

Trabajo Fin de Grado

Prospección magnética aplicada al estudio de valles de fondo plano en los alrededores de Zaragoza

Magnetic survey applied to the study of flat-bottomed valleys in the surroundings of Zaragoza

Autora

Paula Montserrat Torres

Directores

Antonio Casas Sainz

M^o Teresa Román Berdiel

Departamento de ciencias de la Tierra

Facultad de ciencias

2020

INDICE

1. RESUMEN Y ABSTRACT	2
1.1 RESUMEN	2
1.2 ABSTRACT	2
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1 OBJETIVOS.....	4
3. CONTEXTO	4
3.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	4
3.2 LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA.....	5
3.2.1 La cuenca del Ebro	5
3.2.2 Estratigrafía.....	6
3.2.3 Valles de fondo plano (vales).....	7
4. METODOLOGÍA	8
4.1 TRABAJO DE CAMPO	8
4.2 TRABAJO DE GABINETE	11
4.2.1 Tratamiento de datos	11
4.2.2 Trabajo de laboratorio	12
5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	13
5.1 PROSPECCIÓN MAGNÉTICA.....	13
5.2 VALORES DE SUSCEPTIBILIDAD	16
5.3 MODELIZACIÓN MAGNÉTICA 2.5D	18
6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	20
7. CONCLUSIONS.....	25
8. BIBLIOGRAFÍA	26
9. ANEXOS	28

1. RESUMEN Y ABSTRACT

1.1 RESUMEN

En la zona central de la cuenca del Ebro, los valles de fondo plano o “vales” constituyen la forma de relieve más abundante y característica. Estas vales presentan una morfología meandriforme y un relleno cuaternario compuesto de limos, arenas y gravas. El objetivo de este trabajo ha sido la caracterización de los valles de fondo plano, en concreto obtener más información sobre ciertos aspectos como su evolución, la geometría de los rellenos o la geometría del sustrato basal sobre el que se disponen. Para ello, se ha llevado a cabo una prospección geofísica y un análisis de la susceptibilidad magnética en un valle de fondo plano situado al sureste de Zaragoza. Con dichas técnicas se han creado mapas de intensidad de campo magnético, de gradiente y de susceptibilidad. Finalmente, se ha realizado una modelización 2.5D. Los resultados muestran cómo los elementos antrópicos de alta susceptibilidad, como en este caso el gaseoducto, pueden afectar negativamente a las prospecciones magnéticas que tienen por objeto caracterizar los materiales que conforman el terreno.

1.2 ABSTRACT

In the central area of the Ebro basin, the flat-bottomed valleys or “vales” constitute the most abundant and characteristic form of relief. This flat-bottomed valleys have a meandering morphology and a quaternary filler composed of silt, sand and gravel. The objective of this work is the characterization of flat-bottomed valleys, in particular to obtain more information about certain aspects such as their evolution, geometry of the fillers or the geometry of the basal substrate on which they are located. To do this, a geophysical survey and magnetic susceptibility analysis have been carried out in a flat-bottomed valley located in the southeast of Zaragoza. These techniques have been used to create magnetic field intensity, gradient and susceptibility maps. Finally, a 2.5D modeling has been made. The results show how highly susceptible anthropic elements, such as in this case the gas pipeline, can negatively affect magnetic surveys that aimed to characterize the materials that constitute the terrain.

2. INTRODUCCIÓN

Los valles de fondo plano o “vales” son abundantes en el sector central de la cuenca del Ebro y se distribuyen formando redes dendríticas con un trazado principalmente meandriforme.

El fondo plano característico de estos relieves se ha producido debido a la colmatación de los sedimentos erosionados de las colinas circundantes, los cuales impiden apreciar si la geometría del sustrato basal donde se han depositado es de valles de incisión fluvial (en V) o de fondo plano (en U).

El estudio de estas vales y de sus respectivos rellenos sedimentarios holocenos permite conocer la alternancia dinámica entre las etapas de acumulación e incisión, así como la influencia del clima y la actividad antrópica sobre dichas etapas a lo largo del cuaternario. En el Anexo 1, se puede ver la evolución de estas vales en las últimas décadas, a pesar de que es difícil apreciar estos procesos en un intervalo tan corto de tiempo. En muchos casos se han aprovechado los limos de relleno de las vales para el cultivo, diferenciándose claramente estas zonas llanas de las laderas yeso-arcillosas casi desnudas que forman las cuencas-vertientes.

El presente trabajo pretende realizar una caracterización del terreno a partir de técnicas geofísicas. Para ello, se ha realizado una prospección magnética y se ha medido la susceptibilidad magnética de los materiales que constituyen un valle de fondo plano situado al norte de Torrecilla de Valmadrid. La metodología utilizada se detalla en el apartado de Métodos. Por otra parte, los trabajos realizados en la zona siguiendo la misma metodología son los siguientes: Mochales (2006), Pueyo- Anchuela et al., (2010), Romance (2014) y Attar (2019).

A través de la prospección magnética, se han tomado datos de la variación del campo magnético y se han identificado las anomalías magnéticas. Estos datos se han representado en mapas, al igual que los datos de susceptibilidad magnética medidos en los materiales que afloran en el terreno. Además, se ha medido en el laboratorio la susceptibilidad magnética de muestras tomadas a lo largo de toda la zona de estudio. Finalmente, se ha realizado una modelización 2,5D de un corte en el que se muestra, entre otra cosas, la geometría que presentan los materiales que rellenan las vales.

La finalidad de este trabajo es ampliar el conocimiento científico de las vales a partir de la realización de una prospección magnética y otras propiedades magnéticas relacionadas que permiten conocer la geometría con la que se disponen los materiales, su mineralogía y sus propiedades magnéticas. Aparte de eso, estas técnicas también permiten la caracterización de otros elementos antrópicos subterráneos presentes en terreno, como puede ser los gaseoductos y otras infraestructuras.

2.1 OBJETIVOS

Mediante la realización de este trabajo de fin de grado (TFG) se pretende obtener los siguientes valores de aprendizaje:

- Conocer la utilidad de las propiedades magnéticas de los materiales y cómo se realiza una prospección magnética.
- Adquirir suficiente destreza en el manejo de los programas informáticos necesarios para analizar los datos y realizar mapas o para llevar a cabo una modelización.
- Realizar una interpretación de los datos que demuestre los conocimientos logrados a lo largo de la carrera, como pueden ser las bases adquiridas en geomorfología y sedimentología para conocer la estructura, evolución y dinámica de los valles de fondo plano. Además de los conocimientos adquiridos en mineralogía o geoquímica para determinar el origen y la naturaleza de los materiales y relacionarlos con la información obtenida mediante las técnicas magnéticas.

Un objetivo adicional del presente trabajo consiste en obtener información acerca de:

- Las propiedades magnéticas de los materiales de la zona de estudio, como puede ser la susceptibilidad o la variación del campo magnético.
- La geometría en la que se disponen los materiales de relleno de las vales y del sustrato basal sobre el que se disponen, así como el reconocimiento de otros cuerpos que puedan causar anomalías en la zona de estudio.
- La mineralogía de los materiales magnéticos y el origen de los mismos según los datos obtenidos y la influencia que ha podido tener el ser humano en la zona de estudio a lo largo de la evolución de dichas vales.

3. CONTEXTO

3.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se sitúa a 14 km al sur de Zaragoza (Aragón, España), en la proximidad del barrio rural de Torrecilla de Valmadrid (Fig. 1). Más concretamente, al suroeste del vertedero de residuos industriales de Zaragoza (RINZA) (Fig. 2).



Fig. 1- El área de estudio, situada al sur de Zaragoza y al norte de Torrecilla de Valmadrid, se muestra rodeada por un círculo negro.



Fig. 2- El cuadrado delimita la zona de estudio, localizada al suroeste del vertedero de residuos industriales de Zaragoza.

La zona de estudio se localiza en el sector central de la Cuenca del Ebro, en la hoja M.T.N 1:50.000 nº 384 (Fuentes de Ebro). Tiene una longitud de 300m de largo (de E a O) y 200m de ancho (de N a S), con un área de 60.000m². Las coordenadas de la esquina inferior izquierda y la esquina superior derecha son, UTM 681600E; 460050N y 682200E; 460100N, respectivamente y se sitúa a aproximadamente 300 m de altitud (Fig. 2).

3.2 LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA

La zona de estudio se sitúa en el sector central de la cuenca del Ebro.

3.2.1 La cuenca del Ebro

La cuenca del Ebro, tiene una morfología triangular y está delimitada por los Pirineos, los Montes Vasco-Cantábricos al Norte, la Cordillera Ibérica al sur y la Cordillera Costero Catalana al este. Esta cuenca representa la última fase de evolución de la cuenca de antepaís surpirenaica. Sus límites y estructura actual se establecieron entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior, cuando los cabalgamientos frontales surpirenaicos alcanzaron su emplazamiento definitivo (Pardo et al., 2004). Estos cabalgamientos frontales surpirenaicos, junto con el margen ibérico, condicionaron la geometría de relleno, generando en los materiales terciarios una sedimentación con tendencia solapante en *on-lap*.

Los materiales aflorantes de esta zona de edad Terciaria son depósitos de ambientes marinos del comienzo del Terciario, aunque a partir del Eoceno pasan a ser continentales (Riba et al., 1983).

En el mapa geológico (Anexo 2) se puede apreciar que en la zona situada al norte se depositaron areniscas y conglomerados eocenos y se desarrollaron extensos abanicos aluviales y redes fluviales distribuidas desde los márgenes hacia el centro de la cuenca.

En el sector central afloran calizas, evaporitas, areniscas y lutitas del Oligoceno y Mioceno, que se disponen discordantes sobre el Paleozoico y el Mesozoico. Finalmente, en el sector meridional se observan conglomerados que pasan a areniscas y lutitas (sistemas de abanicos y cauces fluviales). A medida que se avanza hacia el interior afloran calizas y evaporitas principalmente miocenas.

El sector central, donde se encuentra la zona de estudio, tiene menor subsidencia que el sector oriental y occidental y presenta una geometría tabular. A partir de las paleocorrientes se ha podido concluir que los materiales de la zona de estudio tienen procedencia ibérica.

Evolución de la cuenca del Ebro

En cuanto a la evolución de la cuenca del Ebro, esta cuenca se formó por relleno de una cuenca de antepaís endorreica durante el Paleógeno y su vaciado con la apertura del Mediterráneo durante el Neógeno, como se explica a continuación con más detalle.

Al inicio del **Paleógeno**, en el Paleoceno, la Depresión del Ebro comenzó a ser una cuenca de antepaís debido a la subsidencia producida principalmente por el avance del sistema de cabalgamientos del Pirineo hacia el sur. Durante el Eoceno superior la cuenca del Ebro se cerró definitivamente al océano Atlántico debido a la emersión de la cadena pirenaica. Durante el

Oligoceno superior y el Mioceno se produjo una gran zona lacustre que propició la existencia de un largo periodo endorreico (Riba et al., 1983; García Castellanos et al., 2003).

Durante este periodo se produjo una gran acumulación de sedimentos, aportados por los sistemas montañosos que rodean la cuenca, que fue favorecida por el drenaje cerrado y la fuerte subsidencia. Estos sedimentos consisten principalmente en materiales clásticos, evaporíticos y carbonatados (Muñoz et al., 2002).

Las oscilaciones climáticas produjeron importantes variaciones en el nivel del mar que se tradujeron en variaciones significativas en los depósitos sedimentarios. Se formaron facies carbonatadas en épocas húmedas con altos niveles de agua o sulfatadas en épocas secas con bajos niveles de agua (Arenas y Pardo, 1999). Además, se llegaron a producir traslaciones en el borde de la cuenca, como denotan las discordancias progresivas presentes en la sedimentación conglomerática (Anadón et al., 1979).

En el **Neógeno (Mioceno)**, concretamente hace entre 8.5 y 11.5 Ma (García-Castellano, 2003), se produjo un cambio en las condiciones de sedimentación al establecerse la red fluvial del río Ebro como sistema de transporte y erosión exorreico hacia el mar Mediterráneo por la erosión en el flanco oriental de la Cordillera Costero Catalana (Anexo 3). Este proceso pudo ocurrir gracias a diversos factores, como son las condiciones húmedas que presentaba la zona durante el Mioceno superior o la gran acumulación de sedimentos en la cuenca que permitieron un aumento del nivel del agua. A partir de entonces se produjeron en la cuenca etapas de predominio de la erosión frente a las etapas de sedimentación según los cambios climáticos. A partir de la incisión producida por el drenaje, se pueden ver estructuras sin y post-tectónicas.

3.2.2 Estratigrafía

Los materiales terciarios que afloran en la zona de estudio (Anexo 4) pertenecen a la Fm. Yesos de Zaragoza (Quirantes, 1978). Esta formación puede alcanzar un espesor de varios cientos de metros y está constituida principalmente por niveles de yesos en alternancia con niveles de margas y lutitas. La base de esta unidad está datada en el Ageniense (límite entre el Oligoceno-Mioceno o Mioceno basal).

Sobre esta formación de yesos se depositaron las calizas miocenas de la Fm. Alcubierre (Quirantes, 1978), que se localizan en las proximidades de la zona de estudio. Esta formación, al sur de Zaragoza, está compuesta en la base por margocalizas con yesos y lignitos, en la parte central por una alternancia de calizas y margas y a techo por calizas masivas.

Finalmente, por encima de estas formaciones se depositaron, de forma discordante, los materiales detríticos cuaternarios.

3.2.3 Valles de fondo plano (vales)

Los valles de fondo plano o también denominados localmente vales están presentes en la zona de estudio y en sus proximidades. Se trata de valles colmatados de sedimentos procedentes de la erosión de las laderas circundantes que no han podido ser evacuados por la red fluvial (Peña et al, 2004).

Estas vales presentan, de forma similar a los valles fluviales, una geometría meandriforme cuando alcanzan una cierta longitud o una geometría rectilínea cuando son más cortas. Además, las vales se disponen perpendiculares al cauce del río o de las vales a las que se dirigen, como es el caso de la val estudiada, la val de Torrecilla de Valmadrid (Anexo 5), que tiene dirección NNE-SSO prácticamente perpendicular al río Ebro y morfología claramente meandriforme.

La val principal de Torrecilla de Valmadrid está jererquizada hasta en tres órdenes. La val principal de primer orden tiene una anchura de 150 a 210 m y dirección NNE-SSO. Los valles de menor tamaño, de segundo orden, presentan anchuras de 40 a 80 m y normalmente se disponen con dirección ESE-WNW. Finalmente, los valles de tercer orden tienen anchuras de 15 a 40 m .

El relleno holoceno de los valles de fondo plano está formado esencialmente por limos, con lentejones intercalados 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 reconocido tres niveles de acumulación. Las vales se encuentran encajadas entre sí debido a la alternancia de periodos de sedimentación y de incisión, por lo que, de forma similar a las terrazas, N3 es el nivel superior y, por lo tanto, el más antiguo. Este nivel se ha datado a partir de los restos arqueológicos en el periodo postbronce-postromano.

Según el estudio realizado por Soriano y Calvo (1987), el nivel superior es el de mayor potencia y el que está presente en el mayor número de afloramientos. Este nivel generalmente presenta superficies erosivas importantes que permiten diferenciar dos episodios erosivos. Además, la frecuente superposición de rellenos de canal indica una importante divagación del medio.

El nivel medio N2 es postmedieval. Este nivel es muy escaso y está constituido por gravas que alternan con niveles de arenas y limos y con materiales más finos a techo. Finalmente, el nivel inferior es de edad muy reciente y está constituido principalmente por gravas con niveles de arenas y limos.

Evolución de las vales

Los valles secundarios se rellenan parcialmente de sedimento por el trasvase de los mismos desde las laderas formando el nivel superior N3 de la val. A continuación, tiene lugar una fase de incisión en la que se movilizan los sedimentos de los rellenos de las vales hacia los cursos principales (ríos Ebro o Huerva). Después, se vuelve a producir una etapa de acumulación de material que genera los segundos rellenos (nivel medio N2). Finalmente, desde el nivel N2 hasta la actualidad se produce un periodo de incisión que solo está activo en las vales más importantes o con un mayor gradiente longitudinal. El tercer nivel N1 corresponde a los materiales provenientes de los aluviones.

