



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Prospección geofísica aplicada al estudio de los valles de fondo plano en el entorno de Zaragoza.
Geophysical survey applied to the study of flat – bottomed valleys in the area around Zaragoza.

Autor

Samuel Rodrigo Egea

Director/es

Luis Arlegui Crespo

Antonio Casas Sainz

Departamento de Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias

2021

ÍNDICE

1.	ABSTRACT	3
2.	RESUMEN.....	3
3.	INTRODUCCIÓN	3
3.1	OBJETIVOS.....	4
4.	CONTEXTO GEOGRÁFICO	5
4.1	SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....	5
4.2	LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA	6
4.2.1	CUENCA DEL EBRO.....	6
4.2.2	ESTRATIGRAFÍA.....	6
4.2.3	VALLES DE FONDO PLANO.....	7
5.	METODOLOGÍA	8
5.1	TRABAJO DE CAMPO	8
5.1.1	MEDIDAS DEL CAMPO MAGNÉTICO: METODOLOGÍA Y EQUIPO EMPLEADO.....	9
5.1.2	MEDIDAS DE LA SUSCEPTIBILIDAD: METODOLOGÍA Y EQUIPO EMPLEADO	10
5.2	TRABAJO DE GABINETE.....	11
5.2.1	TRATAMIENTO DE DATOS	11
5.2.2	TRABAJO DE LABORATORIO	11
6.	RESULTADOS.....	13
6.1	PROSPECCIÓN MAGNÉTICA	13
6.2	SUSCEPTIBILIDAD	17
6.3	MODELIZACIÓN MAGNÉTICA 2.5D	19
6.4	CURVAS TERMOMAGNÉTICAS.....	21
7.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	22
8.	CONCLUSIONS	25
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	26
10.	ANEXOS	28

1. ABSTRACT

One of the most characteristic landforms in Zaragoza are the flat-bottomed valleys, locally known as “vales”, that fit in the gypsums of the central sector of the Ebro Basin. These geological forms are filled with detrital material such as gravels and sands amongst others and defined a planar morphology. The major aim of this study is to determine the internal architecture of the flat valleys, the processes that can be related to their formation and their posterior evolution, to finally determine if the sedimentary filling describes a profile geometry with “U” or “V” shape. In order to characterize valleys, a geophysical study has been carried out, based on magnetic prospecting techniques. This methodology has been developed to determine the spatial variation of magnetic anomalies that shows the area, variation in magnetic susceptibilities, and determination of ferromagnetic mineral phases, to in the end integrate all of these data in mathematical 2.5D models of the geometry and extension of units, at surface and at depth.

Keywords: Geophysics, vales, mathematic model, magnetic susceptibility, magnetism.

2. RESUMEN

Una de las formas de relieve más características de Zaragoza son los valles de fondo plano, también conocidos como vales, quedando encajadas en los yesos (en uno los materiales más abundantes de la provincia de Zaragoza), del sector Central de la Cuenca del Ebro. Estos valles están rellenos de materiales detríticos como gravas o arenas entre otros, proporcionando una morfología plana en su superficie basal. Este estudio se ha realizado con el fin principal de conocer la arquitectura interna de estos valles, así como los procesos que los han formado y si su relleno sedimentario se produce acomodándose a una geometría en forma de U o de V. Para responder estas cuestiones, se ha realizado un estudio basado en técnicas geofísicas como la prospección magnética. Esta metodología nos permite determinar la variación espacial de las anomalías magnéticas presentes en la zona, sus susceptibilidades magnéticas y las fases minerales presentes, para finalmente realizar la modelización matemática en 2.5D de la geometría y extensión de las unidades tanto en superficie como en profundidad.

Palabras clave: Geofísica, vales, magnetismo, modelización matemática, susceptibilidad magnética, anomalías

3. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, debido a la escasa utilidad agrícola del yeso, dominante en los montes de la Cuenca del Ebro, en esta zona, los valles de fondo plano han sido empleadas como zonas preferentes de agricultura desde los tiempos de los romanos (Soriano y Calvo, 1987). Como consecuencia de la agricultura y del clima, dichas vales han sufrido variaciones tanto en su morfología, como en su tamaño y disposición con el paso de los años.

El fondo de las vales se ha ido colmatando progresivamente con materiales sedimentarios, de forma que es imposible distinguir de forma directa si la superficie basal de las vales es plano (forma de U) o presenta una morfología e incisión fluvial (forma de V).

Con el fin de caracterizar las vales a partir de técnicas geofísicas y analíticas centradas en la prospección magnética y el estudio de la susceptibilidad magnética de los materiales que componen la val, se realizaron mediciones en 3 valles de fondo plano, y se analizaron y compararon los datos obtenidos.

El trabajo de campo consistió en (1º) la realización de la prospección magnética, mediante la medición de la variación del campo magnético terrestre en la zona, (2º) en la medición y localización de las anomalías magnéticas, (3º) en la medición in situ de la susceptibilidad magnética de los materiales aflorantes y (4º) recogida de muestras representativas.

El trabajo de laboratorio consistió en medir la susceptibilidad magnética de las muestras recogidas anteriormente.

El trabajo de gabinete, consistió en el procesado de los datos para la elaboración de 3 mapas de anomalías magnéticas a partir de los cuales se han obtenido los perfiles necesarios para la modelización matemática 2.5D de cortes representativos en cada una de las vales prospectadas. Finalmente, también se elaboraron curvas de variación de la susceptibilidad magnética en función de la T^a (curvas termomagnéticas), a partir de los datos obtenidos en laboratorio.

Con los resultados obtenidos en todos los ámbitos de trabajo, se pudo evaluar cuáles son las propiedades magnéticas de los valles de fondo plano, su mineralogía y su geometría en profundidad.

Por último, mencionar que en esta zona se han realizado varios trabajos previos siguiendo la misma metodología. Estos trabajos son los siguientes: Mochales (2006), Pueyo- Anchuela *et al.*, (2010), Romance (2014), Attar (2019), Montserrat (2020) y Aladrén (2020).

3.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este TFG es comparar las propiedades magnéticas y la geometría de valles de fondo plano de distintas dimensiones mediante la aplicación de diferentes técnicas geofísicas.

Otros objetivos son:

- Aprender a usar varios programas para caracterizar y representar gráficamente los datos obtenidos en el campo.
- Analizar cómo se comporta el campo magnético (disposición de anomalías magnéticas y susceptibilidades) en función de los materiales que forman el relleno de las vales.
- Averiguar cuál es la morfología del basamento de estas vales.
- Conocer que tipos de minerales magnéticos hay presentes en las vales y cuál es el origen de su presencia y el proceso que los aporta.

4. CONTEXTO GEOGRÁFICO

4.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se sitúa en las inmediaciones del barrio rural de Torrecilla de Valmadrid, a unos 16 km al sureste de la ciudad de Zaragoza (Aragón, España), en el sector central de la Depresión del Ebro (incluida en la hoja M.T.N 1:50.000 número 384 (Fuentes de Ebro)), (Fig. 1a).

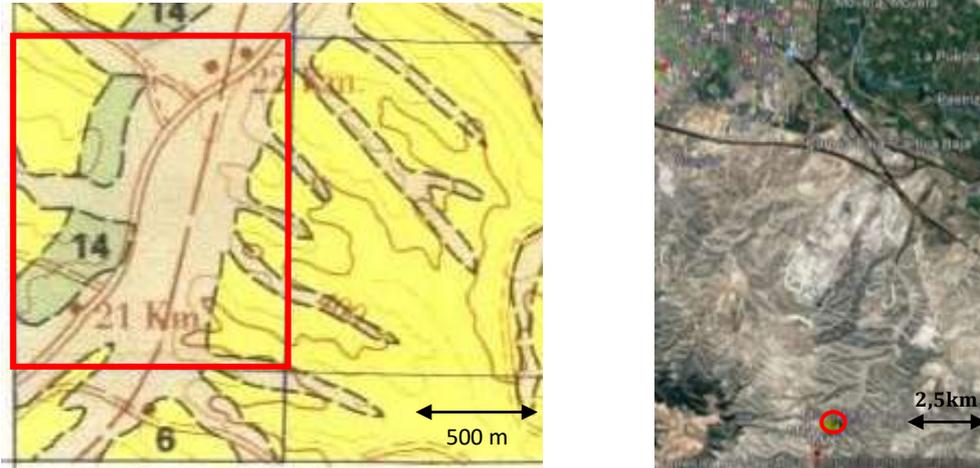


Fig. 1a- Zona de estudio y alrededores, imagen obtenida y modificada de Marqués *et al.* (1990).

Fig. 1b- Zona de estudio situada al Sur de Zaragoza y al Norte de Torrecilla de Valmadrid aparece rodeada con un círculo rojo.

Los valles de fondo plano que han sido estudiados se encuentran a 950 m al noreste de Torrecilla de Valmadrid (Fig. 1b). Las coordenadas UTM de los vértices que delimitan la zona de estudio (Fig. 2) que incluye los 3 campos son: **V1 (679153E/4597906N)**; **V2 (679680E/4597621N)**; **V3 (679546E/4597368N)**; **V4 (679027E/4597634N)**.



Fig. 2- Zona de estudio delimitado por el cuadro rojo. Datum ETRS89; Zona 30T.

4.2 LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA

4.2.1. CUENCA DEL EBRO

La cuenca del Ebro es, geográficamente, una depresión enmarcada por los Pirineos, la Cordillera Ibérica y las Cadenas Costero catalanas. Esta cuenca representa la última fase de evolución de la cuenca de antepaís surpirenaica. Tanto sus límites como su estructura actual se establecieron entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior, en el momento en el que los cabalgamiento frontales surpirenaicos alcanzaron su emplazamiento definitivo (Pardo *et al.*, 2004).

Los materiales que rellenan la cuenca provienen de aportes sedimentarios generados en los sistemas montañosos que la limitan, presentando una sedimentación en *on-lap*, limitada por cabalgamientos surpirenaicos y el margen ibérico.

Los materiales que afloran en esta cuenca son depósitos de ambientes marinos de comienzos del Terciario que pasan a ser continentales desde el Eoceno (Riba *et al.*, 1983). La cuenca puede ser dividida en 3 zonas claramente diferenciables. Dicha diferenciación se basa en aspectos como son la estructura, la subsidencia o los diferentes tipos de materiales disponibles en cada una de las zonas:

- Sector Oriental: En este sector hay pliegues E-W y NE-SW localizados muy cerca del surco pirenaico, ligados a su vez al nivel de despegue sobre horizontes evaporíticos (Vergés *et al.*, 1992).
- Sector Central: Este sector presenta subsidencia y desplazamiento progresivo hacia el margen de la Cordillera Ibérica. El margen pirenaico está formado por las Sierras Exteriores Pirenaicas y el anticlinal de Barbastro que limitan este sector de la cuenca, (Martínez-Peña, 1988). Los materiales de la cuenca están afectados por cabalgamientos NW-SE. La cuenca en este sector esta rellena por materiales neógenos.
- Sector Occidental: Este sector también presenta subsidencia, al igual que el sector central, pero en este caso de mayor escala, razón por la que la presencia de materiales terciarios es muy significativa. Se trata de una cuenca de antepaís simétrica de dirección E-W que fue afectada por cabalgamientos activos hasta el Mioceno Superior (Casas, 1997). El material que rellena la cuenca en este sector es también neógeno, al igual que ocurre en el sector central.

4.2.2. ESTRATIGRAFÍA

Los materiales más antiguos que afloran en la zona de estudio son materiales terciarios (aunque en zonas muy próximas hay paleorelieves mesozoicos aflorantes), pertenecientes a la Fm. Yesos de Zaragoza (Quirantes, 1978), que tiene varios cientos de metros de espesor. Esta formación está constituida por diferentes niveles de evaporitas que se alternan con otros niveles menos potentes de margas y arcillas. Los materiales que constituyen la Fm. Yesos de Zaragoza son muy susceptibles a ser erosionados, siendo los responsables de la morfología que adquieren los valles de fondo plano. La base de esta unidad está datada en el Ageniense (límite entre el Oligoceno-Mioceno o Mioceno basal). A techo de esta Formación evaporítica se depositaron las calizas miocenas de la Fm. Alcubierre (Quirantes, 1978), compuesta por calizas margo-yesíferas en la base, una alternancia de margas y calizas en la zona central y calizas masivas a techo de la formación; no afloran en la zona estudiada apareciendo 4 Km al Oeste y 300 metros más arriba.

Finalmente, por encima de estas formaciones se depositaron, de forma discordante, los materiales detríticos cuaternarios, normalmente procedentes de terrazas de los ríos más próximos.

