



Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Geografía e Historia

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (TIGs)**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

La aplicación de las TIGs en el campo de la espeleología

Gema Martín De Lucas

TRABAJO FIN DE MÁSTER. CURSO: 2011-2012

CONVOCATORIA: Junio

TUTOR: Tanarro García, Luis Miguel. Depto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación y estado de la cuestión.

2. OBJETIVOS

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. El karst del macizo de Cotiella.

4. MATERIAL

4.1 Datos e información de partida.

4.1.1. Datos procedentes de fuentes externas.

4.1.2. Datos de elaboración propia.

4.2. Aplicaciones informáticas utilizadas.

4.2.1. Programas de SIG y CAD.

4.2.2. Programas específicos de topografía, representación de cavidades y cambios de formatos.

4.2.3. Programas específicos de transformación del sistema de referencia de coordenadas.

5. METODOLOGÍA

5.1. Homogeneización de la información.

5.1.1. La elección del sistema de referencia espacial.

5.1.2. La integración de las capas de información en una geodatabase.

5.1.3. La transformación de las capas de información.

5.2. Obtención de datos morfométricos y geológicos de las cavidades.

5.3. Cartografía geológica de cavidades.

5.4. Cartografía y visualización en 3D de las cavidades.

6. RESULTADOS

6.1. La elaboración de una base de datos de las cavidades.

6.2. Cartografía espeleológica en su contexto geológico.

6.3. La visualización y la representación en 3D de las cavidades.

7. CONCLUSIONES

8. BIBLIOGRAFÍA

AGRADECIMIENTOS

1. INTRODUCCIÓN

La **espeleología** tiene por objeto la exploración y estudio de las cavidades subterráneas. Se catalogan todo tipo de descubrimientos subterráneos, se topografía y se investiga su morfología. Su estudio es de interés para geógrafos, geólogos, biólogos, paleontólogos, antropólogos, deportistas, etc.

Hay cuevas de yeso, de lava, de hielo pero la gran mayoría de cavidades subterráneas se localizan en terrenos constituidos por roca calcárea. Se encuentran en todo el mundo, pero sólo una parte han sido exploradas y documentadas. Países como Francia, el Reino Unido y los Estados Unidos, donde la espeleología ha sido popular desde hace muchos años, tienen ampliamente documentada la distribución de sus sistemas de cavidades.

Los primeros humanos que se adentraron en el oscuro mundo del subsuelo no eran espeleólogos explorando el medio en el que entraban, sino buscando refugio y protección. Entrar en una cueva no nos convierte en espeleólogos.

Es en el siglo XVII cuando, entre otros, el jesuita Athanasius Kircher (1602?-1680) se atreve a ir a las profundidades de la tierra para conocerla más y mejor. Su obra "*Mundus Subterraneus* (1664–1678)" puede considerarse el primer trabajo espeleológico pues, aunque aún se habla de dragones y monstruos, constituye el primer intento de hacer un análisis sistemático sobre este nuevo espacio. Se refiere a las cavidades como "canales internos conectados con válvulas y cámaras de fuego responsables de las erupciones volcánicas y el equilibrio térmico de la Tierra".

El gran giro que dará lugar a la espeleología moderna se produce a finales del siglo XIX. Fue el francés Edouard-Alfred Martel (1859-1938) quien acuñó el término y describió las primeras técnicas de progresión con las que pudo explorar 250 cavidades por diferentes países de Europa y en Estados Unidos, algunas de más de 250 metros de profundidad, colgado de una cuerda de cáñamo y sentado sobre un tablón con una vela en la mano. Fue el primero que consideró la exploración directa como un medio para conocer las cavidades y estudiarlas con rigor científico. Es reconocido como el padre de la espeleología moderna. En 1894 publicó la obra *Les abismes* y en 1895 fundó la Sociedad Espeleológica de Francia.

En España la espeleología comenzó de la mano del geólogo Norbert Font i Sagué (1874-1910). Conoció a Martel en el transcurso de la primera visita del espeleólogo francés a Cataluña (1896). Entusiasmado con la práctica de la nueva ciencia, se dispone a divulgar la espeleología en el país.

Por tanto, las nuevas técnicas espeleológicas llegaron a España del contacto de los grupos españoles con grupos franceses. En 1954 se creó una comisión para coordinar los grupos existentes en todo el Estado. Así, tras la Comisión Técnica de Exploraciones Subterráneas, surge la Comisión Nacional de Exploraciones Subterráneas. Las nuevas técnicas de exploración supusieron una disminución considerable en peso y volumen, lo que abrió la posibilidad de que muchas personas se animaran a la realización de la actividad espeleológica. Esta generalización de la actividad tomó un giro deportivo, por lo que la actividad subterránea se encuadró dentro de la Federación Española de Montaña hasta que en 1983 se creó la Federación Española de Espeleología, que se encuadra también como una actividad deportiva más. Poco tiempo después, de la mano del Estado de las Autonomías, aparecerán las distintas Federaciones Territoriales de Espeleología en las diferentes Comunidades Autónomas hasta un total de 15 en la actualidad.

Tras esta breve introducción sobre el nacimiento y desarrollo de la espeleología, cabría preguntarse *¿cómo se buscan, exploran y representan las cavidades?* Y, asimismo, en el contexto en el que se enmarca este Trabajo Fin de Máster (TFM) *¿qué papel desempeñan las Tecnologías de la Información Geográfica en la representación de las cavidades?*

Desde luego, es evidente que la motivación y metodología de un antropólogo es diferente a la del geólogo y a la del deportista. Pero todos están incorporando las nuevas técnicas y materiales de exploración y progresión así como las nuevas tecnologías de información geográfica.

Como aficionada espeleóloga (o apasionada al espeleísmo), mi motivación e interés personal es aprovechar los conocimientos adquiridos en las distintas materias y asignaturas del Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica (TIGs), así como la disponibilidad de licencias temporales de los diferentes programas que se nos han facilitado, para plantear el desarrollo de un Trabajo Fin de Master que examine e indague en el gran potencial de las aplicaciones de las TIGs en el campo de la espeleología, en especial en el análisis de los siguientes aspectos:

- La capacidad de las TIGs para integrar y homogeneizar información geográfica procedente de diversas instituciones y de cierta antigüedad, como es la recogida por los grupos de espeleología.
- La utilización de software espeleológico para la elaboración de modelos 3D de cavidades que después puedan ser visualizados en un SIG o CAD.

- La elaboración de una base de datos georreferenciada de la entrada de las cavidades, que incluya su relación con otras capas de información (geología, topografía, etc.), y que pueda quedar plasmada en diferentes cartografías temáticas.

El análisis de los aspectos citados se llevará a cabo en el área del macizo calcáreo de Cotiella (Pirineo aragonés), localizado al nordeste de la provincia de Huesca, en las comarcas de Sobrarbe y Ribagorza, entre los ríos Ésera (al este) y Cinca (al oeste). Y más concretamente, el estudio se centrará en el sector de Armeña, donde se ha desarrollado un espectacular conjunto endokárstico. La selección del área de estudio obedece a las siguientes razones:

- La disponibilidad de una base de datos de ubicación de cavidades resultado de exploraciones de los últimos 40 años en la zona, proporcionada por la Asociación Científica Espeleológica de Cotiella (ACEC).
- La disponibilidad de topografía subterránea de 20 de las cavidades proporcionadas por la ACEC.
- El conocimiento e interés previo sobre el área y la disponibilidad de realizar trabajos de campo por proximidad a mi residencia.
- La disponibilidad de cartografía geológica de parte del área de estudio (hoja 179 publicada por el IGME (Ríos Aragües *et al.*, 1982)).

1.1. Justificación y estado de la cuestión

Uno de los objetivos principales de los Grupos de Espeleología es la catalogación o inventario y levantamiento topográfico de las cavidades kársticas. La topografía espeleológica supone, por tanto, la representación cartográfica de cavidades, obteniendo datos sobre el desarrollo y profundidad de una cueva además de una serie de datos que sirven como base para estudios geológicos, geomorfológicos o hidrogeológicos (Córdoba Jiménez *et al.*, 2004). El sistema de representación es una proyección ortogonal de la planta y el alzado y, en algún caso, secciones o cortes perpendiculares de la galería. La curvatura terrestre es despreciada; para el topógrafo la Tierra es geoméricamente plana. Además todo plano topográfico debe indicar la escala, el norte (magnético o geográfico), la fecha en la que se tomaron las medidas y el grado de medición. El error medio de los resultados está en función del instrumental y la metodología empleados (Hauselmann, 2011).

Sin embargo, las exploraciones tradicionales llevadas a cabo por grupos de espeleología no eran constantes ni periódicas pues, en buena medida, dependían de la disponibilidad y motivación de sus miembros: se invierten grandes esfuerzos en fines de semana y

vacaciones, muchas veces sin recompensa en los resultados. Los datos de cada exploración se guardaban en fichas, acompañadas de croquis topográficos con distinto grado de precisión en las anotaciones sobre la localización e instrumental utilizado. Además, una misma zona podía ser explorada por distintos clubs en campañas diferentes y, de esta manera, muchos grupos de espeleología disponen de datos con más de 20 años de antigüedad con diferentes coordenadas de localización de una cavidad sin indicar siquiera el sistema de referencia que se utilizó. A esto habría que añadir que el mapa topográfico de aquellos años utilizaba el Datum ED50 y coordenadas geográficas referidas al meridiano 0° en Madrid.

En definitiva se puede tener una buena topografía de la cavidad (planta y alzado) pero referida al norte magnético y sin fecha. La variación de la declinación magnética anual podría ser despreciable, considerando las imprecisiones del instrumental, pero en 40 años varía más de 5° y sería un error importante no tener esto en cuenta para un estudio serio. Recientemente, los Grupos de Espeleología han incorporado las nuevas tecnologías para la ubicación de las cavidades. Se obtienen datos tomados con GPS, pero no anotan si la altimetría ha sido recalculada sobre nivel del mar en Alicante.

Desde esta perspectiva, es lógico pensar que para desarrollar cualquier estudio o proyecto sobre cavidades kársticas de un área concreta en un entorno TIG la información y los datos deben ser homogéneos, es decir, estar en el mismo sistema de referencia geodésico, mismo datum, proyección y sistema de coordenadas. Pero, entonces *¿hay que desechar el trabajo de los últimos 40 años?* O *¿es posible recuperarlo de alguna forma utilizando asimismo las TIGs?*

En este contexto, con la finalidad de resolver el problema suscitado por estas cuestiones, este TFM se ha planteado con el principal objetivo de homogeneizar la información espeleológica que nos ha proporcionado la Asociación Científica Espeleológica Cotiella (ACEC), así como aquella disponible en instituciones (IGN, IGME, etc.) y la obtenida durante el trabajo de campo realizado.

