y objetos
- Áreas de influencia y análisis espacial
- Tablas, gráficos e informes, salidas gráficas e impresión
- Formatos de exportación del mapa, manejo de versiones y datos

En la figura 4-2 se detallan los tipos de información con las que puede trabajar ArcMap.

Figura 4-2: Tipos de capas (layers) en ArcMap



Fuente: <http://www.esri.com>

Aplicación ArcToolbox

Es la aplicación que permite realizar conversiones entre formatos, cambios de proyección, y ajuste espacial. Incluye además herramientas para la generación de geometrías complejas y funciones de geoprocésamiento.

Está basado en menús y desarrollado bajo la metodología de programación orientada a objetos para facilitar el manejo a nuevos usuarios. Permite que todos los componentes que son desarrollados se puedan reutilizar y puede ser utilizado como base para construir aplicaciones personalizadas.

ArcTools está organizado en cuatro grupos de herramientas que proveen soluciones para diferentes tipos de tareas:

- Herramientas para el manejo de datos (data management tools): permiten generar topología en coberturas, definir proyecciones, gestionar atributos y realizar diversas operaciones con datos COGO y tablas INFO
- Herramientas de análisis (analysis tools): permiten realizar superposiciones, crear áreas de influencia (buffers), calcular estadísticas, unir conjuntos de datos y otras muchas funciones
- Herramientas para la conversión de datos (conversion tools): Incluye gran cantidad de herramientas para la conversión de formatos

- Mis herramientas (my tools): permite añadir al menú de ArcToolbox, herramientas desarrolladas por el usuario (ficheros ejecutables o librerías dinámicas) y ejecutar ficheros AML.

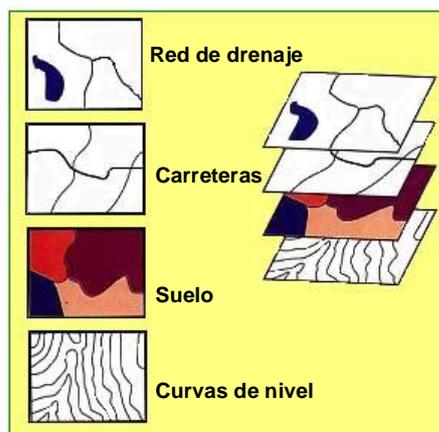
4.3 MODELOS DE DATOS

ArcGis y sus aplicaciones ArcMap, ArcCatalog y ArcTools, trabajan con dos modelos básicos de datos:

1. Datos separados en distintos ficheros: ficheros de tablas con atributos y ficheros con gráficos (datos *raster* y *vectoriales*)
2. El modelo orientado a objetos llamado “*geodatabase*” en el que se integran las tablas con los atributos y los datos gráficos en un único fichero.

Para el primer caso, en el que los datos están separados en distintos ficheros, se utiliza un modelo georrelacional, se almacena la información vectorial en archivos binarios y se utiliza un identificador único para unir la información gráfica a los atributos. Ejemplos de este modelo de datos son las coberturas (coverages) que se observan en la figura 4-3 y los shapefiles.

Figura 4-3: Coberturas temáticas



Fuente: Sistemas de Información Geográfica (BOSQUE SENDRA, Joaquín)

La “*geodatabase*” es un modelo que permite el almacenamiento físico de la información geográfica en un Sistema Gestor de Base de Datos: Microsoft Access, Oracle, Microsoft SQL Server, IBM DB2 e Informix. Posee las siguientes características:

- Permite almacenar numerosos tipos de datos: vectorial, *raster*, CAD, Tablas, topología, información calibrada, etc.
- Permite almacenar, además de elementos geográficos, el comportamiento de dichos elementos, lo que facilita la generación de una visión más completa de la realidad.
- El modelo de datos de la Geodatabase es escalable, y en función de las necesidades de cada organización, es posible diferenciar entre “*geodatabase*” personal, implementada sobre Microsoft Access, o

“*geodatabase*” corporativa, implementada sobre Oracle, Microsoft SQL Server, IBM DB2 o Informix.

CAPITULO 5

5. IMPLEMENTACIÓN DE UN SIG LA COMUNIDAD DE MADRID

5.1 METODOLOGÍA

El Sistema de Información Geográfica (SIG) que se presenta en este capítulo se ha diseñado utilizando como herramienta el programa informático ArcGis de la empresa ESRI (Environmental Systems Research Institute).

La metodología utilizada en este proyecto para implementar el Sistema de Información Geográfica (SIG) de la Comunidad de Madrid se puede resumir en las siguientes tres etapas:

1. Entrada y edición de datos (captación de datos)

2. Operaciones de análisis de datos

3. Representación de resultados

La etapa "*Entrada y edición de datos*" constituye el primer paso en el desarrollo de cualquier proyecto SIG y se puede definir como la etapa más importante ya que la calidad del resultado final depende de la calidad de los datos iniciales.

Esta primera etapa comprende el tratamiento previo de la información, es decir, la adquisición, la transformación de los datos reales a formato digital, la edición gráfica para las correcciones de errores, creación de la topología, codificación de elementos cartográficos y la integración de la base de datos temática y espacial. En esta etapa se utilizaron los programas informáticos MicroStation95, AutoCad2000, ErdasImagine y ArcGis.

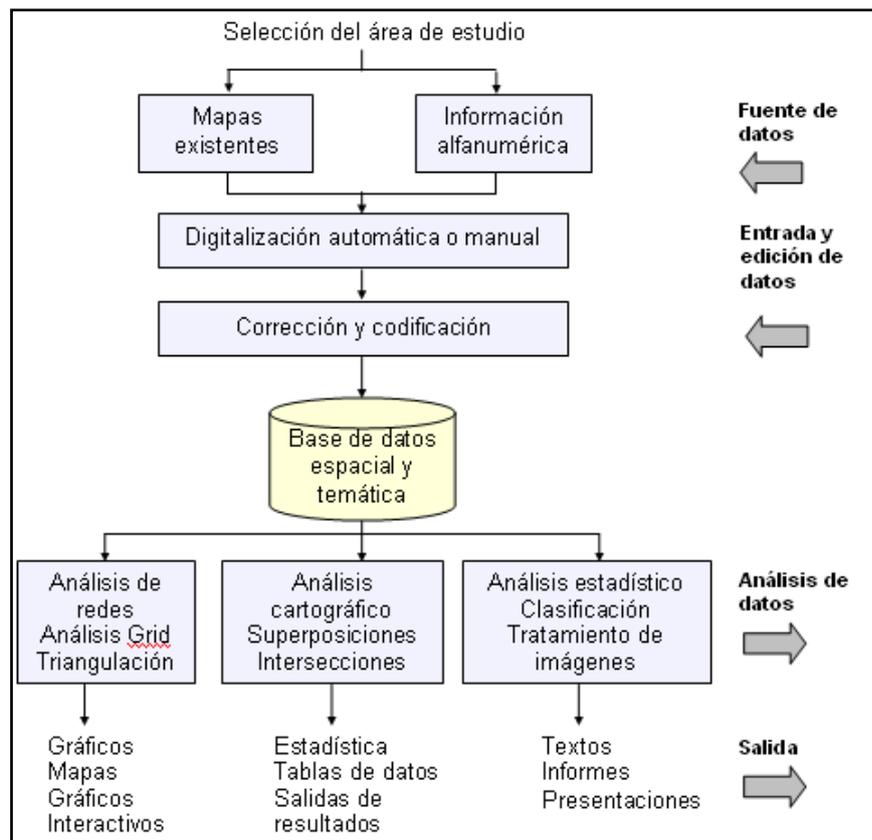
La segunda etapa "*Operaciones de análisis de datos*" se refiere a todos los procesos que permiten obtener resultados a partir de los datos iniciales.

Se especifican los tipos de análisis que se pueden realizar con la información almacenada para estudiar la distribución de metales pesados señalando las funciones de ArcMap que se han sido utilizadas.

La tercera etapa “*Representación de resultados*” describe los medios empleados para la salida de los resultados que puede ser de tipo cartográfico, gráficos y tablas de datos alfanuméricos.

La primera etapa será tratada con más detalle en los apartados 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5, la segunda en el apartado 5.6, finalmente la tercera etapa “*Representación de resultados*” se tratará en el capítulo 6. En la figura 5-1 se puede observar las tres etapas del proyecto relacionándolas con las funciones propias de un SIG.

Figura 5-1: Etapas de un proyecto relacionadas a las funciones del SIG



Fuente: SIG en la gestión de los riesgos geológicos y el ambiente, L. Lain

5.2 TRATAMIENTO PREVIO DE LA INFORMACIÓN ESPACIAL

En este apartado se describen todas las operaciones que se han realizado en la implementación del Sistema de Información Geográfica (SIG) previas a la etapa de análisis.

5.2.1 Adquisición

La mayor parte de la información que contiene el SIG proviene del estudio: *“Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid”*, realizado por La Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Madrid y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), sin embargo existe información espacial que proviene de otras fuentes.

Todos los mapas que se utilizaron están relacionados con los factores que condicionan la distribución natural de metales pesados. Entre los aspectos que condicionan los contenidos elementales de un terreno se cuentan el sustrato litológico del cual se deriva, el tipo de suelo según criterio edafológico, el uso del terreno, entre otros. Se puede resumir estos factores como:

- Geología
- Litología
- Uso del Terreno
- Características físicas y químicas de los suelos: textura, contenido de materia orgánica y pH.

Además se ha incluido la información espacial relacionada a la metodología del estudio publicado por el IGME que fue resumida en el apartado 5.5

- Hidrología
- Estaciones de muestreo
- Zonas de exclusión del muestreo

Se incorporó información espacial adicional para poder realizar los diferentes análisis.

- División Municipal de la Comunidad de Madrid
- Tipos de vegetación.

La información espacial utilizada en este proyecto ha sido obtenida de diversas fuentes y por tanto en diversos formatos. Todos los mapas utilizados son de la Comunidad Autónoma de Madrid en una escala de 1:200 000.

En el anexo A se reúnen todos los mapas que forman parte del SIG una vez que han sido ingresadas como capas de información en ArcMap. En la tabla 5-1 se resume toda información espacial utilizada en el SIG

Tabla 5-1: Información espacial del Sistema de Información Geográfica

MAPA	FUENTE	FORMATO
División municipal	Instituto Geográfico Nacional	digital
Límite de la Comunidad	Cartografía General de la Comunidad de Madrid.	digital
Cascos urbanos	Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.	
Hidrología	Dirección General de Urbanismo y Planificación Regional. Comunidad de Madrid	
Vegetación		
Unidades Tipo geológicas	Estudio: <i>"Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid y el IGME"</i>	analógico
Estaciones de muestreo		coordenadas (x, y)
Zonas de exclusión		analógico

La Cartografía General de la Comunidad de Madrid fue adquirida en formato digital (vectorial) con extensión *dgn* (programa informático MicroStation 95) que contiene la información separada en los siguientes ficheros:

- Hidrología de Madrid
- Red vial: red básica de primer orden, de segundo orden, red local, carreteras nacionales, autovías y pistas
- Capital de la Comunidad, distritos de Madrid, ayuntamientos, aldeas y caseríos
- Vegetación: eriales y cultivos en secano, matorrales, pastizales y cultivos en regadíos, frondosas, coníferas
- Curvas de nivel
- F.F.C.C, vía doble electrificado, vía única

De la Cartografía de la Comunidad de Madrid los ficheros de cascos urbanos, hidrología y vegetación fueron convertidos por medio del programa MicroStation 95 a la extensión *dgw* (diseño asistido por computadora), para ser corregidos posteriormente por medio de las herramientas de dibujo de AutoCad 2000. La información adicional que contenía la cartografía fue eliminada porque no estaba relacionada con el proyecto.

5.2.2 Digitalización de mapas

Para que sea posible almacenar y procesar las imágenes en el ordenador fue necesaria la digitalización de los siguientes mapas:

- Unidades Tipo Geológicas de la Comunidad de Madrid
- Mapa de Elementos que definen la zona de exclusión del muestreo del IGME

Se realizó la digitalización de estos mapas de forma automática por medio de un escáner (en formato *raster*). Cada uno de los píxeles contiene los siguientes tipos de información (J. Gutiérrez y M. Gould):

- Resolución: Es la cantidad de píxeles que se encuentran en una superficie. La resolución de la imagen se puede medir en píxeles por centímetro cuadrado (ppc) o por pulgada cuadrada (dpi).
- Localización: Se expresa por un par de números que indican su posición en una fila y una columna.
- Orientación: Es el ángulo formado por la dirección de las columnas de una retícula *raster* y el norte. Lo habitual es orientar los mapas al norte.