Soriano y Calvo (1987) identificaron, en las vales de Mediana, Botorrita y Torrecilla, tres niveles de relleno equivalentes a las terrazas del río. El nivel más alto se corresponde con la terraza más antigua, mientras que el nivel más bajo se corresponde con la terraza más moderna. El nivel superior tiene una potencia media de 12m. Sobre los depósitos neógenos se diferencian dos superficies erosivas, relacionadas con dos periodos de sedimentación distintos (sedimentación de barras con acreción vertical que se va transformando lateralmente hacia techo a depósitos más marginales). Una de las superficies erosivas está relacionada con el sustrato Neógeno y la segunda afecta a los depósitos fluviales.

El nivel intermedio (el más difícil de diferenciar) tiene un espesor medio de 3m situándose de forma discordante sobre el Neógeno. Hacia techo predominan materiales limosos y rellenos de canal constituidos por gravas.

El nivel inferior es el menos potente (1 m) de los tres y se puede identificar en la gran mayoría de vales de fondo plano. Se trata de un nivel activo en el que observa estratificación horizontal, laminación de bajo ángulo, costras salinas, huellas de organismos, etc., lo que parece indicar que se trata de un nivel generado por la acción dinámica de cursos de agua efímeros (Romance Ibáñez, 2014). Está constituido principalmente por gravas, junto con niveles de arenas y limos.

4.2.3. VALLES DE FONDO PLANO

La geomorfología más característica en nuestra zona de estudio y en sus proximidades son los valles de fondo plano, denominados localmente vales. Son valles colmatados de sedimentos procedentes de la erosión de las laderas circundantes que no pudieron ser evacuados por la red fluvial (Peña *et al.*, 2004), y que presentan una geometría meandriforme, recordando a valles fluviales cuando la longitud de las vales es elevada.

La val principal de Torrecilla de Valmadrid está jerarquizada hasta en tres órdenes. La val principal de primer orden tiene una anchura de 150 a 210 m y dirección NNE-SSO. Las vales de menor tamaño, de segundo orden, presentan anchuras de 40 a 80 m y normalmente se disponen con dirección ESE-WNW. Finalmente, las vales de tercer orden tienen anchuras de 15 a 40 m. El relleno característico de las vales de fondo plano pertenece al Holoceno y consiste en limos alternados con lentejones de arenas y gravas constituidas por cantos rodados de caliza y yeso (Constante, 2009). Este relleno se ha producido principalmente por las corrientes fluviales efímeras, siendo escasos los aportes de las vertientes.

En la val de Valmadrid, se han diferenciado hasta tres niveles de acumulación encajados:

- El nivel superior es el nivel más antiguo, datado a partir de los restos arqueológicos en el periodo postromano. Se trata del nivel más potente y con mayor número de afloramientos (Soriano y Calvo (1987)). Presenta superficies erosivas que permiten diferenciar dos etapas erosivas.
- El nivel medio es de edad postmedieval. Se trata de un nivel de muy poco espesor, que está constituido por niveles de gravas alternados con niveles de arenas y limos y con materiales más finos a techo.
- El nivel inferior es de edad muy reciente y está constituido por los mismos materiales que el nivel intermedio.

La formación de las vales en los materiales yesíferos, puede relacionarse con la incisión de la red de drenaje y con los procesos de karstificación que actuaron durante el Cuaternario, que generaron un modelado de *badlands* con pendientes disecadas por barrancos (Alberto *et al.*, 1984).

4.2.3.1 Evolución de las vales

Soriano y Calvo (1987) definen la evolución de estos valles de fondo plano de la siguiente manera:

1. Inicialmente se produce la sedimentación del nivel superior generado por aportes longitudinales y pequeños aportes transversales.
2. A continuación tiene lugar una etapa erosiva que lleva consigo la génesis de nuevos barrancos encajados sobre el relleno, originando pequeños valles de paredes muy escarpadas. Esto se corresponde con la discordancia erosiva que hay en los rellenos fluviales.
3. Finalmente, las vales se ven afectados por un clima semiárido, de manera que tras largos periodos de sequía se producen lluvias de gran intensidad que incrementan notablemente la actividad erosiva. Las vales también se ven afectadas por los usos agrícolas generados por la acción humana, que aumentan el espesor del suelo y las dimensiones de dichas vales.

5. METODOLOGÍA

5.1 TRABAJO DE CAMPO

La prospección geofísica consiste en caracterizar de forma indirecta las propiedades físicas de los materiales terrestres del subsuelo. Las técnicas pueden ser activas o pasivas, y pueden estar basadas en fuentes de emisión natural como el campo magnético o el gravitatorio o en fuentes antrópicas.

En este estudio se ha empleado la magnetometría. Se trata de una técnica relacionada con las alteraciones de la intensidad del campo magnético terrestre, generadas por variaciones de susceptibilidad magnética de los materiales del subsuelo.

La elección de esta técnica como solución al problema planteado en nuestra zona de estudio, se debe a que la prospección magnética se ha llevado a cabo sobre materiales que presentan un gran contraste de comportamientos magnéticos, pudiendo situar de esta manera los contactos entre ellos y su geometría: por un lado, los materiales del substrato evaporítico (margas y yesos miocenos) son materiales diamagnéticos, mientras que los materiales cuaternarios presentan comportamientos tanto paramagnéticos como ferromagnéticos.

A escala macroscópica se pueden diferenciar tres tipos de materiales diferentes según su comportamiento magnético:

- Materiales diamagnéticos ($k < 0$): estos materiales se caracterizan por tener los orbitales completos y todos los electrones apareados. Al aplicar un campo magnético externo, las trayectorias orbitales giran hasta que el campo magnético que se crea se opone al aplicado. El campo magnético aplicado es más fuerte que el que se crea, de manera que los valores de susceptibilidad son menores que 0 independientemente de la temperatura del material. Dos de los materiales geológicos diamagnéticos más representativos, serían el cuarzo y la calcita.
- Materiales paramagnéticos ($k > 0$): se caracterizan por presentar los huecos electrónicos incompletos, de modo que el campo magnético se origina a partir del spin de los

electrones desapareados. Al aplicar un campo magnético externo, los spines desapareados giran y producen un campo en el mismo sentido y proporcional al aplicado. Algunos de los minerales paramagnéticos más representativos son la biotita, la clorita, el olivino o el anfíbol entre otros.

- **Materiales ferromagnéticos:** estos materiales se caracterizan por la presencia de electrones libres. Por este motivo los dipolos asociados con el spin de los electrones desapareados están acoplados entre átomos adyacentes magnéticamente, dando lugar a un campo molecular y a dominios magnéticos. En estos materiales, los dipolos son paralelos, originando una magnetización espontánea. Dentro de los materiales geológicos ferromagnéticos, aquellos que poseen minerales de hierro, tienen los valores de susceptibilidad más elevados. Otros materiales ferromagnéticos serían los minerales de cobalto y de níquel entre otros.

5.1.1. MEDIDAS DEL CAMPO MAGNÉTICO: METODOLOGÍA Y EQUIPO EMPLEADO

Para este proceso se empleó la metodología de Breiner (1999), basada en utilizar magnetómetros portátiles que describen e identifican los cambios espaciales en el campo magnético de la Tierra. Concretamente se utilizaron 2 aparatos, descritos a continuación:

- **Magnetómetro base:** Es un magnetómetro de protones PMG-2 de SatisGeo (Fig. 3). Se caracteriza por tener un rango de intensidad de campo entre 20.000 y 100.000 nT, una precisión de 1 nT, una resolución de 0,1 nT y un tiempo de medición máximo de 20 segundos (PMG-2, 2012). Se trata de un aparato constituido principalmente por dos botellas de hidrocarburo y varias barras de aluminio para su sostén, utilizado para medir las variaciones diarias del campo magnético, que posteriormente serán corregidas a partir de la variación diurna. Con el fin de que los datos obtenidos en la prospección sean lo más fiables posible es necesario tener en cuenta una serie de observaciones relacionadas con dicho aparato: en primer lugar debe ser colocado a una distancia máxima de 30 metros con respecto a la zona de estudio y a más de 50 metros de distancia de todo tipo de elemento antrópico (vehículos, carreteras, tendidos eléctricos, vallas, tuberías...), que puedan generar ruidos sobre el campo magnético. Además, es importante comprobar que la hora del aparato sea correcta, al igual que el intervalo de medida.
- **Magnetómetro móvil:** El magnetómetro de protones (Fig. 4) utilizado (GSM-19v 6.0 GEM system), sirve para medir las variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre. Se caracteriza por tener una resolución de 0,01 nT y una precisión de 0,2 nT (GEM systems Inc, 2000). Se trata de un aparato formado por dos sensores separados 50 cm el uno del otro, que miden el gradiente vertical y el campo



Fig. 3- Magnetómetro fijo utilizado, modelo PMG-2 de SatisGeo.



Fig. 4- Magnetómetro móvil, GEM systems modelo GSM-19 v.

magnético total. El principio físico por el que rige este magnetómetro se basa en el efecto Overhauser, por el que las ondas de alta frecuencia (VHF) llegan a un envase en cuyo interior hay un líquido abundante en núcleos de hidrógeno, a través de un cable que lo rodea. Al aplicar las ondas a la vasija se induce un campo magnético artificial que alinea en paralelo a los spines nucleares situados en el interior de los protones del líquido. A continuación, se elimina el campo creado de manera que los protones vuelven a su estado original. Es entonces cuando se registra la intensidad del campo magnético.

Para llevar a cabo este proceso de toma de datos se realizaron diferentes perfiles que atravesaban de manera transversal la val que nos disponíamos a evaluar en cada momento, con una dirección E-W en todos ellos. La separación entre perfiles trataba de ser lo más similar posible, pero en ciertas zonas no era posible ya que existían ribazos o rebordes de camino que nos impedían conseguir cierto parecido entre los perfiles. Como norma general los perfiles presentan una separación de aproximadamente 1.5 metros entre cada uno de ellos.

5.1.2. MEDIDAS DE LA SUSCEPTIBILIDAD: METODOLOGÍA Y EQUIPO EMPLEADO

Este proceso consiste en caracterizar el grado de sensibilidad (susceptibilidad) a la magnetización de los diferentes materiales que rellenan las vales, cuando se aplica un campo magnético externo.

La susceptibilidad (k) es una constante de proporcionalidad adimensional, y el aparato empleado para medirla fue el susceptómetro de mano modelo KT-20 (Fig. 5).

Para determinar la susceptibilidad magnética se tomaron medidas abarcando la mayor parte del terreno de los 3 campos de cultivo, manteniendo una distancia de unos 10 metros entre cada punto de medida. En cada punto de medida georeferenciado se tomaron tres valores distintos de susceptibilidad. La técnica utilizada en este proceso es similar a la utilizada en la medición del campo magnético, con la diferencia fundamental de que en este caso las medidas se toman de manera manual y no automáticamente.

La finalidad de este proceso es conocer la distribución de los cambios superficiales en la zona y contextualizar las muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

Por último, una vez conocidos los puntos de interés de muestreo (aquellos donde se produce una gran variación de la susceptibilidad magnética), se recogieron un total de 28 muestras del suelo que estaban tanto en superficie como ligeramente enterradas, y una muestra de escoria, anotando además sus coordenadas. Este proceso se llevó a cabo para posteriormente analizar la susceptibilidad magnética de dichos materiales en el laboratorio.



Fig. 5- Susceptómetro de mano KT-20.

5.2 TRABAJO DE GABINETE

5.2.1. TRATAMIENTO DE DATOS

En primer lugar, se descargan los datos obtenidos en campo, de los magnetómetros móvil y base en un ordenador.

Una vez descargados los datos, se utilizó el programa GEMLink 5.4 para eliminar las variaciones del campo magnético debidas a factores externos mediante la corrección diurna.

Para ello se restan los datos medidos por el magnetómetro móvil a los medidos por el magnetómetro fijo (a la misma hora) de cada una de las jornadas de campo. De esta forma se obtiene la anomalía residual que corresponde al valor de la anomalía generada por el material que forma el relleno de la val que estamos analizando. Concretamente, en nuestra zona de estudio, el magnetómetro fijo registró un valor aproximado de 45500nT.

A continuación, se pasaron los datos a una hoja de cálculo Excel, desde donde se filtraron los datos de baja calidad (valores iguales a 0, o valores de campo magnético demasiados elevados). Una vez procesados los datos, utilizamos los valores de las coordenadas geográficas obtenidos por el GPS, para representar gráficamente los valores de campo magnético y ver de esta forma si los espaciados entre los perfiles que hemos ido realizando en el campo se mantienen equidistantes, lo que significaría que al eliminar los valores, los datos tomados siguen siendo representativos. Tras obtener la tabla en Excel con los valores representativos, se crearon varios mapas con el programa Surfer, mediante el método de triangulación por interpolación lineal, considerándose el más adecuado para este tipo de datos. Con este mismo programa también se crearon los mapas de susceptibilidad magnética. Una vez creados los mapas, se colocan sobre los campos de cultivo correspondientes por medio de Google Earth, con el fin de observar la disposición exacta de las anomalías.