Se han formulado varias hipótesis para explicar los factores que provocan las alternancias entre los periodos acumulativos y erosivos y en qué medida actúan ambos procesos durante cada periodo.

Las hipótesis consideradas suponen que los principales factores implicados son el clima y la actividad humana. Por una parte, el clima semiárido que ha dominado el territorio en los últimos milenios (González-Sampériz et al. 2008), aceleraría la erosión por efecto de las intensas lluvias sobre los terrenos con escasa cubierta vegetal que han experimentado largos periodos de sequía. Por otra parte, la actividad humana produce deforestación que desprotege las laderas y favorece la erosión.

A continuación, se exponen dos hipótesis propuestas que presentan claras diferencias:

Soriano y Calvo (1987) plantean que los primeros periodos acumulativo N3 y erosivo se produjeron principalmente por el clima, ya que la actividad humana no sería tan intensa como para generar esos potentes rellenos. Por lo tanto, el relleno se produciría en un clima frío (tránsito periodo Sub-Boreal a Sub-Atlántico) y la etapa de incisión coincidiría con el periodo de clima más cálido. En cambio, las siguientes etapas de relleno podrían haber sido favorecidas por la actividad humana.

A diferencia de estos autores, Peña et al. (2004) consideran que el aumento de la tasa de acumulación en los niveles superior y medio coincidió con la ocupación humana, mientras que los niveles N1 y N2 estarían principalmente causados por el clima, teniendo la acción antrópica menor importancia para ellos.

4. METODOLOGÍA

La prospección geofísica consiste en estudiar las propiedades físicas de los materiales terrestres que se sitúan por debajo de la superficie terrestre. El presente trabajo describe y analiza una prospección magnética. El método empleado se basa en medir las alteraciones del campo magnético generadas por cuerpos de alta susceptibilidad magnética. La utilización de este método es propicia al tratarse de materiales con comportamientos magnéticos diferenciados. Las margas y los yesos miocenos tienen un comportamiento fundamentalmente diamagnético mientras que los materiales cuaternarios se espera que tengan comportamientos paramagnéticos y ferromagnéticos, lo que permite situar los contactos entre ellos y determinar su geometría.

4.1 TRABAJO DE CAMPO

En este proceso, se siguió la metodología de Breiner (1999), que requiere el uso de magnetómetros portátiles. Estos aparatos sirven para identificar y describir los cambios espaciales en el campo magnético de la Tierra (Breiner, 1999). Los equipos utilizados fueron:

- **Magnetómetro móvil:** sirve para medir las variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre. Este aparato está formado por dos sensores separados 0,5 m que miden la variación del componente vertical del campo magnético. El fundamento de este aparato está en el efecto Overhauser, por el cual las ondas de alta frecuencia (VHF) llegan a través de un cable que rodea a un envase constituido por un líquido abundante en núcleos de hidrógeno. De esta forma se genera un campo magnético artificial y durante este periodo de tiempo los spins nucleares de los protones se alinean. Una vez eliminado el campo creado, los protones vuelven a su posición inicial. En este trabajo se utilizó el magnetómetro móvil sistema GEM de modelo GSM-19v 6.0 (Fig.3), que tiene una resolución de 0,01 nT y una precisión de 0,2 nT (GEM systems Inc, 2000).

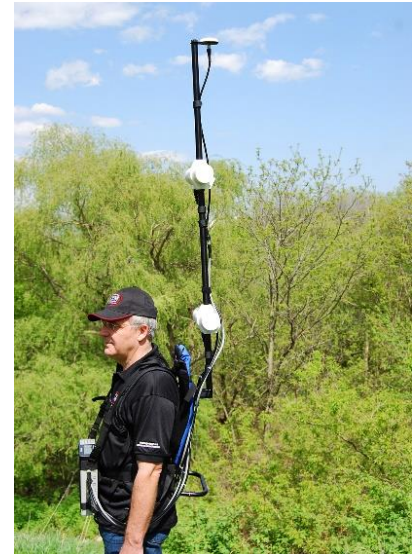


Fig. 3- Magnetómetro móvil, GEM systems modelo GSM-19 v

- **Magnetómetro fijo:** mide las pequeñas variaciones diarias (variación diurna) que se producen en el campo magnético. Se usó el magnetómetro de protones PMG-2 de SatisGeo (Fig.4), constituido principalmente por dos botellas de hidrocarburo y varias barras de aluminio para su sostén. Este magnetómetro tiene un rango de intensidad de campo entre 20.000-100.000 nT, una precisión de ± 1 nT, una resolución de 0,1 nT y un tiempo de medición máximo de 2s (PMG-2, 2012).



Fig. 4- Magnetómetro fijo utilizado, modelo PMG-2 de de SatisGeo.

Para poder adquirir mayor fiabilidad en los datos obtenidos en la prospección es necesario tener en cuenta ciertos requisitos:

1. Es conveniente que el magnetómetro base no esté a más de 30 m de la zona de trabajo y también debe estar alejado 60 m del tráfico local o de las infraestructuras que puedan interferir en las mediciones, como los cables de tendido eléctrico, las tuberías, las vallas o las construcciones metálicas. Además, siempre se debe situar en el mismo lugar.
2. Antes de realizar la prospección hay que asegurarse de que la persona que transporta el magnetómetro móvil no lleve accesorios u otros objetos magnéticos que puedan alterar los datos obtenidos en la medición del campo magnético.
3. También se debe comprobar que la hora de los aparatos sea correcta al igual que el intervalo de medida y otros parámetros modificables.
4. Durante la realización de la prospección hay que tratar de evitar los ruidos magnéticos de origen antrópico: como ocurre en la proximidad de una carretera con tráfico frecuente, de los tendidos y torres eléctricas, etc.

- **Sistema de Posicionamiento Global (GPS):** Para sustituir el GPS incorporado al magnetómetro móvil utilizado, que estaba averiado, se adhirió un GPS adicional a la parte superior del aparato lo más alejado posible de los sensores para que no pudiera interferir en la toma de datos. De esta forma, se pudieron geolocalizar las medidas tomadas en cada instante.

Para llevar a cabo la toma de medidas con el magnetómetro móvil, se realizó un recorrido que consistía en un trazado de líneas trasversales a la dirección de la val (de este a oeste) y paralelas entre sí con una separación de 1,5 m, a no ser que lo impidieran matorrales u otros obstáculos como vallas presentes en las líneas de muestreo. Los surcos regulares de los campos de cultivo facilitaron la realización de dicho trazado. Con este procedimiento se obtuvieron medidas en toda la zona de estudio. Los seis campos que conforman gran parte del área de estudio se han denominado sectores, siendo el sector 1 el que se sitúa más al sur y el sector 6 el que se sitúa más al norte. Esta nomenclatura posibilita la realización de descripciones más detalladas y concisas.

- **Susceptómetro:**

Otro aparato imprescindible para el estudio fue el susceptómetro. Este aparato permite medir la susceptibilidad de un material al efecto del campo magnético. La susceptibilidad (k) es adimensional. Se puede distinguir distintos tipos de materiales en función de su susceptibilidad:

- Materiales diamagnéticos ($k < 0$) : todos los huecos electrónicos están ocupados, sin haber electrones desapareados. Al aplicar un campo magnético, los orbitales de los electrones giran produciendo un campo que se opone al aplicado, pero que es mucho más débil. Es el caso del cuarzo o la calcita que presentan susceptibilidades de aproximadamente -10^{-6} SI .
- Materiales paramagnéticos ($k > 0$): los huecos electrónicos están incompletos, de forma que al aplicar un campo magnético externo, los spines desapareados giran produciendo un campo magnético en el mismo sentido y proporcional al aplicado. Los minerales de la arcilla y los filosilicatos son materiales paramagnéticos, con susceptibilidades del orden de 10^{-7} y 10^{-8} SI.
- Materiales ferromagnéticos: presentan electrones libres. El conjunto de los electores desapareados, en los que el spin de cada uno produce un dipolo, están acoplados magnéticamente entre átomos adyacentes, dando lugar a un campo molecular y a dominios magnéticos. Dentro de este grupo, los materiales que presentan una susceptibilidad más alta son los ferromagnéticos como el hierro. En ellos, los dipolos se sitúan paralelos al campo magnético, que también presenta magnetización remanente natural (NRM).

Las medidas tomadas con este aparato abarcaron la mayor parte del terreno para poder generar un mapa de la máxima precisión posible. Estas medidas se llevaron a cabo con el susceptómetro de mano KT-20 (Fig. 5). Como este aparato no toma medidas automáticamente sino que hay que tomarlas una a una sobre el sustrato (tando el susceptómetro con el valor del aire), se siguió una dinámica distinta de la del magnetómetro móvil . En cada campo de cultivo se realizaron unas cuatro o cinco líneas, tan rectilíneas como fue posible, también transversales a la val. En cada una de ellas se tomaron aproximadamente diez puntos de medida, con una separación constante (entre quince y veinte pasos). En cada punto de medida se tomaron cinco valores distintos de susceptibilidad y sus coordenadas. En la ladera también se realizaron mediciones, creando así una red bastante homogénea de puntos en toda la zona de estudio.



Fig. 5- Susceptómetro de mano KT-20.

Finalmente, se recogieron 13 muestras de suelo, anotando sus coordenadas e intentando obtener la mayor diversidad posible de suelos y de fragmentos de escoria presentes en el camino para así analizar la susceptibilidad de los materiales en el laboratorio, como se explicará en el apartado siguiente.

4.2 TRABAJO DE GABINETE

4.2.1 Tratamiento de datos

Tras introducir los datos de los magnetómetros al ordenador, en primer lugar se realizó la corrección diurna para eliminar las variaciones del campo magnético debidas a factores externos. Este proceso consiste en restar los datos medidos por el magnetómetro móvil a los medidos por el magnetómetro fijo (a la misma hora) de cada día de campo obteniendo la intensidad residual que corresponde al valor de la anomalía magnética. Esta corrección se llevó a cabo con el programa GEMLink 5.3. Seguidamente, se prepararon los datos con la hoja de cálculo Excel para la posterior realización del mapa. Este proceso consistió en:

- 1- Filtrar los datos con baja calidad.
- 2- Para asignar las coordenadas adquiridas por el GPS a los datos de la prospección, se procedió a completar y duplicar los datos de GPS de cada día por interpolación, ya que se habían obtenido la mitad de medidas, y se correlacionan ambos ficheros de datos a partir del tiempo en el que se tomaron las medidas.
- 3- Antes de juntar los datos de cada día de campo se comprobó que el intervalo de valores de la base era semejante. En este caso, al haber realizado un día de campo en noviembre (situando la base en otro sitio) y los otros dos en días próximos de febrero, se observó que el valor de la base de noviembre difería del resto (Fig. 6). Para ello, se tomaron los valores obtenidos en un mismo punto en dos días de campo y se calculó la diferencia, aplicándola al resto de valores de noviembre.

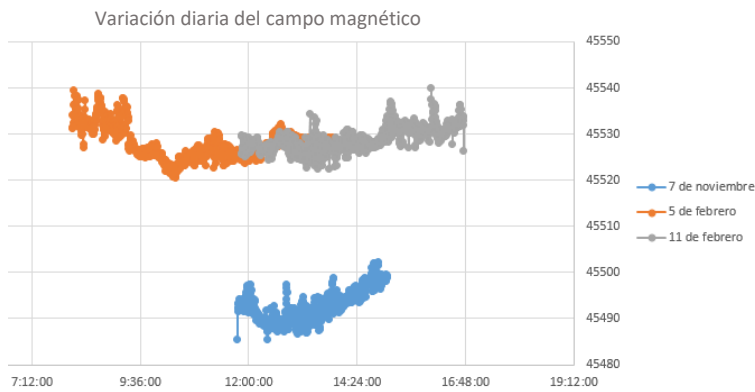


Fig 6- Variación diaria del campo magnético terrestre. En azul los valores del 7 de noviembre, en rojo los del 5 de febrero y en gris los del 11 de febrero.

Una vez conseguida la tabla de valores, se crearon los mapas con el programa Surfer 15, utilizando el método de kriging o triangulación por interpolación lineal al considerarse, en comparación con el resto de métodos de interpolación, los más adecuados para estos datos. Con este programa también se realizaron los mapas de susceptibilidad magnética. A continuación, se situaron los mapas en la zona de estudio por medio de Google Earth.

Finalmente, se realizó una modelización 2.5 D con el programa Gravmag (Pedley et al, 1993; Pedley et al, 1994). Para ello, se decidió en que zona se quería realizar el perfil (tomando los valores obtenidos con el magnetómetro) y se determinaron ciertos parámetros como: declinación, inclinación, intensidad del campo magnético (obtenidos a partir de la página web British Geological Survey) y la dirección del perfil. También se asignaron valores a la extensión de los cuerpos en la dirección perpendicular al perfil y a su susceptibilidad, para la cual se tuvieron en consideración los valores de susceptibilidad obtenidos en el campo y en el laboratorio.

4.2.2 Trabajo de laboratorio

Se midió la susceptibilidad magnética de las 13 muestras de suelo recogidas en diferentes puntos de la zona de estudio (Fig. 7) y de los fragmentos de escoria. Para ello, se utilizó el susceptómetro KLY3 Kappabridge (AGICO, República Checa). Este aparato genera un campo magnético de baja intensidad 300 A/m y trabaja a una frecuencia de 875 Hz.

Con cada muestra se rellenó un tubo de metacrilato de 8 cm³ de volumen (Fig 8) y se obtuvo su peso seco para calcular la densidad. A continuación, se introdujo en el susceptómetro (Fig 9). De esta forma, se obtuvieron los valores de la susceptibilidad total, la susceptibilidad másica a partir del valor de la masa y la susceptibilidad volumétrica.



Fig. 7- Muestras de suelo analizadas, n = 13.



Fig. 8-. Cubo de metacrilato de 8 cm³ en la parte superior de la fotografía.



Fig .9- Susceptómetro KLY3.

5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 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 la Fig. 10 se pueden observar todos los puntos donde se tomaron medidas. Como se puede apreciar, en la zona de la derecha faltan valores ya que se eliminaron por ser datos de baja calidad.



Fig. 10- Puntos en los que se tomaron medidas y que, a la vez, corresponden con el trazado realizado por el prospector.

Para comenzar, se realizaron mapas generales del gradiente y campo magnético (Anexo 6). El mapa de la intensidad de campo (Anexo 6A) presenta valores con un intervalo amplio, aproximadamente de 39.600 nT a 49.900 nT. En general, la mayoría de las medidas de la zona se sitúan en torno a 45.500 nT, a excepción de las anomalías que se reconocen al este de la zona de estudio que presentan valores de hasta 5.500 nT. Estas anomalías se disponen en sucesión lineal con una dirección N150E.