La disponibilidad de información homogeneizada de los sistemas de cavidades de una determinada área permite a su vez que pueda ser tratada dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Y, de nuevo, nos podemos preguntar sobre *¿qué aplicaciones se le puede dar a dicha información?, ¿qué otras capas pueden ayudar a entender el “laberinto subterráneo” formado por los sistemas kársticos?*

Las aplicaciones de los SIG se han incorporado al estudio de los ámbitos karstificados desde diferentes aproximaciones (ESRI, 2007). La mayoría de los trabajos utilizan esta herramienta con el objeto de inventariar la localización de las cavidades (Florea et al., 2002). Se trata pues de archivos georreferenciados que constituyen el paso inicial para la realización de completas bases de datos, con información asociada a cada una de las cavidades (Goa et al., 2002; Phelan, 2002). Además, en aquellas áreas donde las formas kársticas están bien desarrolladas y tienen un alto valor geomorfológico, estas bases de datos son una importante herramienta para su gestión y conservación (Szukalski y Glasspool, 2007; Harley et al., 2010). También desde una óptica más divulgativa se han utilizado los SIG para el desarrollo de “atlas del karst” (Litwin, 2008). En este sentido, la propuesta de este TFM es de gran interés dado que el área de estudio se localiza dentro del Geoparque de Sobrabe (año de declaración 2006, 1ª revalidación 2009). El Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón ha propuesto un inventario de lugares de interés geológico (LIG) de la Comunidad Autónoma de Aragón. En relación al macizo de Cotiella, en la actualidad está propuesto el endokarst de Armeña como punto de interés geológico (PIG son áreas menores de 50 hectáreas).

Otros estudios, desde una perspectiva más científica, combinan varias capas geográficas (modelo digital de elevaciones, geología, geomorfología, hidrología, etc.) con el objeto de determinar los factores que controlan la distribución de las cavidades. Las herramientas de análisis espacial y estadístico de los SIG permiten estudiar la relación de las cavidades y otras formas kársticas con las características topográficas (pendiente, orientación, altitud), tectónicas (fracturas, fallas, diaclasas), hidrográficas (Weary y Orndorff, 2001; Hung et al., 2002; Lamelas, 2007).

El medio subterráneo no se puede beneficiar del sistema global de navegación por satélite (GNSS), ni de la ortofotografía aérea, ni de la tecnología de sensores LIDAR aerotransportados; sin embargo, se han desarrollado diversas aplicaciones informáticas como *VisualTopo* o *Compass* para la realización de la topografía digital de cavidades con ordenador que facilitan tanto el trabajo de campo como el de gabinete (Herrero Rico, 2000; Mulet, 2006). La inserción de la topografía 3D de las cavidades en los mapas geológicos de superficie aportan nuevas posibilidades de estudio: direcciones de galerías asociadas a fracturas, pasajes a lo largo de capas diferentes de caliza, etc. (Weary et al., 2001). Además el medio subterráneo explorado se puede visualizar en 3D con *ArcScene* sobre el modelo digital de superficie pudiendo girar la orientación para ver relaciones espaciales de las cavidades y posibilidades de conexión entre ellas. Estos datos visualizados en 3D con una

interpolación de un corte geológico permiten mayores posibilidades de análisis (Wu *et al.*, 2008, Phelan, 2002).

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Master (TFM), tal como ha quedado en cierto modo planteado en la introducción, es la utilización de los conocimientos y habilidades adquiridos durante el Máster Universitario en Tecnologías de Información Geográfica (TIG) con la finalidad de estudiar y analizar las posibilidades de aplicación del uso de las herramientas de software SIG y CAD, proporcionadas en las asignaturas, en el campo de la espeleología.

Las aplicaciones llevadas a cabo para el área del macizo de Cotiella se concretan en una serie de objetivos específicos:

- Desarrollar una metodología encaminada a la homogenización de datos de cavidades, con el objeto de crear un archivo o inventario georreferenciado de cavidades. Se dispone de una base de datos con coordenadas planimétricas y altimétricas de ubicación de cavidades en distintos sistemas de referencia, datum y/o proyección. El primer paso, como luego se explicará, será elegir el sistema de referencia con el que se desea trabajar y transformar todos los datos a éste. Para desarrollar este objetivo se han utilizado programas específicos.
- Elaborar la cartografía geológica del área de estudio, para obtener varios mapas que muestren la relación entre la geología y la distribución de las cavidades. Representar la localización de las cavidades (fichero vectorial de puntos) y la topografía subterránea de las cavidades (fichero vectorial de polígonos) en tres dimensiones.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El territorio estudiado se localiza en el sector oriental del Pirineo oscense, en las comarcas de Sobrarbe y Ribagorza, entre los ríos Cinca, Cinqueta y Ésera, correspondiéndose con el macizo de Cotiella (42° 31'N; 0° 20'E, 2.912 m) (Figura 1).

Las cumbres o cordales, que constituyen el circo glaciar de Armeña, se elevan por lo general por encima de los 2500 m, culminadas por los picos Cotiella (2912) m, Punta de Armeña (2823 m) y Punta Reduno (2537 m) y Pico de la Rivereta (2685 m), en sus límites

sur y norte, respectivamente, elevándose por tanto sobre el ibón de Armeña, cuya altura se encuentra en torno a los 1850 m. Otros picos aislados por barrancos alcanzan también importantes alturas, como es el macizo situado al este del ibón de Plan, coronado por Peña de Las Once (2.650 m) y Peña Mediodía (2.427 m). El macizo en su conjunto, hacia el sur desde el pico Cotiella, de relieve orientado a solana, desciende uniformemente hasta el río de la Garona; mientras que hacia el oeste, el relieve desciende bruscamente desde los 2.246 m en Punta Llerga hasta los 700 m de altitud en Lafortunada, junto al embalse de Laspuña. Este descenso altitudinal se resuelve en laderas muy pendientes, derivadas del profundo encajamiento de los ríos Irués, Cinca, Cinqueta y de la Garona.

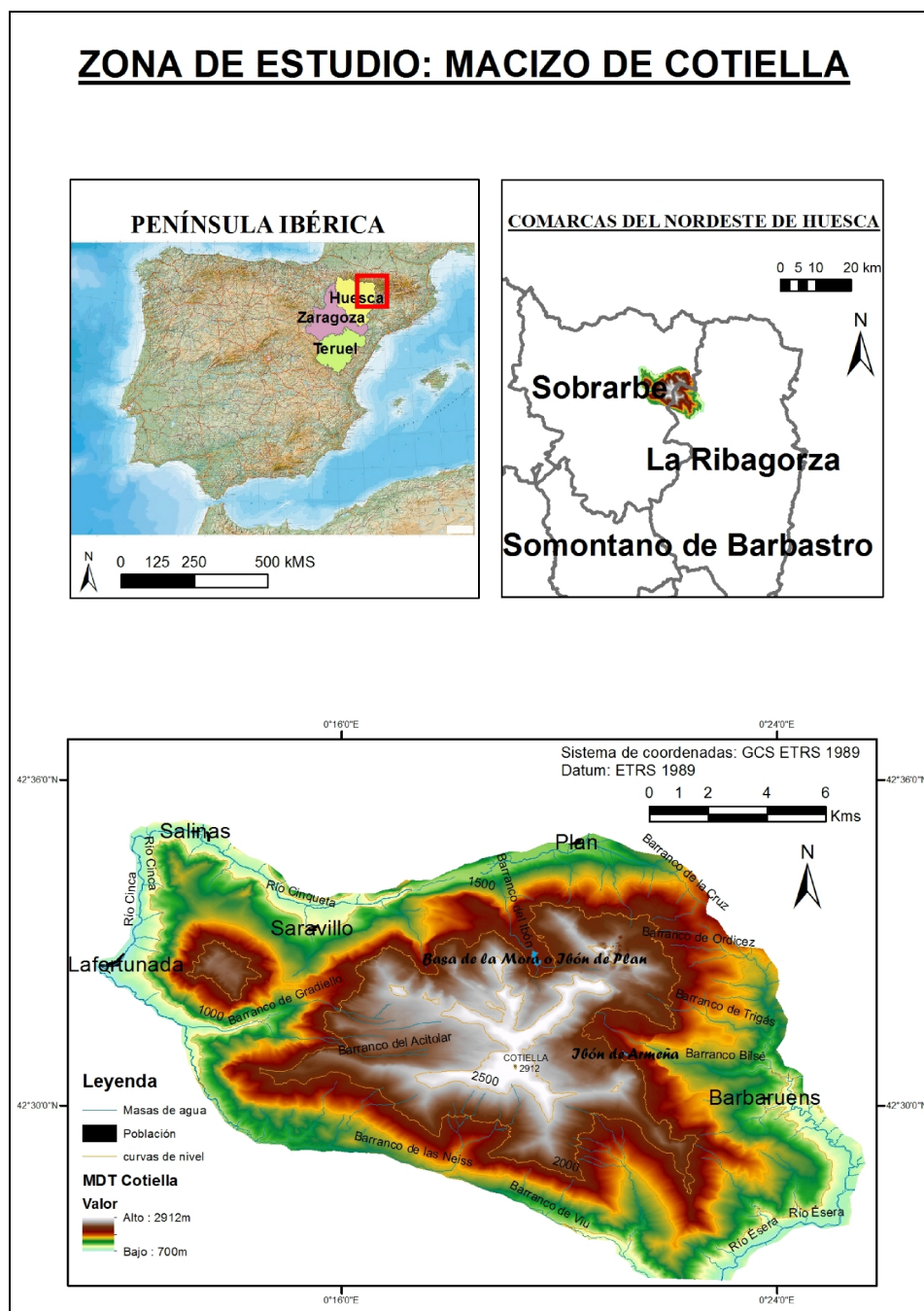


Figura 1. Área de estudio: macizo de Cotiella. Elaboración propia. Fuentes: IGN, SITAR.

En términos generales, este macizo calcáreo se define por un relieve de grandes escarpes verticales afectados por la acción glaciaria con desniveles de cientos de metros en distancias muy cortas. Es una zona de alta montaña con riesgo de avalanchas de nieve en invierno en torno al pico Cotiella, donde además existen relieves de gran valor, con restos de formas glaciares labradas en sustrato calcáreo y formas kársticas de gran interés (Belmonte, 2004).

La red hidrográfica está organizada por los ríos Cinca, Cinqueta y Ésera que marcan el límite del área de estudio. Estos ríos tienen caudales cuantiosos durante la fusión nival. En el interior del macizo, la red secundaria se ha encajado modelando profundos y angostos barrancos, como el barranco de Barbaruéns. Las fuentes o manantiales tienen una amplia representación en los sectores inferiores del macizo debido a que el sistema kárstico del macizo impide la surgencia de manantiales en los sectores topográficamente superiores.

El macizo de Cotiella, desde el punto de vista geológico, forma parte de la Unidad Surpirenaica Central (Figura 2). Las rocas que afloran son principalmente calizas formadas en los fondos de mares cálidos durante el Cretácico Superior. Los fósiles de erizos, esponjas o bivalvos que se encuentran en el macizo nos indican su origen marino. Durante la Orogenia Alpina colisionan las placas europea e ibérica empujando hacia el sur las rocas que hoy vemos en Cotiella mediante un gran manto de corrimiento que levanta las viejas rocas cretácicas sobre jóvenes margas eocenas que se encuentran al sur del macizo. La característica más sorprendente del cabalgamiento del Cotiella es, sin duda, su horizontalidad. Las sierras de Cotiella, Chía y Ferrera están cortadas por este plano de cabalgamiento que se sitúa sobre la cota 1.600-1.800 m. Por encima de él aparece la serie alóctona deslizada (manto de corrimiento), superponiendo «anormalmente» materiales de edad cretácica sobre otros de la era terciaria (Paleoceno). El circo de Armeña constituye un excelente observatorio del fenómeno descrito. El plano de cabalgamiento se sitúa a la altura del rellano ocupado por el ibón de Armeña (San Román, 2006).

La unidad tectónica de Cotiella, que junto a Gavarnie y Monte Perdido constituye el manto de Gavarnie, está desplazada hacia el sur decenas de kilómetros sobre las rocas del Trías, de comportamiento más plástico y fue la primitiva cobertera sedimentaria de la Zona Axial (Ríos Aragües et al., 1982). La inclinación de los estratos del Cotiella es Este-Oeste, condicionando este buzamiento a que la vía de drenaje del agua subterránea se dirija hacia el sector Fornos, donde tiene su nacimiento el río Irués.