- Valor: El valor asociado a un píxel corresponde a una medida de un atributo del espacio geográfico representado por dicho píxel. Los valores pueden ser enteros o reales, y se visualizan mediante un color (o escala de grises).
- Zona y clase: Una zona o región es un área formada por celdas contiguas que tienen el mismo valor. Una clase la componen todas las regiones del mismo valor. Las clases (o categorías) se recogen en la leyenda.

En la tabla 5-2 se resumen las características del mapa Unidades Tipo Geológicas luego de ser digitalizado por medio del escáner.

Tabla 5-2: Propiedades de la imagen: Unidades Tipo Geológicas

PROPIEDADES	VALOR
Ancho	10 947 píxeles
Alto	12 056 píxeles
Resolución horizontal	300 ppp
Resolución vertical	300 ppp
Profundidad en bits	24
Número de cuadros	1

La imagen tiene una profundidad de 24 bits, es decir, cada píxel queda descrito por tres grupos de 8 bits (256 valores posibles de luminosidad para el rojo, el verde y el azul).

El mapa de tipos de vegetación, que fue adquirido en formato *raster*, tenía las características que se pueden observar en la tabla 5-3.

Tabla 5-3: Propiedades de imagen. Tipos de vegetación

PROPIEDAD	VALOR
Ancho	7 938 píxeles
Alto	8 939 píxeles
Resolución horizontal	300 ppp
Resolución vertical	300 ppp
Profundidad en bits	24
Número de cuadros	1

Posteriormente se convirtió la información del formato *raster* al formato vectorial. Para esto fue necesario generar las líneas que separen las diferentes categorías de los píxeles.

Se utilizaron las herramientas de dibujo del programa informático AutoCad 2000 para convertir los mapas al formato vectorial realizando líneas continuas (polilíneas) y polígonos que son objetos reconocidos por ArcMap (aplicación de ArcGis encargada de la edición y manejo de mapas).

Los mapas adquiridos en formato digital, fueron convertidos por medio del programa MicroStation 95 a la extensión *dwg* (diseño asistido por computadora). Se corrigieron por medio de las herramientas de dibujo de AutoCad 2000 convirtiendo todos los mapas en líneas continuas y polígonos.

5.2.3 Transformación de coordenadas de la información en formato *raster*

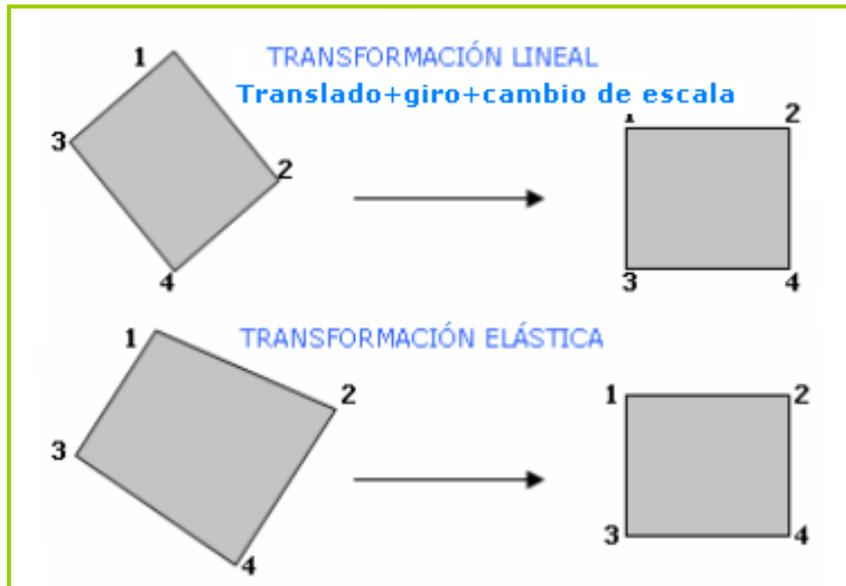
Para toda la información espacial se utilizó como sistema de coordenadas la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) European Datum 1950, Huso 30.

Como se mencionó anteriormente, la cartografía utilizada procede de diferentes fuentes, por lo tanto no poseen la misma calidad que posibilite que coincidan plenamente los mapas en el sistema de coordenadas del Sistema de Información Geográfica (SIG).

En la figura 5-2 se esquematiza los dos tipos de transformación de coordenadas que se realizaron en este proyecto:

- Transformación lineal: traslación más giro más cambio de escala
- Transformación no lineal: Deformación geométrica.

Figura 5-2: Transformación lineal y no lineal



Fuente: Tecnología de los sistemas de Información Geográfica (MOLDES, 1995)

Al capturar el mapa de Unidades Tipo Geológicas y el mapa de zonas de exclusión por medio de un escáner se produjeron deformaciones en la imagen que debieron ser corregidas.

Para el mapa de Unidades Tipo Geológicas, primero se intentó hacer la transformación de coordenadas de forma lineal, para ello se tomaron 20 puntos de control distribuidos uniformemente en el mapa, cuyas coordenadas se observan en la tabla 5-4. Las coordenadas x e y se refieren a las de la imagen en formato *raster*, mientras que X_M e Y_M se refieren a las coordenadas reales UTM.

Tabla 5-4: Puntos de control para la transformación de coordenadas

PUNTO	Coordenadas (figura)		Coordenadas reales	
	X	y	XM	YM
1	0,3891	1,0126	360 000	4 460 000
2	0,4977	0,9052	380 000	4 480 000
3	0,6058	0,8520	390 000	4 500 000
4	0,6062	0,7978	400 000	4 500 000
5	0,7143	0,7440	410 000	4 520 000
6	0,7686	0,6902	420 000	4 530 000
7	0,8772	0,5827	440 000	4 550 000
8	0,8779	0,4745	460 000	4 550 000
9	0,7705	0,4202	470 000	4 530 000
10	0,6085	0,4198	470 000	4 500 000
11	0,5016	0,3110	490 000	4 480 000
12	0,3938	0,3101	490 000	4 460 000
13	0,3404	0,2557	500 000	4 450 000
14	0,2322	0,3090	490 000	4 430 000
15	0,2315	0,4169	470 000	4 430 000
16	0,1766	0,5785	440 000	4 420 000
17	0,1758	0,6864	420 000	4 420 000
18	0,2301	0,6328	430 000	4 430 000
19	0,3376	0,6879	420 000	4 450 000
20	0,3364	0,8501	390 000	4 450 000

La transformación lineal se basa en la resolución matricial de dos ecuaciones:

Ecuación 1: $x = ax + by + c$

Ecuación 2: $y = dx + ey + f$

Donde a , b , d , e son los factores de escala, mientras que c , f es el desplazamiento de la imagen.

Por medio de la resolución de las ecuaciones 1 y 2 se obtuvieron cuatro parámetros:

- ✓ $\alpha_x = 185\,051,925$ (factor de escala)
- ✓ $\alpha_y = 185\,555,7424$ (factor de escala)
- ✓ $T_x = 546\,911,834$ (traslación)
- ✓ $T_y = 4386\,529,839$ (traslación); $1,56783$ (giro)

Estos cuatro parámetros fueron utilizados en el programa informático AutoCad 2000 para ingresar la imagen como una figura con las coordenadas reales para su posterior vectorización, sin embargo, no fue suficiente la transformación lineal ya que la imagen tenía una deformación elástica, por lo que se utilizó el programa ERDASImagine para corregirla.

ERDASImagine permite realizar la transformación de coordenadas con polígonos de grado n , dependiendo del número de puntos que se ingresen.

Se utilizó un polígono de grado 3.

De la misma manera se realizó la transformación de coordenadas para el mapa de elementos que definen la zona de exclusión del muestreo realizado por el IGME y el mapa de tipos de vegetación que aunque fue adquirido en formato digital no poseía las coordenadas reales.

En la tabla 5-5 se resumen las propiedades de la imagen *raster* luego de ser rectificada por medio de ERDAS Imagine. Se observa que la resolución de la imagen rectificada disminuyó de 300 ppp a 96 ppp.

Tabla 5-5: Propiedades de imagen rectificada en ERDAS IMAGINE

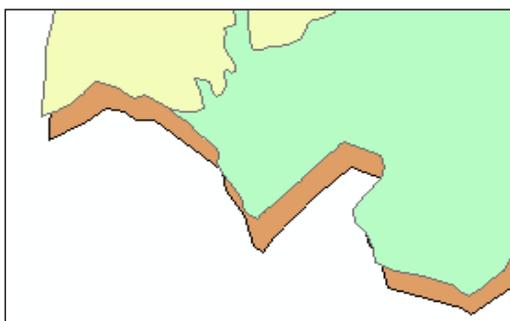
Unidades geológicas de la Comunidad de Madrid	
PROPIEDADES	VALOR
Ancho	10 001 píxeles
Alto	10 668 píxeles
Resolución horizontal	96 ppp
Resolución vertical	96 ppp
Profundidad en bits	24
Número de cuadros	1

5.2.4 Transformación de coordenadas de la información en formato vectorial

Una vez que toda la información espacial se encontraba en formato vectorial se introdujeron al módulo ArcMap del programa informático ArcGis donde fue fácil visualizar que no todas las capas coincidían en sus coordenadas. En la

figura 5-3 se puede observar que dos capas de información no coinciden completamente en sus coordenadas por lo tanto deben ser corregidas.

Figura 5-3: Capas de información espacial desplazadas



Se tomó como referencia el límite de la Comunidad que proviene de la Cartografía digital de la Comunidad de Madrid proporcionada por La Dirección General de Urbanismo y Planificación Regional para corregir las coordenadas de los demás mapas.

Todos los mapas que se ingresaron al Sistema de Información Geográfica (SIG) se ajustaron a las coordenadas del mapa del Límite de la Comunidad ya que se consideró que era la fuente más confiable.

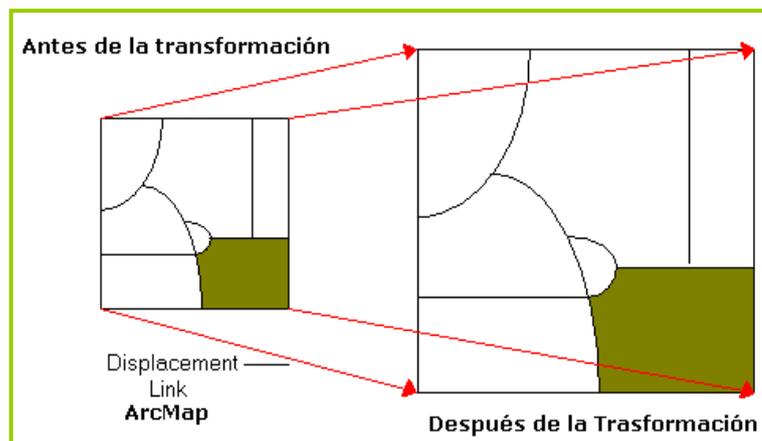
Se realizó el ajuste de coordenadas por medio de las herramientas de ArcMap que permiten hacer una transformación lineal.

Fue necesario utilizar las funciones de transformaciones de coordenadas de ArcMap (Spatial Adjustment), que permite tres tipos de transformaciones: Affine, Similarity y Projective.

Las funciones de transformación de coordenadas en ArcMap están basadas en la comparación de las coordenadas de los puntos de fuente y destino, también llamados puntos de control (control points) o enlaces de desplazamientos (link points).

La figura 5-4 esquematiza los enlaces de desplazamientos (link point) en ArcMap para realizar la transformación de coordenadas.

Figura 5-4: Enlaces de desplazamientos en ArcMap



Se utilizó la transformación lineal (affine) que permite escalar la información, trasladarla y rotarla. Esta función requiere al menos tres enlaces de desplazamiento.

ArcMap define la transformación lineal (affine) de la siguiente forma:

$$x' = Ax + By + C$$

$$y' = Dx + Ey + F$$

donde

(x,y) son de coordenadas originales de los datos y (x',y') son las coordenadas transformadas. A, B, C, D y F son determinados comparando la ubicación del origen y destino de los puntos de control y sirven para escalar, rotar, y trasladar las coordenadas, es decir, los parámetros de la transformación son el ajuste entre el origen y el destino de los puntos de control.

A continuación se describen los pasos efectuados para ajustar el mapa de Unidades Tipo Geológicas:

- Se Ingresó el límite de la Comunidad de Madrid como una capa de información en ArcMap junto al mapa de Unidades Geológicas
- Se especificó la capa de información se quiere editar
- Se especificó el método de ajuste (Transformation Affine) en la barra de herramientas de ajuste espacial (Spatial Adjustment)
- Se crearon de forma interactiva 25 enlaces de desplazamiento distribuidos uniformemente por toda la Comunidad de Madrid, señalando un punto de origen en la capa de Unidades Tipo Geológicas y el destino en la capa límite de la Comunidad de Madrid

- Se verificó que el error residual total fuera el menor posible
- Se dio la orden de Ajuste (Adjust) en la barra de herramientas de ajuste espacial (Spatial Adjustment)

En la figura 5-5 se observa la tabla creada por el programa ArcMap para la transformación lineal (affine) del mapa de Unidades Tipo Geológicas cuyas coordenadas se definen como X Source y Y Source (coordenadas de origen), mientras que las coordenadas del límite de la Comunidad de Madrid se define como X Destination y Y Destination.