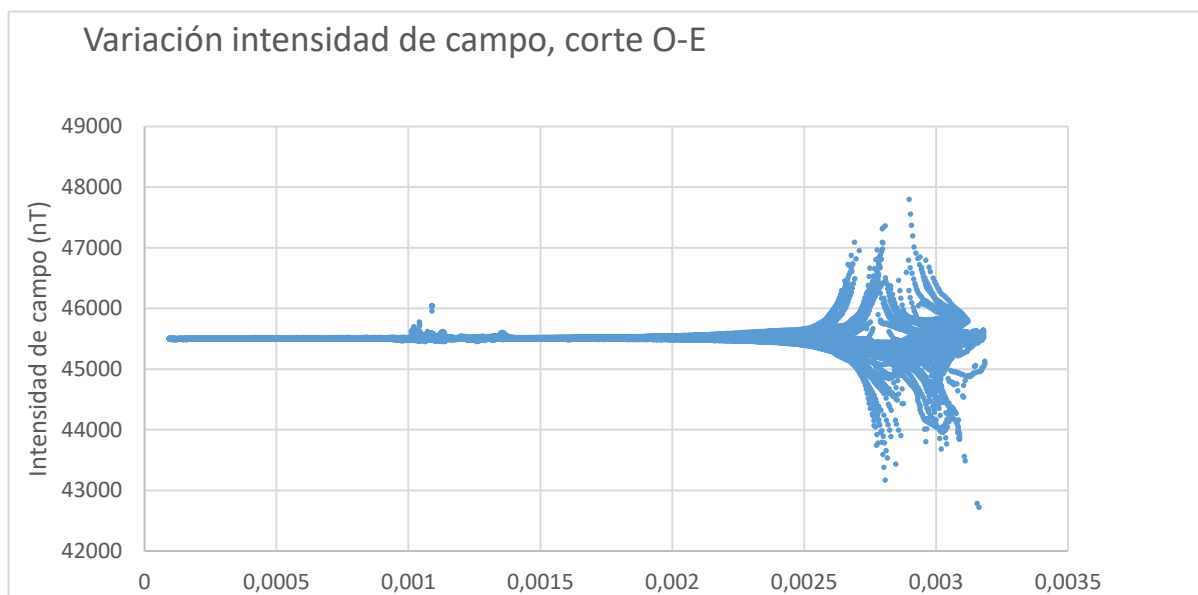


Fig. 11- Valores obtenidos a lo largo de todos los perfiles E-O realizados. En el eje Y la intensidad de campo (nT) y en el eje X la longitud.

El gráfico de la Fig. 11 representa la proyección y superposición de todos los perfiles realizados en la zona y permite ver la variación de la intensidad del campo magnético de un lado a otro de la val. Al igual que en el mapa anterior, se aprecia que en la zona de la derecha se producen anomalías positivas y negativas entre 42.800 y 47.800 nT, mientras que el resto de puntos se mantienen en torno a los 45.500 nT. Cabe destacar una anomalía que aparece entre la zona central del perfil y el lateral izquierdo, con aproximadamente 500 nT de amplitud en la intensidad de campo total.

El mapa general de gradiente (Anexo 6B) tiene una cierta similitud con el mapa de intensidad de campo. La mayoría de valores se sitúan en el intervalo de -100 a 400 nT, aunque en el extremo este también se distinguen grandes anomalías negativas (hasta -10.000 nT) y positivas de menor amplitud (hasta 1.700 nT) con una longitud de onda media de 10 m. Además, se puede ver un pequeño círculo en el camino que corresponde a una anomalía monopolar negativa con una amplitud menor de 150 nT y una longitud de onda de 6 m.

La gran amplitud de las anomalías, que se producen en esta zona y que se representan en los mapas, impiden ver el resto de valores con más detalle. Por este motivo, se han realizado mapas sin considerar los valores más altos, sólo seleccionando un intervalo más pequeño en el que se encuentran la mayoría de valores. Por lo tanto, se han generado mapas de campo magnético y de gradiente con intervalos de 2 a 5 nT.

El mapa de la variación del campo magnético detallado se ha realizado en un intervalo comprendido entre 45.445 y 45.555 nT (Anexo 7 A). En él se pueden ver dos grandes anomalías que casi ocupan la mitad Este de la zona de estudio. La anomalía negativa se sitúa en la parte sureste de la zona de estudio mientras que la anomalía positiva se localiza en la zona situada al noreste de la misma. Aparte de eso, se pueden reconocer anomalías dipolares de menor tamaño a lo largo del camino. Estas anomalías alcanzan amplitudes de hasta 80 nT. En la zona de la ladera y en la zona situada más al oeste en los campos de cultivo las variaciones son pequeñas, de 45.505 nT a 45.515 nT. Los valores más bajos se localizan en algunas zonas de las laderas (como se puede ver en la zona situada al suroeste del mapa), principalmente en los sectores 1 y 2 (campo de cultivo 1º y 2º desde el sur), ya que el sector 2 tiene valores más altos en el centro. Los sectores 4, 5 y 6, situados más al norte y algunas zonas de las laderas también presentan valores un poco más altos.

Por otra parte, en el mapa detallado de gradiente (Anexo 7B) se muestran valores que están en un intervalo entre 26 y -26 nT. Este mapa tiene ciertas similitudes con el que se acaba de describir, como pueden ser las anomalías que se reconocen en el tramo del camino, que son muy parecidas en ambos mapas. Sin embargo, en este caso cada anomalía puede alcanzar una amplitud máxima de aproximadamente 30 nT y una longitud de onda de 10 m, a excepción de la anomalía monopolar negativa que se ha podido identificar en el mapa general de 150 nT. A diferencia del mapa de campo magnético, las anomalías dipolares de la zona que se sitúa más hacia el este son de un tamaño mucho menor, lo que permite ver las pequeñas variaciones de la intensidad del campo magnético en gran parte de los sectores. Esta zona y la de la ladera presentaron valores de gradiente de -6 a 4 nT, exceptuando unas pequeñas variaciones que se producen en los sectores 1 y 2 que alcanzan los 8 nT.

Finalmente, se decidió hacer un tercer mapa de gradiente para poner de manifiesto, con más detalle, los valores de la zona central y de la ladera (Figura 12). Este mapa representa los valores en un intervalo de -16 a 12 nT. Al ser un intervalo tan reducido, se pueden ver unas isolineas paralelas a la trayectoria realizada con el magnetómetro, causadas por el ruido del muestreo.

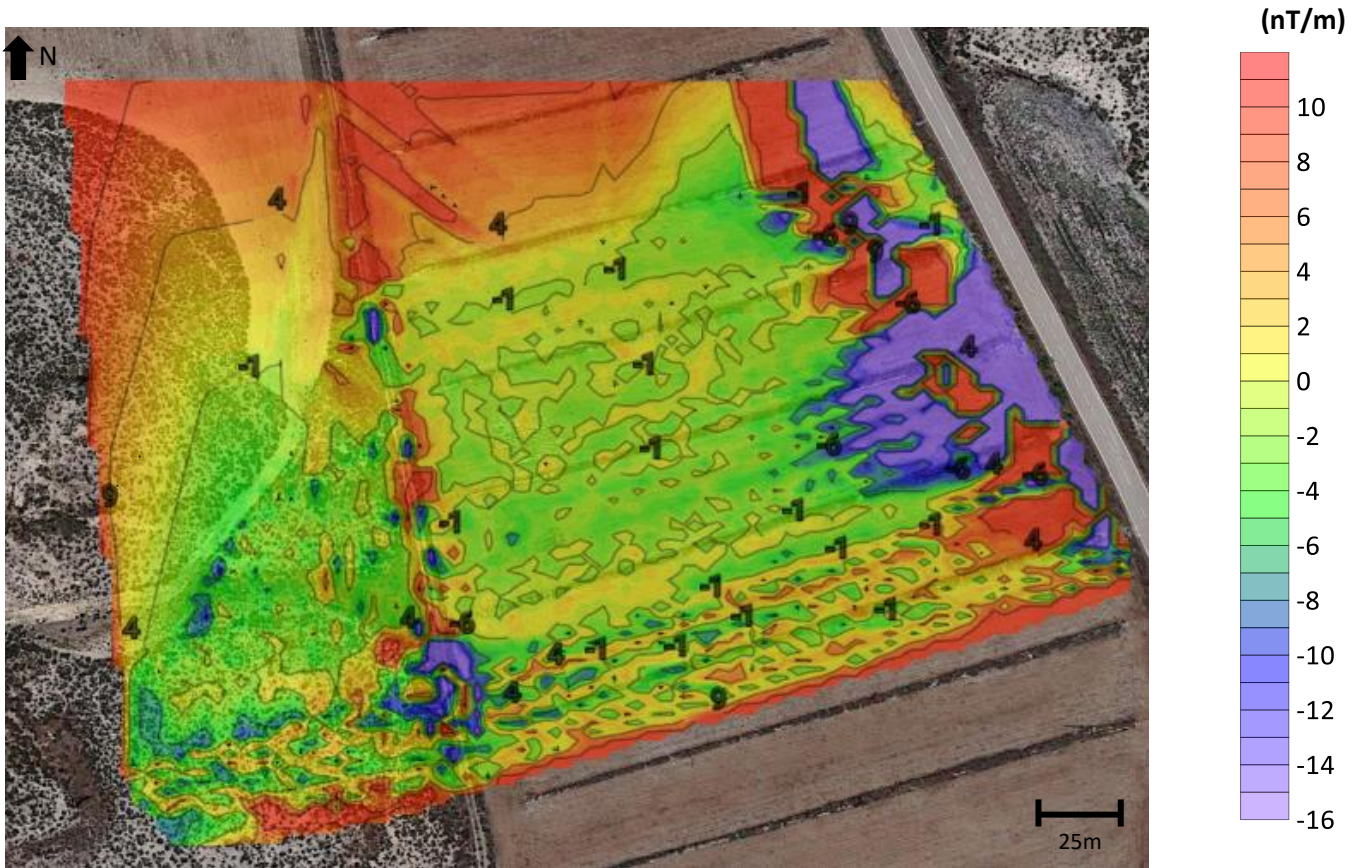


Fig. 12- Mapa más detallado del gradiente.

Los sectores 1, 2 y la ladera contigua presentan valores comprendidos entre -2 y 2 nT, un poco mayores que los de la zona central, que muestran valores entre -6 y -2. En estas zonas se pueden observar las pequeñas anomalías positivas y negativas ya comentadas, entre las que destacan las abundantes anomalías negativas de hasta -10 nT que se forman en la ladera situada más al sur. En el mapa, a medida que se va hacia el norte, se produce un aumento sustancial del gradiente, desde valores que oscilan entre -1 y 4 nT en el sector 5 hasta valores de aproximadamente 10-12 nT en el sector 6.

5.2 VALORES DE SUSCEPTIBILIDAD



Fig .13- Mapa de los puntos donde se tomaron las medidas de susceptibilidad.

En la Fig. 13 se muestran los puntos donde se obtuvieron los valores de susceptibilidad.

El mapa del Anexo 8 muestra todos los valores de susceptibilidad que se midieron en la zona. Esos valores oscilan entre $13,9 \cdot 10^{-6}$ SI y $4000 \cdot 10^{-6}$ SI. En la zona situada al oeste, en el camino (entre la ladera y los cultivos), llama la atención una banda prácticamente vertical que presenta valores altos ($400 \cdot 10^{-6}$ SI) y que alcanza los valores máximos más al norte.

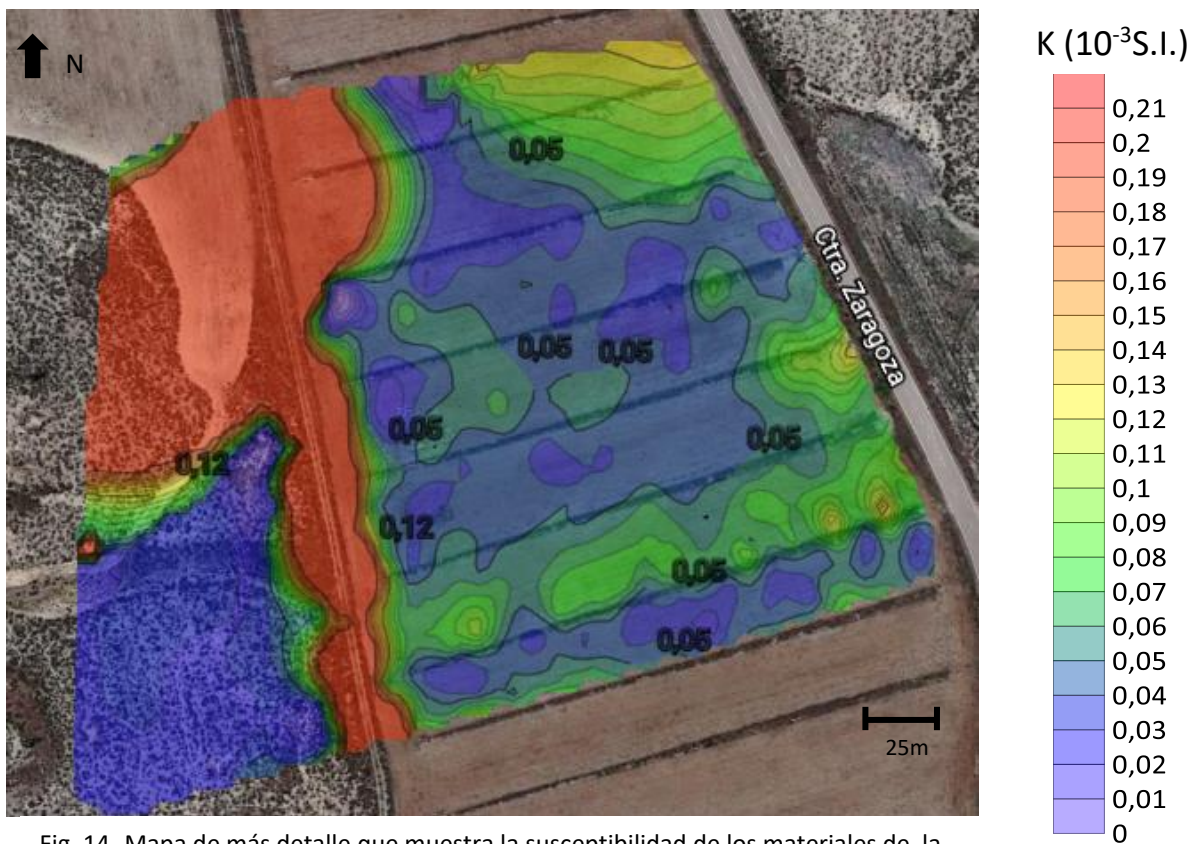


Fig. 14- Mapa de más detalle que muestra la susceptibilidad de los materiales de la zona.

De forma similar a los mapas de campo y gradiente, se realizó un segundo mapa (Fig. 14), más detallado, que presentaba los cambios en los valores de la susceptibilidad en un intervalo más reducido, entre 0 y $210 \cdot 10^{-6}$ SI. Como en el mapa general, los valores más altos se sitúan en el camino, alrededor del mismo y en la zona noroeste del mapa. Por otra parte, los valores más bajos, entre 0 y $30 \cdot 10^{-6}$ SI, se localizan en la ladera. En los campos de cultivo la susceptibilidad varía entre 30 y $60 \cdot 10^{-6}$ SI, exceptuando el sector 2 y las zonas situadas al este y al noreste del mapa, donde la susceptibilidad aumenta hasta valores de $120 \cdot 10^{-6}$ SI.

En la Fig. 15 se muestran los puntos de la zona de estudio donde se tomaron las 13 muestras de suelo analizadas. En la tabla resumen de la Fig. 16 se presentan los valores obtenidos de dichos análisis, que se realizaron en el laboratorio. Por último, en el Anexo 9 se muestran los demás valores obtenidos de los análisis de suelo.

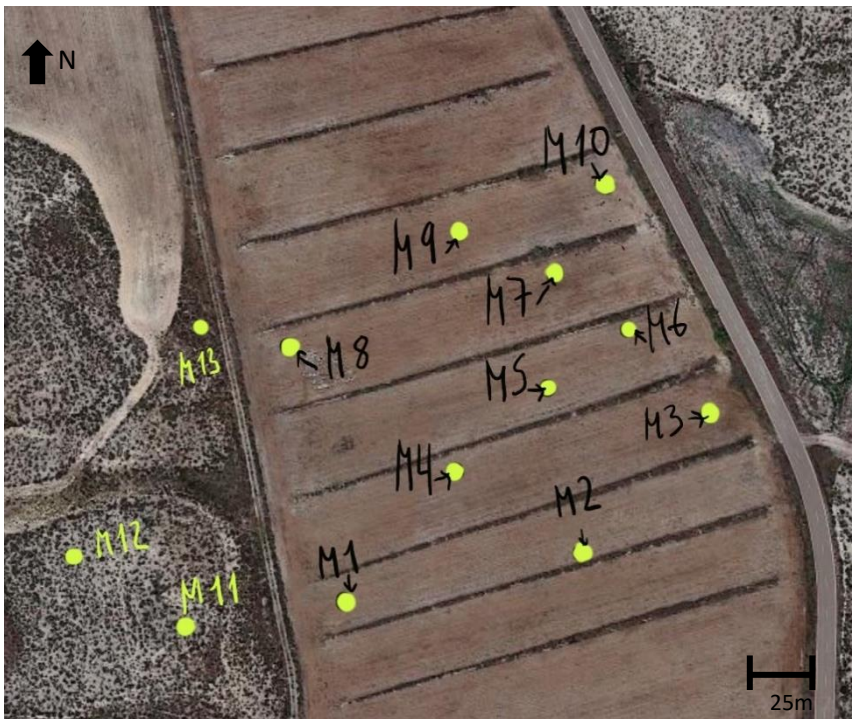


Fig. 15- Puntos en los que se han recogido las muestras de suelo.