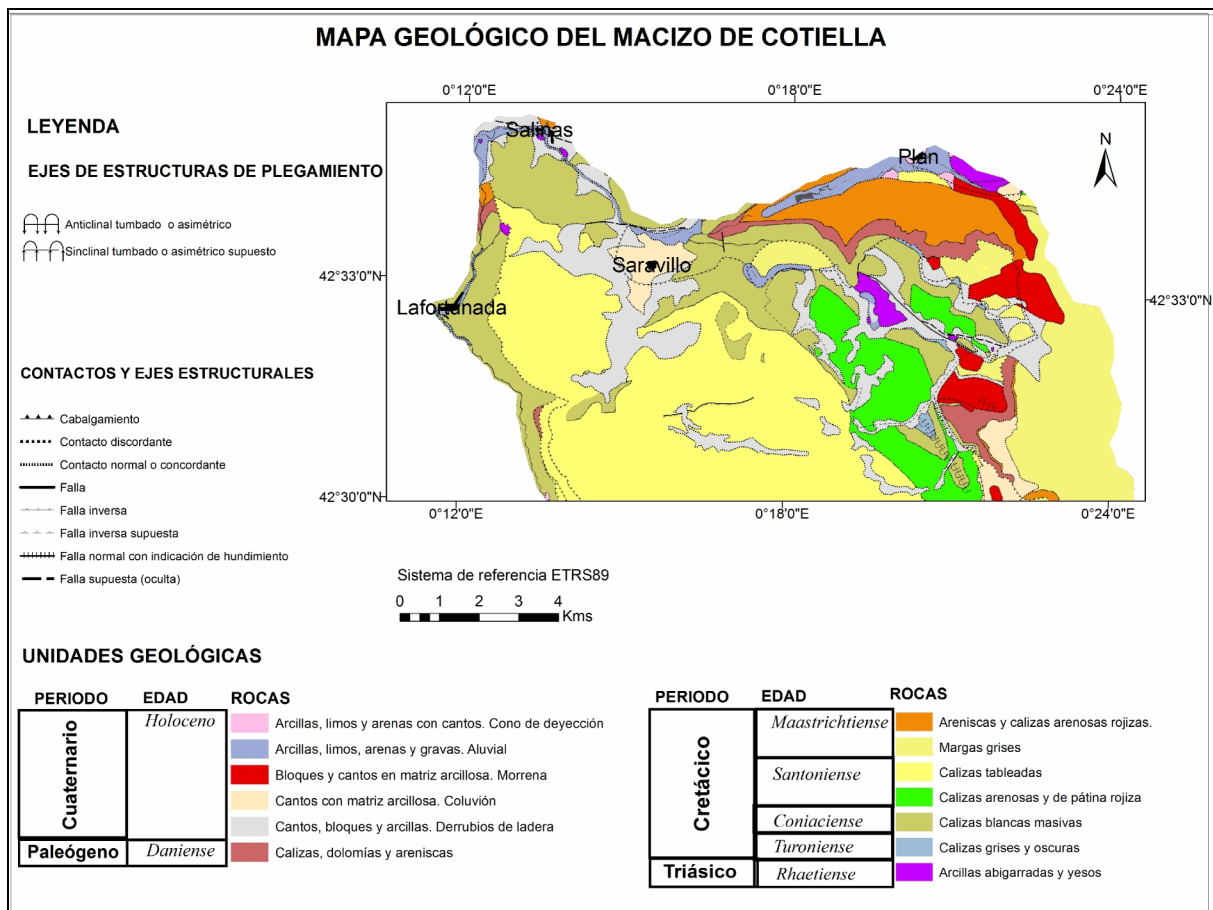


Figura 2. Cartografía geológica del Norte del macizo de Cotiella. Elaboración propia a partir del Mapa Geológico Nacional (IGME, Hoja 179, Bielsa).

Por su parte, los rasgos climáticos del macizo de Cotiella están definidos por la presencia de temperaturas típicas de los ambientes de montaña, con valores medios anuales bajos o incluso muy bajos por encima de 1.500 m y elevada frecuencia de heladas. La precipitación media en los fondos de valle oscila entre 1.100 y 1.300 mm/año, mientras que a más de 2.500 m de altitud alcanza valores entre los 1.700 mm y 1.800 mm. La cuantía de las precipitaciones es elevada en comparación con los relieves prepirenaicos o con la Depresión del Ebro pero, a igual altitud, es ligeramente inferior a la del Pirineo Occidental y Oriental. Las elevadas precipitaciones y la importancia de la innivación hacen del área de estudio un importante núcleo de generación de recursos hídricos. Los relieves calcáreos de Cotiella, Turbón, Sierra de Chía y Sierra Ferrera permiten la constitución del acuífero de mayor entidad en todo el sector nororiental de la provincia de Huesca (CHEBRO).

Dada la importancia del funcionamiento hidrogeológico del macizo de Cotiella para entender la relación entre las cavidades de diferentes sectores y la posibilidad de su futura conexión, se detallan brevemente los datos y avances actuales recogidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro. Este macizo forma parte, conceptualmente, de un acuífero kárstico de

alta montaña, con carácter libre y fuerte control topográfico. Existe cierto divorcio entre las divisorias hidrográficas e hidrogeológicas de cuencas adyacentes en los sistemas kársticos más desarrollados, comprobado por coloraciones en el caso del entorno del pico de Cotiella. Las áreas de recarga se sitúan a elevadas cotas, son pobres en suelo y presentan un exokarst y un endokarst significativos que se traducen en el escaso desarrollo de la red superficial. Las principales descargas están muy relacionadas con la red fluvial y muestran variaciones estacionales en sus características fisicoquímicas y en su caudal muy notables, en este caso acompañadas de espectaculares surgencias con “trop plein” o “reventón” (como en El Chorro en el sector Fornos). La causa de este efecto, poco habitual en la naturaleza, se debe a una sobrecarga estacional de niveles de agua en el acuífero kárstico en fechas de primavera muy lluviosa, o tras unas tormentas de verano muy intensas; o por el deshielo de una nevada invernal muy copiosa.

En el macizo de Cotiella, los recursos biológicos presentan una gran diversidad, de acuerdo con los fuertes desniveles y la gran heterogeneidad topográfica y litológica. Desde los carrascales submediterráneos de Punta Llerga hasta los ambientes glaciares y de tundra de las zonas altas, se produce una secuencia, unas veces ordenada y otras parcialmente perturbadas por el hombre, de robledales y pinares de pino laricio, pinares de pino silvestre, bosques mixtos, hayedos, abedulares, abetales, pinares subalpinos y pastos alpinos y subalpinos. Además, hay numerosos enclaves que albergan especies de gran rareza e interés botánico, algunas de las cuales están en peligro o se definen como vulnerables (Llobet, 1994). Asimismo, los importantes recursos faunísticos (desde un punto de vista ecológico y cinegético) están relacionados con el estado de conservación de los bosques y con la difícil accesibilidad de algunos ambientes (piso nival, cantiles, congostos). La vegetación alcanza también una elevada valoración, por la presencia de cantiles rocosos, por el predominio de roquedo con muy poco suelo y por la presencia de un relieve kárstico muy desarrollado, donde viven especies frágiles y de alto valor ecológico.

Por ello, todo el macizo está declarado como un Lugar de Interés Comunitario (LIC) y, junto a Sierra Ferrera, es una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), encontrándose en el Ámbito de Protección del Quebrantahuesos (*Gypaetus Barbatus*). Recientemente forma parte del Geoparque de Sobrarbe, perteneciente a la Red Europea y Global de Geoparques auspiciada por la UNESCO. Además, hay que añadir la existencia de puntos y áreas de interés geológico y geomorfológico, como el circo glaciar y el exokarst de Armeña, los glaciares rocosos de la Peña de las Once y el entorno glaciar de la Basa de la Mora.

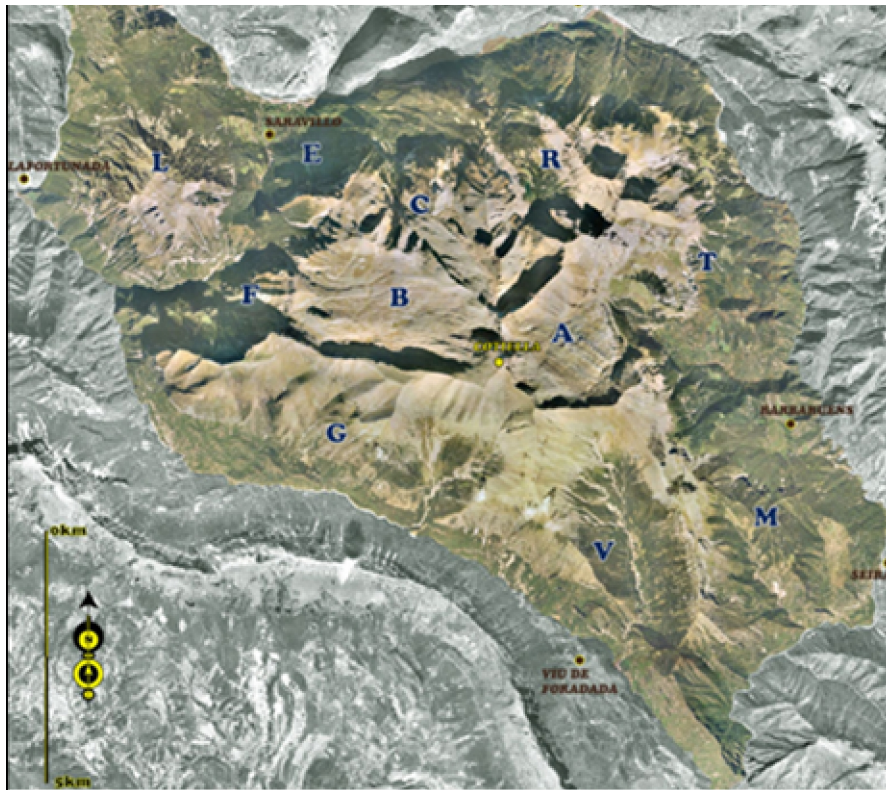
Desde un punto de vista humano, se trata de una zona muy despoblada, no existen núcleos de población que superen los 500 habitantes, localizados básicamente en los márgenes de los ríos. Los principales núcleos de población son Barbaruéns, Plan, Saravillo, Serveto, Sin y Badaín. El aprovechamiento tradicional descansó sobre una agricultura destinada a la alimentación humana local y una ganadería ovina que alternaba estacionalmente el uso de los pastos supraforestales y de las estepas de la Depresión del Ebro mediante sistemas trashumantes que entraron en profunda crisis a mediados del siglo XX. En la actualidad la agricultura se restringe a los fondos de valle (terrazas y llanuras aluviales) y depósitos morrénicos de suave pendiente, con predominio exclusivo de los prados, mientras la ganadería ovina y vacuna han visto estabilizados sus censos después de décadas de retroceso general. El resto del territorio está constituido por amplias extensiones de bosques y vegetación arbustiva y, en las zonas altas, por roquedos. Se aprovecha muy moderadamente con pastoreo en los pastos alpinos y subalpinos de Cotiella y explotación forestal muy ocasional en las vertientes septentrionales.