Por último se realizaron tres modelizaciones gravimétricas 2.5 D con el programa Gravmag (Pedley *et al*, 1994). La localización de cada uno de los 3 perfiles se determinó en función de las zonas donde existen anomalías más representativas. Por otra parte se determinaron ciertos parámetros como son la inclinación, declinación, intensidad de campo magnético (obtenidos a partir de la página web del Instituto Geográfico Nacional), y la dirección de cada uno de los 3 perfiles realizados. Además, se asignaron valores a la susceptibilidad de los cuerpos representados (a partir de la susceptibilidad obtenida en el campo) y a la extensión de los mismos en la dirección perpendicular al perfil elegido, con el fin de que la anomalía resultante sea lo más parecida posible a la anomalía real.

5.2.2. TRABAJO DE LABORATORIO

Con cada una de las 29 muestras (Fig. 6a y 6b) recogidas en diferentes puntos de la zona de estudio se siguió el mismo procedimiento:

En primer lugar se cuarteo la muestra y se relleno un recipiente de volumen conocido (7,5 cm³), para posteriormente pesarlo en la balanza y obtener así el peso seco. Conociendo el peso en seco y el volumen, calculamos la densidad. Una vez calculada la densidad de cada una de las muestras, se fueron introduciendo una a una en el susceptómetro KLY3 Kappabridge (AGICO, República Checa) obteniendo los valores de susceptibilidad másica a partir del valor de la masa, la susceptibilidad volumétrica (que utilizaremos posteriormente para realizar la modelización gravimétrica y las curvas termomagnéticas) y la susceptibilidad total de cada una de las

muestras. Este aparato trabaja a una frecuencia de 870 Hz y genera un campo magnético de baja intensidad 300 A/m.



Fig.6a- Muestras recogidas en diferentes puntos de la zona.



Fig.6b- Muestra de escoria recogida.

Por otra parte, de las 29 muestras analizadas, se seleccionaron 2, con valores de susceptibilidad que se desviaban bastante de la media. Con estas dos muestras, se realizaron curvas de variación de la susceptibilidad con la temperatura (Curvas k-T) para observar la afinidad magnética y mineralogía de los materiales de dichas muestras.

Para ello, en primer lugar se cuartearon las muestras y se molieron en el mortero de ágata para conseguir la fracción más fina posible. A continuación se retiró la materia orgánica presente en la fracción y se pesó en una balanza seleccionando 0.3 gramos de muestra, para después introducir la muestra en el tubo de ensayo que contenía la varilla complementaria termosensora CS-L del sistema modular KLY3 Kappabridge.

Tras esto, se ejecutó el programa informático SUSET7, que se encargó de medir la susceptibilidad de la muestra introducida en el sistema modular mencionado anteriormente.

Dicha muestra fue sometida a un incremento progresivo de la temperatura desde los 25°C hasta los 700 °C, conforme iba tomando medidas de la susceptibilidad magnética. Finalmente, el equipo retornó a la temperatura inicial mientras seguía tomando medidas a intervalos regulares. La variación de la susceptibilidad magnética con la temperatura nos da información de cómo varía el comportamiento magnético de los minerales de la muestra conforme avanza el proceso, ya que estos se van transformando o desapareciendo. Por tanto, la desaparición de un determinado mineral, se refleja en la curva como un descenso de la susceptibilidad magnética, mientras que la aparición en nuevas fases minerales se identifica en la curva con variaciones de la susceptibilidad.

Una vez obtenidos los datos, fueron introducidos en el programa Cureval 8 para llevar a cabo la representación gráfica de las curvas k-T, y su procesado (suavizado de las curvas, identificación de las temperaturas en las que se producen cambios de las fases minerales).

Una vez representadas las curvas termomagnéticas, analizamos las variaciones de la pendiente en las mismas. Si determinamos la temperatura de Curie (temperatura por encima de la cual, un cuerpo ferromagnético pierde su magnetización remanente y se comporta como un material paramagnético), para cada una de las fases minerales presentes, podemos averiguar que minerales las componen, comparando la tabla de temperaturas esperables para cada mineral con la temperatura a la que se produce la variación en las curvas.

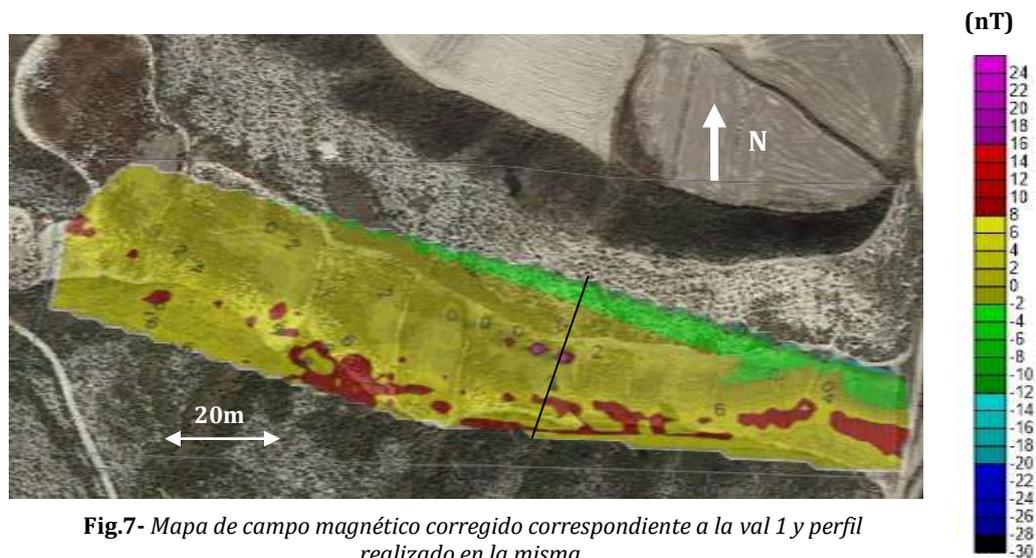
6. RESULTADOS

6.1 PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

A partir de los datos tomados en la prospección magnética, se realizaron distintos mapas en los que se representaron la intensidad del campo magnético y el gradiente magnético.

En primer lugar, se realizaron mapas generales del campo magnético total sin corregir (Anexo 1) de cada una de las vales, donde el intervalo de valores de campo magnético va de 45490 a 45560 nT. Para trabajar con los valores de manera correcta, es necesario aplicar la corrección diurna, obteniendo así los mapas de intensidad de campo magnético corregido para cada una de las vales, con valores mucho más reducidos que nos permiten apreciar con más claridad las variaciones de intensidad y por tanto las anomalías presentes.

Observando el mapa de campo magnético corregido para la val n°1 (Fig. 7), podemos diferenciar dos sectores. En la zona Norte predominan los valores más bajos, siendo incluso negativos, mientras que en la zona Central y sobre todo en la zona Sur aparecen valores de intensidad mayores. Se pueden apreciar varias anomalías por todo el mapa, destacando aquellas que se sitúan en la zona Norte con valores de hasta -28 nT, con longitudes de onda de entre 2 y 4 metros y con amplitudes de 5 nT, y por otra parte aquellas que presentan valores de entre 8 y 24 nT que aparecen puntualmente a lo largo de la zona Central y la zona Sur y que parecen seguir una trayectoria determinada, con longitudes de onda de hasta 12 metros y amplitudes que alcanzan los 30 nT.



Observando el mapa de campo magnético corregido para la val n°2 (Fig. 8), podemos diferenciar varias zonas en función de la intensidad del campo magnético. Por un lado observamos como en la zona NW, los valores de la intensidad son muy bajos e incluso negativos. Por otra parte, se aprecia cómo las zonas SW y NE presentan los valores más altos. Por último, la zona central presenta mayoritariamente valores intermedios.

Se pueden observar anomalías distribuidas por todo el mapa, de las que podemos destacar, por un lado las del sector N con valores de intensidad de campo entre -3 y 12 nT, con longitudes de onda de hasta 6 metros y amplitudes que alcanzan los 2 nT, y por otra parte las que se aprecian en el sector SW con valores en torno a 11 nT, ocasionadas probablemente por el tendido eléctrico, con longitudes de onda de hasta 5 metros y amplitudes que alcanzan los 8 nT.

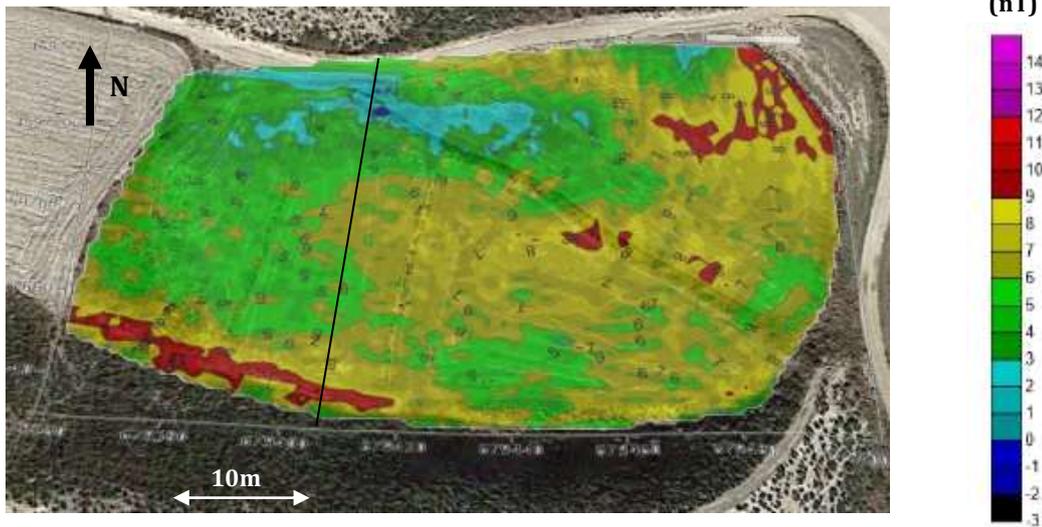


Fig.8- Mapa de campo magnético corregido correspondiente a la val 2 y perfil realizado en la misma.

Observando el mapa de campo magnético corregido para la val n°3 (Fig. 9), podemos decir que los valores de intensidad de campo magnético son bastante homogéneos, entre 0 nT y 5 nT mayoritariamente. Se pueden observar varias anomalías situadas sobre todo en la zona central del mapa y en el sector SE- E. En la zona central se aprecian dos anomalías: aquella con un valor de intensidad de 25 nT, con una longitud de onda de 5 metros aproximadamente y una amplitud de unos 40 nT y aquella con valores de intensidad negativos (entorno a -5 nT), cuya longitud de onda es mayor (unos 8 metros), pero con una amplitud muy similar. Además podemos apreciar una serie de anomalías lineales que limitan el campo al NE, con valores de intensidad de campo de hasta 21 nT y que se pueden ser debidas a la poca batería que tenía el magnetómetro móvil a la hora de tomar dichas medidas. Por otra parte, en el sector SE se observa la presencia de tres anomalías con valores muy negativos que oscilan entre los -10 y los -35 nT, con longitudes de onda cercanas a los 5 metros y amplitudes de hasta 35 nT. Finalmente en el extremo SE del campo de cultivo se aprecian anomalías con valores de intensidad elevados, con longitudes de onda y amplitudes mínimas.