Muestra	Bulk s. (10^{-6})
M1	851
M2	175
M3	202
M4	167
M5	200
M6	255
M7	178
M8	909
M9	172
M10	142
M11	8
M12	-0,3
M13	406

Fig. 16- Valores de susceptibilidad de las muestras obtenidos en laboratorio.

Se distinguen cuatro grupos de valores bien diferenciados que presentan rangos de valores muy distintos en relación con la localización de las muestras:

- Intervalo de $142,3 \cdot 10^{-6}$ SI a $255 \cdot 10^{-6}$ SI (Fig. 16, color rosa): la mayoría de las muestras de suelo recogidas en los campos de cultivo (M2 a M7, M9 y M10) presentan valores en este intervalo. Estas muestras están constituidas por limos, areniscas y gravas.
- Intervalo de $-0,3 \cdot 10^{-6}$ SI a $8 \cdot 10^{-6}$ SI (Fig. 16, color amarillo): las muestras M11 y M2, situadas en la ladera, presentan los valores de susceptibilidad más bajos. Estas muestras están compuestas fundamentalmente por yesos, margas y arcillas.

- Intervalo de $851 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$ a $909 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$ (Fig. 16, color verde): las muestras M1 y M8 se localizan cerca del camino y a la misma distancia del mismo.
- Valor único de $400 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$ (Fig. 16, color gris): la muestra M13 presenta un valor más bajo que las muestras tomadas al lado del camino pero más alto que los valores de las muestras tomadas en los campos de cultivo. Esta muestra se sitúa en la ladera pero muy próxima al camino.

Además de las muestras de suelo, se tomaron muestras de escoria (Fig. 17) en el camino y en sus proximidades. En la tabla resumen de la Fig. 18 se presentan los valores de susceptibilidad de dichas muestras. En esta tabla se puede observar que los valores de susceptibilidad son muy altos, oscilando entre $11890 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$ y $66490 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$. Los demás valores obtenidos de las escorias, que no aparecen en la Fig. 18, se muestran en el Anexo 10.



Fig. 17- Muestras de escoria. En la esquina superior izquierda los fragmentos que componen la muestra 5 y a su derecha la muestra 6.

Muestras	Bulk s. (10^{-6})
1	28970
2	11890
3	44930
4	14200
5	35700
6	66490

Fig. 18- Valores de susceptibilidad de las muestras de escoria.

5.3 MODELIZACIÓN MAGNÉTICA 2.5D

Se ha realizado una serie de perfiles (Fig 19 y Anexo 11) con el programa Gravmag para ver la posible geometría del relleno de las vales. Con el fin de modelizar anomalías similares a las obtenidas en campo, se ha modificado la geometría de los cuerpos, su susceptibilidad (teniendo en cuenta los valores obtenidos en el apartado anterior) y la profundidad de los cuerpos que generan dichas anomalías, intentando a su vez obtener la configuración más realista posible. Para ello, se han introducido varios parámetros, como la inclinación de $56,7^\circ$, la declinación de $0,53^\circ$, el campo magnético de $36,4 \text{ A/m}$ o un *half strike* de 500 m , el cual se refiere a la longitud que presentan los cuerpos perpendicularmente al perfil.

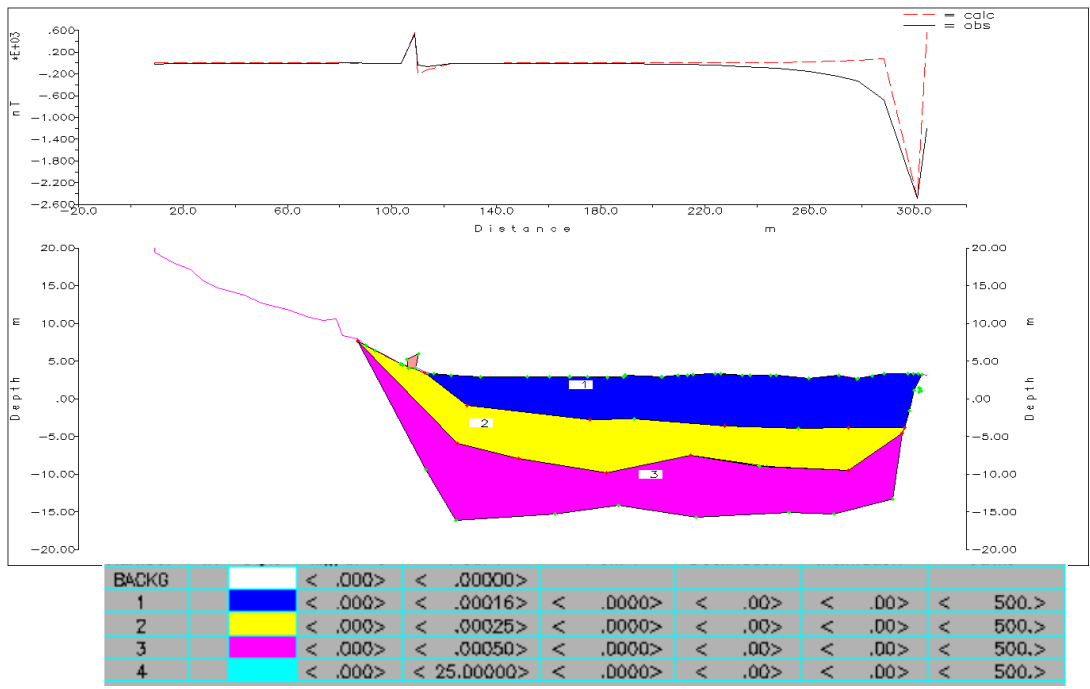


Fig. 19- Perfil 1, modelización a menor escala. El gráfico superior corresponde a la curva de anomalías, medida en campo, que generan los materiales (eje Y) en función de la distancia (eje X). En una línea roja discontinua se muestran las anomalías que producen los cuerpos que se han trazado en el perfil inferior. En este perfil se representa la profundidad en el eje Y, la distancia en el eje X y la topografía en una línea rosa continua.

Se ha realizado un primer corte general (Fig. 19) a menor escala para poder abarcar la gran anomalía negativa de hasta -2500 nT que se produce en la parte derecha. Para resolver esta anomalía se ha introducido una tubería a una profundidad de 2 m (midiendo hasta el punto central de la misma). A esta tubería (Fig. 20) se le ha asignado un valor de susceptibilidad de 28 SI teniendo en cuenta que la susceptibilidad del hierro suele tener valores que oscilan entre 25 y 125 SI, según las características del metal (O'Handley, 2000). Con la escala utilizada no ha sido posible realizar una tubería detallada con un espesor de pocos centímetros y el interior vacío por lo que se ha simplificado como un círculo de diámetro aproximado de 0,5 m. A partir de este valor y considerando un espesor de 3 cm se han podido realizar varios cálculos para obtener el diámetro real de la tubería, al tener la misma área el tubo de hierro que el polígono representado.

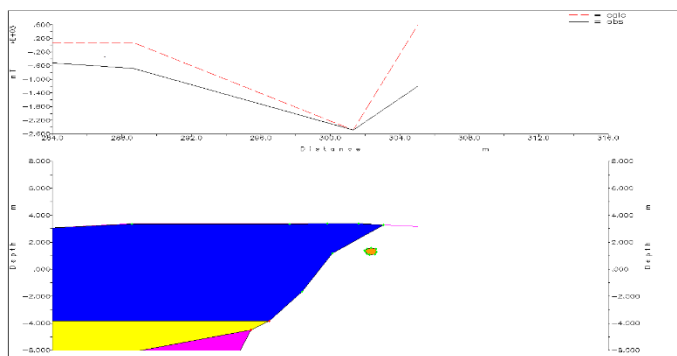


Fig. 20- Sección lateral derecha del perfil 1 con más detalle. El cuerpo naranja circular representa la tubería con una susceptibilidad de 38 SI.

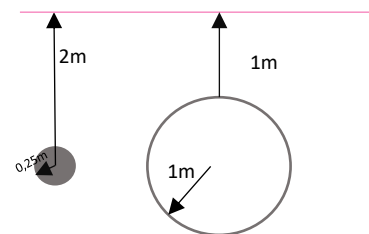


Fig. 21- A la izquierda, el círculo gris es la simplificación de la tubería en Gravmag y a la derecha la tubería que resulta al dejar el interior vacío y utilizar la misma cantidad de hierro (en color gris).

- Área del círculo de hierro representado (Fig. 21, círculo gris) = $\pi \cdot 0,25^2 = 0,19 \text{ m}^2 = 1900 \text{ cm}^2$
- Radio de la tubería =
 $\pi \cdot (R+3\text{cm})^2 - (\pi \cdot R^2) = 1900\text{cm}^2 \rightarrow (\pi R^2 + 9\pi + 6\pi R) - (\pi R^2) = 1900 \rightarrow$
 $9\pi + 6\pi R = 1900 \rightarrow R = 1900 - 9\pi / 6\pi \rightarrow R = 94 \text{ cm} = 0,94\text{m} \quad R+3 = 0,97\text{m}$
 La tubería tiene un diámetro aproximado de 2 m.

Aparte de la anomalía producida por la tubería, cabe destacar la anomalía de amplitud 500 nT que se sitúa a la izquierda (Fig. 19), aproximadamente a 110 m, causada por los materiales que conforman el camino. Se ha realizado un polígono superficial de susceptibilidad $120000 \cdot 10^{-6}$ SI. Para el resto de los polígonos, que representan las unidades de relleno con litologías y susceptibilidades similares, se han asignado valores mucho menores: el cuerpo azul tiene una susceptibilidad de $200 \cdot 10^{-6}$ SI, el amarillo de $300 \cdot 10^{-6}$ SI y el rosa de $500 \cdot 10^{-6}$ SI. Finalmente, el color blanco representa el *background* diamagnético (compuesto de yesos principalmente). Sin embargo, la geometría de esos polígonos en este perfil es extremadamente variable y aproximada, ya que se han realizado en una escala muy pequeña donde no se han podido apreciar las pequeñas variaciones producidas por estos cuerpos. Por este motivo ha realizado un segundo perfil.

El segundo perfil (Anexo 12) se ha llevado a cabo en la parte de la zona de estudio más al sur, que está menos afectada por las grandes anomalías que produce la tubería. Además, la anomalía dipolar producida a los 100 m aproximadamente, en la zona del camino, no tiene una amplitud excesiva (en torno a 25 nT). Aún así, la zona de la derecha no se ha podido tener en cuenta. La anomalía de la izquierda la puede producir un cuerpo muy superficial con una susceptibilidad de $10000 \cdot 10^{-6}$ SI. El relleno de la val lo compone un nivel superior con una susceptibilidad de $100 \cdot 10^{-6}$ SI. Se le ha asignado un valor un poco más bajo pero bastante similar al que presentaron la mayoría de muestras de suelo de los campos de cultivo analizadas en el laboratorio. Los rellenos inferiores tienen susceptibilidades mayores que aumentan progresivamente con la profundidad: $300 \cdot 10^{-6}$ SI el superior, $500 \cdot 10^{-6}$ SI el intermedio y $700 \cdot 10^{-6}$ SI el inferior. Como se puede ver, la zona de la derecha del perfil, que corresponde a la zona que está en el centro de los campos de cultivo, no se pudo ajustar al estar afectada por la anomalía de la tubería.

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la mayoría de mapas realizados de la zona de estudio, se han podido apreciar en el este de la zona las grandes anomalías generadas por la tubería que tienen una amplitud de intensidad de campo de hasta 5500 nT. Según el del tipo de mapa, esta anomalía puede llegar a afectar a las medidas tomadas en la zona central del área de estudio, llegando a alcanzar una longitud de onda de 80m. Los mapas de intensidad de campo y gradiente generales permiten caracterizar perfectamente el trazado de la tubería. De esta forma, se puede afirmar que la tubería corresponde al gaseoducto que conecta Barcelona-Valencia y Vizcaya al coincidir exactamente con el trazado del mismo, como muestra el Anexo 13.

Por otra parte, las anomalías que se producen en la zona del camino, con un valor máximo de 500 nT de amplitud de intensidad del campo magnético y de 150 nT de gradiente y un valor medio de aproximadamente 40 nT de amplitud de intensidad de campo y 30 nT de gradiente,

podría deberse a materiales antrópicos, como pueden ser los restos de vallas de hierro que se encuentran en el lateral este del camino, o a la antigua vía de ferrocarril de Utrillas-Zaragoza que pasaba por allí. Este ferrocarril fue inaugurado en 1904, con la finalidad de transportar los carbones (lignito) de la zona de Utrillas, Montalbán y Escucha y sacarlos al mercado nacional a través de Zaragoza. Sin embargo, en 1966 tuvo lugar el cierre de las minas y desmantelamiento del mismo. (Parque temático de la minería y el ferrocarril).

En el resto de la zona de estudio, se producen pequeñas variaciones de intensidad del campo magnético, que oscilan entre 45505 y 45515 nT. La mayoría de valores están en torno a 45505 nT de campo magnético y entre -1 y -4nT en el mapa de gradiente, aunque todavía quedan algunas zonas donde se producen pequeñas anomalías. El aumento progresivo de los valores de la intensidad de campo que se produce hacia el Norte puede ser debido a la influencia del gaseoducto sobre los materiales, ya que no presenta una trayectoria rectilínea sino que se adentra más hacia el interior de los campos a medida que se dirige hacia el Norte. Por otra parte, las laderas presentan valores de intensidad de campo magnético bastante homogéneos, excepto la zona de la ladera de cota más baja al estar erosionada (junto al sector2), donde se producen pequeñas variaciones de intensidad de campo (Anexo 14). Este fenómeno, se puede apreciar más claramente en el mapa de gradiente más detallado, donde se pueden ver pequeñas anomalías de hasta -10 nT en la ladera erosionada y sobre todo en el sector 2(Fig. 12). Por lo tanto, a grandes rasgos, se observa que se producen pequeñas anomalías en las zonas que presentan cotas inferiores. Esto puede ser debido a que estas zonas actúan como vía preferente de circulación de fluidos, transportando los minerales ferromagnéticos presentes, por ejemplo, en la zona del camino (fragmentos de escoria) y depositándolos en estas zonas de menor cota. Este proceso se puede producir por la disolución de los óxidos de hierro, a menudo con la mediación de bacterias reductoras del hierro. De forma que el Fe^{2+} en solución se puede oxidar para formar nuevos minerales de óxido de hierro o puede estar disponible para que las bacterias magnetotácticas mineralicen la magnetita (Roberts, 2015).

La realización de los mapas de intensidad de campo y de gradiente magnético ha permitido apreciar las diferencias que existen entre ambos. Se ha podido constatar cómo la magnitud de las anomalías del gradiente es distinta a la de la intensidad de campo. Además, cómo el gradiente, que corresponde a la diferencia de intensidad entre la distancia a la que se sitúan los dos sensores magnéticos, varía mucho más que el campo magnético, como muestran los mapas de los Anexos 7A y 7B: el mapa de intensidad de campo sigue midiendo las anomalías producidas por el gaseoducto a casi 100 m del mismo, mientras que el mapa de gradiente solo las mide hasta 25 m de distancia. Por lo tanto, el mapa de gradiente magnético muestra las anomalías producidas por los cuerpos más cercanos lo cual, en este caso, puede ser ventajoso ya que permite ver las pequeñas anomalías que se producen en el centro del campo de cultivo.