Figura 5-5: Tabla de Enlaces de Desplazamientos (Link Table)

I...	X Source	Y Source	X Destination	Y Destination	Residual Error
8	458291,771791	4516769,330178	458361,367431	4516527,792367	3,475451
9	393593,158579	4501456,324126	393766,610265	4501239,509518	88,493924
10	466869,069049	4539316,893119	466937,689129	4539073,111256	1,545122
14	419271,143583	4449654,031750	419342,252456	4449407,885652	10,715290
15	425450,271644	4449802,141469	425523,744059	4449555,792782	6,963876
16	436622,400704	4443155,048821	436695,873120	4442908,700134	4,040187
17	444194,381406	4442269,057929	444267,853821	4442022,709242	2,171017
18	450997,062699	4430115,856026	451066,213207	4429869,507339	4,325536
19	417360,874066	4515756,319175	417431,692501	4515507,381646	13,748230
20	401807,301009	4498061,407717	401877,625936	4497818,467061	15,883464
21	434315,278252	4539533,305582	434384,658927	4539290,473221	8,935924
22	439527,501428	4546731,550567	439588,209518	4546497,390790	18,055319
23	449700,442835	4556626,969276	449769,823510	4556375,464330	10,566562
25	462645,379251	4548316,719345	462714,804099	4548072,885735	1,921503
27	465774,577247	4541047,429844	465845,695383	4540800,209656	3,597606
28	486260,711832	4435432,604746	486331,265538	4435188,018563	6,668268
29	494012,212399	4437492,772979	494080,414315	4437248,186796	6,510744
30	482779,308096	4483700,353769	482850,426233	4483456,078432	5,617091
31	482986,478319	4483598,314704	483057,596456	4483349,401227	5,914752
33	476182,062110	4487517,196719	476251,286206	4487272,143421	1,837045
34	471531,997604	4498842,309990	471606,383595	4498597,273785	5,630319
35	466801,923717	4505138,865331	466871,934061	4504898,204772	4,059171
36	464080,271582	4504036,202408	464150,281926	4503786,790556	4,869722
37	462730,432919	4510169,380468	462800,116390	4509925,488320	1,402864
38	365647,663713	4453516,204845	365719,241975	4453268,852114	24,372168

RMS Error: 19,848183

Una vez realizados todos estos pasos la capa de Unidades Tipo Geológicas se ajusta mejor al Límite de la Comunidad de Madrid, sin embargo las dos capas siguen sin coincidir, a esto se lo conoce como el error residual, es una medida de ajuste entre la ubicación verdadera y la localización de la transformación.

El error residual (RMS residual root mean square) es generado para cada enlace de desplazamiento e indica cuán buena es la transformación.

5.2.5 Calidad de la información. Análisis de errores

Como ya se ha mencionado el principal error que existe cuando se trabaja con mapas de diferentes fuentes es ajustar las coordenadas de los mismos.

Hacer que los diferentes mapas coincidan totalmente en sus coordenadas no es posible, por lo que se recomienda hacer el ajuste dejando un error que sea aceptable. Por ejemplo el error residual total del mapa de Unidades Tipo Geológicas fue de 19,8481 m como se observa en la figura 5-4. Considerando la escala original de la información 1:200 000 se puede aceptar este error ya que en papel representaría menos de una décima de milímetro.

Teniendo toda la información espacial en formato vectorial se realizó el proceso de filtrado en ArcMap cuyo objetivo es optimizar el número de

vértices de las líneas para que sean más fáciles de procesar y ocupen menos espacio, es decir el filtrado de líneas consiste en eliminar algunos vértices cuando están muy próximos entre sí o eliminar vértices intermedios en tramos cortos.

ArcGis permite establecer un parámetro de filtrado para cada escala de referencia en la que se utilizan los arcos. Los procesos de filtrado se realizan en ArcMap de forma automática al igual que la creación de la topología.

Los errores que se pueden presentar en la creación de las topologías son los siguientes:

- Arco con un extremo sin conectar a otro arco cruce de dos arcos sin corte.
- Arco que no cierra un polígono por ser corto, arco que sobrepasa a otro.
- Nodo con menos de tres arcos
- Polígono sin centroide o con más de un centroide
- Arco con un mismo polígono a ambos lados
- Polígono con área nula, polígono con demasiados arcos

- Arco con demasiados vértices

5.3 TRATAMIENTO PREVIO DE LA INFORMACIÓN ALFANUMÉRICA

El tratamiento previo de la información alfanumérica o temática consiste en la captura, edición, eliminación de errores y finalmente el diseño de la base de datos temática que formará parte del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Se puede decir que el tratamiento de la información alfanumérica es menos laborioso que en la información espacial.

5.3.1 Adquisición

La información alfanumérica o temática está ligada a la información espacial que se requiere en el Sistema de Información Geográfica (SIG), por tanto cada uno de los mapas tiene asociado una tabla de atributos.

Se recopiló información de aquellos datos asociados a metales pesados en suelos por lo que la mayor parte de la información se basa en el estudio publicado por el IGME: *“Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid”*.

La información fue digitalizada y almacenada mediante tablas en hojas de cálculo *excel*, a pesar de que el módulo ArcMap del programa ArcGis también posee herramientas para la edición de la base de datos temática.

En el procesamiento de la información alfanumérica se producen errores que deben ser eliminados antes de formar parte de la base de datos temática del Sistema de Información Geográfica (SIG). ArcMap, usualmente no reconoce ciertos caracteres como “ñ”, tildes, espacios en blanco, etc. Por esta razón se realizó la digitalización de la información alfanumérica omitiendo estos caracteres.

También es posible que no se reconozcan los decimales de un número por lo que es imprescindible verificar las tablas una vez que forman parte del SIG y corregir este tipo de errores dentro del programa utilizado para gestionar la información alfanumérica, en nuestro caso, las hojas de cálculo.

Es posible corregir los errores mediante las herramientas de ArcMap, estando en modo edición, pero este proceso es laborioso por lo que es preferible corregir los errores en hojas de cálculos o programas de manejo de base de datos.

5.3.2 Diseño de la base de datos alfanuméricos

Se utilizó el modelo entidad-relación para diseñar la base de datos alfanumérica o temática de este proyecto.

Los datos se almacenan formando las llamadas relaciones que son tablas rectangulares formadas por filas (registros) y columnas (campos).

Para diseñar la base de datos temática se revisaron los siguientes objetivos:

- Asegurar que todos los datos necesarios para satisfacer los requerimientos del usuario estén almacenados en la base de datos.
- Eliminar la redundancia de datos sin perder claridad o información.
- Suministrar una forma clara para entender la organización de los datos.

En el anexo A se reúnen todas las tablas que forman parte de la base de datos del SIG una vez que han sido ingresadas como capas de información al módulo ArcMap del programa ArcGis.

La tabla 5-6 presenta la información temática relacionada a la información espacial.

Tabla 5-6: Contenido de la base de datos espacial y temática

INFORMACIÓN ESPACIAL	INFORMACIÓN ALFANUMÉRICA O TEMÁTICA
División Municipal	Nombre del municipio, superficie, población, área, perímetro, código del municipio, código de la Comunidad de Madrid
Unidades Tipo Geológicas	Tipo de material, tipo de suelo, características del relieve, pH, contenido de materia orgánica, textura, valores de fondo y referencia por metal.
Hidrología	Descripción, nombre de embalses, ríos, arroyos y lagunas, ubicación
Estaciones de muestreo (Estudio realizado por el IGME)	Ubicación, etiqueta del IGME, valor de los elementos traza
Zona de exclusión del muestreo del IGME	Ubicación de zonas industriales, puntos de vertido.
Vegetación	Tipo de vegetación

Las características principales que posee la base de datos temática son las siguientes:

- La base de datos relacional está compuesta por varias tablas realizadas en una hoja de cálculo *excel* y posteriormente incorporadas a ArcMap
- Las tablas contienen información referente a la distribución de metales pesados
- Las tablas están almacenadas en una forma estructurada
- Contienen información no redundante

- Las filas (registros) son los objetos geográficos y las columnas muestran las variables temáticas (campos) asociados a ellos
- No existe ninguna tabla con dos filas iguales
- Una de las columnas constituye un atributo especial, el identificador de la fila/registro.

Los identificadores se utilizan para relacionar la base de datos temática con la espacial y también para unir dos o más tablas de la base de datos mediante la operación denominada “unión relacional”. En la figura 5-6 se esquematiza una de las tablas que forma parte de la base de datos temática del presente proyecto. El identificador que permitirá relacionar la tabla de la figura 5-6 es “UNIDADES_G” que se refiere a las unidades tipo geológicas.

Figura 5-6: Características de las Unidades Geológicas

OI	UNIDADES_G	PH	MATERIA_O	ARENA_ (%)	LIMO_ (%)	ARCILLA_ (%)
0	Tipo 1	5,84	3,85	74,3	16,4	7,2
1	Tipo 2	5,85	2,36	80,5	11,4	6,7
2	Tipo 3	6,41	0,82	76	12,1	12,8
3	Tipo 4	8,28	1,54	59,8	26,2	14,2
4	Tipo 5	7,78	1,69	49,6	24,9	25,5
5	Tipo 6	7,34	1,48	67,2	20,1	13,3
6	Vega del Jarama	6,98	1,64	68	20,4	13,1
7	Vega del Tajo y TajuRa	8,09	1,55	65,1	22,6	12,3
8	Vega del Alberche y Guadarrama	5,89	1,33	81,3	11,8	8,7

Record: 0 Show: All Selected Records (0 out of 9 Selected.) Options ▾

En general, la mayoría de tablas se pueden enlazar por medio de este identificador “UNIDADES_ G” que se refiere a las Unidades Tipo Geológicas:

- Unidad tipo 1: rocas metamórficas
- Unidad tipo 2: granitos
- Unidad tipo 3: arcosas
- Unidad tipo 4: calizas del páramo
- Unidad tipo 5: yesos y margas yesíferas
- Unidad tipo 6: depósitos aluviales

ArcMap del programa ArcGis asigna una columna OID que sirve como identificador en caso de no existir alguno. Los tipos de datos que son reconocidos por el programa ArcGis son: carácter, numérico, enteros, enteros binarios y fecha.

5.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

5.4.1 Manejo de la Información en ArcGis

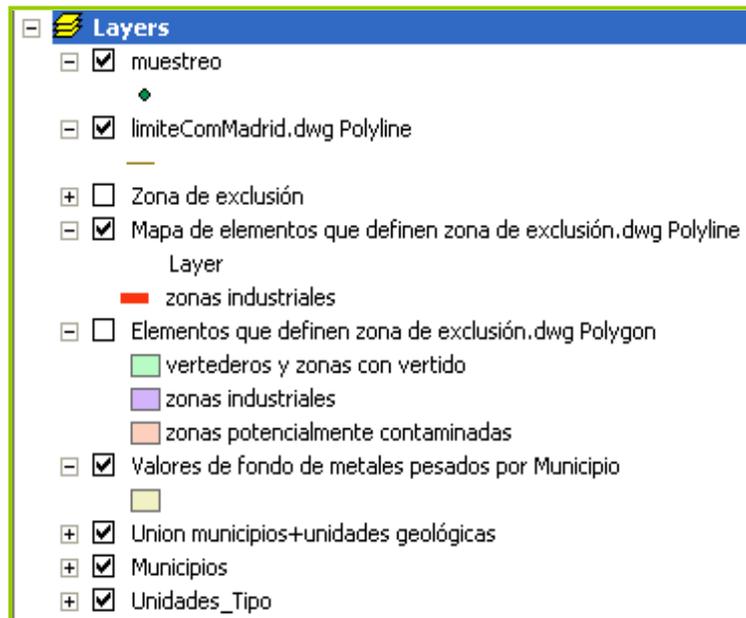
El modelo de datos vectorial de ArcGis, en su versión ArcInfo utiliza la organización arco/nodo que tiene dos componentes, el *módulo Arc* y el *módulo Info*. El primero manipula la base de datos espacial, es decir, maneja las coordenadas y la topología y está capacitado para manejar los datos de localización geográfica. El *módulo Info* es un sistema de gestión de base de datos relacionales encargado de almacenar y manejar los atributos o variables temáticas (modelo relacional).