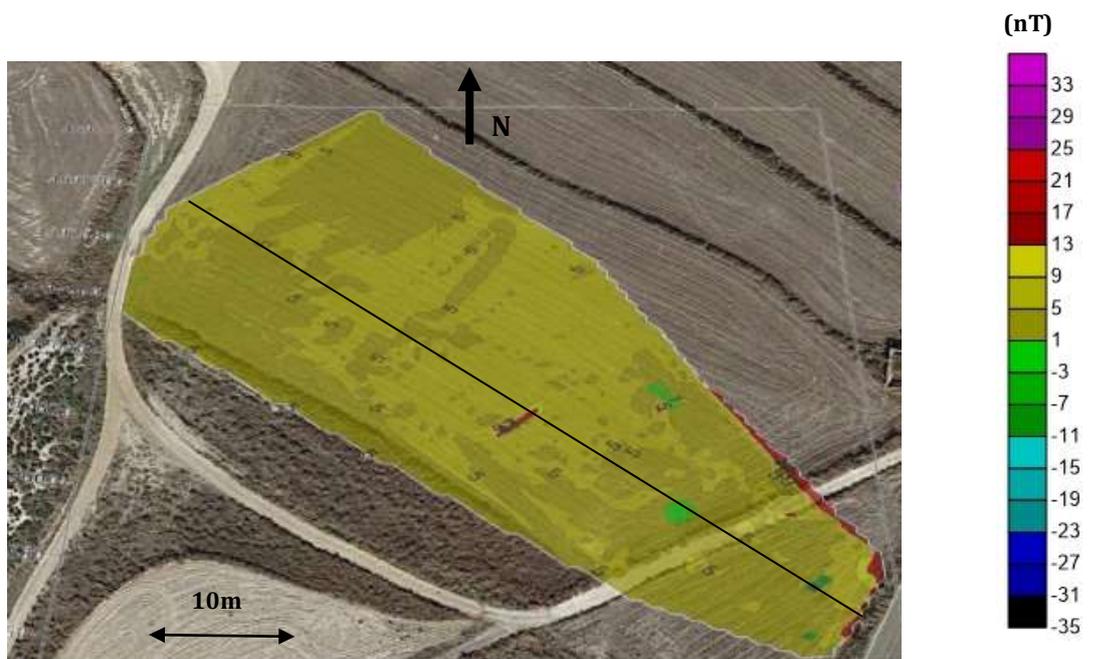
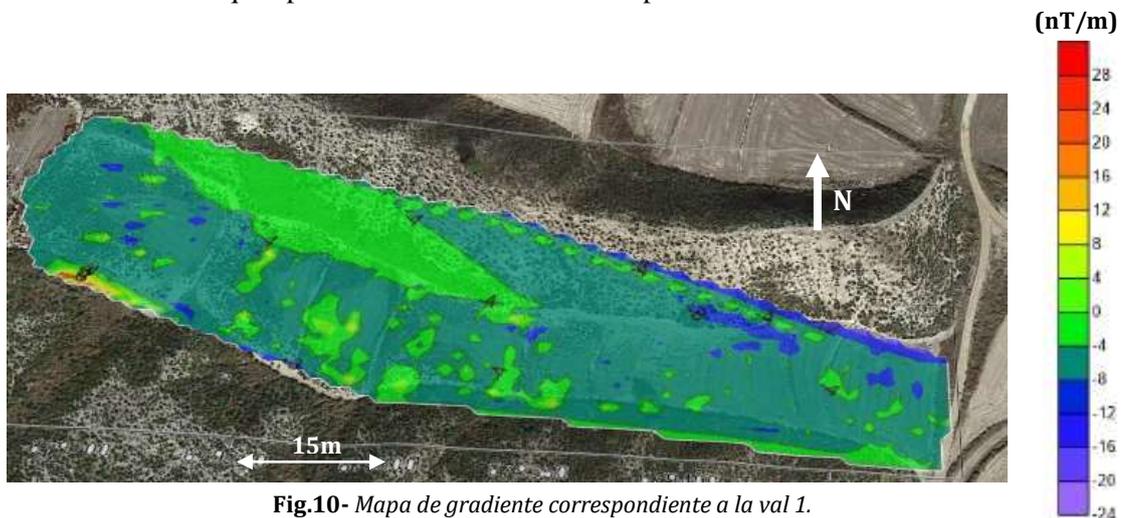


Fig.9- Mapa de campo magnético corregido correspondiente a la val 3 y perfil realizado en la misma.

Por otro lado realizamos el mismo proceso con los valores de gradiente obteniendo un resultado, similar al obtenido a partir de la intensidad del campo. Representando los valores de gradiente, observamos que el intervalo de valores de gradiente va de -24 nT/m a 40 nT/m.

Realizamos un mapa de los valores de gradiente detallado para cada una de las vales, donde se observan con mayor claridad las diferentes anomalías presentes en la zona de estudio.

Al observar el mapa del gradiente para la val n°1 (Fig. 10), se intuye una cierta relación entre los valores de gradiente y los del campo magnético en la zona. La zona Central y la zona Norte se caracterizan por la presencia de valores de gradiente más bajos, siendo incluso negativos a excepción de un sector bastante amplio al NW del mapa donde aparecen valores de hasta 8 nT/m. Por otra parte, en el sector Sur aparecen en ciertos puntos valores de gradiente más altos llegando incluso a alcanzar valores de 24 nT/m. Con respecto a las anomalías presentes, se puede decir que son muy similares a las representadas en el mapa de intensidad de campo magnético. Por un lado se observa una serie de anomalías distribuidas a lo largo del sector central del mapa que presentan valores de intensidad de hasta 12 nT/m y por otra parte, también son características las anomalías negativas situadas en el sector Norte y la anomalía positiva con valores de hasta 24 nT/m que aparece en el sector SW del mapa.



Observando el mapa del gradiente para la val n°2 (Fig. 11), se aprecia una cierta correlación con el mapa de valores de intensidad de campo magnético. Se observa como en la mayoría del mapa, predominan valores de gradiente bajos en torno a 0 nT/m, a excepción de determinadas zonas como por un lado, el extremo Sur y ciertos sectores del Norte del mapa, donde aparecen valores muy negativos y por otro lado el sector SE, donde predominan valores de gradiente positivos de hasta 3 nT/m. Con respecto a las anomalías presentes en el mapa del gradiente en esta zona, podemos destacar aquellas anomalías con valores negativos localizadas al Sur del mapa y probablemente generadas por la proximidad del tendido eléctrico. Importantes también las anomalías presentes en el sector SE y las anomalías negativas localizadas en la zona Norte del mapa, todas ellas generadas probablemente por la existencia de caminos construidos por el hombre y que rodean este campo.

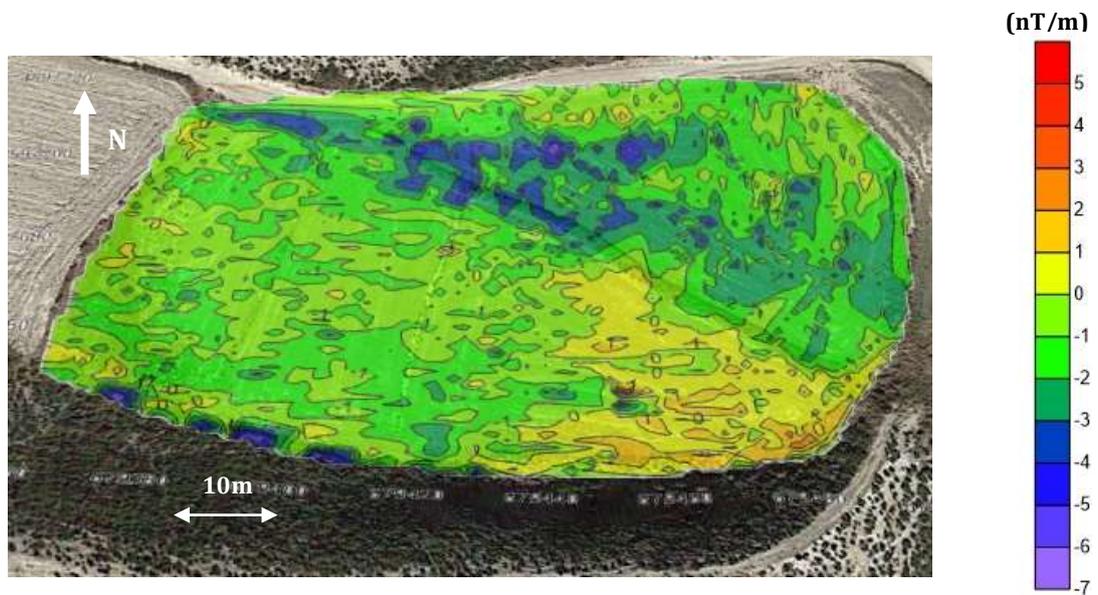


Fig.11- Mapa de gradiente correspondiente a la val 2.

Finalmente con respecto al mapa del gradiente para la val n°3 (Fig.12), podemos decir que existe una gran correlación con los valores de intensidad del campo magnético. Se observa como hay un gran predominio por todo el mapa, de valores de gradiente negativos. Con respecto a las anomalías, importante destacar aquellas con valores muy negativos situadas en el sector SE de la parte central del mapa. También resaltar aquellas con valores positivos de hasta 28 nT/m en la parte central del mapa y la que aparece en el sector SE junto al camino con valores de intensidad de hasta 19 nT/m. Por último, y no por ello menos importante, cabe destacar la anomalía positiva de 12 nT/m localizada en el límite SE del mapa y causada probablemente por el paso de la carretera junto a este campo de cultivo.

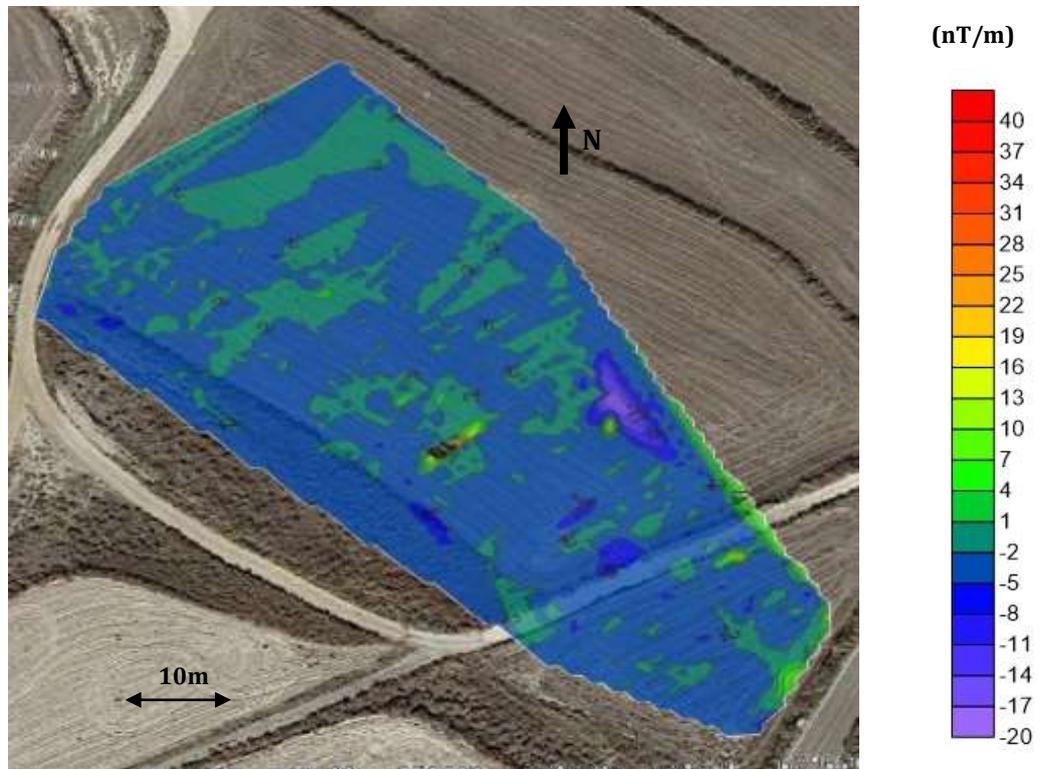


Fig.12- Mapa de gradiente correspondiente a la val 3.

6.2 SUSCEPTIBILIDAD

Para representar los mapas de susceptibilidad realizamos el mismo proceso que hemos seguido con el campo magnético y el gradiente, pero esta vez a partir de los datos de susceptibilidad que hemos ido tomando a lo largo y ancho de las zonas de estudio. Así pues se obtiene una malla de datos, que nos permite representar varios mapas a partir de los datos de susceptibilidad, para así interpretar las diferentes anomalías presentes en las vales estudiadas, pero esta vez en función de la susceptibilidad. En total se tomaron un total de 461 medidas, con valores que oscilan entre $0,0112 \cdot 10^{-3}$ y $0,6818 \cdot 10^{-3}$ SI. En el extremo Sur del mapa de susceptibilidad de la val nº3 (Fig. 16), llama la atención un sector que presenta los valores más altos ($0,6818$ SI).

En primer lugar, observando el mapa de susceptibilidad para la val nº1 (Fig. 13), con un intervalo de valores entre $0,015 \cdot 10^{-3}$ y $0,11 \cdot 10^{-3}$ SI, se aprecia como los valores más altos se sitúan en la zona central siguiendo un patrón similar al que siguen los valores más altos de campo y gradiente en este campo de cultivo. Por otro lado, los valores más bajos se localizan en el Norte y en el sector NW del mapa, al igual que los valores más reducidos de campo y gradiente en esta zona.