En el mapa de susceptibilidad (Fig. 14) destacan los valores altos, de aproximadamente $3 \cdot 10^{-6}$ SI, aunque los materiales del camino pueden llegar a cifras aún más altas, hasta los $4000 \cdot 10^{-6}$ SI. Como ya se ha comentado, estos materiales seguramente presentan susceptibilidades tan altas porque persisten restos de la antigua línea ferroviaria. A diferencia de estos restos del camino,

los materiales que componen la ladera son diamagnéticos (yesos principalmente) al presentar valores muy bajos de susceptibilidad, entre 0 y $30 \cdot 10^{-6}$ SI. La ladera que se sitúa más al Norte probablemente tenga los mismos valores de susceptibilidad pero como en esa zona no se han tomado medidas, el programa ha interpolado los datos, añadiendo los valores más cercanos y concediendo a estos materiales una susceptibilidad mucho más alta de la que seguramente presentan. En cambio, el suelo de los campos de cultivo tiene una susceptibilidad mayor que la de las laderas, 30 y $60 \cdot 10^{-6}$ SI, debido a que los rellenos de las vales contienen minerales ferromagnéticos. En la zona de menor cota del segundo campo de cultivo, también se puede observar una susceptibilidad un poco mayor, de hasta $110 \cdot 10^{-6}$ SI, posiblemente debido a que el agua tiende a acumular allí los elementos férricos presentes en la zona, como ya se ha comentado. Este fenómeno también ha sido observado por Quijano et al. (2011 a y b) en los alrededores de Zaragoza, donde los valores de la susceptibilidad varían según la elevación y la posición de la pendiente al estar relacionados con las partículas magnéticas producidas por los vehículos (gases de combustión de los motores, partículas producidas por la abrasión y corrosión del automóvil...), el movimiento del agua superficial y la redistribución de minerales magnéticos en los suelos cultivados.

Finalmente, la susceptibilidad aumenta hacia el Este hasta $120 \cdot 10^{-6}$ SI, al situarse cada vez más cerca de la carretera, por lo que se puede haber producido contaminación de los suelos adyacentes durante la construcción de la misma. Además, en algunos puntos específicos la susceptibilidad aumenta debido a elementos antrópicos concretos como puede ser la señal que muestra la presencia del gaseoducto en uno de los campos 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 $-0,3 \cdot 10^{-6}$ SI y $8 \cdot 10^{-6}$ SI) de las muestras M11 y M12 se localizan en las laderas formadas principalmente por yesos. Los suelos de los campos de cultivo presentan susceptibilidades mayores (entre $142,3 \cdot 10^{-6}$ SI y $255 \cdot 10^{-6}$ SI) debido a la presencia de minerales magnéticos en el relleno de las vales. La muestra M13, situada en la ladera al lado del camino, presenta una susceptibilidad un poco mayor ($406 \cdot 10^{-6}$ SI) al haberse podido contaminar por los óxidos de hierro generados por la actividad antrópica. Lo mismo sucede con las muestras M1 y M8, próximas a la zona por donde pasaba la vía ferroviaria y que presentan susceptibilidades más altas (entre $851 \cdot 10^{-6}$ SI y $909 \cdot 10^{-6}$ SI). Finalmente, los fragmentos de escoria presentan valores de susceptibilidad muy elevados (entre $11890 \cdot 10^{-6}$ SI y $66000 \cdot 10^{-6}$ SI) y son muy abundantes a lo largo de todo el camino, ya que son restos del balasto de la antigua línea ferroviaria Utrillas-Zaragoza.

Por lo tanto, el mapa de susceptibilidad aporta información sobre la susceptibilidad superficial de los materiales. Al compararlo con los mapas de intensidad de campo y gradiente se aprecia que los materiales ferromagnéticos que quedan de la línea ferroviaria son superficiales ya que presentan susceptibilidades altas en superficie pero no tan altas como serían si el cuerpo continuase con esa susceptibilidad en profundidad (como se comentará más adelante en los perfiles). A diferencia de estos materiales, en el mapa no se aprecia ni el más mínimo indicio de la tubería, lo que certifica que la parte superior de la misma no es superficial sino que se sitúa a cierta profundidad. 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, lo cual en este caso es ventajoso al poder obtener así la susceptibilidad de los materiales que componen el relleno superior de la val y poder ver claramente que las anomalías producidas por los vestigios de la línea ferroviaria son meramente superficiales.

En el primer perfil realizado (Fig. 19), para poder generar una anomalía de 2.500 nT, se introdujo una tubería representada por un polígono con susceptibilidad del hierro (38 SI) de 0,5m de diámetro y situado su centro a 2 m de profundidad, lo que equivaldría a una tubería de 2 m de diámetro, 3 cm de grosor con su parte superior situada a 1 m de profundidad. El valor de la profundidad es bastante realista ya que normalmente estas tuberías se sitúan a 1 o 2 m de profundidad. Sin embargo, el tamaño obtenido resulta excesivo para la tubería de un gaseoducto, aún habiendo utilizado un grosor mayor que el habitual en este tipo de tuberías, 1 o 2 cm. Este desajuste puede ser debido a distintos factores:

- 1) Haber asignado al hierro un valor de susceptibilidad menor que el que realmente tiene, lo que permitiría obtener una anomalía similar con un volumen de hierro menor y, por tanto, una tubería de menor tamaño.
- 2) La anomalía podría variar al modificar la geometría y al situar la parte superior de la tubería a menor profundidad, aunque el volumen de esta parte sea menor.
- 3) La imprecisión de la medida puede ser considerable ya que este perfil presenta una anomalía con una de las mayores amplitudes de toda la zona de estudio.

Por otra parte, en este perfil también se puede ver una anomalía en la zona del camino de 500 nT que se trata de una excepción al tener un valor de amplitud mucho mayor que las medias de las anomalías producidas por estos materiales. Por ello se representó un polígono de geometría poco realista al que se le asignó un valor de susceptibilidad mucho más alto que el que presentarían esos materiales.

La presencia del gaseoducto en el extremo Este de la zona de estudio y los elementos antrópicos del camino constituyeron una seria dificultad a la hora de realizar perfiles más detallados. Ello se debió a que estos elementos, muy especialmente el gaseoducto, producían grandes anomalías que no permitían apreciar las pequeñas anomalías que producen los rellenos de la val cercanos a los mismos. Para intentar evitar que la anomalía del gaseoducto encubriera estas pequeñas anomalías, se intentó realizar el segundo perfil (Anexo 12) lo más al sur posible (al ser la zona donde el gaseoducto está más alejado). Aún así, la zona que ha permitido conocer la posible geometría de la val sin verse afectada por estas anomalías mayores tiene una longitud de 70 m de los 200 m aproximadamente que tiene la val, por lo que este perfil solo aporta una vaga idea sobre la posible geometría del relleno de la val de la zona situada entre el centro y el lateral izquierdo de la misma. Para explicar la anomalía producida por los materiales del camino se ha generado un cuerpo superficial y se le ha adjudicado un valor de susceptibilidad de $10000 \cdot 10^{-6}$ SI SI, un poco menor que el valor de la escoria ya que ésta se presenta junto a otros materiales de menos susceptibilidad. En el relleno de la val se puede observar un aumento progresivo de la susceptibilidad con la profundidad, pasando de $100 \cdot 10^{-6}$ SI que presenta la unidad superior a $700 \cdot 10^{-6}$ SI que presenta la unidad inferior. En general se puede ver una geometría de fondo plano, aunque no está del todo claro al no poder contar con la parte derecha del perfil. Por otra parte, hay que tener en consideración que el nivel de acumulación N3 (de

edad postbronce/post-romano) presente en esta zona se puede encontrar encajado en el depósito de una unidad anterior (situada a mayor altura), que puede engrosarse y deformarse hasta alcanzar potencias de al menos 16 m debido a un proceso de subsidencia kárstica sinsedimentaria. Según Gutiérrez et al., 1997 el barranco de Torrecilla ha experimentado una evolución compleja debido al fenómeno de subsidencia kárstica sinsedimentaria en dicha unidad.

Finalmente, quedan por explicar la incógnita del origen de los minerales ferromagnéticos y la causa del aumento de la susceptibilidad del relleno de las vales con la profundidad. Una posibilidad sería que estos minerales procediesen de un área fuente cercana, sin embargo, la mayoría de los elementos que conforman esta zona son yesos por lo que esta opción no es factible. Otra opción sería que el hierro sea producto de la actividad antrópica, como pueden ser la agricultura. La agricultura podría favorecer la formación de minerales magnéticos por diversos motivos, como por ejemplo, la fertilización, que aumenta la materia orgánica del suelo o por el crecimiento de los cultivos, que toman Fe y producen una migración vertical del mismo en el perfil (Sapkota et al., 2011). Sin embargo, el contenido de hierro que aporta dicha actividad al terreno no parece que sea suficiente si se tiene en cuenta que la susceptibilidad del nivel inferior de la val, de edad postbronce/postromana, es bastante alta, $700 \cdot 10^{-6}$ SI. Una tercera opción sería que se hubieran generado por los paleoincendios naturales o de origen antrópico (Peña et al, 1993) que, a su vez, eliminarían la cubierta vegetal y favorecerían la erosión de las laderas y la sedimentación en las vales. El principal problema de esta hipótesis es que los incendios suelen ser procesos puntuales y, por ello, no podrían afectar a la susceptibilidad de todos los niveles de acumulación. La última opción sería que el hierro fuera de origen natural y que su formación estuviera condicionada por el drenaje del suelo, el pH, la presencia de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico. En general, en este proceso son fundamentales la presencia de bacterias y las condiciones climáticas (Vázquez-Castro et al., 2018).

En definitiva, los materiales ferromagnéticos presentes en el relleno inferior de la val tuvieron un origen fundamentalmente natural, mientras que los materiales ferromagnéticos presentes en el relleno superior están más influenciados por las actividades antrópicas. Por lo tanto, según las teorías presentadas sobre los factores que causan la incisión y relleno de las vales, esta hipótesis concuerda con el modelo evolutivo propuesto por Soriano y Calvo (1987). Según este modelo, N3 se produjo en un clima más frío y no estuvo tan condicionado por la actividad humana. Finalmente, los horizontes superficiales presentan materiales ferromagnéticos provenientes de la antigua vía ferroviaria y la carretera que han sido movilizados hasta los campos fundamentalmente por la erosión hídrica, la acción eólica y la labor de cultivo.

7. CONCLUSIONS

The measurements made during the magnetic prospection, those taken in the field by the susceptometer and the analyses of the specimens carried out in the laboratory have provided the following conclusions:

Concerning the materials that constitute the study area, their susceptibility and other anthropic elements, the following conclusions can be adressed:

- In the east of the study area, there is a gas pipeline at a depth of approximately 2 m (mesuring up to the central point of it), that generates large anomalies that can reach up to 5500 nT.
- The area where the path is located, has a very high susceptibility in surface due to the fact that a railway line used to pass through there and there are still remains of it.
- The slopes that are situated in the surroundings of the valley are paramagnetic and are mainly formed by miocene gypsum, marl and clays.
- The quaternary filler of the bottomed-flat valleys have a higher susceptibility than the slopes due to the magnetic minerals that they present.

On the other hand, according to the second cross-section, the basal geometry of these type of valleys is flat although this information is not very reliable as only the left side of the profile has been obtained. The cause of this has been the large anomalies caused by the gas pipeline and the railway line remains that have not allowed us to see many of the small anomalies produced by the fillings in the flat-bottomed valley. Therefore, for the characterization of the flat-bottomed valleys, it is better to carry out a previous study of the chosen area in order to avoid pipes and other infrastructures that produce exessively large anomalies. For example, in this case it would be better to have extended the study area towards the South where the effect of the gas pipeline is lower.

Appart from that, it has been possible to obtain certain conclusions about the distribution and origin of the magnetic minerals in the area. Generally, lower altitude areas present higher susceptibility as they are a preferential route for the circulation of fluids and ferromagnetic minerals. In addition, an increase in susceptibility has been observed in flat-bottomed valleys fillers with depth. The deeper ferromagnetic minerals of these valleys could have a natural origin, while in the origin of the ferromagnetic minerals of the upper filler, the anthropic factor (agriculture and other anthropic effects) had more importance.

Finally, it would be interesting to contrast these results with those that could be obtained using other geophysical techniques (seismic prospecting, goeradar, gravimetry,...) in order to carry out a much more complete characterization of the flat-bottomed valleys.

8. BIBLIOGRAFÍA

Anadón, P., Colombo, F., Esteban, M., Marzo, M., Roble, S., Santanach, P. y Solé, L. (1979): Evolución tectonoestratigráfica de los Catalánides. *Acta Geol. Hispánica*. 14: 242-270.

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.

British Geological Survey, Geomagnetism (en línea). World Magnetic Model 2020 Calculator (Fecha de consulta: 13/06/2020) Disponible en: <https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html>

Castelltort, X. (2016): Evolución del drenaje en cuencas erosivas durante el Neógeno-Cuaternario. Margen oriental de la Cuenca del Ebro. *Geogaceta*. 60: 51-54.

Constante, A. (2009): Estudio geoarqueológico de los registros holocenos del sector central del valle del Ebro. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 371p.

García-Castellanos, D., Vergés, J., Gaspar-Escribano, J. y Cloetingh, S. (2003): Interplay between tectonics, climate, and fluvial transport during the Cenozoic evolution of the Ebro Basin (NE Iberia). *Journal of Geophysical Research*, 108 (B7), 2347.

GEM systems Inc (2000): GSM-19 v6.0 Instruction Manual. Ontario (Canada), 85p.

Gutiérrez, F. y Arauzo, T. (1997): Subsistencia Kárstica sinsedimentaria en un sistema aluvial efímero: El Barranco de Torrecilla (Depresión del Ebro, Zaragoza). *Cuadernos de Geología Ibérica* 22, 349-372.

Gonzalez-Samperiz, P., Valero-Garcés, B., Moreno, A., Morellón, M., Navas, A., Gayarre, J. y Delgado-Huertas, A. (2008): Vegetation changes and hydrological fluctuations in the Central Ebro Basin (NE Spain) since the Late Glacial period: Saline lake records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259: 157-181.

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.

Muñoz, A., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Pardo, G., Pérez, A. y Villena, J. (2002). Ebro basin (northeastern Spain). En: *The Geology of Spain* (Gibbons, W. y Moreno, T., eds), Geological Society of London, 370-385.

O'Handley, R.C. (2000) : *Modern magnetic materials: principles and applications*. John Wiley & Sons, New York, 727p.