El **turismo** adquiere cada día mayor relevancia, especialmente en el valle de Gistaín, donde hay buenas perspectivas de futuro. El número de montañeros que visitan estos parajes es reducido, comparado con el de los que ascienden a los montes de altitud superior a los 3.000 m.

3.1. El karst del macizo de Cotiella

El área de Cotiella destaca por la profusión de formas kársticas tanto externas como internas. Las características litológicas, estructurales, pluviométricas y la persistencia del manto nival favorecen la disolución de las rocas que componen el territorio. A lo largo y ancho de todo el macizo se encuentran formas exokársticas, como distintos tipos de lapiazes y abundantes campos de dolinas (Belmonte, 2001). En cuanto a las formas endokársticas, hasta la fecha se han catalogado 389 cavidades (ACEC, 2012). Iniciadas en los años 70, las exploraciones espeleológicas en el macizo de Cotiella se han realizado continuamente durante los últimos 40 años, lográndose importantes descubrimientos y exploraciones menos fructuosas. Se ha levantado la topografía de más de 31 kms de recorrido, una veintena de simas superan los 100m de profundidad y están en proceso de exploración por ACEC.

La ACEC ha definido los límites geográficos del área de estudio por los ríos y barrancos que circundan el macizo y ha subdividido éste en 11 zonas de trabajo espeleológico que permite catalogar geográficamente las cavidades otorgando un número correlativo según el orden de descubrimiento (Figura 3).



- Leyenda:**
- A-Armeña
 - B-Ereta de las Brujas
 - C-Barranco Galliners
 - E-Espuena
 - F-Fornos
 - G-Garona
 - L-LLerga
 - M-Monteneri
 - R-Ribereta
 - T-Trigás
 - V-Viu

Figura 3. Zonas espeleológicas del macizo del Cotiella. Fuente: ACEC. Disponible en: http://www.acecotiella.com/inventaire/grand_massif.html

Así, los amplios afloramientos de calizas del Cretácico superior, situados al noroeste y este del pico de Cotiella, conforman una amplia área en la que se reconocen formas exokársticas y endokársticas bastante desarrolladas, destacando el modelado de extensos lapiaces carentes de suelo edáfico y sin cobertera vegetal, sobre los que se infiltra el agua de las precipitaciones y los neveros existentes merced a la densa fracturación. Dentro de este ámbito, el circo de Armeña, al E del pico de Cotiella, constituye una zona muy favorable a la infiltración de agua y en él se han reconocido formas endokársticas muy desarrolladas. Este sistema kárstico, en el que se ha llevado buena parte de aplicaciones con las TIGs en este trabajo, se localiza en el fondo del límite que define el pico de Cotiella-Punta Armeña, a alturas comprendidas entre los 2140-2200 m, precediendo al ibón de Armeña. La profusión de cavidades y simas son representadas incluso en los mapas topográficos: las series impresas del mapa topográfico nacional MTN50 y MTN25 representan las cavidades (simas, cuevas, cavernas, abrigos, grutas, dolinas, torcas, sumideros, etc.) con un símbolo puntual en el lugar de su ubicación y, en algunos casos, con su topónimo. Con estos mapas se puede hacer una lectura inicial, aunque no fiable, de la distribución y situación altimétrica e hidrográfica de la red de cavidades (Figuras 4 y 5).

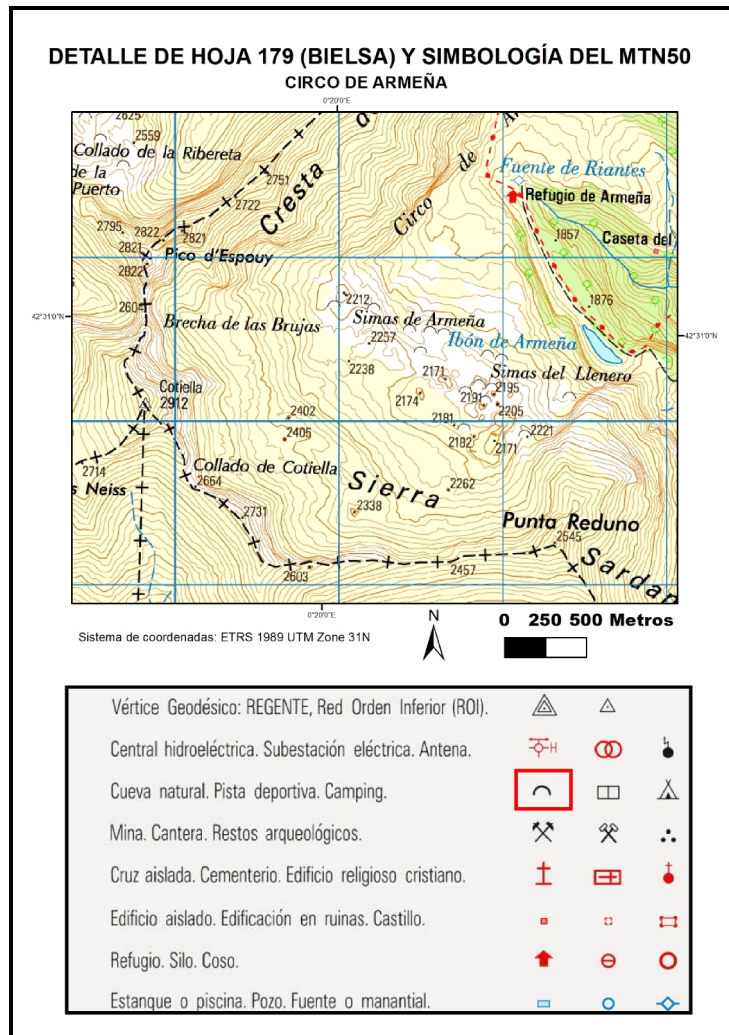


Figura 4. Detalle de simas del circo de Armeña a partir del Mapa Topográfico Nacional a escala 1: 50.000 (IGN). Elaboración propia.

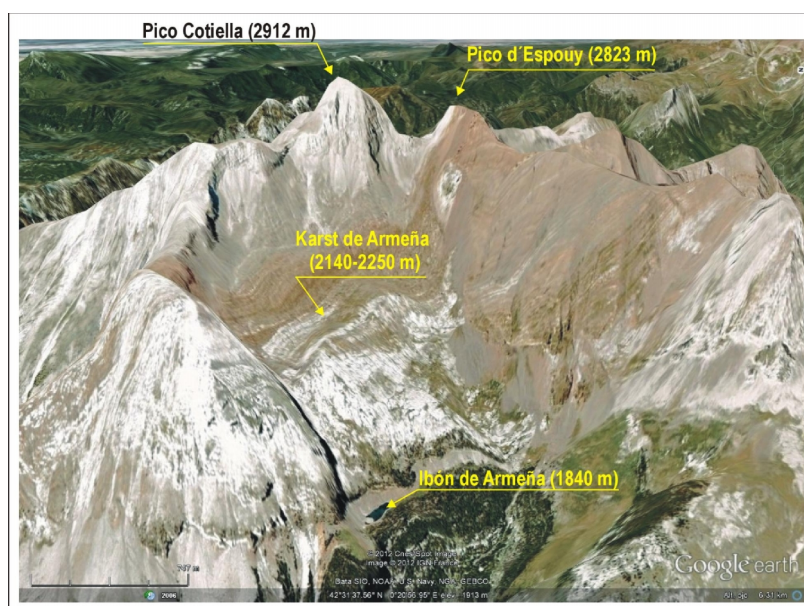


Figura 5. Vista general en 3D del circo de Armeña a partir del Google Earth. Elaboración propia.

4. MATERIAL

En este apartado se detallan la procedencia de los datos e información de partida, las aplicaciones informáticas utilizadas para homogeneizar y tratar posteriormente en un SIG la información, así como el instrumental utilizado durante las campañas de campo.

CAPAS	FUENTE	FORMATO	SISTEMA DE REFERENCIA PLANIMÉTRICO	SISTEMA DE REFERENCIA ALTIMÉTRICO	SISTEMA DE COORDENADAS/PROYECCIÓN
Ubicación de cavidades	ACEC	Vectorial de puntos	ED50	Nivel medio del mar en Alicante	UTM 31T
Topografía de cavidades		Vectorial de polígonos	ED50	Nivel medio del mar en Alicante	UTM 31T
BTN25	IGN	Vectorial de líneas	ETRS89	Nivel medio del mar en Alicante	UTM 31T
MDT05		Raster	ETRS89	Nivel medio del mar en Alicante	UTM 31T
PNOA		Raster	ETRS89	Sin referencia	UTM 31T
Mapa general de la península		Raster	ETRS89	Sin referencia	UTM 30N
Cartografía Geológica	IGME	Raster	ED 50	Sin referencia	Coordenadas Geográficas (Meridiano 0° Greenwich)
Provincias, comarcas, núcleos de población, ZEPA, LIC y usos del suelo	SITAR	Vectorial de polígonos	ED 50	Sin referencia	UTM 30T
Cuencas hidrográficas, masas de agua superficial y subterránea	CHEBRO	Vectorial de polígonos	ED 50	Sin referencia	UTM 30T
Rutas GPS	PROPIOS	Vectorial de líneas	WGS84	WGS84	UTM 31T
Ubicación de cavidades con GPS		Vectorial de puntos	WGS84	WGS84	UTM 31T
Ubicación de cavidades con Mapa ALPINA		Vectorial de puntos	ED50	Nivel medio del mar en Alicante	Coordenadas Geográficas (Meridiano 0° Madrid)

Tabla 1. Características y procedencia de las capas de datos de información de partida.

4.1 Datos e información de partida.

4.1.1. Datos procedentes de fuentes externas

Los datos y la información de partida proceden de fuentes, fechas y formatos muy diversos (Tabla 1):

a) Asociación Científico Espeleológica Cotiella (ACEC). Las primeras referencias de exploraciones espeleológicas en el macizo son de 1967 pero no es hasta los años setenta cuando se descubre el potencial kárstico del área, al localizarse más de 80 cavidades en el circo de Armeña. Los principales avances se deben a grupos catalanes y franceses que en 2001 acuerdan trabajar conjuntamente uniendo esfuerzos y mejorando resultados. En abril de 2008 se crea la ACEC con el objeto de coordinar, en colaboración con proyectos científicos, los diferentes trabajos y exploraciones espeleológicas que se desarrollan en el macizo de Cotiella y otras áreas de interés de las Comarcas de Sobrarbe y la Ribagorza. También, la Asociación ha unificado diversos proyectos de interés geológico e hidrológico, formando el denominado Plan General Hidrogeológico de Cotiella, programa de interés científico y espeleológico en el que están implicados miembros y entidades que forman la propia Asociación, con la colaboración de diversos organismos oficiales de la zona.

El balance de resultados de la ACEC es notablemente remarcable con la exploración y topografía de más de diez cavidades que se acercan o sobrepasan los 500 metros de profundidad, así como con la ejecución de una base de datos, a partir de los trabajos realizados por los diferentes grupos durante los últimos 40 años, que incluye información de más de 300 cavidades y que se va ampliando y actualizando con el avance de cada nueva campaña (ACEC, 2012).