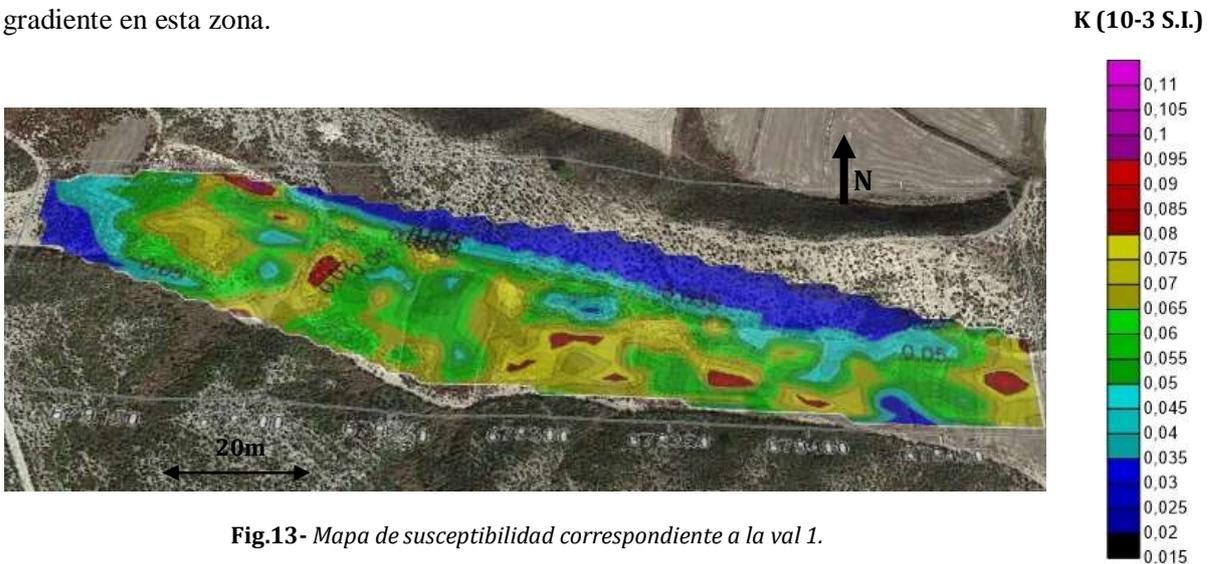


Fig.13- Mapa de susceptibilidad correspondiente a la val 1.

Los valores de susceptibilidad en el mapa para la val nº2 (Fig. 14), oscilan entre $0,01 \cdot 10^{-3}$ y $0,14 \cdot 10^{-3}$ SI. Por un lado, los valores más bajos de susceptibilidad predominan en el sector Norte del mapa, mientras que los valores más altos aparecen en la zona Sur del mismo con valores máximos de $0,14 \cdot 10^{-3}$ SI.

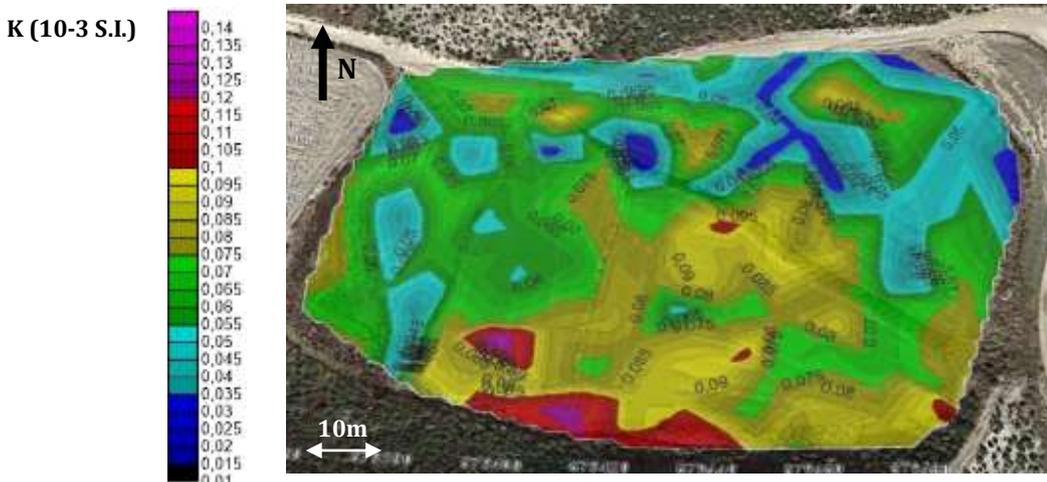


Fig.14- Mapa de susceptibilidad correspondiente a la val 2.

Finalmente observando el mapa de susceptibilidad para la val nº3 (Fig. 15), con valores que van desde 0 hasta $0,63 \cdot 10^{-3}$ SI, podemos decir que los valores de susceptibilidad son bastante homogéneos a lo largo y ancho de todo el campo de cultivo predominando valores de susceptibilidad bajos. Cabe destacar, que a pesar de esta homogeneidad, en este campo aparece el valor de susceptibilidad más elevado ($0,63 \cdot 10^{-3}$ SI) de los tres campos estudiados, concretamente en el extremo SE del mapa. También aparecen valores elevados de entorno a $0,23 \cdot 10^{-3}$ SI en el extremo NW, concretamente en un punto correspondiente al camino que limita dicho campo.

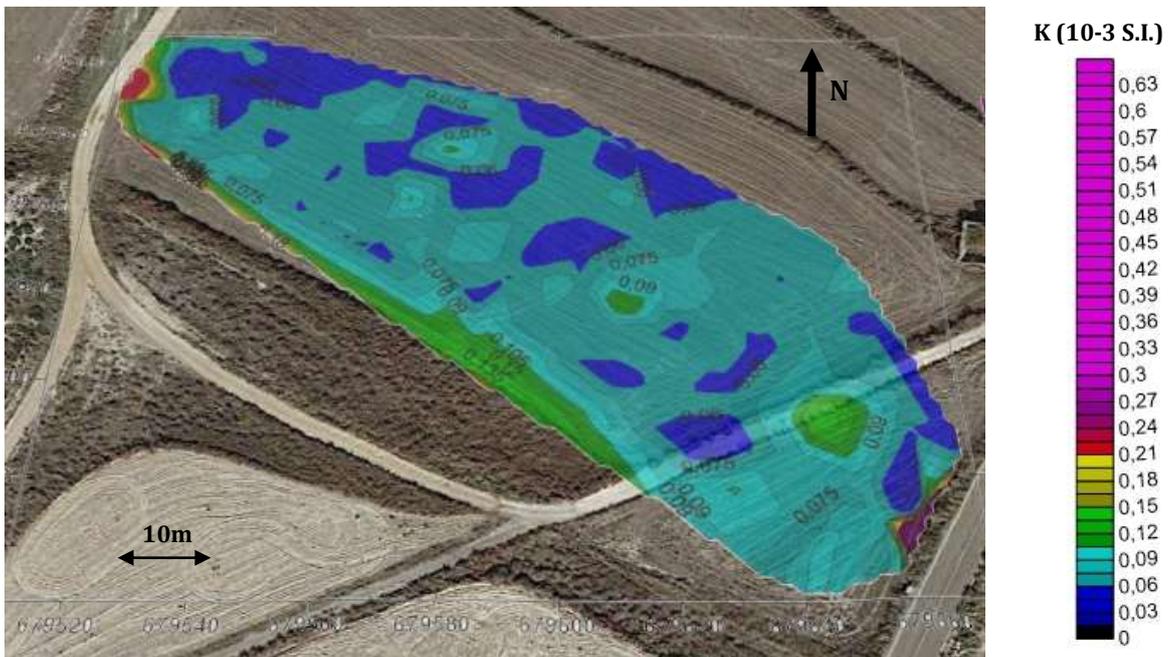


Fig.15- Mapa de susceptibilidad correspondiente a la val 3.

Fig.16- Valores de susceptibilidad de las muestras obtenidas en el laboratorio.

En el Anexo 2 se muestran los puntos de la zona de estudio donde se tomaron las 28 muestras de suelo y la muestra de escoria analizadas. En la tabla resumen de la Figura 16, se presentan los valores obtenidos de dichos análisis, que se realizaron en el laboratorio. Por último en el Anexo 3 se muestran el resto de valores obtenidos de dichos análisis.

Se pueden diferenciar 4 grupos de valores que presentan rangos de valores bastante distintos en relación con la localización de las muestras:

- Intervalo de $69,66 \cdot 10^{-6}$ SI a $191,41 \cdot 10^{-6}$ (Fig. 16, color amarillo): la mayoría de las muestras recogidas en los 3 campos de cultivo (M1 a M10, M12 a M14 y M17 a M25) presentan valores en este intervalo. Estas muestras están constituidas por limos y areniscas fundamentalmente.
- Intervalo de $-3,13 \cdot 10^{-6}$ a $26,89 \cdot 10^{-6}$ SI (Fig. 16, color azul): las muestras M11, M15 Y M16, situadas en las zonas de ladera del campo de cultivo nº1, presentan los valores de susceptibilidad más bajos. Estas muestras están compuestas fundamentalmente por yesos, arcillas y margas.
- Intervalo de $215,92 \cdot 10^{-6}$ a $380,09 \cdot 10^{-6}$ (Fig. 16, color verde): las muestras M26, M27 y M28, se localizan todas ellas en el campo de cultivo nº3, concretamente en las inmediaciones de dos caminos y de la carretera.

MUESTRA	Bulk s. (10-6)
M1	120.01
M2	147.08
M3	110.43
M4	100.73
M5	96.92
M6	106.82
M7	106.91
M8	185.80
M9	69.66
M10	165.95
M11	-3.13
M12	124.35
M13	128.81
M14	123.58
M15	26.89
M16	6.47
M17	163.51
M18	191.41
M19	166.32
M20	137.64
M21	138.39
M22	149.24
M23	155.92
M24	182.23
M25	182.65
M26	380.09
M27	273.61
M28	215.92
E1	20944.28

- Valor de $20944,28 \cdot 10^{-6}$ SI (Fig. 16, color granate): la muestra E1, corresponde con la muestra de escoria recogida en el campo de cultivo n°3 en las inmediaciones de la carretera.

6.3 MODELIZACIÓN MAGNÉTICA 2.5D

Se han realizado 3 perfiles con el programa Gravmag, para determinar la geometría de los materiales que conforman el relleno de las vales. Con el fin de modelizar anomalías similares a las obtenidas en el campo, se ha ido modificando la susceptibilidad (teniendo en cuenta los valores del apartado anterior), la geometría de los cuerpos y la profundidad de los mismos que generan dichas anomalías, intentando a su vez dar siempre con el modelo más realista posible. A la hora de realizar los perfiles debemos fijar una serie de parámetros comunes a todos los perfiles. Estos parámetros son: la declinación con un valor de $0,35^\circ$; la inclinación de 57° ; un half strike de 500 m (longitud que presentan los cuerpos perpendicularmente al perfil); un campo magnético de 38,2 A/m y una orientación determinada para cada perfil. El primer y el segundo perfil tienen aproximadamente la misma orientación, mientras que la orientación del tercer perfil es diferente. Se ha decidido realizar estos perfiles (Incluidos en Fig. 7; Fig. 8 y Fig. 9) porque son los que contienen las zonas más interesantes a analizar de cada uno de los 3 campos de cultivo, atravesando anomalías importantes que debemos estudiar.

El primer perfil realizado (Fig. 17) tiene una longitud de 90 m y una amplitud máxima de 50 nT, presenta una anomalía en la parte central del mismo, con una longitud de onda de 10 metros y una amplitud de 40 nT y está asociada con un sector próximo al talud Norte de dicho campo de cultivo. Esta anomalía es generada por la presencia de materiales ferromagnéticos. Para llevar a cabo una correcta modelización magnética, en primer lugar se representa el relleno de la val mediante la construcción de tres polígonos de aproximadamente unos 15 metros de potencia cada uno, a lo largo de todo el perfil, con valores de susceptibilidad de $500 \cdot 10^{-6}$ SI para cada uno de ellos y que se relaciona con materiales diamagnéticos como son los yesos que rellenan el fondo. Para modelizar la anomalía se representa un polígono con un valor de susceptibilidad de $15 \cdot 10^{-3}$ SI.