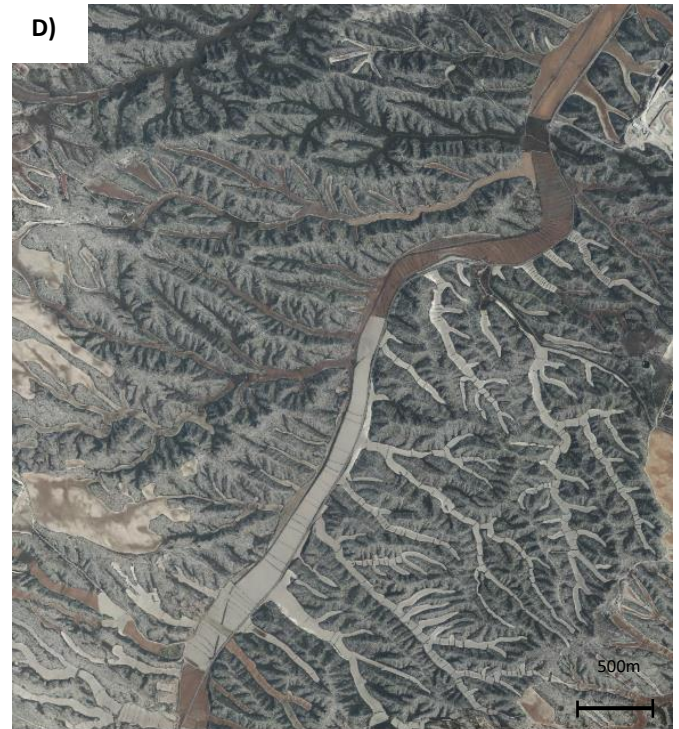
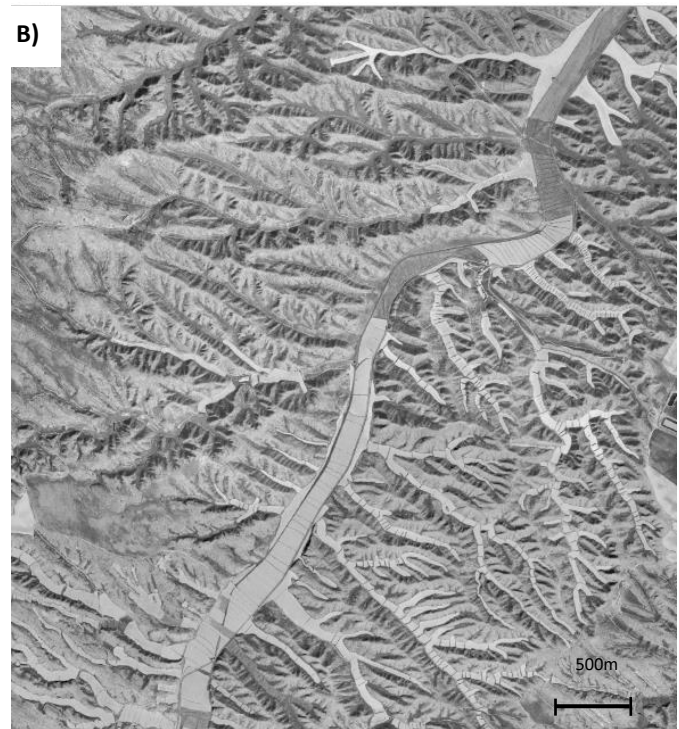
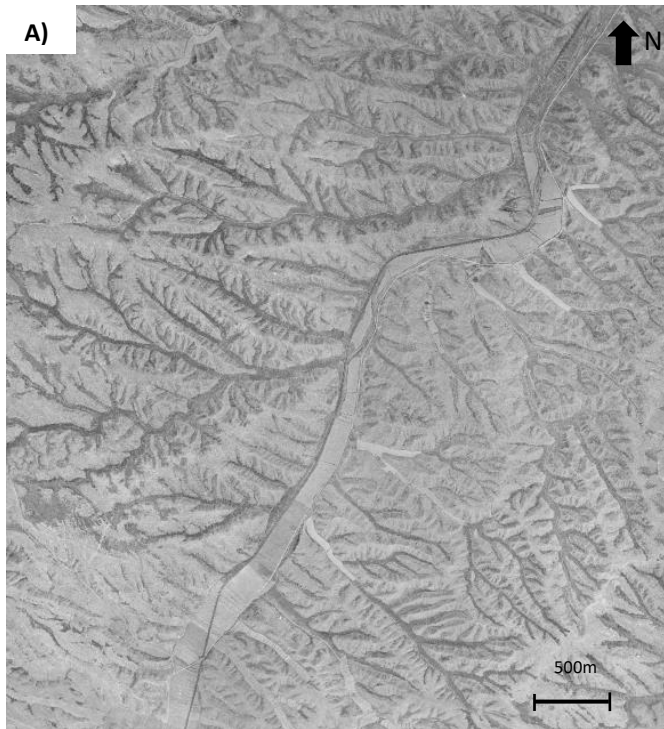
Pardo, G., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Muñoz, A., Pérez, A., Pérez-Rivarés, F.J., Vázquez-Urbez, M. y Villena, J. (2004): La Cuenca del Ebro. *Geología de España*, IGME.

Parque temático de la minería y el ferrocarril (en línea). Utrillas minero. Fecha de consulta (23 / 06/2020). Disponible en:

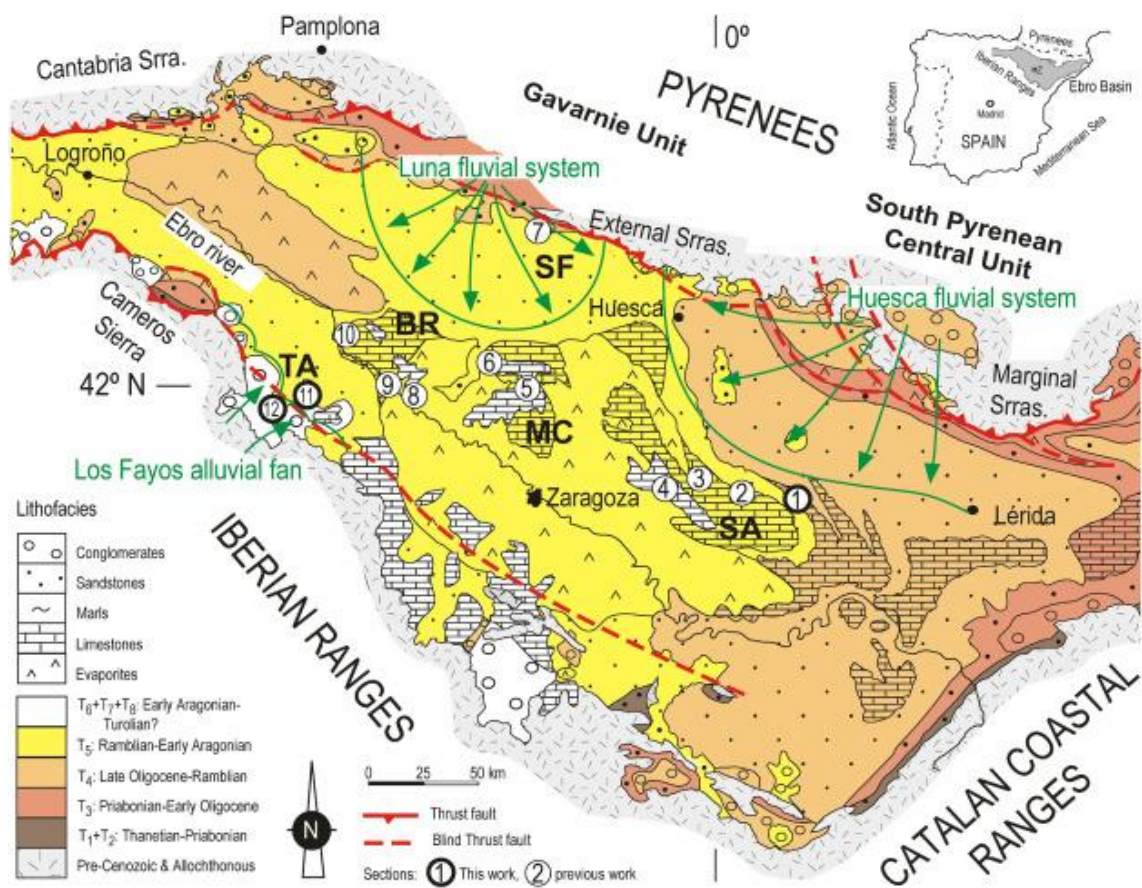
<<https://parquemineroutrillas.com/utrillas-minero/#1492788454361-a9302ae7-15af>>

- Pedley, R.C., Busby, J.P. y Dabek, Z.K. (1993): GRAVMAG user manual. Interactive 2.5D gravity and magnetic modelling. British Geological Survey, Technical Report WK/93/26/R, 75 p.
- 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., Echeverría, M.T., Petit-Maire, N. y Lafont, R. (1993): Cronología e interpretación de las acumulaciones holocenas de la Val de las Lenas (Depresión del Ebro, Zaragoza). *Geographicalia*,30: 321-332.
- 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 geoarqueología. 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
- 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.
- Roberts, A.P (2015): Magnetic mineral diagenesis. *Earth Science Reviews*, 151: 1-47.
- 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.
- Sapkota, B., Cioppa, M. y Gagnon, J. (2011): "Investigation of the changes in magnetic properties and chemicals properties of soil Turing plant growth in a controlled environment". *Environmental Earth Science*.
- 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.
- Quijano, L., Gaspar, L., Chaparro, M. y Navas, A. (2011a): Magnetic susceptibility in topsoils and bulk cores of cultivated Calcisols: *Latinmag Letters*, 1(2), D09: 1-6.
- Quijano, L., Gaspar, L., López-Vicente, M., Chaparro, M., Machín, J. y Navas, A. (2011b): Soil magnetic susceptibility and surface topographic characteristics in cultivated soils : *Latinmag Letters*, 1(2), D10 :1-6.
- Quirantes, J. (1978): Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros. Institución Fernando el Católico, Zaragoza, 200 p.
- Vázquez-Castro, G. y Solís-Castillo, B. (2018): Magnetismo ambiental en suelos vírgenes y antropizados. En: *Magnetismo ambiental y cambio climático*. Colecciones CIGA (Centro de investigaciones en geografía ambiental). Ciudad de México, México, 85-139.

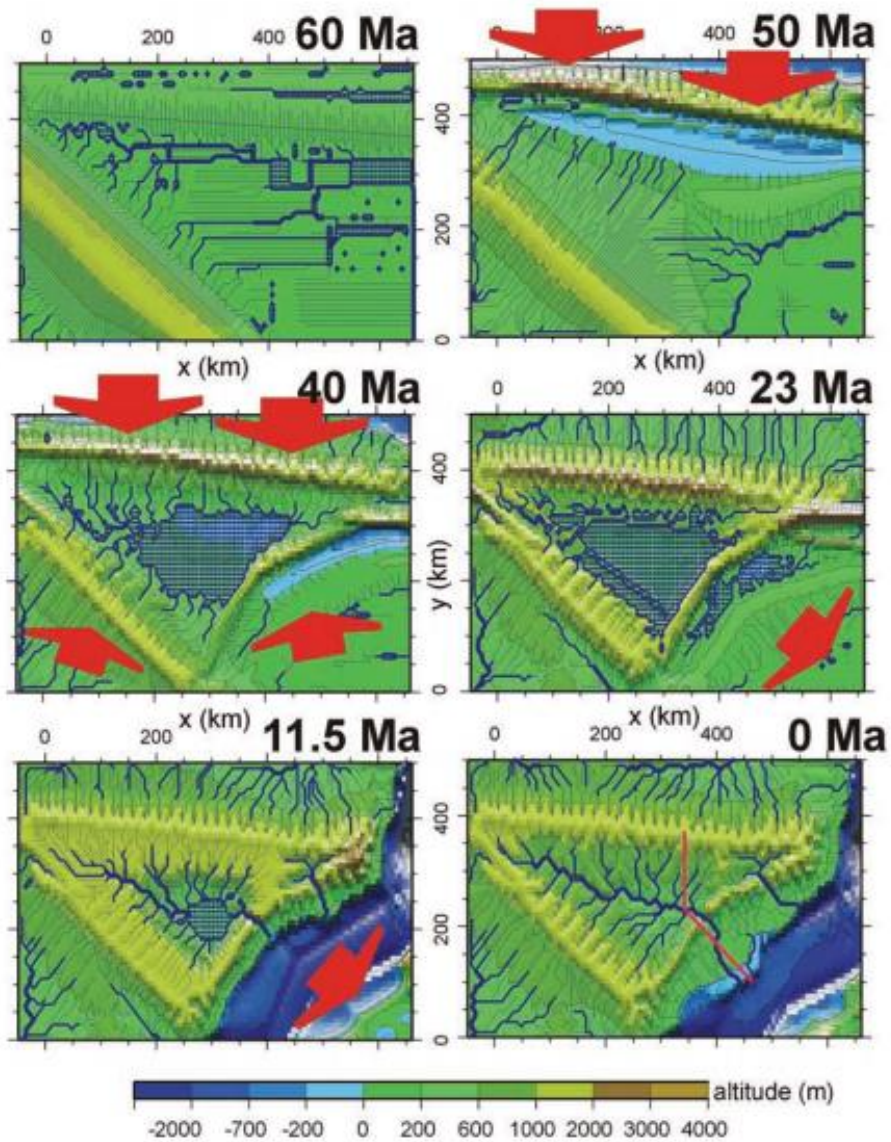
9. ANEXOS



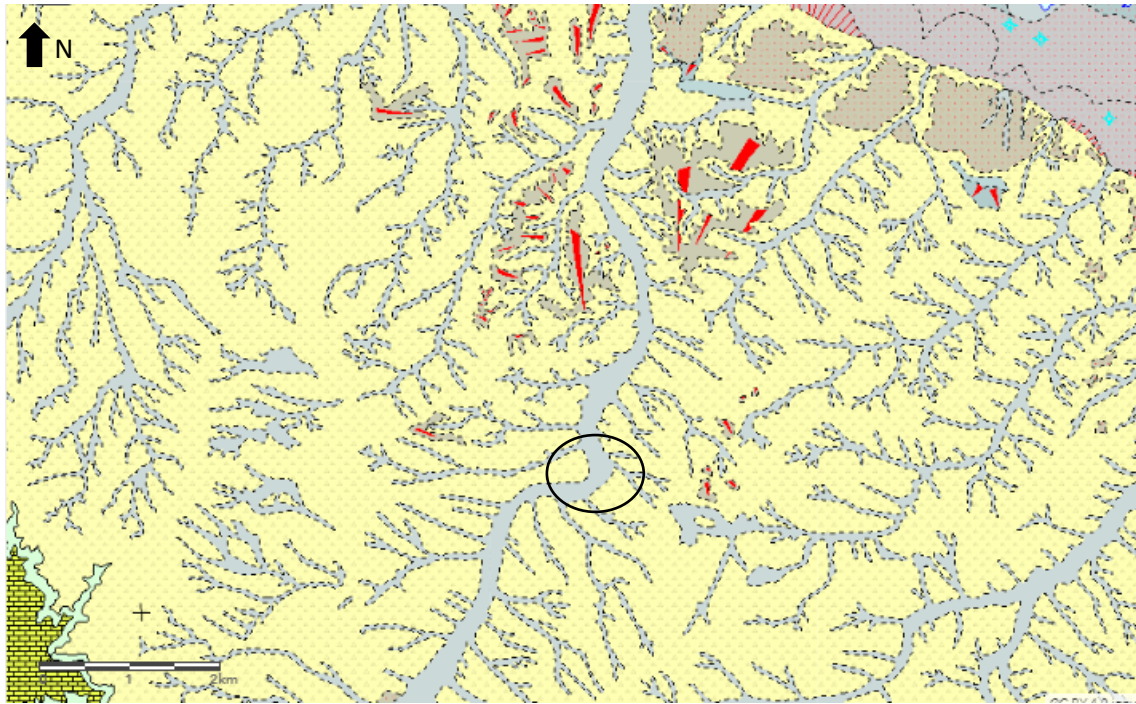
Anexo 1- Ortofotos de vuelos históricos existentes. A) Ortophoto tomada por el vuelo americano, serie B de 1956-1957. B) Ortophoto del vuelo OLISTAT realizado entre 1997-1998. C) Ortophoto del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) tomada en 2006 y D) Ortophoto del PNOA de 2015.