Para el desarrollo de este Trabajo Fin de Master, la ACEC nos ha proporcionado la siguiente información:

- *El inventario georreferenciado de la localización de las cavidades del macizo de Cotiella.* Se trata de un archivo en formato vectorial (capa de puntos) con la ubicación de cada cavidad. El sistema de referencia planimétrico es *European 1950* (ED50) y el altimétrico referido al nivel medio del Mediterráneo en Alicante y la proyección UTM (huso 31 N).
- *El levantamiento topográfico de 20 de las cavidades del macizo:* en formato vectorial como capas de polígonos 3D que conforman los pozos, galerías, meandros, etc. de la cavidad. Los datos se encuentran georreferenciados por el punto de entrada a la

cavidad en el sistema de referencia ED50 y proyección UTM (huso 31 N) y altimetría referida al nivel medio del Mediterráneo en Alicante.

b) Instituto Geográfico Nacional (IGN). El Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) dispone de un variado catálogo para descarga libre y gratuita de la información geográfica digital para uso no comercial. Los archivos están en distintos formatos, escalas y resoluciones. Para la zona de estudio se han descargado los siguientes archivos:

- **BTN25:** Base Topográfica Nacional 1:25.000. Base de datos topográfica 3D de referencia a escala 1:25.000 capturada a partir de pares estereoscópicos u ortofotografías del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Se han descargado las Hojas del Mapa Topográfico Nacional nº 179 y 212 en el sistema geodésico de referencia ETRS89, proyección UTM (huso 31T). Las altitudes están referidas al nivel medio del mar Mediterráneo en Alicante.
- **MDT05:** Modelo digital del terreno, a nivel del suelo con paso de malla de 5 m. El formato de archivo es ASCII matriz ESRI (asc) y el sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM (huso 31 T), hojas del MTN nº 179 y 212. Las altitudes están referidas al nivel medio del Mar Mediterráneo en Alicante. Se ha obtenido por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del PNOA con resolución de 25 a 50 cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de ruptura donde fuera viable.
- **PNOA:** Se han obtenido los mosaicos de ortofotos del PNOA más recientes, correspondientes a las hojas del MTN nº 179 y 212 en formato ECW, sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM (huso 31 T). Cada mosaico está acompañado de un archivo de metadatos (xml) y un archivo *shape* (comprimido en formato *zip) formado por recintos que indican, para cada píxel del mosaico, la resolución geométrica y la fecha de toma de la ortofotografía.
- **Mapa General de la Península 1:1.250.000** en formato ECW georreferenciado (sistema ETRS89, proyección UTM huso 30N). Este mapa se ha utilizado en la construcción de la figura con la localización del área de estudio.

c) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Aunque la cartografía geológica digital en formato vectorial distribuida por este organismo no es gratuita, si es posible obtener y descargar desde la propia pagina web del IGME cartografía geológica a distintas escalas en formato raster (ficheros *.jpg o *.pdf), junto con la memoria explicativa.

De este modo, se ha descargado la hoja geológica nº 179 (Bielsa) a escala 1:50.000 (serie MAGNA, publicada en 1982). Se trata de una imagen georreferenciada en coordenadas geográficas y datum ED 1950 y recortada por el marco que define el contenido temático. La

descarga es un archivo comprimido (*.zip) que contiene el fichero *.jpg de imagen y dos ficheros asociados *.jgw y *.aux de georreferenciación, necesarios para su correcta visualización.

d) Sistema de Información Territorial de Aragón (SITAR). El Centro de Información Territorial de Aragón, integrado en el Departamento de Política Territorial e Interior, ha elaborado su propia plataforma de información geográfica sobre el territorio de la Comunidad Autónoma de Aragón, que permite el acceso y la descarga libre y gratuita de diferentes productos cartográficos (mapas temáticos, datos geográficos, etc.) en distintos formatos y escalas: El sistema de referencia de los mapas es datum ED50 y proyección UTM (UTM 30N). Se han descargado las capas de provincias, comarcas y núcleos de población para la construcción de mapas y las capas de las zonas ZEPA (zonas de especial protección para las aves), LIC (lugares de interés comunitario) y usos del suelo para incorporar la información en el trabajo.

e) Confederación Hidrográfica del Ebro (CHEBRO). Desde el geoportal SITEbro es posible visualizar y descargar información geográfica variada (distintos tipos de mapas temáticos), así como imágenes y fotoplanos de la cuenca del Ebro. Los mapas están georreferenciados en ED50 UTM 30N. Se han descargado las capas de masas de agua, tanto subterráneas como superficiales y cuencas hidrológicas para incorporar la información a la base de datos.

4.1.2. Datos de elaboración propia.

Una de las aplicaciones más interesantes para el espeleólogo es poder localizar con GPS la “boca” de una cavidad y su ruta de acceso, para después representar dicha información sobre diferentes mapas (mapa topográfico, mapa geológico, etc.) o sobre la ortofoto. Además, los recorridos GPS de localización de cavidades se pueden añadir (previo cambio de formato y ajuste de sistema de referencia) a un mapa geológico de cavidades para fines divulgativos.

Con este objetivo, a lo largo del desarrollo del TFM se han llevado a cabo varias campañas de campo en las que se ha realizado la comprobación de la ubicación geográfica del punto de entrada de alguna de las cavidades por medio del GPS. Esto se debe a que muchos de los datos de localización de cavidades proporcionado por la ACEC provienen de campañas antiguas, de modo que la propia ACEC recomienda comprobar las coordenadas de acceso a las cuevas. Por otro lado, se ha levantado la topografía de la cueva de Lasgüeriz como práctica de aprendizaje y comprobación de resultados (ya disponible en los archivos ACEC).

Se trata de una galería horizontal, situada en la parte oeste del macizo, en las cercanías del núcleo de Saravillo y de casi 1 kilómetro de desarrollo longitudinal. Para ello se han utilizado datos propios obtenidos por triangulación sobre un mapa topográfico (Llobet, 1994), Datum ED50, coordenadas geográficas, meridiano 0° Madrid y altimetría s.n.m. y diferente material e instrumental de campo (receptor GPS Garmin ETREX, barómetro Suunto Vector Red, brújula Suunto M-3, clinómetro Silva y cinta métrica).

4.2. Aplicaciones informáticas utilizadas.

Tal como se ha indicado, uno de los objetivos de este TFM ha sido potenciar los conocimientos adquiridos durante el desarrollo del Máster a través del uso de las herramientas de software SIG y CAD, junto con software libre, y su aplicación en el campo de la espeleología. En este sentido, los programas informáticos utilizados han sido los siguientes:

4.2.1. Programas de SIG y CAD.

En la realización del Trabajo Fin de Máster se han utilizado los siguientes programas informáticos:

* **ArcGIS Desktop 10.0 (ESRI)**. La licencia, para uso educativo, fue proporcionada en la asignatura de SIG del Máster de TIGs con un año de validez. (ArcGIS Desktop 10.0, 2010). Se han utilizado los “paquetes” ArcMap y ArcScene con las extensiones, entre otras, de Análisis Espacial (ArcGIS Spatial Analyst) y Análisis 3D (ArcGIS 3D Analyst).

* **MicroStation V8i (Bentley)**. Es una plataforma de diseño asistido por ordenador (CAD del inglés Computer Aided Design) usada por diseñadores que trabajan la cartografía de dibujos y proyectos de infraestructura global. Es muy utilizado por arquitectos, ingenieros y cartógrafos convirtiéndolo en un formato estándar de diseño en estas áreas. En la asignatura de Cartografía se nos ha proporcionado una licencia de uso de un año.

4.2.2. Programas específicos de topografía, representación de cavidades y cambios de formatos.

* **VISUAL TOPO** (versión 5.02, Copyright, Eric DAVID © vtopo@free.fr). Es un software de libre descarga (<http://vtopo.free.fr/>) diseñado para el levantamiento topográfico de cavidades subterráneas y ampliamente utilizado en España por grupos de espeleología (Mulet, 2006). Permite calcular y editar la cartografía topográfica (planta, alzado, alzado desarrollado, etc.), así como visualizar los resultados en 3D. Tiene en cuenta la mayoría

de los instrumentos de medida utilizados por espeleólogos, así como por los buceadores. Pueden exportarse los resultados a los formatos de archivo Excel y PLT.

* **CaveXO**. Visor 3D de cuevas que permite cambios de formatos. Es del paquete de Compass Cave Survey Software y esta es la única versión que funciona en Windows7. Permite seleccionar datos y cambiar el formato de salida de la topografía de la cavidad hecha con VisualTopo (*.plt) a formato (*.dxf).

* **GPSBabel** es un *software* gratuito elaborado por Robert Lipe, en colaboración con un grupo de desarrolladores que se van sumando al proyecto original, cuya función principal es la conversión entre más de 140 formatos de archivos para poder trabajar con ellos en los diversos programas de edición y tratamiento de datos geográficos y todos los modelos de receptores GPS del mercado. Los fabricantes de receptores GPS no utilizan formatos estándares, cada fábrica maneja sus propios formatos de archivos incompatibles entre sí. GPSBabel convierte ficheros con información de coordenadas (*waypoints*) y rutas (*tracks*) entre diferentes formatos para poder transferir esa información entre los receptores GPS y los programas de representación de mapas.

4.2.3. Programas específicos de transformación del sistema de referencia de coordenadas.

Las herramientas necesarias para la homogeneización de la información han sido desarrolladas por instituciones y se encuentran a libre disposición para su uso. Entre las utilizadas en este trabajo estarían las siguientes:

* **Calculadora geodésica:** realiza la transformación de puntos o ficheros de puntos de ED50 a ETRS89, tanto en coordenadas geográficas como en UTM. Esta aplicación ha sido desarrollada por la Subdirección de Astronomía, Geodesia y Geofísica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y está disponible para libre descarga en la página web del I.G.N.: <http://www.ign.es/ign/layoutIn/herramientas.do#PAG>.

* **Rejilla para cambio de Datum entre ED50 y ETRS89** (en formato NTV2, proporcionada por el IGN). Esta transformación no destruye topología alguna, es eficiente y continua con un grado de acuerdo de sólo algunos centímetros sobre todo el territorio. Los SIG tienen integrada esta herramienta en sus últimas versiones.

* **Calculadora de ondulación del geoide.** El modelo oficial *Earth Gravitational Model EGM2008* está publicado para su libre uso en la *National Geospatial-Intelligence Agency*

(NGA: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html). Permite computar las alturas del geoide dando la latitud y longitud geográficas del lugar referidas al elipsoide WGS84. También hay una calculadora *on-line* punto a punto donde se introducen las coordenadas geográficas del punto y se obtiene la altura geoidal en metros o en pies, en el enlace: <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>.

* **Calculadora o-line de declinación magnética.** Esta calculadora ha sido diseñada por el *National Geophysical Data Center* (NGDC), perteneciente al *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) de Estados Unidos (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>), para calcular la declinación en el punto y fecha determinado. Estos datos son introducidos utilizando el modelo actual *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). El Instituto Geográfico Nacional también proporciona los datos geomagnéticos on-line pero la calculadora de declinación magnética sólo admite fechas del 2005 al 2015.

5. METODOLOGÍA

5.1. Homogeneización de la información

Los datos de partida obtenidos desde las distintas administraciones (IGN, IGME, SITAR, CHEBRO, etc.) son heterogéneos en cuanto al sistema de referencia empleado, el formato, la fecha de los datos, etc. Así, por ejemplo, un mismo punto del área de estudio tiene valores de coordenadas diferentes en el mapa geológico del IGME y en el mapa topográfico del IGN por estar referidos a Datum distintos. Por esta razón, cualquier proyecto que se quiera realizar precisa que el conjunto de la información sea homogéneo.

5.1.1. La elección del sistema de referencia espacial.

El primer paso es seleccionar el sistema de referencia geodésico (Datum y proyección) tanto planimétrico como altimétrico sobre el que vamos a tener todos los datos georreferenciados. Es una parte muy importante, laboriosa y que requiere recursos informáticos diversos.

El Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, reguló el sistema de referencia geodésico sobre el que se debe compilar toda la información geográfica y cartográfica oficial referida a todo o parte del territorio español. Respecto al área peninsular, para este trabajo interesan los siguientes aspectos:

- *Sistema de referencia geodésico* (art. 3): Se adopta el sistema ETRS89 para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica que tiene asociado el elipsoide GRS80 y está materializado por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE y sus densificaciones.
- *Sistema de referencia altimétrico* (art. 4): Se tomará como referencia de altitudes los registros del nivel medio del mar en Alicante para la Península. El sistema se encuentra materializado por las líneas de la red de nivelación de alta precisión NAP.
- *Sistema de representación cartográfica* (art. 5): para cartografía terrestre, básica y derivada a escalas mayores de 1/500.000 ETRS-Transversa de Mercator.

En este sentido, los datos de partida, según la fuente de procedencia, ofrecen las siguientes características:

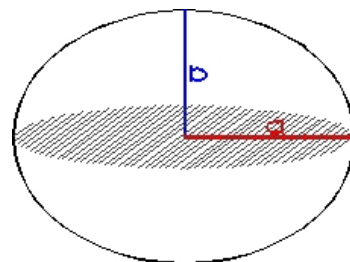
- En relación a los *datos planimétricos* se han elaborado bajo tres sistemas de referencia geodésico diferentes. En la siguiente tabla se resumen los parámetros que definen a los elipsoides utilizados en los sistemas de referencia:

Nombre del Datum	Elipsoide de referencia	a	b	1/α	e
ED50	International1924 (Hayford 1909)	6,378,388.000	6,356,911.946	297.000000	0.081992
ETRS89	GRS 80	6,378,137.000	6,356,752.314	298.257222	0.081819
WGS84	WGS 84	6,378,137.000	6,356,752.314	298.257224	0.081819

Tabla 2: Elipsoides de referencia utilizados en los datos de partida.

Los parámetros que definen todo elipsoide de revolución y las relaciones entre ellos son los siguientes:

Semieje mayor	a
Semieje menor	b
Achatamiento	$\alpha = \frac{a-b}{a}$
Excentricidad	$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$



Los tres sistemas tienen el mismo origen de coordenadas geodésicas: meridiano de Greenwich y Ecuador. Los sistemas ETRS89 y WGS84 son geocéntricos, sin embargo, para ED50 el Datum es Potsdam (Torre de Helmert) en Alemania. A efectos prácticos, en el ámbito SIG se considera que los Datum WGS84 y ETRS89 son iguales por lo que no será necesaria ninguna transformación. Se puede observar en la tabla 2 que los dos elipsoides poseen valores de parámetros prácticamente exactos.

- Respecto a los *datos altimétricos* vienen referidos al nivel medio del mar Mediterráneo en Alicante, excepto los datos tomados con GPS que vienen referidos al elipsoide WGS84.

- Y, finalmente, en cuanto al *sistema de proyección*, todos los datos de partida utilizan la proyección U.T.M. (Universal Transversa de Mercator). Se trata de una proyección cilíndrica transversa conforme que divide a la Tierra en 60 husos (60 proyecciones) de 6° de longitud en anchura empezando por el meridiano 0° de Greenwich y en 20 zonas o bandas de 8°. En el caso de proyección de grandes zonas (como la cuenca del Ebro o la comunidad autónoma de Aragón) los datos se encuentran en el huso central 30T extendido.

Por lo tanto, de acuerdo a las bases recogidas en el citado Real Decreto 1071/2007, los datos planimétricos obtenidos del área de estudio se han transformado al sistema de referencia espacial Datum/Proyección: ETRS89/UTM (huso 31T) y los valores altimétricos se han referido al nivel medio del Mediterráneo en Alicante.

5.1.2. La integración de las capas de información en una geodatabase.

Todas las capas con los datos de trabajo del área de estudio se han incluido en una geodatabase (cotiella.gdb) por tres razones fundamentales:

- para obtener automáticamente recalculados los datos de la capa de partida (como perímetros y áreas) resultado del recorte o extracción de la zona de estudio
- para tener todas las capas del área de trabajo agrupadas y organizadas en el mismo contenedor
- para poder trabajar con las tablas en Access y utilizar las herramientas de consultas y formularios.

5.1.3. La transformación de las capas de información.

- **Las capas obtenidas del IGN** tienen todos los datos georreferenciados en el sistema de trabajo, con lo que no se requiere realizar ninguna transformación.

- **Las capas que se han obtenido desde la CHEBRO y el SITAR** están todas en formato vectorial, si bien el sistema de referencia espacial es ED50/UTM 30T. En este caso se ha utilizado la rejilla, proporcionada por el IGN, para cambio de Datum entre ED50 y ETRS89 (en formato NTV2_Península) que viene incorporada en el software ArcGIS 10. Esta transformación no destruye topología alguna, es eficiente y continua con un grado de acuerdo de solo algunos centímetros sobre todo el territorio peninsular. El protocolo ha sido el siguiente: cada capa se recorta por el área de estudio (polígono), se reproyecta al huso 31T y finalmente se cambia de Datum.

- **El mapa geológico (hoja 179, Bielsa)** descargado desde el portal del IGME es una imagen raster, georreferenciada en coordenadas geográficas, si bien utiliza el datum ED50. Por lo tanto, al igual que en el caso anterior, se han utilizado las herramientas de ArcGIS para realizar el cambio de datum a ETRS89 y proyección UTM31T. La imagen resultante, recortada por el área de estudio, sirve de base para digitalizar con el CAD Microstation las unidades geológicas, los contactos, los ejes estructurales y las estructuras de plegamiento. Los archivos .dgn se cambian de formato y se incorporan a la geodatabase en ArcMap.

- Los datos proporcionados por la **ACEC** son vectoriales y contienen dos tipos de datos:

- *Los datos de ubicación de las cavidades.* Se trata de una capa vectorial de puntos en coordenadas UTM31T y Datum ED50. Se ha utilizado, igualmente, la herramienta de proyección (rejilla NTV2_Península) de ArcGIS para transformar la capa al Datum ETRS89.

- *Los datos de topografía de las cavidades.* La topografía de cada cavidad está en un archivo vectorial de polígonos en Datum ED50 y proyección UT31T. Con la herramienta de ArcMap se ha cambiado el Datum de cada archivo y se ha incorporado a la geodatabase.

- **Los datos de elaboración propia** requieren diversas transformaciones antes de ser incorporados a la base de datos:

a) *Los datos de GPS obtenidos en los trabajos de campo.* La ACEC indica la necesidad de comprobar la ubicación geográfica de alguna de las cavidades inventariadas. Con este objeto, durante las campañas de campo se ha llevado a cabo la comprobación de la localización geográfica de algunas de las cavidades (capa de puntos) y de rutas de acceso (capa de líneas) mediante GPS. Por defecto, los datos del GPS se muestran en coordenadas geográficas, pero se puede configurar el receptor para obtener coordenadas en UTM 31T (algunos receptores GPS llevan incorporado un altímetro barométrico que, bien ajustado y configurado, da valores sobre el nivel del mar aceptables pero el receptor utilizado toma datos altimétricos sobre elipsoide).

Los archivos GPS de las rutas de acceso al punto de entrada de cavidades se han exportado directamente al SIG ArcMap, únicamente se debe realizar el cambio de formato de archivo con el software GPSBabel (de *.trk a *.kml) como se muestra en la figura 6.

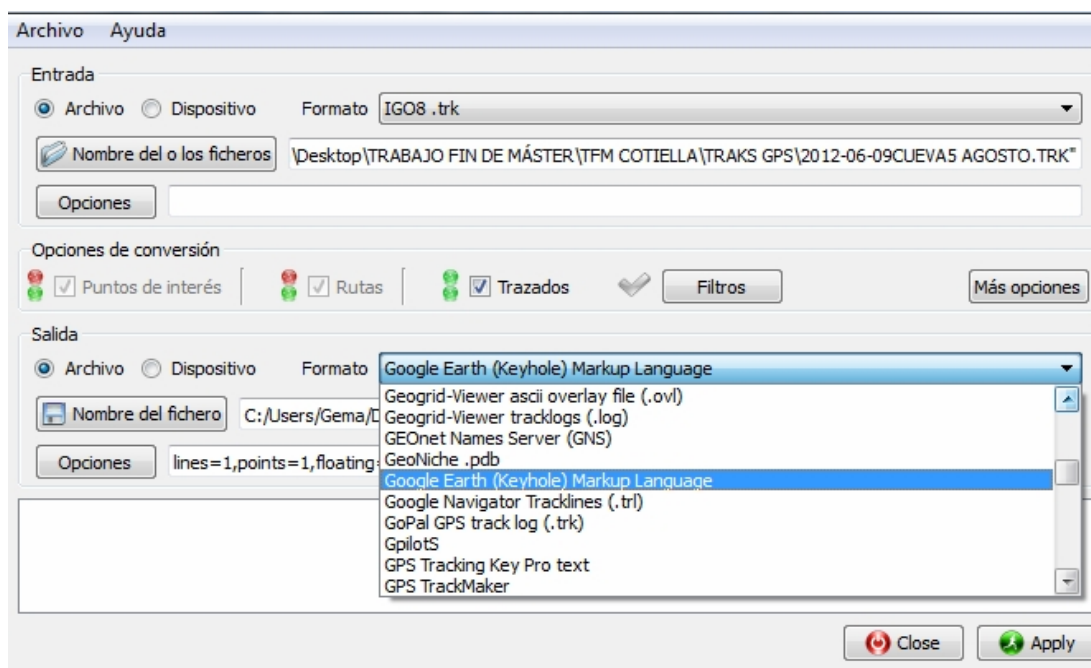


Figura 6. Imagen del programa GPSBabel para cambio de formato de archivos GPS

El archivo *.kml resultante se incorpora a ArcMap y se exporta a formato *.shp para finalmente incorporarlo a la geodatabase.

El problema estriba en que los datos GPS sobre la altimetría de los puntos de ubicación de cavidades son calculados sobre elipsoide y hay que referirlos a valores sobre el nivel del mar antes de incorporarlos a la base de datos de cavidades.

Los receptores GPS calculan las alturas elipsoidales (sobre elipsoide WGS84) pero, cuando es necesario obtener las alturas respecto al nivel del mar, estas alturas elipsoidales se deben convertir en alturas ortométricas (la altura respecto al geode) utilizando la relación:

$$h = H + N$$

Siendo:

h la altura de un punto con respecto al elipsoide (altura elipsoidal u perpendicular al elipsoide),

N la altura del geode respecto al elipsoide (llamada ondulación del geode y también perpendicular al elipsoide) y

H la altura del punto con respecto al geode (llamada altura ortométrica y es altura medida a lo largo de la altura de plomada y perpendicular al geode).

Los valores de ondulación del geode pueden ser tanto positivos como negativos, es decir, en algunas zonas del planeta el geode está por encima del elipsoide y en otras está por debajo (Figura 7).