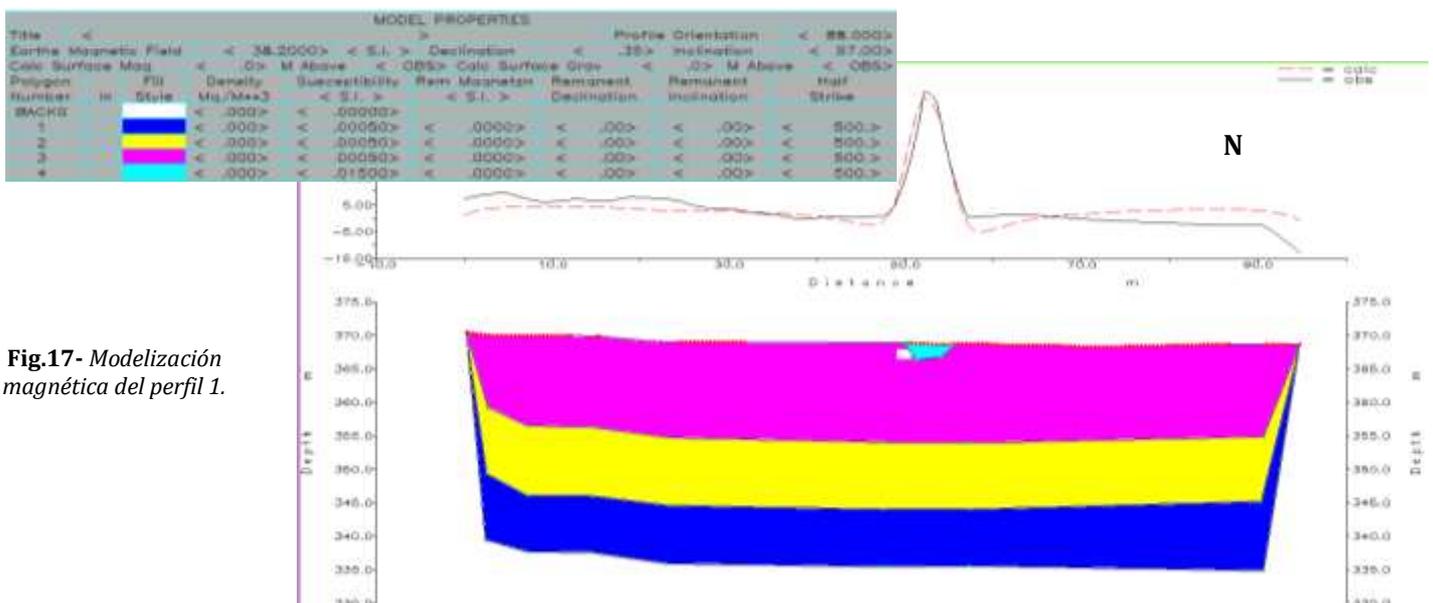


Fig.17- Modelización magnética del perfil 1.

El segundo perfil (Fig. 18) con una longitud de 85 m y una amplitud máxima de 12 nT presenta una anomalía positiva en el extremo izquierdo del mismo con una longitud de onda de 5 metros y una amplitud de 8 nT estando asociada con la zona de talud situada en la parte Sureste del campo de cultivo. Esta anomalía es generada por la presencia de materiales ferromagnéticos en este sector, aunque en este caso la proporción de materiales ferromagnéticos es mucho menor que en el resto de los casos, puesto que la amplitud de la anomalía presente es la más reducida de los 3 campos. Con el fin de hacer una correcta modelización magnética, en primer lugar se representa el relleno de la val mediante la elaboración de tres polígonos de aproximadamente 10 metros de potencia cada uno, a lo largo de todo el perfil, con valores de susceptibilidad de $560 \cdot 10^{-6}$ SI para cada uno de ellos y que se relacionan con materiales diamagnéticos como son los yesos que rellenan el fondo. Para modelizar la anomalía, se representa un polígono con un valor de susceptibilidad de $2 \cdot 10^{-3}$ SI.

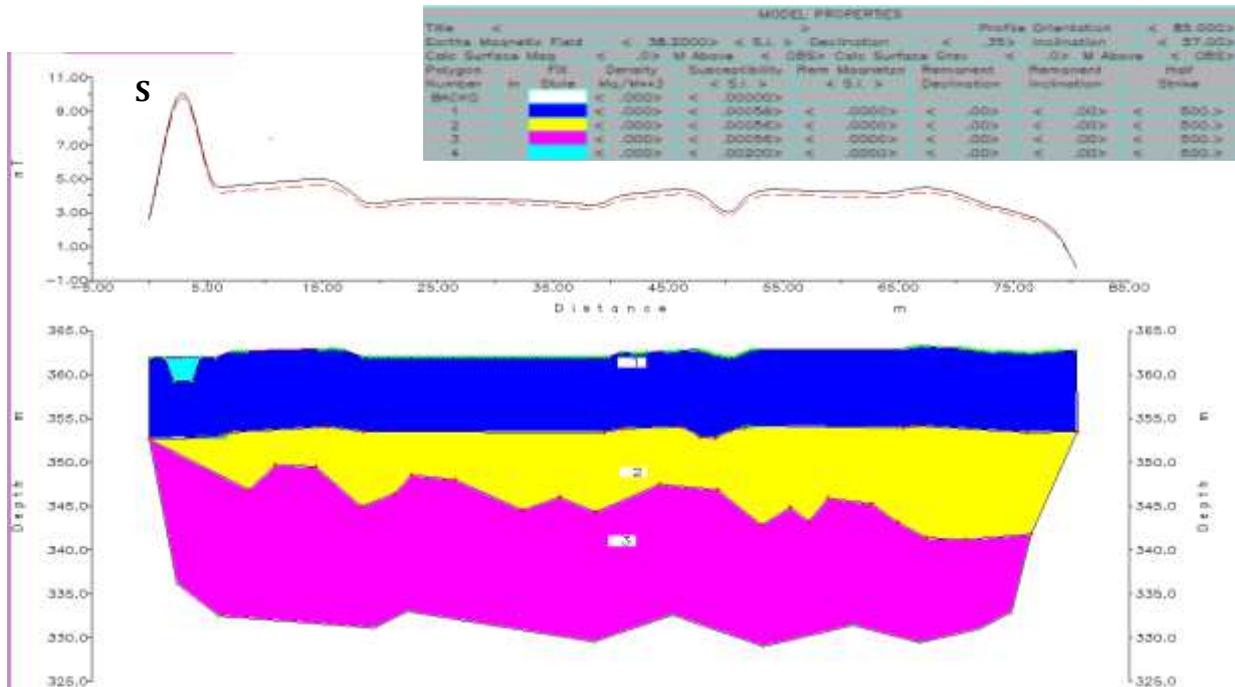


Fig.18- Modelización magnética del perfil 2.

Por último, en el tercer perfil (Fig. 19) con una longitud de 180 m y una amplitud máxima de 45 nT se observa la presencia de dos anomalías claramente diferenciadas: una positiva en la parte central con una longitud de onda de 10 metros y una amplitud de 40 nT y otra negativa en el extremo derecho con una longitud de onda de 10 metros y una amplitud de 30 nT. Se dibuja nuevamente un polígono, que abarca toda la longitud del perfil en profundidad, con un valor de susceptibilidad de $500 \cdot 10^{-6}$ SI y que representa el relleno de este campo de cultivo. Para modelizar la anomalía central positiva, se representa un polígono con un valor de susceptibilidad de $6.5 \cdot 10^{-3}$ SI, cuyo origen es la acumulación de materiales ferromagnéticos en este sector, aunque en menor medida que en el primer perfil, puesto que esta anomalía presenta una amplitud menor.

Por otra parte, la anomalía del extremo derecho está directamente relacionada con una zona muy próxima a un camino. Para modelizar dicha anomalía, se representa un polígono con un valor de susceptibilidad de $-6.5 \cdot 10^{-3}$ SI es decir, un valor negativo que indica que la anomalía ha sido generada por la presencia de materiales diamagnéticos en este sector.

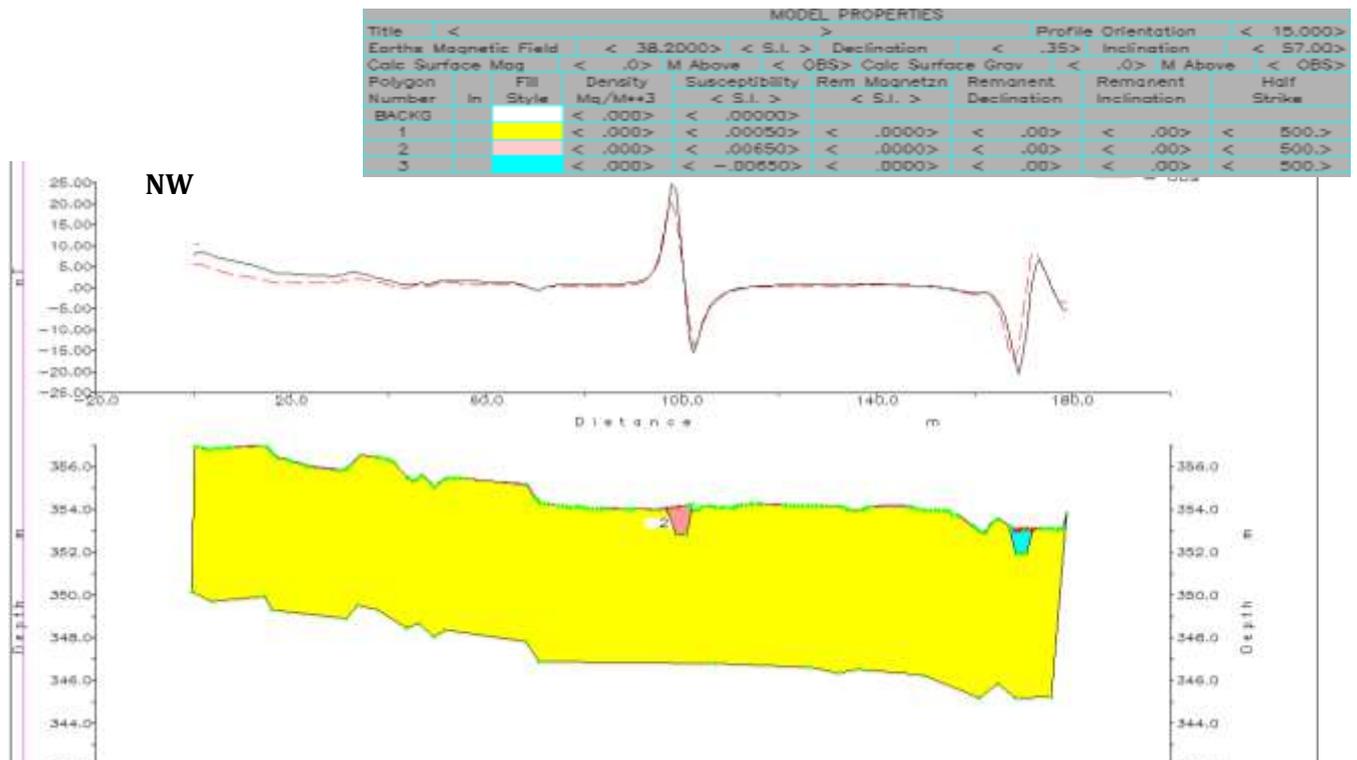


Fig.19- Modelización magnética del perfil 3.

6.4. CURVAS TERMOMAGNÉTICAS

El análisis de las variaciones de la susceptibilidad magnética con la temperatura permite identificar el comportamiento de los materiales en función del valor de la susceptibilidad media. En total, se representaron las curvas termomagnéticas de 2 de las 29 muestras (M11 y E1).

Por un lado, la curva para M11 (Fig. 20) presenta un rango de susceptibilidad que va desde los $10 \cdot 10^{-6}$ hasta $175 \cdot 10^{-6}$ SI. Se puede apreciar cómo hay un brusco y puntual descenso de la susceptibilidad en torno a los 180°C . A continuación la curva se mantiene constante hasta los 300°C , momento en el que la susceptibilidad desciende bruscamente hasta los 585°C . Entre 600 y 650°C se identifica una serie de pequeñas variaciones y a partir de 650°C la susceptibilidad se mantiene constante hasta los 700°C .

Si calculamos la contribución magnética en la muestra, a partir de la modelización de la curva paramagnética de susceptibilidad (Fig. 20) se obtiene que para esta muestra analizada, la contribución de minerales paramagnéticos es de entorno al 25%, lo que indica que la muestra posee un fuerte comportamiento ferromagnético (en torno al 25%).

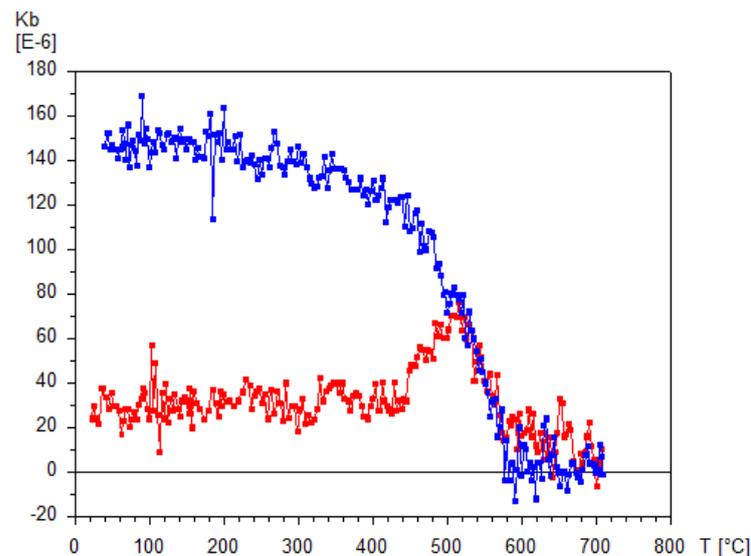


Fig.20- Curva termomagnética (en azul) y contribución paramagnética (en rojo) de la muestra M11.