Anexo 2 – Mapa geológico en el que se muestra la distribución de las unidades tectosedimentarias de la Cuenca del Ebro. (Tomado de Pérez-Rivarés et al., 2018)



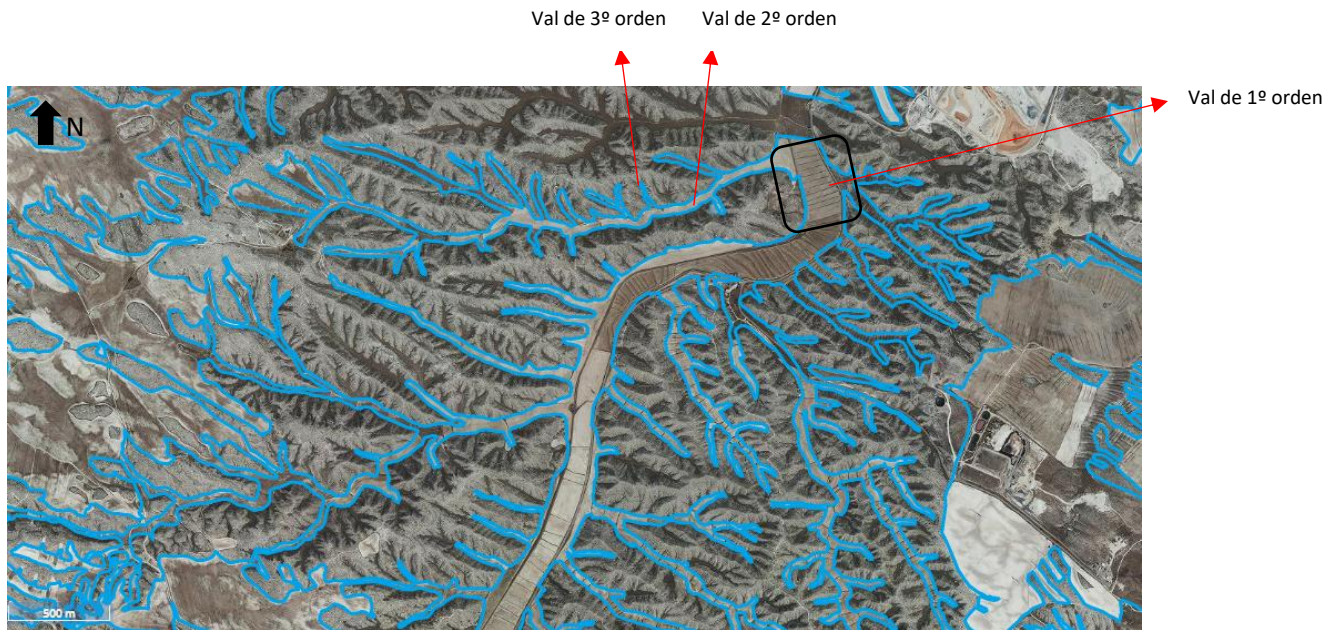
Anexo 3 - Modelo de topografía y drenaje de García Castellanos et al. (2003). La cuenca de antepaís se comenzó a formar hace 50 Ma. La cuenca se cerró por el acortamiento tectónico de las Catalánides y la elevada tasa de evaporación/precipitación hace 40 Ma. La extensión de la cuenca de Valencia propició el crecimiento pasivo de las Catalánides hace 23 Ma. Una de las corrientes del nuevo escarpe capturó el sistema endorreico hace 11.5 Ma. Actualmente, la incisión afecta a toda la cuenca.



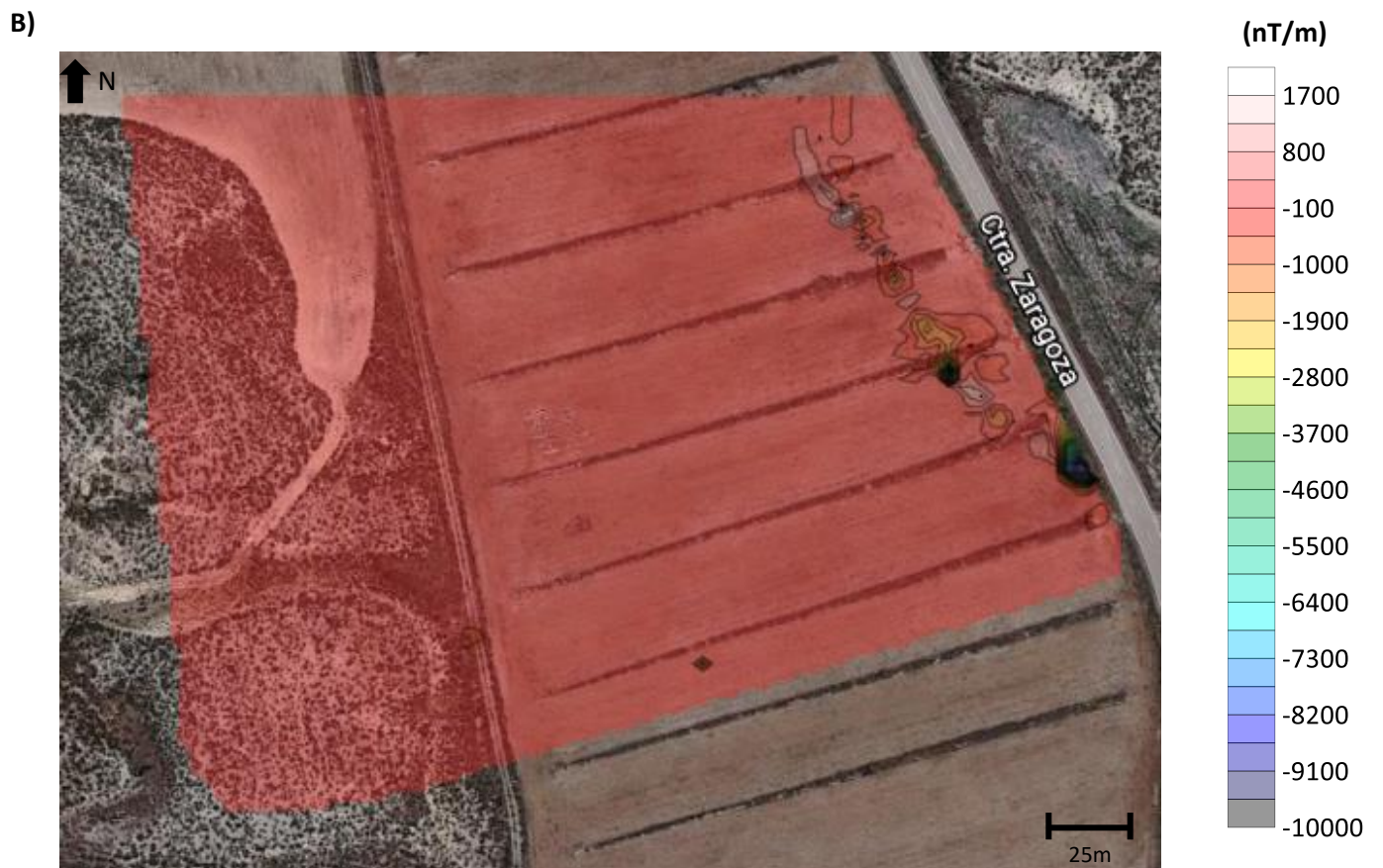
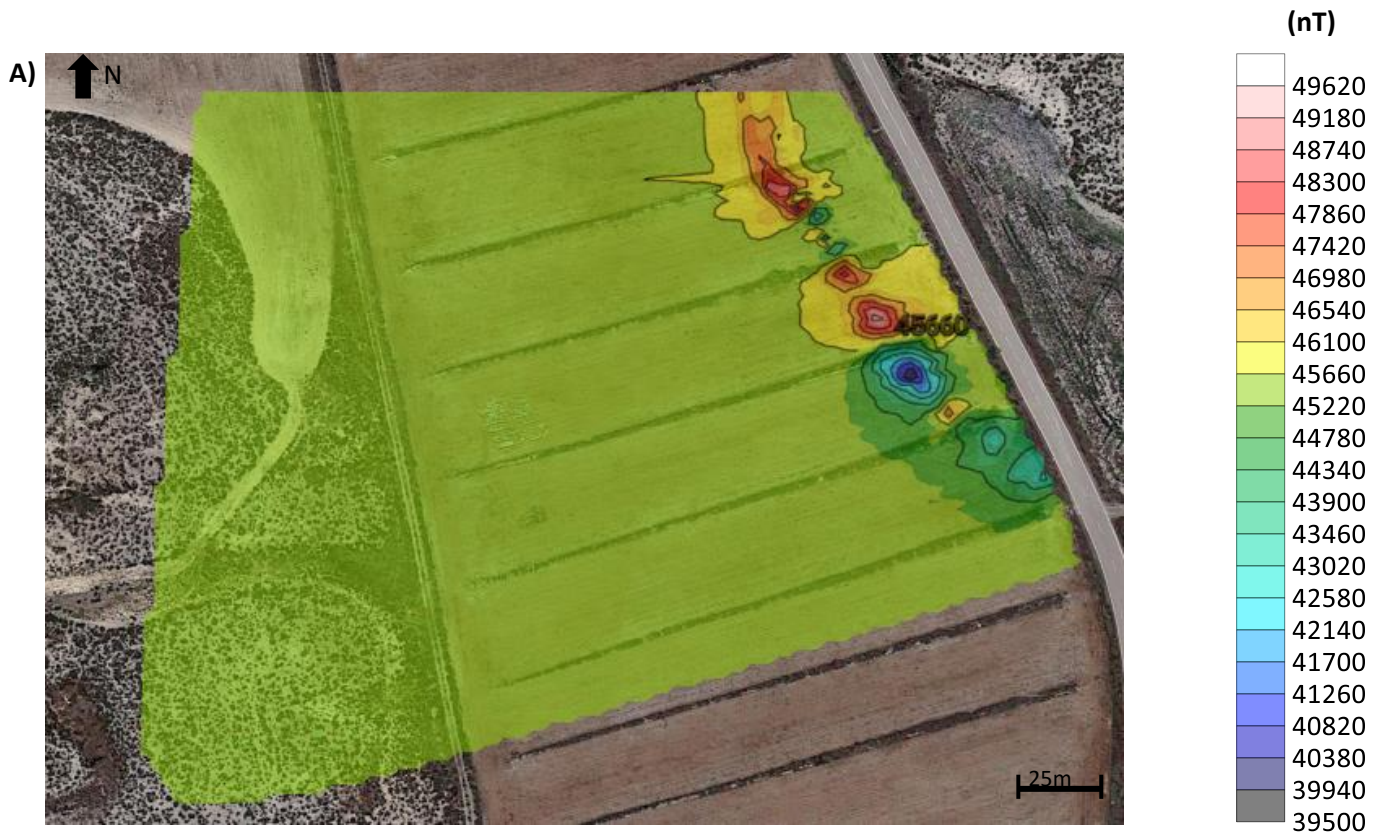
Leyenda

	Yesos nodulares con margas y arcillas		Cantos, limos yesíferos y arcillas. Fondos de valle plano
	Gravas y cantos en matriz limo-arcillosa. Glacis		

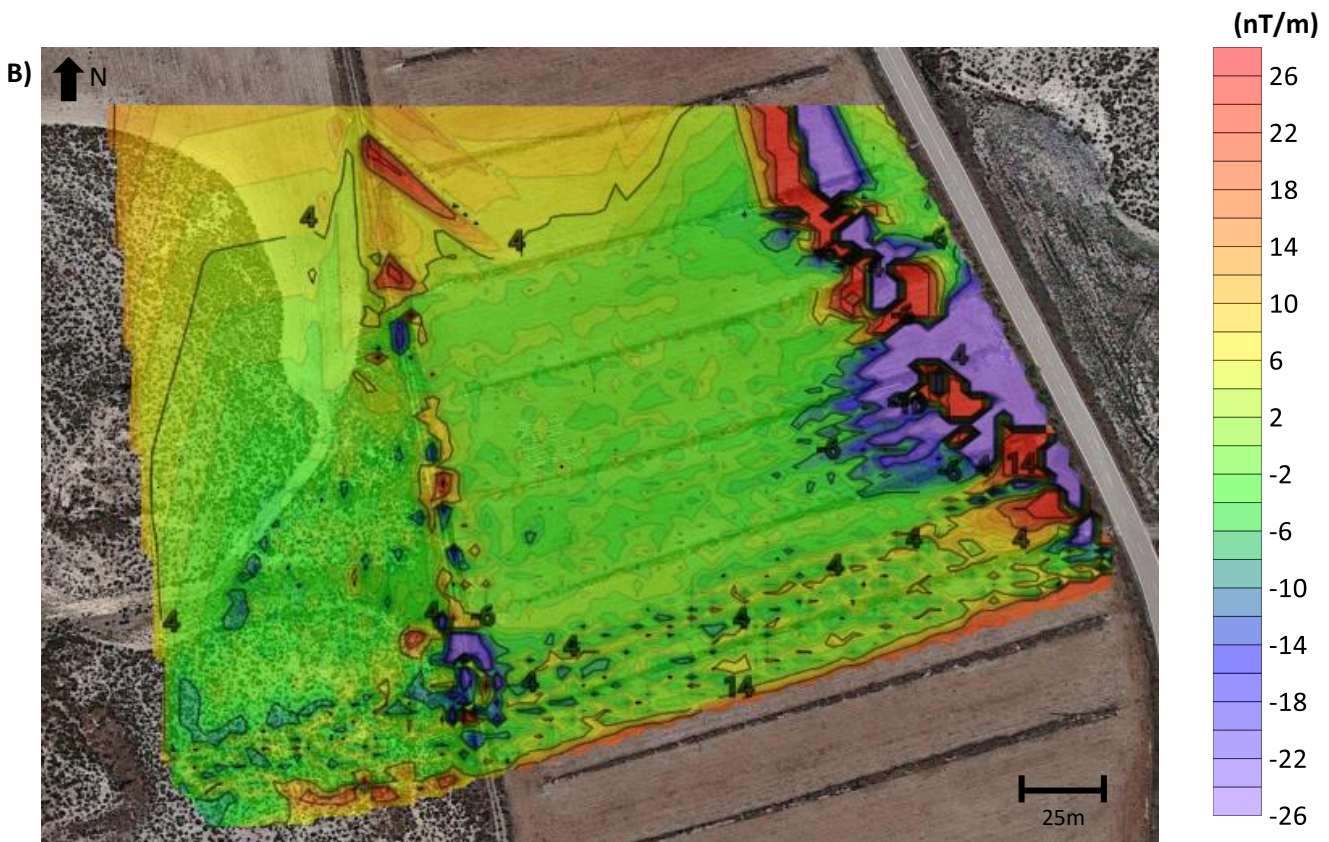
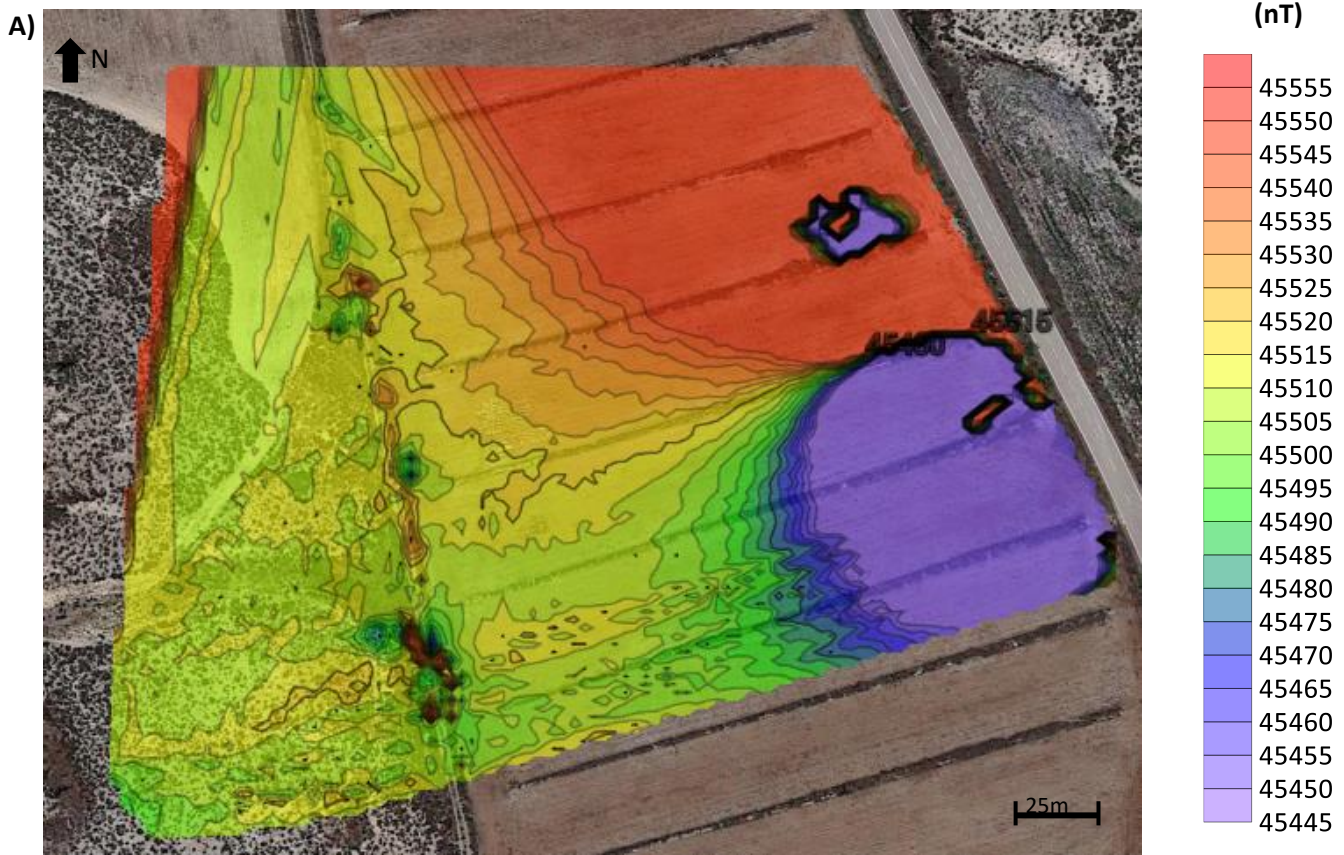
Anexo 4- Mapa geológico de la zona en el que se muestra el área de estudio delimitada con un círculo. El color amarillento representa los yesos miocenos de la Fm. Zaragoza y en la parte inferior izquierda las calizas miocenas de la Fm. Alcubierre. El color azul claro representa los rellenos holocenos de los valles de fondo plano.