Se utiliza el concepto de capa de forma similar a un sistema CAD (diseño asistido por computadoras) que de alguna forma clasifica las entidades según categorías

En la figura 5-7 se esquematiza la forma en que se pueden visualizar las distintas capas de información dentro del módulo ArcMap. Las capas (layers) señaladas con un visto son las que están visibles para el usuario. Así el usuario puede disponer de varios tipos de información al mismo tiempo. En las propiedades de cada una de las capas es posible modificar la simbología para su representación. Para la capa “Elementos que definen zona de exclusión” de la figura 5-7 se ha elegido un color diferente para cada

uno de los polígonos que la componen, esta es una manera de comprender mejor la información espacial.

Figura 5-7: Visualización de capas de información en ArMap



Una vez que las capas son ingresadas a ArcMap es necesario colocar un sistema de referencia, para el caso de este proyecto se utilizó el sistema UTM, European datum 1950, Huso 30.

La información alfanumérica que forma parte de la base de datos temática fue ingresada de la misma manera a ArcMap. Cuando todas las capas de información han sido ingresadas, tienen un sistema de coordenadas y se han corregido los posibles desplazamientos se integraron las dos bases de datos.

5.4.2 Integración de las bases de datos espacial y alfanumérica

La Georreferenciación es otra manera de denominar a la integración de las dos bases de datos, es un proceso por el cual se le asignan coordenadas a una entidad de la base de datos alfanumérica o bien se asocia un dato a una entidad ya referenciada geográficamente.

Para asociar la componente espacial con la componente temática de un dato geográfico, en el modelo vectorial se establece un identificador o código numérico para cada elemento geográfico que aparece en las dos bases de datos: la espacial y la temática, como se menciona en el apartado 5.3.2

El identificador o código tiene que ser introducido en la base de datos alfanumérica junto con los demás datos referidos al mismo registro, y se tiene que introducir igualmente en el registro de la entidad gráfica, con lo que se posibilita el enlace entre ambos ficheros.

Para la integración de las dos bases de datos se realizaron los pasos que se describen a continuación:

- Edición de los mapas en formato vectorial por medio de las herramientas CAD (diseño asistido por computadora) del programa informático AutoCad 2000, guardando los diferentes elementos geográficos en distintas capas (layers).

- Se ingresaron al módulo ArcMap los mapas que conservan el formato CAD, por tanto la distinta información ya se encuentra separada en capas.
- Al ingresar el mapa en formato vectorial, ArcMap genera automáticamente una tabla de atributos la cual contiene en uno de los campos la capa que proviene del programa AutoCad 2000. En la figura 5-8 se observa la tabla de atributos creada para la información espacial “Elementos que definen la zona de exclusión”.
- Se ingresan las tablas que contenga atributos temáticos relacionados a la información espacial.
- Debe existir un campo que es común a las dos bases de datos: espacial y alfanumérica para realizar la integración. Esta columna es el identificador o código
- Por medio de una de las funciones de ArcMap denominada JOIN (relacionar) fue posible añadir a la tabla generada automáticamente por ArcGis, la tabla de sus atributos temáticos. La figura 5-9 ejemplariza esta acción.

Figura 5-8: Tabla de atributos generada por ArcMap

Shape	Entity	Handle	Layer	Linetype	Color
Polygon	Polyline	1ADF	zonas industriales	Continuous	12
Polygon	Polyline	1AE0	zonas industriales	Continuous	12
Polygon	Polyline	1AE1	zonas industriales	Continuous	12
Polygon	Polyline	1D8A	zonas industriales	Continuous	12
Polygon	Polyline	1D8B	zonas industriales	Continuous	12
Polygon	Polyline	1D8E	zonas industriales	Continuous	12
Polygon	Polyline	1D8F	zonas industriales	Continuous	12
Polygon	Polyline	1D92	vertederos y zonas con vertido	Continuous	41
Polygon	Polyline	1D93	vertederos y zonas con vertido	Continuous	41
Polygon	Polyline	1D94	vertederos y zonas con vertido	Continuous	41
Polygon	Polyline	1D95	vertederos y zonas con vertido	Continuous	41
Polygon	Polyline	1D96	vertederos y zonas con vertido	Continuous	41
Polygon	Polyline	1D97	vertederos y zonas con vertido	Continuous	41
Polygon	Polyline	1D98	vertederos y zonas con vertido	Continuous	41
Polygon	Polyline	1D99	vertederos y zonas con vertido	Continuous	41

Record: 100 Show: All Selected Records (1 out of 448 Selected)

En la figura 5-8 se observa la tabla de atributos que ArcMap genera automáticamente al ingresar la capa “Elementos que definen la zona de exclusión” que fue previamente editada en AutoCad 2000. Esta capa contiene 448 polígonos agrupados en tres capas (layers): zonas industriales, vertederos y zonas con vertido y la capa zonas potencialmente contaminadas.

La figura 5-9 muestra una tabla de la base de datos temática “Attributes of valores de fondo p95 por unidad tipo” que contiene el campo “UNIDADES_

G” cuyos elementos son iguales al campo “Layer” de la tabla inferior “Attributes of Unidades_Tipo” que pertenece a la base de datos espacial.

Para el caso de la figura 5-9, cuando el usuario requiera conocer el contenido de Ag en cualquier Unidad Tipo Geológica, simplemente tendrá que señalar con el cursor cualquier parte de la Comunidad de Madrid y tendrá la información temática que requiera.

Figura 5-9: Georreferenciación por medio de ArcGis

Attributes of valores de fondo p95 por unidad tipo

OID	UNIDADES__	Ag (ug/g)	As (ug/g)
0	Tipo 1	0,120	51
1	Tipo 2	0,070	15
2	Tipo 3	0,070	27
3	Tipo 4	0,070	22
4	Tipo 5	0,240	31
5	Tipo 6	0,400	22
6	GLOBAL (p95)	0,150	30

Record: 1 Show: All Selected Records (

Attributes of Unidades_Tipo

FID	Shape*	Layer	Cnt_Layer
0	Polygon	Tipo 2	61
1	Polygon	Tipo 3	304
2	Polygon	Tipo 4	209
3	Polygon	Tipo 5	302
4	Polygon	Tipo 6	460
5	Polygon	Tipo 1	91

Record: 1 Show: All Select

5.4.3 Creación de la topología

El Sistema de Información Geográfica (SIG) tiene como característica la posibilidad de crear asociaciones entre las entidades gráficas, formando la topología, que se refiere a un conjunto de entidades relacionadas entre sí cuyo propósito es recorrer el territorio representado en el SIG desde una entidad a otra.

El programa ArcGis genera la topología automáticamente utilizando los centroides y sus identificadores, es decir, se digitalizan los nodos y los arcos, pero sin atribuir a éstos últimos su topología. A continuación se digitaliza un punto dentro de cada polígono, denominado centroide, y se etiqueta con un identificador que puede utilizarse como geocódigo para asociarle atributos temáticos desde una tabla.

Mediante ArcGis fue posible crear automáticamente las relaciones topológicas entre las entidades gráficas. Se crearon redes de polígonos o de arcos de forma automática sin tener que señalar cada una de los arcos que componen un polígono o una red de arcos.

La topología en ArcGis se puede plantear de dos maneras diferentes: topología de reglas, y topología de mapa o topología implícita.

En la *topología de reglas* existen reglas topológicas que dotan de flexibilidad al modelo de datos, ya que es el usuario quien decide qué reglas topológicas se aplican en cada caso, así como la forma de manejar los errores topológicos detectados tras un proceso de validación.

Las reglas topológicas se establecen para controlar las relaciones espaciales permitidas entre elementos de una misma capa o de varias, y se puede elegir entre 26 reglas diferentes dependiendo de las relaciones espaciales que se quiera comprobar.

Durante el proceso de validación de la topología, se verifica que cada una de las reglas que han sido establecidas, se cumple en todos y cada uno de los elementos que participan en dicha topología, y se crea un registro de cada uno de los errores detectados.

Las áreas no validadas (*dirty area*) son aquellas zonas que han sido editadas, actualizadas, o afectadas por la adición o borrado de elementos, dentro de una topología. Se generan áreas no validadas cada vez que un elemento es editado, borrado, creado, o modificado el subtipo, cuando se reconcilian versiones y, en general, cada vez que una determinada operación de mantenimiento realizada puede generar un error topológico.

Durante el proceso de validación, y cada una de las veces en las que no se cumple alguna de las reglas topológicas elegidas por el usuario, se crea un registro de error que se almacena en la base de datos.

La geodatabase es flexible a la hora de manejar los errores, que si bien pueden convivir como tales en la geodatabase, es posible convertirlos en excepciones.

La *topología de mapa* se trata de una topología implícita que se puede aplicar sobre elementos simples (puntos, líneas y polígonos) y controla, durante una sesión de edición, las relaciones espaciales existentes entre aquellos elementos de un mapa elegidos por el usuario. Permite editar de forma simultánea elementos con geometrías coincidentes y puede aplicarse tanto a elementos de una misma capa como a los de distintas capas.

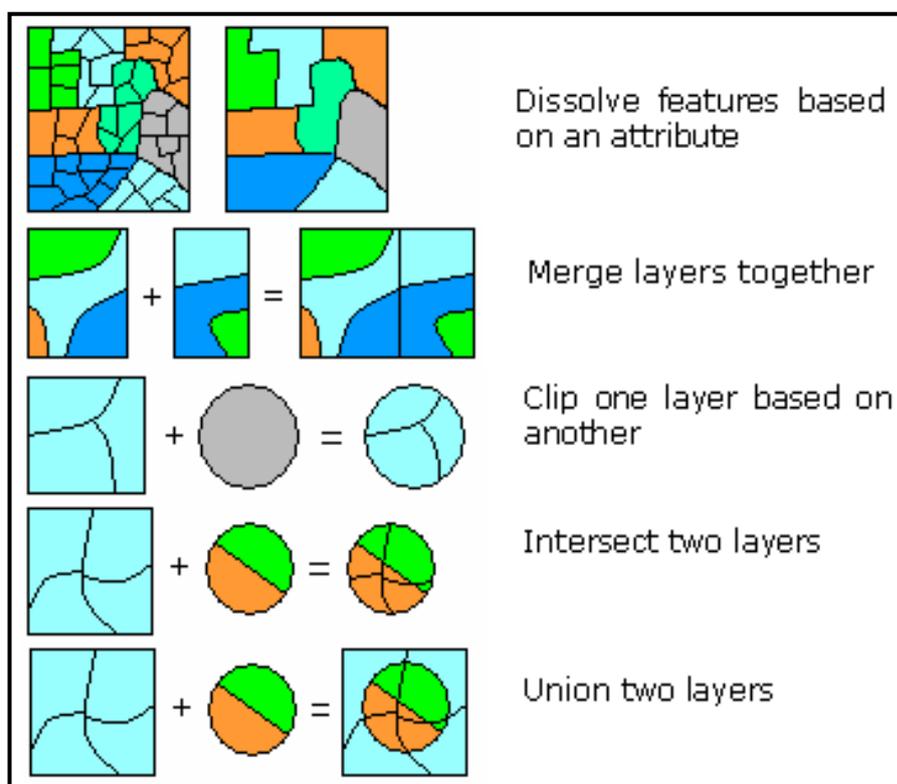
5.5 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS Y CONSULTAS

Las funciones de superposición de polígonos permiten generar distintos mapas temáticos utilizando la información recopilada en la base de datos espacial y alfanumérica.

Los mapas temáticos consisten en combinar dos temas de polígonos de forma que se cree un tema con la superposición lógica de ambas.

En la figura 5-10 se puede observar las diferentes funciones que posee ArcMap en *GeoProcessing Wizard* para trabajar con polígonos y sus atributos.

Figura 5-10: Operaciones con polígonos de GeoProcessing Wizard.



Con la información que este proyecto tiene almacenada se pueden crear diversos mapas temáticos, sin embargo, los que resultan más útiles para el estudio de la distribución natural de metales pesados en la Comunidad de Madrid son los siguientes:

Mapa temático 1: Zona de exclusión para el diseño del muestreo del estudio publicado por el IGME: *Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de*

Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid.

Mapa temático 2: Asignación de valores de fondo y referencia por municipio de los quince elementos: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn.

Mapa temático 3: Líneas de igual contenido de los elementos traza Al, Ca, Fe, Ga, K, Mg, Na, Pb, Sc, Sr, Th, Tl en suelos de La Comunidad Autónoma de Madrid.

5.6 POSIBLES ANÁLISIS

Una vez introducida la información en el Sistema de Información Geográfica (SIG), las primeras utilidades del mismo se centran en la visualización y búsquedas selectivas de la información.

El SIG facilita notablemente el análisis de la información referente a la distribución natural de metales pesados dentro de la Comunidad de Madrid y puede ser utilizado posteriormente como herramienta de análisis en el estudio de temas ambientales relacionados a los suelos.