Por otra parte, la curva para E1 (Fig. 21) presenta un rango de susceptibilidades mayor, que va desde los 0 hasta los $450 \cdot 10^{-6}$ SI. Se observa cómo la susceptibilidad desciende muy ligeramente en torno a los 180°C . Tras esto la curva se mantiene prácticamente constante hasta los 450°C , momento en el que la susceptibilidad disminuye bruscamente hasta los 600°C . Finalmente la curva se mantiene constante hasta los 700°C .

Si calculamos la contribución paramagnética en la muestra, a partir de la modelización de la curva paramagnética (Fig. 21) se obtiene que para esta muestra analizada, la contribución de minerales paramagnéticos es de entorno al 40% (algo mayor que en el caso de M11), lo que indica que la muestra posee un comportamiento ferromagnético predominante (60%).

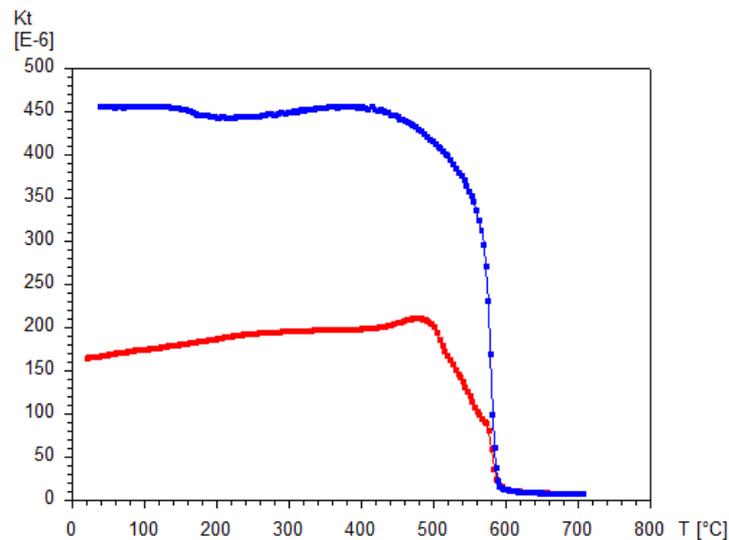


Fig.21- Curva termomagnética (en azul) y contribución paramagnética (en rojo) de la muestra E1.

7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos mediante el empleo de las diversas técnicas descritas, podemos valorar si los resultados son coherentes, determinar su grado de error y contrastarlos con los datos obtenidos en otros trabajos de índole similar.

La realización de los mapas de intensidad de campo y de gradiente magnético ha permitido apreciar las diferencias que existen entre ambos. Se observa cómo la magnitud de las anomalías del gradiente es distinta a la de la intensidad de campo y cómo el gradiente varía más que el campo magnético. El mapa de gradiente muestra las anomalías producidas por los cuerpos más cercanos, siéndonos de mayor utilidad que el mapa de intensidad de campo magnético en determinadas ocasiones, ya que nos permite ver pequeñas anomalías muy difíciles de distinguir en los mapas de intensidad.

Con respecto a las anomalías magnéticas de los mapas de campo corregido para cada una de las vales, aquellas que superan los 15 nT o son inferiores a 0 nT están originadas por elementos antrópicos como señales, postes de electricidad y tendido eléctrico, carreteras, caminos, vallas y otros elementos bajo el suelo. Este hecho es especialmente notorio en la val 1 (Fig. 7) concretamente en el sector Norte donde las anomalías son negativas y cuyos valores oscilan entre los 0 y los -27 nT muy próximos a estructuras eléctricas; y en la val 3 (Fig. 9), en el extremo este de la misma donde se localizan valores extraordinarios de entre -35 a 33 nT, cercanos a la carretera y a una serie de estructuras de una antigua línea ferroviaria sin aparente presencia de materiales metálicos en superficie y con balasto de caliza, que atravesaba dicho tramo. La mayor parte de los valores de campo magnético en las 3 vales oscilan entre los 0 y los 12nT.

Respecto a las anomalías de origen natural encontradas en las vales, en la val 1 tienden a aumentar su valor en la zona central a lo largo de toda su longitud, mientras que en la val 2 las anomalías con valores más grandes se distribuyen a lo largo de todo el campo destacando 3

zonas: el sector Sur, que coincide con la zona de talud donde hay un mayor desarrollo vegetativo; una zona del sector central donde se produce un salto topográfico notable y también hay un gran desarrollo de vegetación; y finalmente el extremo NE.

Respecto a la val 3, la homogeneidad de los valores de las anomalías de origen natural, puede ser debida a que dicho valle no se encuentra escalonado ni presenta taludes próximos.

En cuanto a la susceptibilidad destacan los valores altos del mapa de la val 3, de aproximadamente $0,6 \cdot 10^{-3}$ SI, que corresponden con los restos de escoria y una serie de materiales antrópicos probablemente pertenecientes a la antigua línea ferroviaria o arrojados durante la construcción de la carretera que limita este campo. A diferencia de estos restos del extremo Este del mapa de la val3, los materiales que forman las laderas Norte y Sur de la val 1, los materiales situados próximos al camino que limita la val 2 al Norte y algunos de los materiales que forman el suelo del tercer campo de cultivo son diamagnéticos (yesos principalmente) al presentar valores muy bajos de susceptibilidad, entre 0 y $0,05 \cdot 10^{-3}$ SI. Por otra parte, la mayoría de los materiales que forman el suelo de la val 1 y la val 2 junto con los que conforman la ladera Sur que limita la segunda y una serie de materiales del camino que limita la val 3 al Oeste tienen una susceptibilidad algo mayor, entre 0,05 y $0,25 \cdot 10^{-3}$ SI, con presencia puntual de materiales ferromagnéticos. Además, en algunos puntos específicos la susceptibilidad aumenta debido a elementos antrópicos concretos como puede ser la presencia de una torre de electricidad y tendido eléctrico en el primer y el segundo campo de cultivo.

En los análisis de susceptibilidad realizados en laboratorio se han obtenido valores acordes con la distribución de susceptibilidades que muestra el mapa. De manera similar, los valores de susceptibilidad más bajos (entre $-3,13 \cdot 10^{-6}$ y $26,89 \cdot 10^{-6}$ SI) de las muestras M11, M15 y M16 se localizan en las laderas formadas principalmente por yesos de la val1. Los materiales que forman los suelos de los campos de cultivo presentan susceptibilidades mayores ($69,66 \cdot 10^{-6}$ SI y $191,41 \cdot 10^{-6}$) debido a la presencia de minerales magnéticos en el relleno de las vales. Las muestras M26, M27 y M28 (localizadas en las inmediaciones de dos caminos y de la carretera comarcal) presentan valores de susceptibilidad algo mayores (entre $215,92 \cdot 10^{-6}$ y $380,09 \cdot 10^{-6}$) habiéndose podido contaminar por los óxidos de hierro generados por la actividad antrópica. Por último el fragmento de escoria (E1), próximo a la carretera comarcal y a la zona por donde pasaba la vía ferroviaria presenta el valor de susceptibilidad más elevado ($20944,28 \cdot 10^{-6}$ SI), ya que son restos del balasto de la antigua línea ferroviaria Utrillas-Zaragoza.

En definitiva, el mapa y los análisis de laboratorio de susceptibilidad permiten conocer dicha propiedad en los materiales superficiales, independientemente de la que presenten los materiales infrayacentes.

Por otra parte, los 3 perfiles de modelización gravimétrica 2.5D realizados con el programa GravMag presentan un relleno diamagnético inferido a partir del conocimiento geológico y el modelo realizado. Además, todos ellos presentan una morfología en forma de "V". Por último se pueden extraer una serie de conclusiones de cada uno de los perfiles:

El perfil 1 presenta una anomalía situada en la parte central, que se asocia con la acumulación de minerales ferromagnéticos.

El segundo perfil dibuja una pequeña anomalía en el extremo izquierdo del mismo que corresponde con una zona del talud Sur de dicho campo de cultivo. Esta anomalía puede estar asociada con la presencia de una torre de electricidad en lo alto de dicho talud o puede estar asociada con la presencia de materiales ferromagnéticos al igual que la anomalía del primer perfil, aunque en este caso la acumulación de éstos es mucho menor.

El tercer perfil presenta dos anomalías caracterizadas cada una de ellas por un tipo de material diferente. La anomalía situada en la zona central del perfil, se corresponde aparentemente con materiales ferromagnéticos, mientras que la anomalía situada en el extremo derecho del perfil hace referencia a la presencia de materiales diamagnéticos en el extremo Este de este campo de cultivo.

Finalmente, si contrastamos las temperaturas de Curie y de Néel (Anexo 4) esperables para cada mineral, en la curva termomagnética de la muestra M11 hay un brusco y puntual descenso de la susceptibilidad en torno a los 180°C que indica la presencia de hidróxidos de hierro. A continuación la curva se mantiene constante hasta los 300°C (indicando presencia de sulfuros), momento en el que la susceptibilidad desciende bruscamente hasta los 585°C indicando la presencia de minerales ferromagnéticos entorno a esa T^a , como son la magnetita y la maghemita. Entre 600 y 630°C se identifica una serie de pequeñas variaciones que podrían corresponder con la hematites.

Para la muestra de escoria (E1), la susceptibilidad desciende muy ligeramente en torno a los 180°C indicando la presencia de hidróxidos de hierro. Tras esto la curva se mantiene prácticamente constante hasta los 450°C (momento en el que aparecen ferrita de cobre), momento en el que la susceptibilidad disminuye bruscamente hasta los 600°C apareciendo en este punto de la curva minerales como la magnetita. Finalmente la curva se mantiene constante hasta los 700°C.

8. CONCLUSIONS

The materials that constitute the study area, their susceptibility together with the measurements made during the magnetic prospecting, those taken in the field by the susceptometer and the analysis of the samples made in the laboratory have provided the following conclusions:

- The slopes bordering the vales present very low susceptibilities due to the presence of diamagnetic materials mainly Miocene gypsum and clays. In the case of the southern slope that limits val 2, the susceptibility of its materials is higher, probably due to the presence of an electricity tower on top of it.
- In general, the lower altitude zones (flat bottom valley fillings) present a higher susceptibility because they favor the circulation of ferromagnetic minerals and fluids. The more superficial ferromagnetic minerals could have an anthropic origin such as agriculture or construction, while the presence of those deeper ones could have a natural origin.
- The area near the local road has a very high susceptibility, either because of the remains of the railway line that passed through there or because of the dumping of anthropogenic materials in that field at the time of the construction of the highway.
- The 2.5D models of the characterized flat-bottomed valleys show a "V" shaped morphology modeled in the gypsum, presenting an erosive geometry on the Miocene gypsum materials, and a Quaternary sedimentary fill.
- The thermomagnetic curves carried out determine that the magnetic components in the valleys are magnetite and hematite. There is also evidence showing the presence of iron hydroxides, sulfides, maghemite and other minerals such as copper ferrite in smaller proportions.

Finally, for a better characterization of the valleys it would be necessary to work with other complementary techniques:

- Geophysical, to determine in greater depth the geometry of the valleys and their layers (gravimetry, seismic, georradar...).
- Geochemical, in order to know the characteristics of the materials and water in the area.
- Mineralogical, to accurately identify the composition of the materials (XRD).
- Drilling, to study the stratigraphic series by taking deep samples.