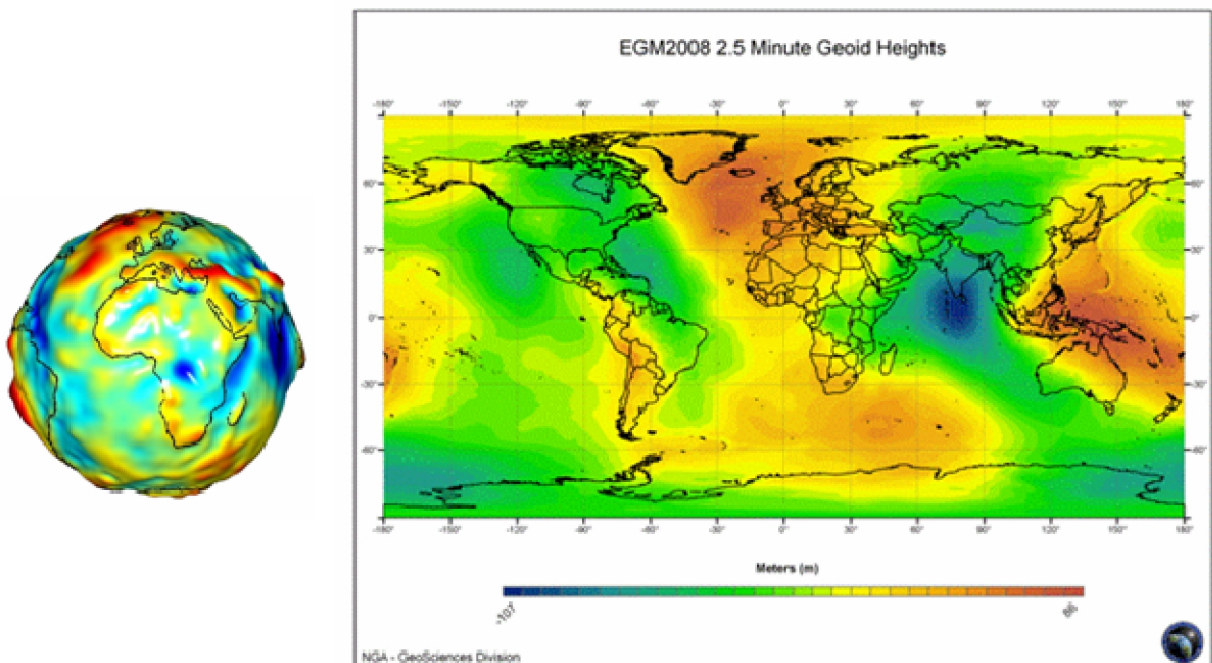


Figura 7. Representación de la diferencia vertical geode-elipsoide. Fuente: Misión GRACE (NASA).

La altura esferoidal es un valor geométrico y no tiene sentido físico, no refleja el valor de la gravedad. Se podría dar el caso de un área donde los cursos de agua pueden fluir hacia arriba, es decir, pueden no reflejar el movimiento provocado por la gravedad.

En la zona norte de la Península Ibérica el valor de la altura geoidal N oscila entre los 45 y 60 metros, es decir, el elipsoide WGS84 se encuentra una media de 50m por debajo del geode (Figura 8).

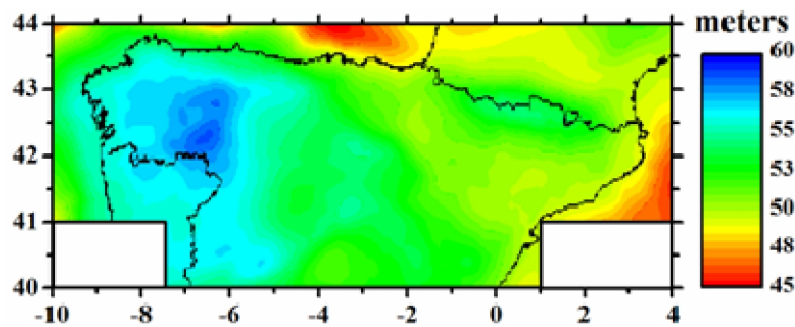


Figura 8: Ondulación del geode en el área del norte de Iberia. Fuente: NIBGEO. Prof. Dr. Víctor Corchete. Departamento de física aplicada. Universidad de Almería.
http://airy.ual.es/www/nibgeo_spanish.htm

Se puede apreciar que los valores de la ondulación del geode (o altura geoidal) en la zona del Pirineo son del orden de 50 a 53 metros. Es decir, tenemos que restar este valor a la altitud elipsoidal que nos da el GPS para obtener altitudes ortométricas. Lo más sencillo es usar la calculadora de ondulación del geode N para cada punto y restar ese valor al de GPS como se explicó anteriormente. Sin embargo, en el caso de tener muchos puntos de datos, lo más rápido es descargarse el archivo de la capa raster (formato ESRI GRID) con los valores de la altura geoidal de la cuadrícula que corresponde a nuestra zona de estudio. El tamaño de celda es de 2.5 minutos pero válido para este estudio. Este archivo está disponible en la página web de la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_gis.html).

Esta capa se extrae por máscara de zona de estudio, se proyecta a ETRS89 UTM 31T y se añade a la geodatabase. En nuestra capa de puntos de cavidades, con la herramienta "Extraer valores múltiples a puntos" añadimos el nuevo campo N (altura geoidal). Posteriormente creamos un nuevo campo H altura ortométrica y con la calculadora de campo restamos a la altura de GPS el valor de N (Figura 9).

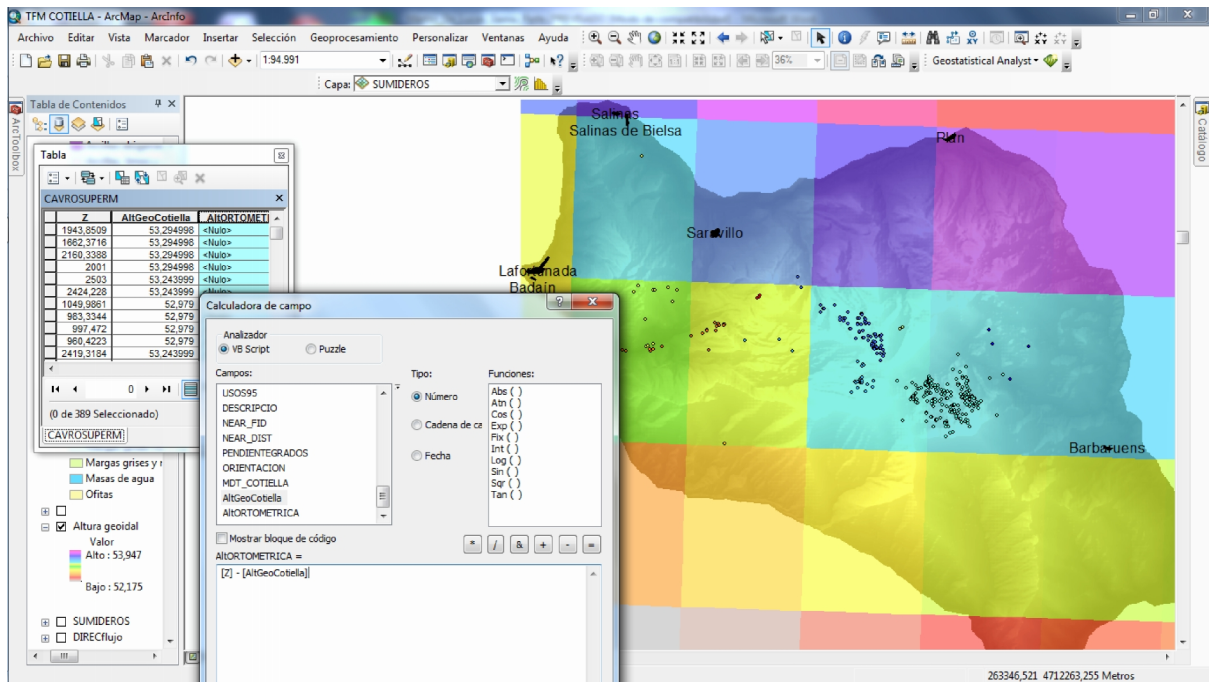


Figura 9. Imagen de ArcMap mostrando el proceso de cálculo de alturas ortométricas.

b) Los datos de campo para el levantamiento topográfico de las cavidades. Estos datos, tomados durante las campañas de campo de los Grupos de Espeleología, se introducen en fichas estándar, cada una para cada estación de medida. En éstas se anotan diferentes valores: la distancia, la dirección e inclinación, así como los valores al techo, suelo, derecha e izquierda de la cavidad en ese punto. La técnica e instrumental de topografía espeleológica se adapta a los obstáculos encontrados y a la disponibilidad de material y conocimientos del grupo. También se anotan las coordenadas de la entrada de la cavidad bien por triangulación con mapa topográfico o bien se toman del GPS, así como la dirección del norte magnético y/o norte geográfico (con brújula y mapa).

Estos valores se introducen en el programa VisualTopo, cuyo interface tiene el mismo formato que la ficha, con el que se calculan las coordenadas de todos los puntos y permite representar la planta, el alzado y el alzado desarrollado de cada cavidad e incluso se dispone de la opción de visualizar y representar en 3 dimensiones como se puede apreciar en la figura 10.

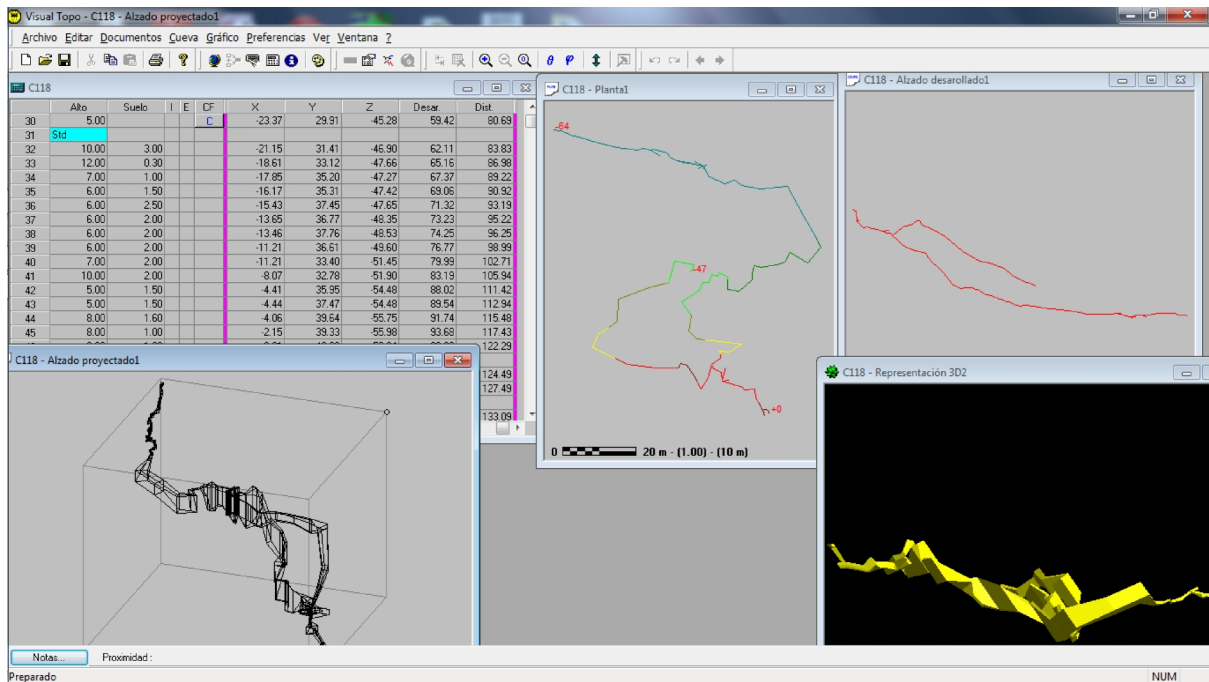


Figura 10. Imagen de las herramientas del programa VisualTopo.