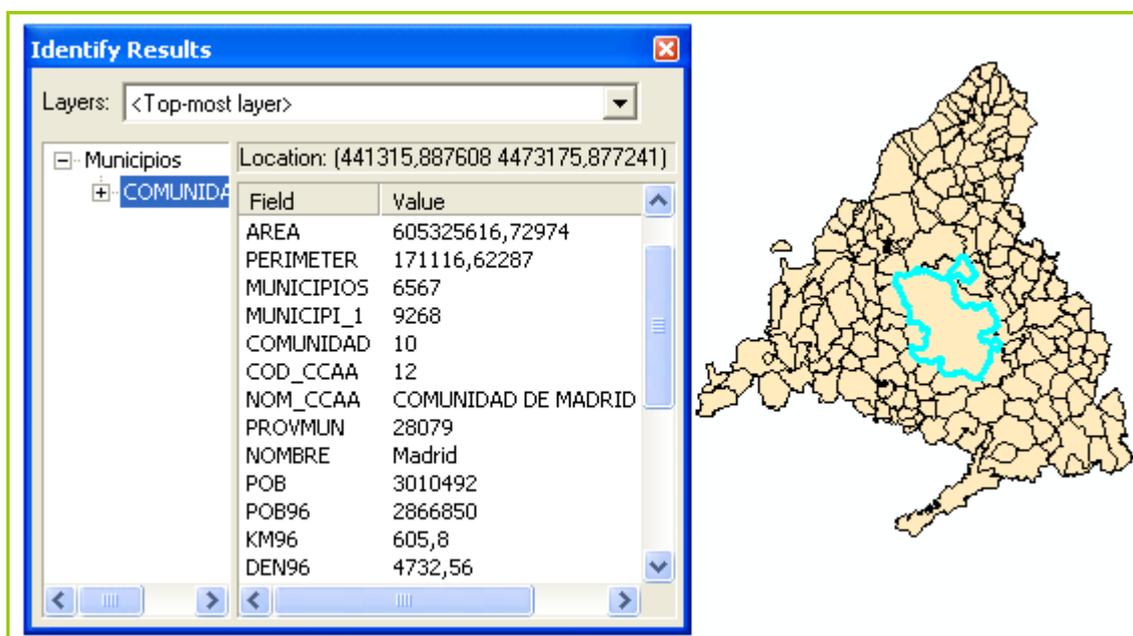
El sistema de consultas del SIG convierte la interacción entre el usuario y los datos extremadamente dinámicos e incluye: documentos gráficos como mapas y documentos alfanuméricos como listados, tablas, reportes, etc.

Entre los diferentes análisis que se pueden realizar tenemos los siguientes:

- ✓ Visualización de datos: la posibilidad de seleccionar los niveles de información deseados obteniendo mapas temáticos
- ✓ Selección de los registros o elementos geográficos de una tabla cuyas variables temáticas cumplan una condición aritmética y/o aritmética lógica, es decir dos o más campos de la misma tabla que cumplan simultáneamente una condición aritmética que afecten a los campos temáticos considerados
- ✓ Producción de mapas
- ✓ Consulta espacial: Se refiere a la posibilidad de preguntar cuales son las propiedades de un determinado objeto, o en cuales lugares tienen tales propiedades.
- ✓ Análisis espacial: Consiste en el uso de un conjunto de técnicas de combinación entre los niveles de información, de modo de evidenciar patrones anteriormente ocultos al analista.

En la figura 5-11 se presenta un tipo de consulta espacial que se puede hacer en el SIG diseñado, dentro de la capa División Municipal. El usuario puede conocer la información almacenada sobre cualquiera de los municipios señalándolo previamente, por ejemplo se muestra el área, perímetro, población, densidad de población, etc.

Figura 5-11: Ejemplo de consulta espacial en un SIG



Para el ejemplo dado en la figura 5-11 el usuario ha seleccionado el Municipio de Madrid y en una tabla de resultados denominada *Identify Results* aparece la información sobre área, perímetro, población, densidad de población, código de la Comunidad, etc.

Algunas consultas simples que pueden ser realizadas con un Sistema de Información Geográfica:

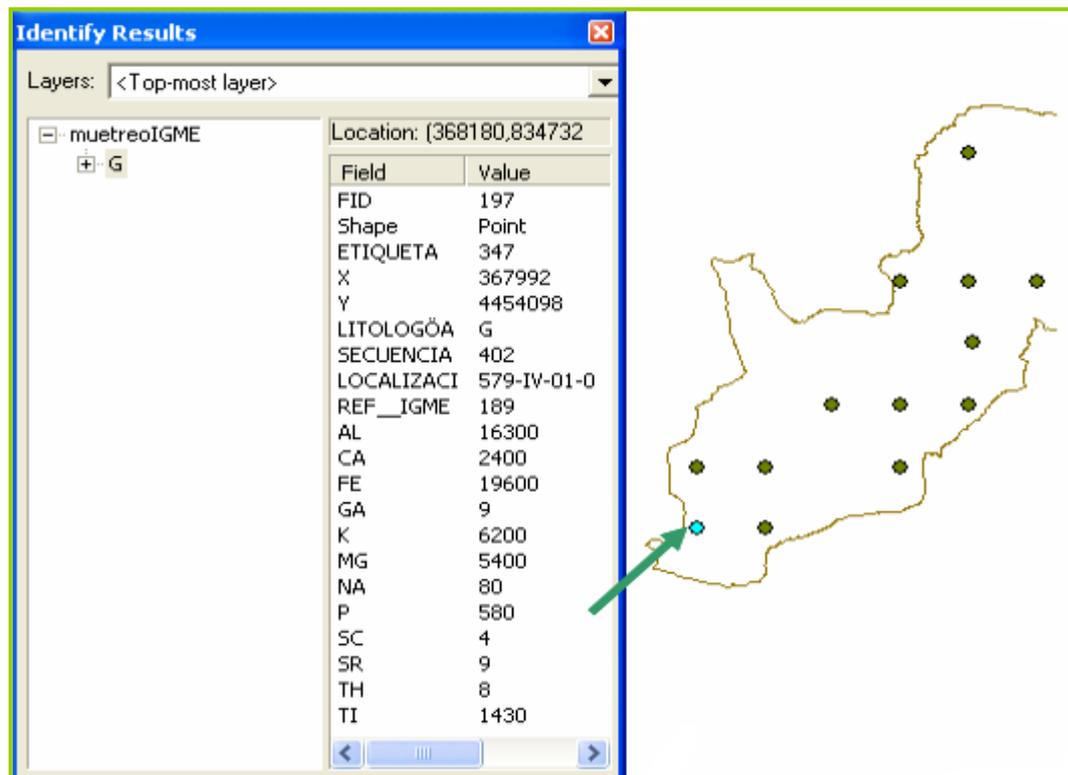
- Recuperación de los datos, ¿Donde está un objeto determinado?, ¿Que es este objeto?
- Sintetizar los atributos de los objetos dentro de una distancia o área determinada
- Mostrar todos los objetos que satisfagan un determinado criterio

Además de los análisis mencionados anteriormente el usuario puede realizar las siguientes consultas a la base de datos temática y espacial.

- Coordinadas de un determinado punto, por ejemplo la ubicación de cualquier estación de muestreo.
- Visualizar al mismo tiempo diversos tipos de información como por ejemplo la hidrología, tipo de vegetación, división municipal, unidades tipo geológicas, para relacionar todos estos componentes.
- Conocer el valor de fondo y referencia de metales pesados en cualquier punto de la Comunidad de Madrid. Dependiendo de la ubicación del sitio seleccionado por el usuario dentro de las Unidades Tipo Geológicas se darán los resultados.

- Investigar la concentración de cada uno de los elementos traza en cualquier punto del muestreo realizado por el IGME. En la figura 5-12 se observan el valor en ug/g de Al, Ca, Fe, Ga, K, Mg, Na, P, Sc, Sr, Th, TI para la muestra etiquetada como 347 y cuyas coordenadas UTM son 367 992, 4 454 098

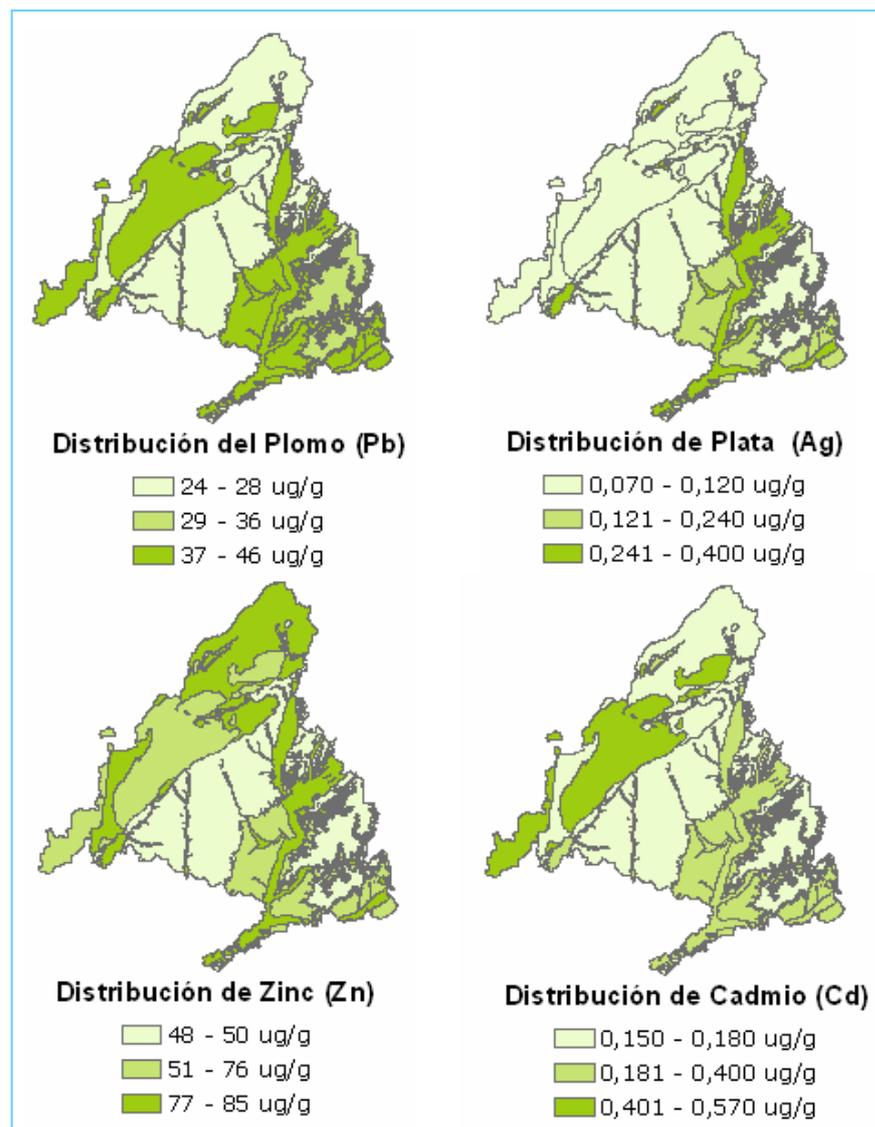
Figura 5-12: Consulta espacial Muestreo del IGME



- Comparación del valor de fondo y referencia de los distintos metales pesados en la Unidades Tipo para estudiar la variabilidad y comprobar que el contenido de metales pesados en el suelo depende del tipo de material y el tipo de suelo. En la figura 5-13 se presenta la distribución de cuatro

metales Pb, Ag, Zn y Cd mediante sus niveles de fondo en el mapa de Unidades Tipo Geológicas.

Figura 5-13: Distribución de valor de fondo de Pb, Ag, Zn y Cd



- Consultar la información temática de cualquier objeto geográfico por ejemplo, nombre de embalses, ríos, nombres de municipios, tipo de vegetación.
- Determinar el área o longitud de cualquier objeto geográfico, por ejemplo, la longitud de los ríos, el área de un embalse, el área total de la zona de exclusión del muestreo del IGME, etc.
- Producción de mapas temáticos. Es posible crear los mapas mencionados en el apartado 5.5, por ejemplo se puede utilizar el SIG para la creación de líneas de igual concentración que clasifican las zonas en áreas en las que una variable toma un valor constante. Se podría representar el contenido de un determinado elemento Al, Ca, Fe, etc.

Además de todos los posibles análisis que se han mencionado anteriormente el SIG permite la organización de los datos de modo que se puedan almacenar datos sustituyendo mapas analógicos por una mapas digitales teniendo algunas ventajas: reducción en el espacio físico; el fin del deterioro de los productos en papel; la pronta recuperación de los datos y la posibilidad de producir copias sin pérdida de calidad.