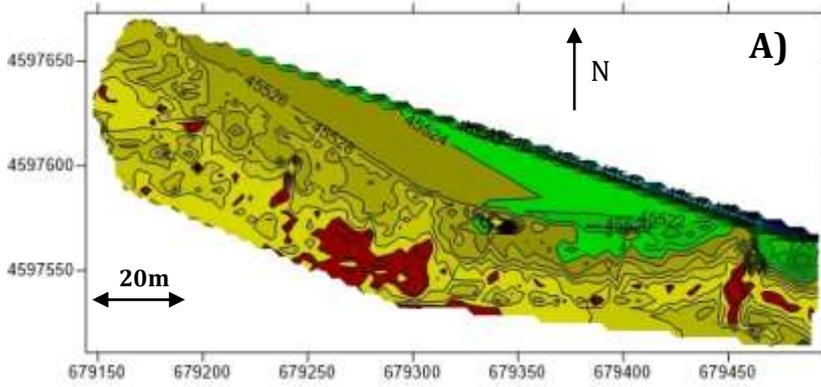
9. BIBLIOGRAFÍA

- Aladrén, D. (2020): Estudio de las anomalías magnéticas en valles de fondo plano de la Cuenca del Ebro (Zaragoza). Trabajo de fin de grado. Universidad de Zaragoza, 29p.
- Alberto, F., Gutiérrez, M., Ibáñez, M. J., Machín, J., Peña, J.L., Pocoví, A. y Rodríguez, J. (1984): El Cuaternario de la depresión del Ebro en la región aragonesa. Cartografía y síntesis de los conocimientos existentes. Universidad de Zaragoza y Estación Experimental de Aula Dei, 217 pp.
- Attar, A. (2019): Prospección geofísica aplicada al estudio de la geometría de valles de fondo plano. Trabajo fin de grado. Universidad de Zaragoza, 46p.
- Breiner, S. (1999): Applications manual for portable magnetometers. GeoMetrics, San José (California), 58 p.
- Constante, A. (2009): Estudio gearqueológico de los registros holocenos del sector central del valle del Ebro. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 371p.
- GEM systems Inc (2000): GSM-19 v6.0 Instruction Manual. Ontario (Canada), 85p.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. y Banerjee, S.K. (1995): Magnetic properties of rocks and minerals, in *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants* (T. J. Ahrens, Ed.), AGU, Washington D. C., 189–204 pp.
- Instituto Geográfico Nacional (Fecha de consulta: 25/04/2021). Disponible en <https://www.ign.es/web/ign/portal/gmt-area-geomagnetismo>
- Marqués, L.A., Santos, J.A., Esnaola, J.M. y Gil, C. (1990): Mapa geológico de España, E 1: 50.000, Fuentes de Ebro (384). Servicio de publicaciones – Ministerio de Industria y Energía, Madrid, 42 p., 2 mapas
- Martínez-Peña, M.B y Pocoví, A., 1988. El amortiguamiento frontal de la estructura de la cobertera surpirenaica y su relación con el anticlinal de Barbastro-Balaguer. *Acta Geol. Hisp.* 23, 81-94.
- Mochales, T. (2006): Prospección magnética aplicada a la detección y caracterización de dolinas en el entorno de Zaragoza. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 222 p.
- Montserrat, P. (2020): Prospección magnética aplicada al estudio de valles de fondo plano en los alrededores de Zaragoza. Trabajo de fin de grado. Universidad de Zaragoza, 41p.
- Muñoz-Jimenez, A., Casas-Sainz, A.M., 1997, The Rioja trough (N Spain): Tectosedimentary evolution of a symmetric foreland basin: *Basin Research*, v.9 no, p65-89.
- Pardo, G., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Muñoz, A., Pérez, A., Pérez-Rivarés, F.J., VázquezUrbez, M. y Villena, J. (2004): La Cuenca del Ebro. *Geología de España*, IGME.
- Pedley, R.C., Phillips, M.W. y Williamson, J.P (1994): GRAVMAG toolkit user manual. British Geological Survey, Technical Report WK/91/1/R, 67 p.
- Peña, J.L., Julián, A., Chueca, J., Echevarría, M.T. y Ángeles, G.R. (2004): Etapas de evolución holocena en el valle del río Huerva: Geomorfología y gearqueología. En: *Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticos* (Peña, J.L., Longares, L.A. y Sánchez, M., eds.). Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, Zaragoza, 289-302.

- Pérez-Rivarés, F.J., Arenas, C., Pardo, G. y Garcés, M (2018): Temporal aspects of genetic stratigraphic units in continental sedimentary basins: Examples from the Ebro basin, Spain. *Earth-Science Reviews*, 178: 136-153.
- PMG2 (2012): Operation manual. En: Specifications. República Checa, 4-5.
- Pueyo-Anchuela, O., Casas-Sainz, A., Soriano, M. A. y Pocoví-Juan, A. (2010). A geophysical survey routine for the detection of doline areas in the surroundings of Zaragoza (NE Spain). *Engineering Geology*, 11: 382-396. 10.1016.
- Quirantes, J. (1978): Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros. Institución Fernando el Católico, Zaragoza, 200 p.
- Riba, O., Reguant, S. y Villena, J. (1983): Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. Libro homenaje a J.M. Ríos: Geología de España, IGME.
- Romance, J. (2014): Aplicación de la prospección geofísica a la caracterización geológica del entorno de Zaragoza. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Zaragoza, 49 p.
- Soriano, A. y Calvo, J. M. (1987) Características, datación y evolución de los valles de fondo plano de las inmediaciones de Zaragoza. *Cuaternario y Geomorfología*, 1: 283-3293.
- Vergés, J., Muñoz, J. A., Martínez, A., 1992. South Pyrenean fold and thrust belt : The role of foreland evaporitic level in thrust geometry. En *thrust tectonics*, McClay, M. R. (ed), Chapman & Hall, London, (225-264).

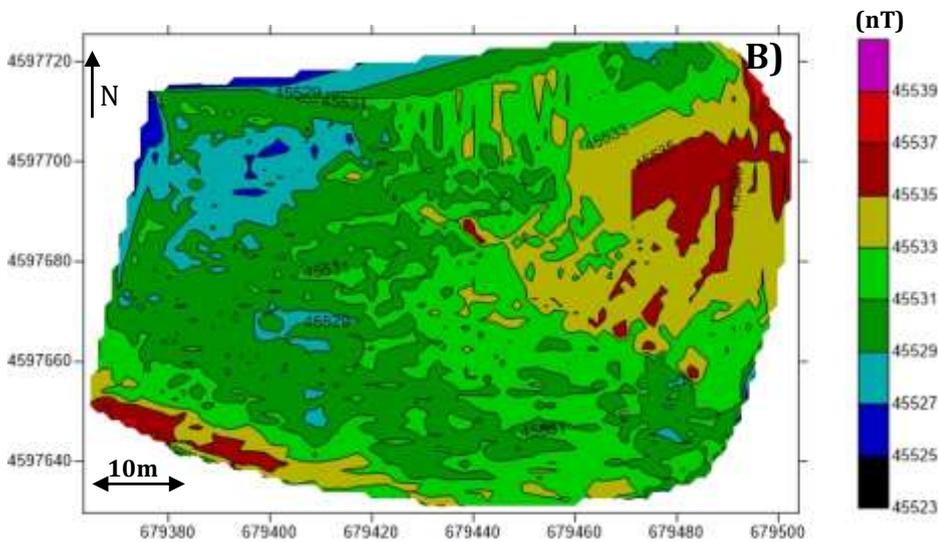
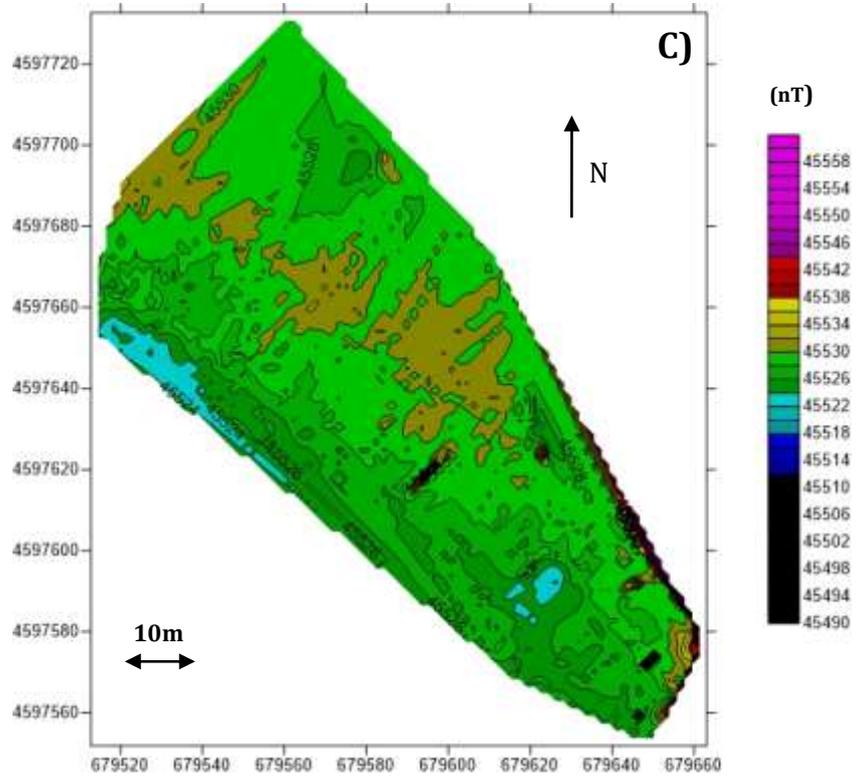
10. ANEXOS

Anexo 1



A) Mapa de campo magnético total sin corregir correspondiente a la Val1.

C) Mapa de campo magnético total sin corregir correspondiente a la Val3.



B) Mapa de campo magnético total sin corregir correspondiente a la Val2.

Anexo 2



Anexo 2. Mapa con los puntos donde han sido recogidas las muestras de suelo y de escoria

Anexo 3

MUESTRAS	Mass (g)	Volume (cm ³)	Total s. (10 ⁻⁶ SI)	Bulk s. (10 ⁻⁶ SI)	Mass s. 10 (cm ³ /g)
M1	9.50	6.21	74.51	120.01	78.44
M2	11.90	10.35	152.19	147.08	127.89
M3	19.60	14.74	162.74	110.43	83.03
M4	21.20	17.10	172.21	100.73	81.23
M5	18.40	15.21	147.38	96.92	80.10
M6	16.90	12.61	134.73	106.82	79.72
M7	17.10	11.63	124.36	106.91	72.73
M8	22.90	14.87	276.29	185.80	120.65
M9	21.00	14.29	99.51	69.66	47.39
M10	20.80	13.87	230.12	165.95	110.63
M11	19.10	15.04	-4.70	-3.13	-2.46
M12	17.80	12.19	151.61	124.35	85.17
M13	20.00	13.61	175.26	128.81	87.63
M14	23.50	13.74	169.84	123.58	72.27
M15	23.60	16.39	44.06	26.89	18.67
M16	18.50	14.57	9.43	6.47	5.10
M17	19.90	12.28	200.86	163.51	100.93
M18	19.73	11.81	226.14	191.41	114.62
M19	21.66	13.21	219.66	166.32	101.41
M20	18.48	12.83	176.64	137.64	95.58
M21	19.62	14.01	193.94	138.39	98.85
M22	16.01	10.53	157.19	149.24	98.18
M23	15.80	10.26	159.97	155.92	101.25
M24	18.89	11.96	217.87	182.23	115.34
M25	14.16	8.69	158.67	182.65	112.06
M26	20.11	12.41	471.82	380.09	234.62
M27	16.65	10.95	299.71	273.61	180.01
M28	15.13	10.58	228.45	215.92	150.99
E1	39.39	16.83	35256.19	20944.28	8950.54

Anexo 3. Resultados obtenidos en el laboratorio de las muestras de suelo por medio de un susceptómetro KLY3 y una balanza de precisión. A partir de estos valores se ha podido calcular la susceptibilidad másica y la bulk susceptibility.

Anexo 4

TABLE 3. Magnetic Properties of Selected Minerals

Mineral	Composition	Magnetic Order	T_c^a (°C)	J_s^b (Am ² kg ⁻¹)
<i>Oxides</i>				
cobalt ferrite	CoFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	520	80
copper ferrite	CuFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	455	25
hematite	α-Fe ₂ O ₃	canted antiferromagnetic	675	0.4
maghemite	γ-Fe ₂ O ₃	ferrimagnetic	~600	70–80
ilmenite	FeTiO ₃	antiferromagnetic	-233	
magnetite	Fe ₃ O ₄	ferrimagnetic	575–585	90–92
ulvöspinel	Fe ₂ TiO ₄	antiferromagnetic	-153	
magnesioferrite	MgFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	440	21
jacobsite	MnFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	~300	77
trevorite	NiFe ₂ O ₄	ferrimagnetic	585	51
<i>Sulfides</i>				
troilite	FeS	antiferromagnetic	305	
pyrrhotite	Fe ₇ S ₈	ferrimagnetic	320	20
greigite	Fe ₃ S ₄	ferrimagnetic	~333	~25
<i>Oxyhydroxides</i>				
goethite	α-FeOOH	antiferromagnetic/weak ferromagnetic	~120	<1
feroxyhyte	δ-FeOOH	ferrimagnetic	~180	<10
lepidocrocite	γ-FeOOH	antiferromagnetic(?)	-196	
<i>Metals and Alloys</i>				
cobalt	Co	ferromagnetic	1131	161
wairauite	CoFe	ferromagnetic	986	235
iron	Fe	ferromagnetic	770	218
nickel	Ni	ferromagnetic	358	55
awaruite	Ni ₃ Fe	ferromagnetic	620	120

^a T_c = Curie temperature (ferromagnetic materials) or Néel temperature (ferrimagnetic and antiferromagnetic materials).

^b J_s = Saturation magnetization at room temperature.

Anexo 4. Temperaturas de Curie y de Néel de algunos minerales. Tomado de Hunt 1995.