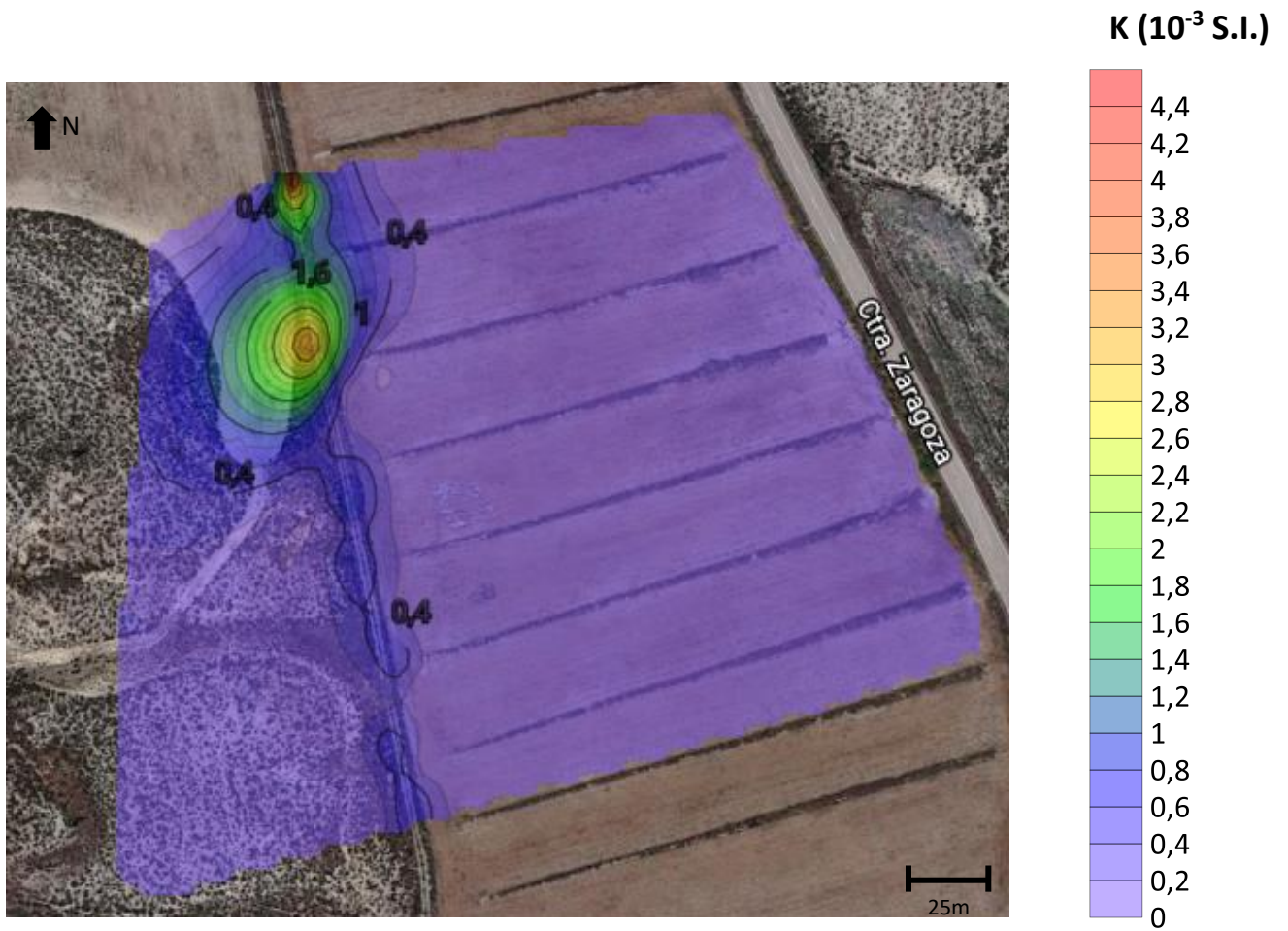
Anexo 5- Zona de estudio (enmarcada con un rectángulo) y sus alrededores. Las vales, delimitadas en color azul, conforman una red dendrítica que presenta morfología meandriforme. En el centro de la imagen, atravesándola de arriba abajo con dirección aproximada de N35E, se reconoce la val de primer orden de Torrecilla de Valmadrid. Las vales de segundo orden se disponen aproximadamente perpendiculares a la val principal y sus ramificaciones de tercer orden son de menores dimensiones.



Anexo 6- Mapas generales: A) Intensidad del campo magnético. B) Gradiente



Anexo 7- Mapas más detallados: A) Variación de la intensidad del campo magnético.
B) Gradiente.



Anexo 8- Mapa general de susceptibilidad.

Muestra	Masa (g)	Densidad estimada (g/cm ³)	Volumen (cm ³)	s. total (10 ⁻⁶ SI)	Bulk s. (10 ⁻⁶ SI)	Mass.s (cm ³ /g)
M1	17	1	17	1446.82	851.07	851.07
M2	16	1	16	280.0	175.0	175.0
M3	16	1	16	323.44	202.15	202.15
M4	17	1	17	285.49	167.93	167.93
M5	19	1	19	380.78	200.41	200.41
M6	14	1	14	357.66	255.47	255.47
M7	19	1	19	338.00	177.9	177.9
M8	21	1	21	1910.9	909.95	909.95
M9	20	1	20	345.25	172.62	172.62
M10	20	1	20	285.42	142.71	142.71
M11	28	1	28	21.99	7.85	7.85
M12	29	1	29	-0.84	-0.289	-0.289
M13	26	1	26	1057.74	406.82	406.82

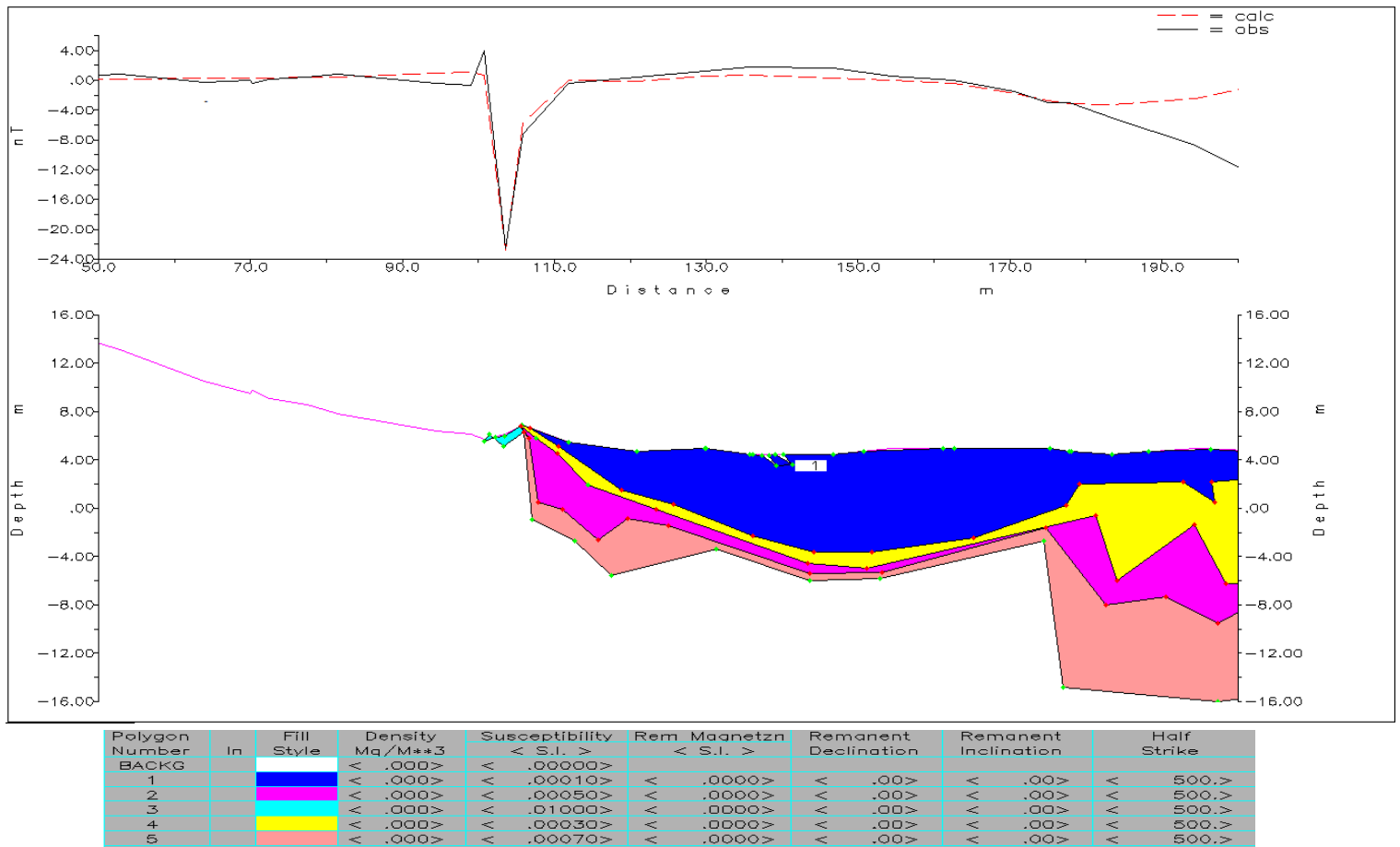
Anexo 9- Resultados obtenidos en el laboratorio de las muestras de suelo por medio de un susceptómetro KLY3 y una balanza de precisión. A partir de estos valores se ha podido calcular la susceptibilidad másica y la *bulk susceptibility*.

Muestras	Masa (g)	Densidad estimada (g/cm ³)	Volumen (cm ³)	Total s. (10 ⁻⁶ SI)	Bulk s. (10 ⁻⁶ SI)	S. másica (cm ³ /g)
1	16	2.7	5.93	17169.66	28973.8	10731.04
2	15	2.7	5.55	6606.04	11890.87	4404.027
3	15	2.7	5.55	24962.87	44933.17	16641.91
4	14	2.7	5.18	7367.417	14208.59	5262.44
5	22	2.7	8.15	29084.67	35694.82	13220.3
6	26	2.7	9.62	64029.99	66492.68	24626.92

Anexo 10- Resultados obtenidos en laboratorio de las muestras de escoria.



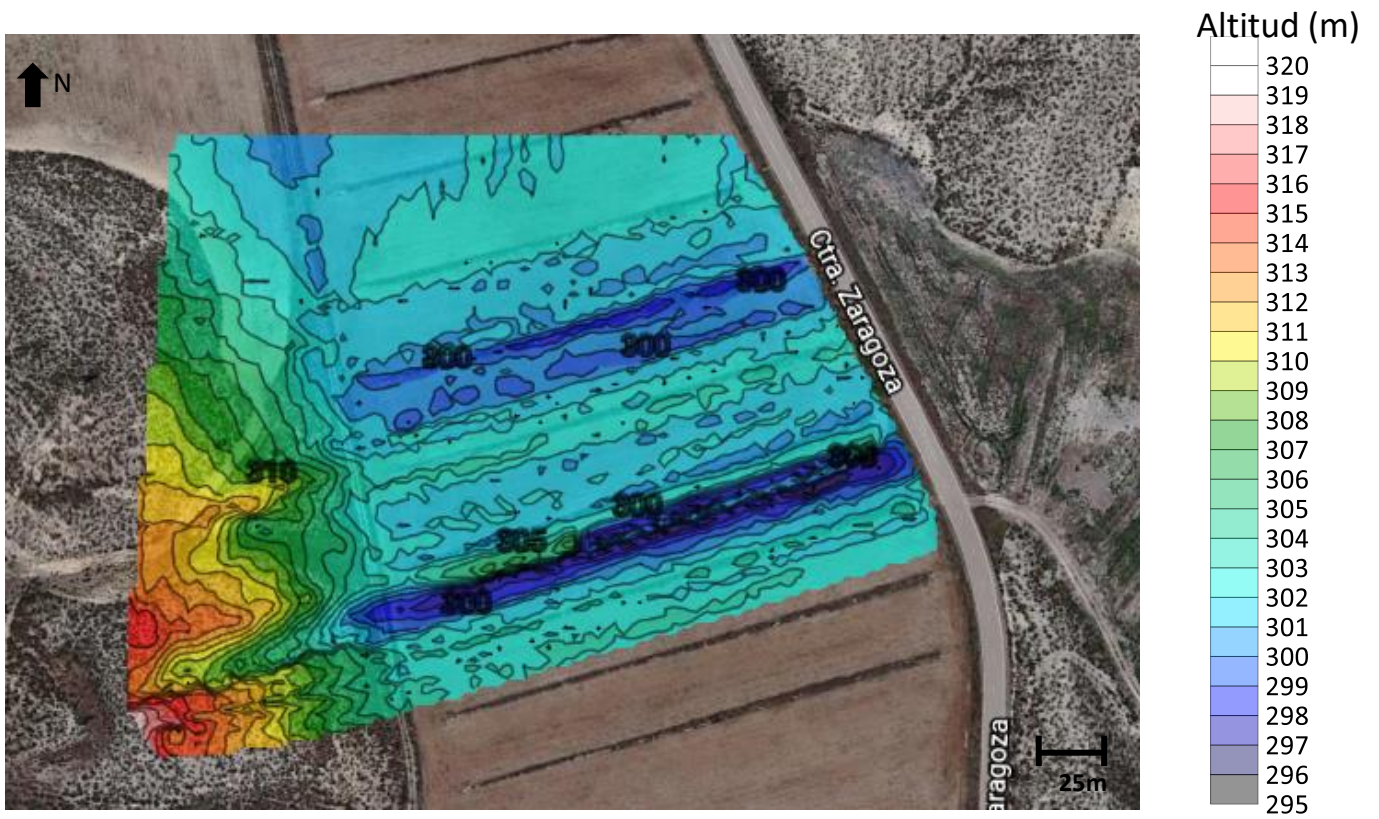
Anexo 11- Localización de los perfiles de modelización realizados.



Anexo 12- Perfil 2, modelización a mayor escala.



Anexo 13- Trazado del gasoducto según el mapa obtenido del IDE Aragón (Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón)



Anexo 14- Mapa de la altitud de la zona realizado con los valores medidos por el GPS.