CAPITULO 6

6. EXPLOTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

6.1 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS Y CONSULTAS

Como se ha demostrado el Sistema de Información Geográfica (SIG) permite la consulta de los datos de forma sencilla, interactiva y rápida.

La implementación del Sistema de Información Geográfica ha permitido la creación de tres mapas temáticos que sirven para el estudio de la distribución natural de metales pesados en suelos de La Comunidad Autónoma de Madrid.

En realidad, con la información almacenada dentro de la base de datos espacial y alfanumérica es posible la creación de varios mapas temáticos, sin embargo, se consideró que los tres mapas temáticos que se presentan a continuación eran suficientes para esquematizar la metodología utilizada.

Mapa temático 1: Zona de exclusión para el diseño del muestreo del estudio publicado por el IGME: “*Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid*”.

Como se señaló previamente en el apartado 5.5, las estaciones de muestreo consideradas en las seis unidades tipo de terreno fueron dispuestas según una malla cuadrada de 3 000 m de lado.

Se excluyeron las láminas de agua, todas aquellas áreas que quedaban dentro de zonas urbanas e industriales o muy próximas a las mismas (1 000 m), así como vertederos y puntos potencialmente contaminados.

Mediante las herramientas que proporciona ArcMap, área de influencia (buffering) se delimitaron las zonas de exclusión.

El resultado de la creación de este mapa temático se puede observar en el apartado 8.2.2

Mapa temático 2: Asignación de valores de fondo y referencia por municipio de los quince elementos: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn.

El estudio realizado de forma conjunta por La Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Madrid y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) señala los valores de fondo y referencia de metales pesados por unidades tipo, de modo que se puede dar el caso de un municipio con dos o más valores dependiendo de su ubicación dentro de las unidades tipo.

Por medio de las funciones de ArcMap se asignará este valor por municipio para lo cual se utilizará el criterio de señalar para cada municipio el valor más restrictivo de aquellos que le corresponda por su ubicación.

Para crear este mapa temático se realizaron las siguientes operaciones en ArcMap:

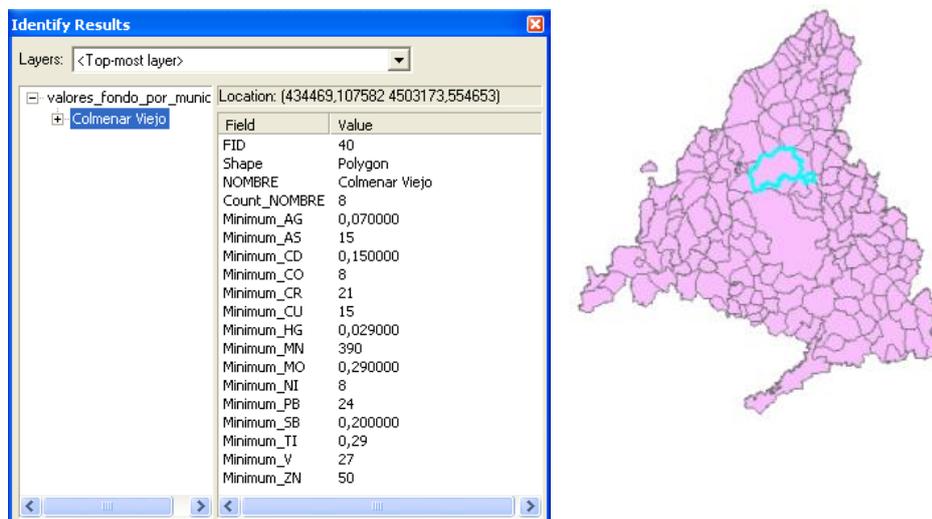
- Visualización de capas en ArcMap: tablas de valores de fondo y referencia de los distintos metales pesados, mapa de unidades tipo geológicas y el mapa de división municipal de la Comunidad de Madrid.
- Integrar los valores de fondo y referencia al mapa de unidades tipo por medio de la herramienta JOIN, utilizando como identificador “UNIDADES_G”.
- Unión de los polígonos de las capas unidades tipo geológicas y división municipal por medio de la opción union two layers de Geoprocessing Wizard en ArcMap.

- Disolución de los polígonos basándose en el atributo NOMBRE de la capa división municipal añadiendo en la nueva capa “Municipio mínimos valores” el mínimo valor para cada metal pesado.
- La capa resultante es un nuevo mapa de división municipal que tiene la información del mínimo valor de fondo y de referencia para cada metal pesado.

El resultado de la creación de este mapa temático se puede observar en el apartado 6.2.2

En la figura 6-1 se representa la el mapa temático 2 en el cual se ha seleccionado el municipio Colmenar Viejo, se puede observar que tiene referenciada la información del mínimo valor de fondo y referencia para cada metal pesado.

Figura 6-1: Mapa temático 2



El resultado de este mapa temático se presenta en dos tablas que contienen los valores de fondo y referencia de 10 metales pesados: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, para algunos de los municipios de la Comunidad de Madrid. La tabla 6-1 presenta los valores de fondo y la tabla 6-2 presenta los valores de referencia

Tabla 6-1: Valores de fondo por municipio ($\mu\text{g/g}$)

NOMBRE	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb
Ajalvir	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Alameda del Valle	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Alcalá de Henares	0,07	22	0,15	8	22	14	390	0,29	15	24
Alcobendas	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Alcorcón	0,07	27	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Aldea del Fresno	0,07	15	0,15	8	21	15	390	0,29	8	24
Algete	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Alpedrete	0,07	15	0,57	9	21	32	900	0,58	8	43
Ambite	0,07	22	0,15	8	22	14	390	0,29	15	24
Anchuelo	0,07	22	0,15	8	22	14	390	0,29	15	24
Aranjuez	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Arganda del Rey	0,07	22	0,18	10	25	14	420	1,31	17	36
Arroyomolinos	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Arroyomolinos (Monte del Aguijon)	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Batres	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Becerril de la Sierra	0,07	15	0,16	9	21	25	900	0,58	8	28
Belmonte de Tajo	0,07	22	0,18	10	25	14	420	1,31	17	36
Berzosa del Lozoya	0,07	27	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Boadilla del Monte	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Braojos	0,12	51	0,16	16	44	25	1170	0,62	33	28
Brea de Tajo	0,07	22	0,18	10	25	14	420	1,31	17	36
Brunete	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Buitrago del Lozoya	0,12	51	0,16	16	44	25	1170	0,62	33	28
Bustarviejo	0,07	15	0,16	9	21	23	650	0,58	8	28
Cabanillas de la Sierra	0,07	15	0,15	8	21	15	390	0,29	8	24
Cadalso de los Vidrios	0,07	15	0,57	9	21	32	900	0,58	8	43
Camarma de Esteruelas	0,07	22	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Campo Real	0,07	22	0,18	10	25	14	420	1,31	17	36
Canencia	0,07	15	0,16	9	21	25	900	0,58	8	28
Carabaña	0,07	22	0,18	10	25	14	420	1,31	17	36
Casarrubuelos	0,07	27	0,15	8	22	15	390	0,29	15	24
Cenicientos	0,07	15	0,57	9	21	32	900	0,58	8	43

Tabla 6-2: Valores de referencia por municipio ($\mu\text{g/g}$)

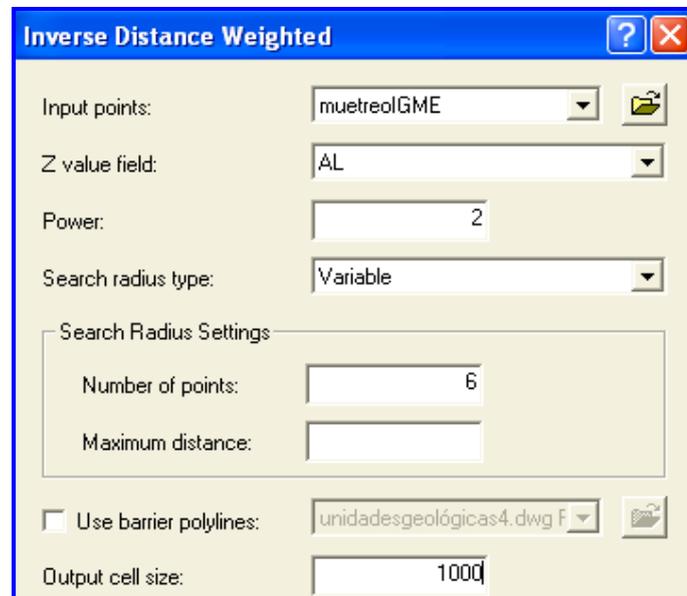
NOMBRE	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb
Ajalvir	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	22,00	33
Alameda del Valle	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Alcalá de Henares	0,10	31	0,28	12	44	20,00	720	0,50	22,00	33
Alcobendas	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Alcorcón	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Aldea del Fresno	0,11	22	0,28	12	44	27,00	720	0,50	13,00	33
Algete	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Alpedrete	0,49	22	0,82	20	52	54,00	1340	1,10	13,00	79
Ambite	0,10	31	0,28	12	44	20,00	720	0,50	22,00	33
Anchuelo	0,10	31	0,28	12	44	20,00	720	0,50	22,00	33
Aranjuez	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	22,00	33
Arganda del Rey	0,10	31	0,29	15	47	20,00	780	1,30	22,00	50
Arroyomolinos	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Arroyomolinos (Monte del Aguijon)	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Batres	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Becerril de la Sierra	0,38	22	0,32	20	52	54,00	1340	1,10	13,00	41
Belmonte de Tajo	0,10	31	0,29	15	47	20,00	780	1,30	22,00	50
Berzosa del Lozoya	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Boadilla del Monte	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Braojos	0,38	184	0,32	52	175	64,00	2000	1,10	41,00	41
Brea de Tajo	0,10	31	0,29	15	47	20,00	780	1,30	22,00	50
Brunete	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Buitrago del Lozoya	0,38	184	0,32	52	175	64,00	2000	1,10	41,00	41
Bustarviejo	0,38	22	0,32	18	52	42,00	920	1,10	13,00	41
Cabanillas de la Sierra	0,11	22	0,28	12	44	27,00	720	0,50	13,00	33
Cadalso de los Vidrios	0,49	22	0,82	20	52	54,00	1340	1,10	13,00	79
Camarma de Esteruelas	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Campo Real	0,10	31	0,29	15	47	20,00	780	1,30	22,00	50
Canencia	0,38	22	0,32	20	52	54,00	1340	1,10	13,00	41
Carabaña	0,10	31	0,29	15	47	20,00	780	1,30	22,00	50
Casarrubuelos	0,11	50	0,28	12	44	27,00	720	0,50	29,00	33
Cenicientos	0,49	22	0,82	20	52	54,00	1340	1,10	13,00	79

Mapa temático 3: Líneas de igual contenido de los elementos Al, Ca, Fe, Ga, K, Mg, Na, Pb, Sc, Sr, Th, Tl.

La representación espacial de la distribución natural de estos elementos mediante líneas de igual contenido permitirá una mejor visualización y análisis de los elementos traza.

Es posible la creación de este mapa ya que se cuenta con la ubicación de cada una de las estaciones de muestreo y la concentración de cada uno de los elementos mencionados. Se utilizaron las herramientas de interpolación de ArcMap. Tomando como ejemplo la concentración del Aluminio (Al), el procedimiento utilizado es el siguiente:

- Se incorporó la capa “muestreoIGME” que contiene las coordenadas (x,y) de los puntos muestreados y la concentración de cada elemento.
- Se utilizó la opción Interpolación a *raster* y el método de interpolación “inverso de la distancia” (Inverse Distance Weighted) de la barra de análisis espacial
- Se indicó, mediante el cuadro de diálogo de la figura 6-2, que la interpolación se realice tomando los 6 puntos más cercanos y que el tamaño de celda (píxel) sea de 1 000 m.

Figura 6-2: Cuadro de diálogo de la función de interpolación

6.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

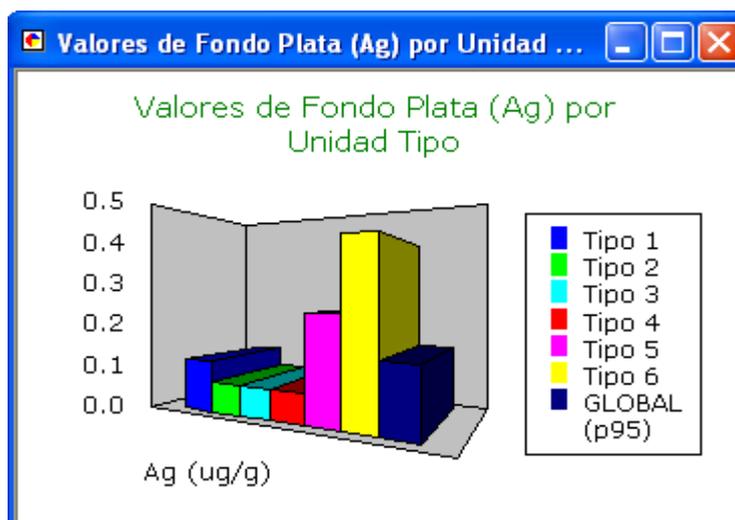
ArcGis permite la edición de resultados del Sistema de Información Geográfica de diversas maneras dependiendo de los requerimientos del usuario:

- Tipo Cartográfico
- Tablas de datos alfanuméricos
- Gráficos (univariado o multivariado)

ArcMap admite presentar los resultados por medio de tablas y reportes que contienen información alfanumérica.

Además, ArcMap permite la creación de gráficos a partir de información alfanumérica así por ejemplo se realizó un gráfico de barras para el valor de fondo de Plata (Ag) por Unidad Tipo Geológica que se puede observar en la figura 6-3

Figura 6-3: Valores de Fondo de Plata (Ag) por Unidad Tipo Geológica



6.2.1 Información alfanumérica tabular

Como la base de datos temática se ha diseñado por medio del modelo relacional, es posible que la unión relacional cree una nueva tabla cuyas filas son la concatenación de los campos de dos tablas iniciales que pueden tener

distintas estructura. Este operador permite generar con facilidad nuevas tablas partiendo de las existentes.

Esta forma de presentación de resultados resulta útil cuando la fuente de la información tabular es distinta y se requiere relacionar información de distintas tablas.

6.2.2 Composiciones cartográficas

Es posible obtener diferentes cartografías de síntesis, mapas de detalle y composiciones de la cartografía con otros esquemas y gráficos del estudio.

El SIG permite obtener cartografías derivadas de operaciones algebraicas con las coberturas de información.

Los mapas temáticos son el sistema de presentación de datos más característico de los SIG. Están formados por un escenario de entidades vectoriales, o *raster* y una o varias capas con organización topológica, que son las encargadas de presentar los datos de uno o varios campos sobre puntos, líneas o polígonos, también se pueden realizar combinando varios temas

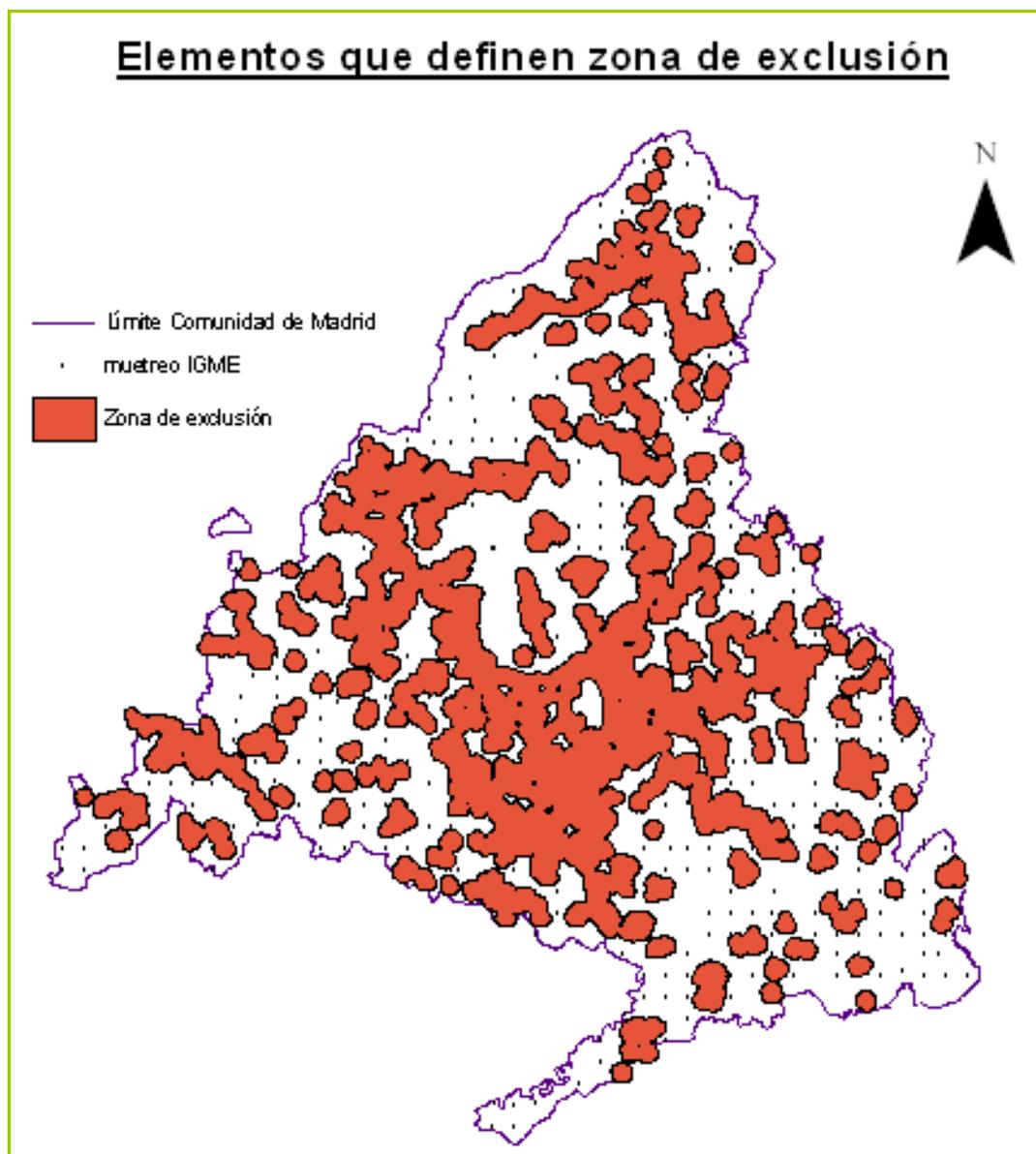
El SIG posee herramientas completas para la producción de mapas, facilitando la inclusión de títulos, de grillas de coordenadas, escalas gráfica y

numérica, leyenda, norte y textos diversos, siendo mucho más indicados para la cartografía que los sistemas CAD (diseño asistido por computadoras)

Mapa temático 1: Zona de exclusión para el diseño del muestreo del estudio publicado por el IGME: “*Determinación de Niveles de Fondo y Niveles de Referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid*”.

En la figura 6-4 se puede observar el mapa temático 1 que ha sido editado mediante las herramientas de ArcMap.

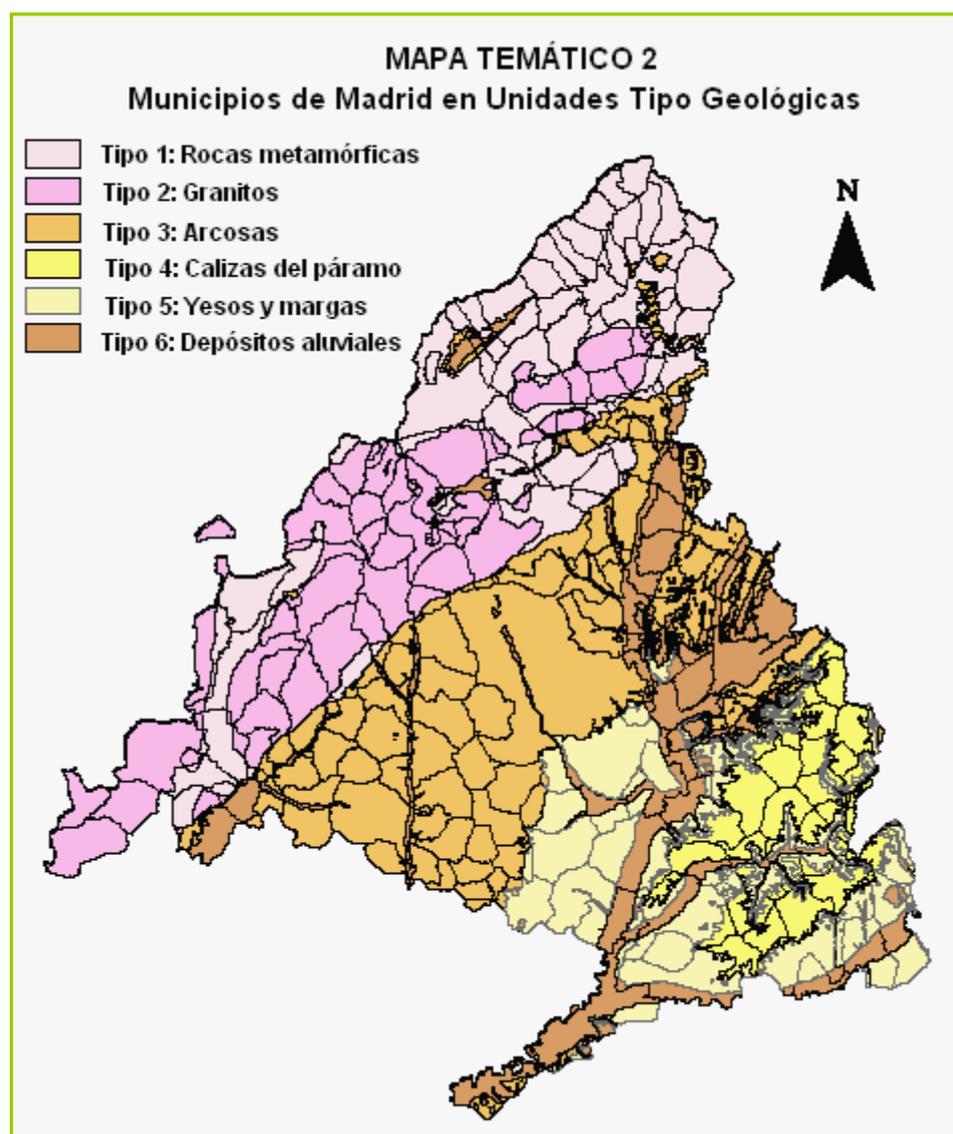
Figura 6-4: Mapa Temático 1



Mapa temático 2: Asignación de valores de fondo y referencia por municipio de los quince elementos: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn.

Se puede observar en la figura 6-5 la unión de dos mapas: el mapa de división municipal y el mapa de Unidades Tipo Geológicas, que es el paso previo a la asignación de los valores de fondo y referencia por municipio.

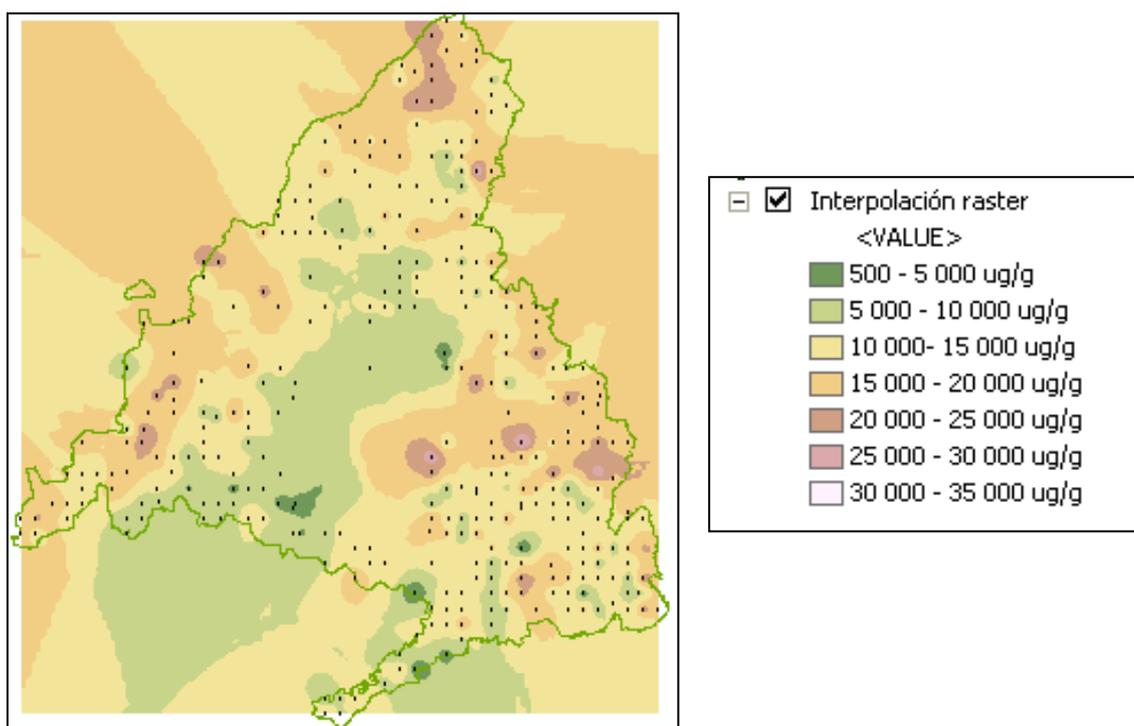
Figura 6-5: Municipios de Madrid en Unidades Tipo Geológicas



Mapa temático 3: Líneas de igual contenido de los elementos Al, Ca, Fe, Ga, K, Mg, Na, Pb, Sc, Sr, Th, Tl.

En la figura 6-6 se puede observar el resultado la interpolación realizada. La nueva capa creada por ArcMap permite utilizar una simbología distinta para que el usuario pueda comprender rápidamente la información. Los valores de concentración se dividieron en 7 intervalos, siendo el menor valor 500 $\mu\text{g/g}$ y el máximo valor 35 000 $\mu\text{g/g}$.

Figura 6-6: Interpolación a *raster* del contenido de Aluminio ($\mu\text{g/g}$)



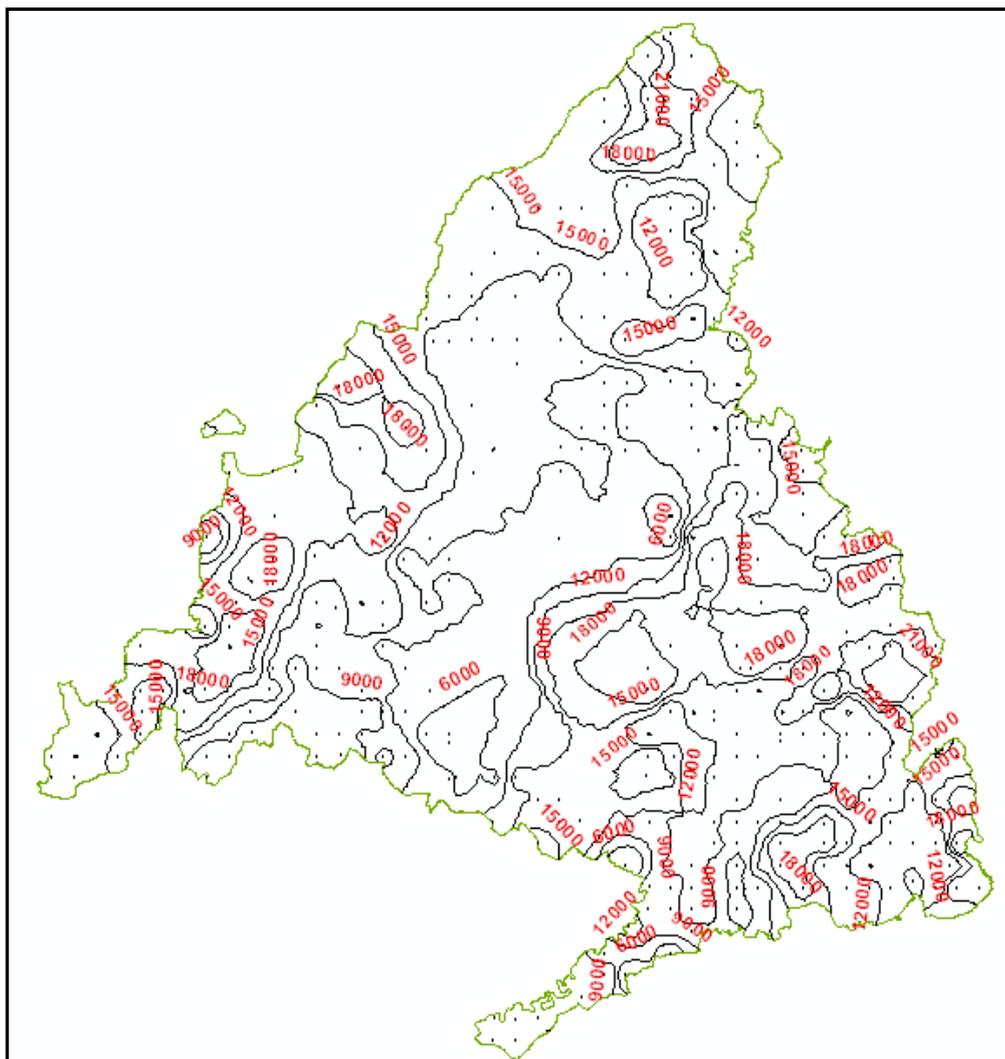
Visualizar de esta manera la información que originalmente se encontraba en una tabla de la base de datos temática, permite al usuario ver que en general

los suelos de la Comunidad de Madrid presentan concentraciones de Aluminio (Al) entre 5 000 $\mu\text{g/g}$ y 2 000 $\mu\text{g/g}$, existiendo concentraciones mayores solo en pequeñas áreas.

Luego de obtener esta capa *raster* fue posible generar líneas de igual concentración para el Aluminio por medio de la función “creación de contornos” de la barra de herramienta de análisis espacial (Spatial Analysis).

A cada una de las líneas se le asigna una etiqueta que contiene el valor de Aluminio (Al) en $\mu\text{g/g}$ como se observa en la figura como se observa en la figura 6-7.

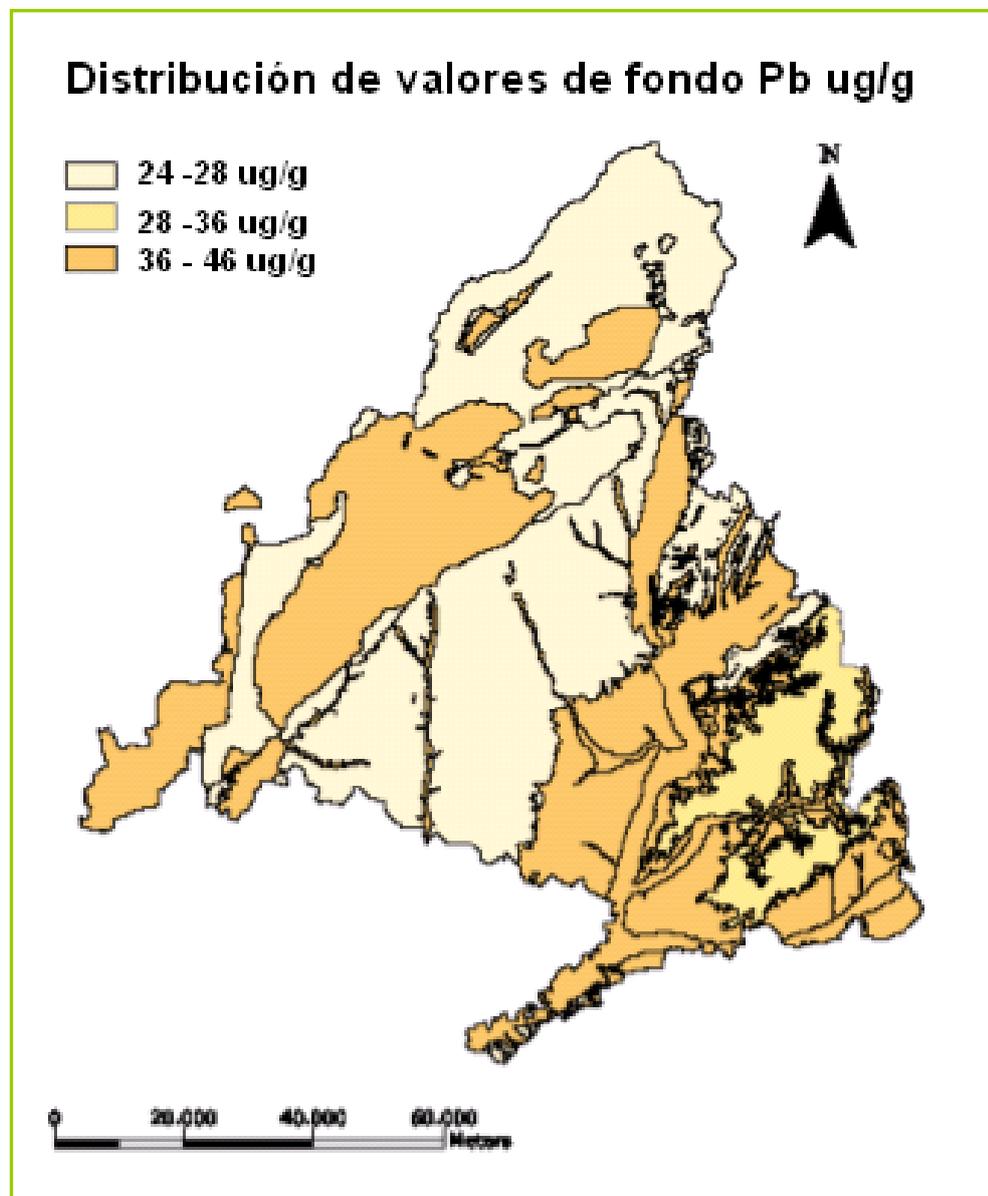
Figura 6-7: Líneas de igual concentración de Aluminio



Además se incluye en la figura 6-8 la representación cartográfica de la distribución del Plomo dentro de la Comunidad de Madrid para lo cual se han designado tres intervalos que comprenden los 6 valores que originalmente se han establecido ya que corresponden a las 6 unidades tipo geológicas.

Este mapa intenta demostrar la utilidad que tienen los SIG para el estudio del medio ambiente ya que en caso de estudiar el riesgo debido a la toxicidad de cualquier metal pesado es necesario establecer intervalos de concentración y representarlos dentro de la zona de estudio, que en este caso particular sería la Comunidad Autónoma de Madrid.

Figura 6-8: Distribución del Plomo dentro de la Comunidad de Madrid



CAPITULO 7

7.1 Conclusiones

El empleo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el estudio de la distribución de metales pesados en los suelos de la Comunidad de Madrid, facilita el manejo de información espacial o alfanumérica, permite al usuario del SIG la creación de mapas temáticos que para visualizar, analizar y comprender rápidamente la información y relacionar la distribución de estos elementos con otros factores como la geología, litología, vegetación y las características físicas y químicas de los suelos.

La asignación de valores de fondo y referencia de metales pesados para cada municipio de la Comunidad de Madrid constituye una herramienta para la ejecución de Estudios de Impacto Ambiental en temas relacionados a la contaminación de suelos, ya que se tiene la concentración natural de estos

elementos, lo que permite establecer comparaciones entre estas concentraciones y valores anómalos.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUILO, Miguel, *et al.*, (1998): Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Ministerio de Medio Ambiente. España
2. BERNHARDSEN, Tor (1999): Geographic Information Systems. John Wiley & Sons, Inc, Estados Unidos.
3. BOSQUE SENDRA, Joaquín (1997): Sistemas de Información Geográfica. Ediciones Rialp, Madrid.
4. BOSQUE SENDRA, Joaquín; ESCOBAR MARTINEZ, F. Javier (1994): Sistemas de Información Geográfica. Prácticas con PC ARC/INFO e IDRISI. Editorial RA-MA, Madrid.
5. CHUVIECO SALINERO, Emilio (2002): Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel Ciencia, Barcelona.
6. DE MIGUEL, Eduardo; CALLABA, Antonio (2002): Determinación de Niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros

elementos traza en suelos de La Comunidad de Madrid. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.

7. LAÍN HUERTA, Luis (1999): Los Sistemas de Información Geográfica en los Riesgos Naturales y en el Medio Ambiente. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
8. LAÍN HUERTA, Luis (2002): Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión de los Riesgos Geológicos y el Medio Ambiente. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
9. MOLDES TEO, F. Javier (1995): Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica. Editorial RA-MA, Madrid.
10. POMARES, F, *et al.* (1998): Estado de contaminación por metales pesados en suelos de cítricos con cultivo ecológico. Departamento de Recursos Naturales. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Valencia.
11. URZELAI, Arantzazu (2003): Análisis de Riesgos para la salud humana y los ecosistemas. Investigación de la contaminación del suelo. IHOBE, País Vasco.
12. VIENNEAU, Aleta (1999): Using ArcCatalog. Esri, Estados Unidos.

REFERENCIAS DE INTERNET

1. <http://www.araneus.humbolt.org.co>: Sistemas de Información Geográfica
2. <http://www.esri.com/ArcGis>: ArcGis 8
3. <http://www.fao.org>: Introducción a los Sistemas de Información Geográfica.
4. <http://www.incom.cl>: El sistema arcgis
5. <http://www.lenntech.com>: Tabla periódica de los elementos
6. <http://www.procalculo.com>: ArcGis Desktop
7. <http://www.rae.es>: Real Academia Española
8. <http://www.unlp.edu.ar>. Empresa Cesga: Metodología de construcción de proyectos GIS para la asistencia a los municipios en la DAM