Otros datos topográficos que se añaden son: el desarrollo horizontal de la cavidad, el desarrollo vertical de la cavidad y el grado de precisión según la Unión Internacional de Espeleología (UIS International Union of Speleology) (Häuselmann, 2011).

El archivo de datos generado con el programa VisualTopo tiene una extensión *.plt, si bien puede exportarse a fichero con extensión *.dxf. Posteriormente en un programa CAD (Microstation o AutoCAD) se añaden los símbolos convencionales en la planta y el alzado de la cavidad según la UIS (disponibles en http://www.carto.net/neumann/caving/cave-symbols/uis_signatures_english.pdf).

Los programas CAD incorporan en el mismo archivo (*.dxf, *.dwg, *.dgn) los datos de puntos, líneas y polígonos. La mejor representación de la topografía subterránea es la formada con los poliedros resultantes al unir el rectángulo de cada estación (formado por los datos del alto y el ancho de la cavidad en ese punto) con los de la estación siguiente y así sucesivamente. Así se obtiene una idea aproximada del volumen, tamaño de las galerías, pasajes, pozos, gateras, etc. que conforman la cavidad. En la figura 11 se muestra un ejemplo de la topografía de una cavidad visualizada con el CAD Microstation.

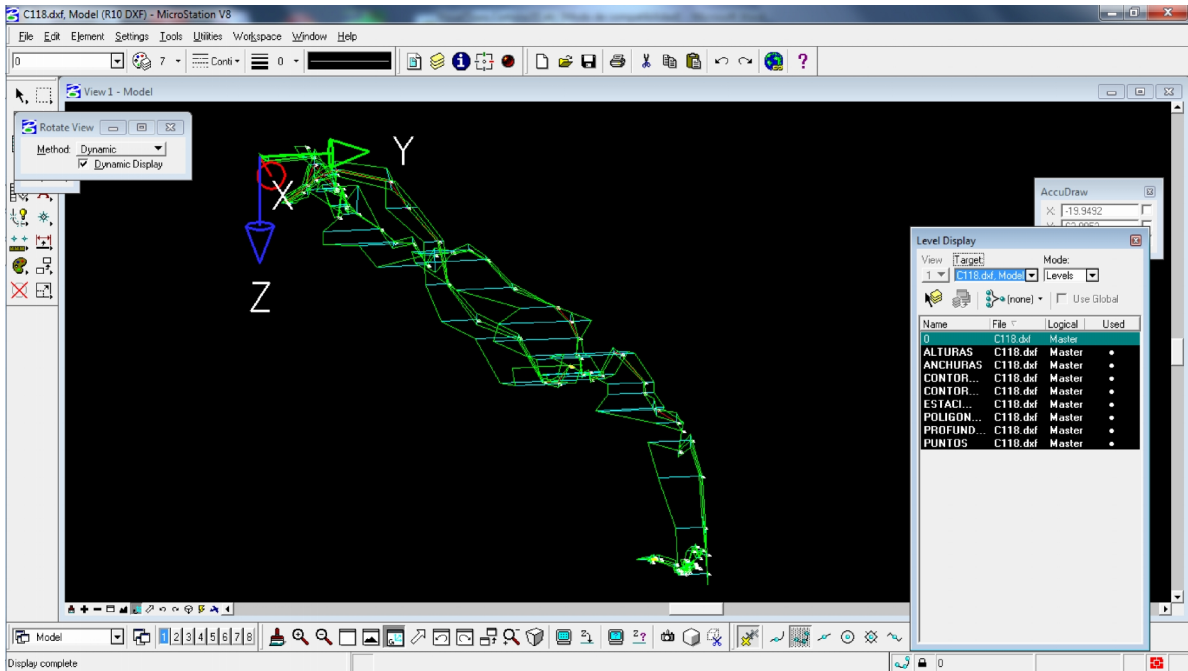


Figura 11. Imagen 3D de la topografía de una cavidad en el programa Microstation.

Para integrar e importar los archivos topográficos en ArcGIS se selecciona la serie de polígonos que representan la cavidad en formato *dwg o *dgn, se añaden como capa en ArcMap y se exportan a *shp o dentro de la geodatabase.

Hay que tener en cuenta que las topografías referidas al norte magnético hay que pasarlas antes a norte geográfico y, finalmente, al norte de cuadrícula. El valor de la declinación magnética para un punto terrestre en una fecha dada se puede obtener en la calculadora online de declinación magnética del *National Geophysical Data Center* (NGDC) (Figura 12). Es importante realizar este paso para topografías antiguas pues en 40 años el valor de la declinación magnética en la zona ha variado más de 5°, como se puede apreciar comparando los valores en Cotiella (latitud: 42.513° N y Longitud: 0.321° E) del 1 de enero de 1970 y el mismo día de 2012, como se muestra en la tabla 3.

Fecha	Declinación magnética (+ E - W)
1970-01-01	-5.7275° changing by 0.1017° per year
2012-01-01	-0.4703° changing by 0.1217° per year

Tabla 3. Valor de la declinación magnética en Cotiella en diferentes fechas.

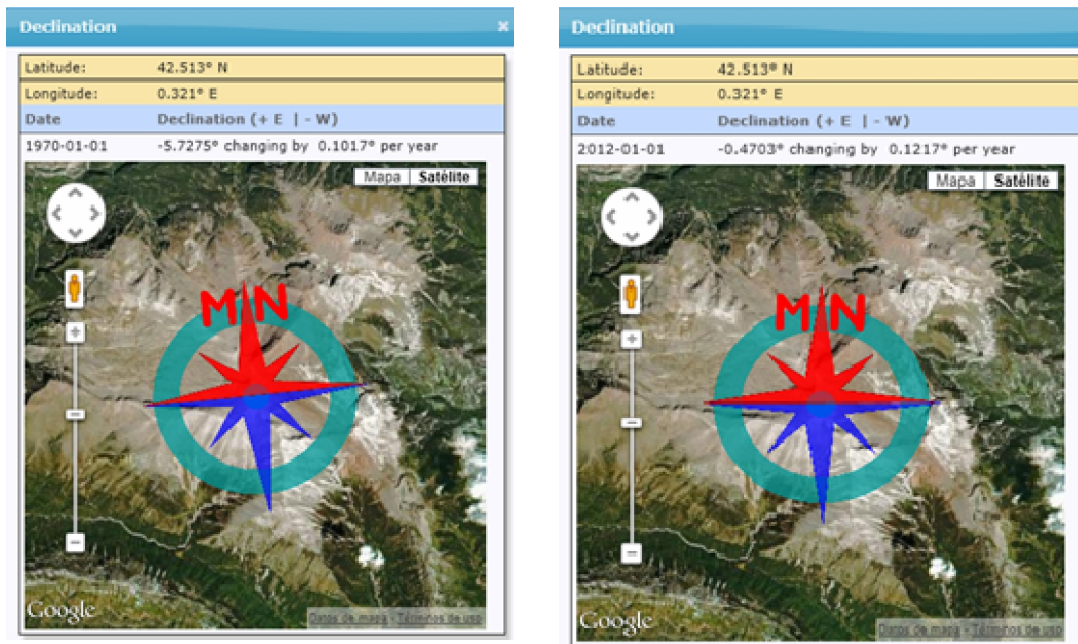


Figura 12. Imagen de los resultados de la declinación magnética para el área de estudio.

El último paso es georreferenciar los datos a ETRS89 UTM31T con las coordenadas de ubicación de la cavidad, que corresponde al punto medio de la boca o entrada. Este es nuestro punto (0,0) de la topografía de la cavidad y, excepto que la cavidad tenga más de una entrada, es el único punto disponible para la georreferenciación de todos los datos subterráneos. Con la herramienta “Georreferenciación” de ArcMap (Figura 13) se asigna el valor de las coordenadas de la boca de la cavidad al punto (0,0) y se proyecta con el Datum y coordenadas elegidas.

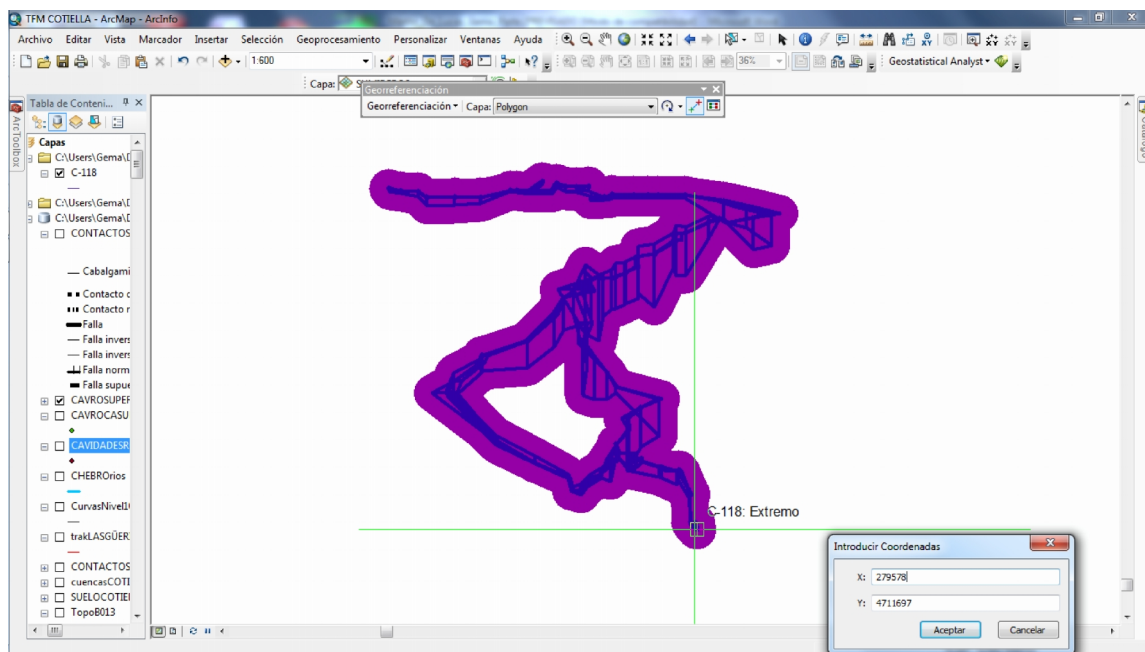


Figura 13. Imagen de ArcMap georreferenciando la topografía de una cavidad.

Así, al añadir las capas de topografía subterránea 3D en ArcMap se visualiza la proyección de la planta sobre la superficie del terreno y en ArcScene se visualiza bajo el MDT de la zona.

c) Los datos sobre la ubicación y el levantamiento de la topografía de la cueva de Lasgüeriz. Los datos de ubicación tomados por triangulación con apoyo del mapa topográfico de Cotiella (Llobet, 1994) están en coordenadas geográficas (meridiano 0° Madrid) y ED50. Antes de incluir estos datos en la capa de puntos de ubicaciones, los valores de longitud se pasan a meridiano de Greenwich restando 3°41'14'' al este. Con la calculadora geodésica del IGN se realiza la transformación de las coordenadas de puntos de ED50 a ETRS89 en coordenadas UTM31T y éstos se añaden a la base de datos de puntos de cavidades.

5.2. Obtención de datos morfométricos y geológicos de las cavidades

A partir del Modelo Digital de Elevaciones y la cartografía derivada (mapa de pendientes, mapa de orientaciones) se han obtenido algunos parámetros morfométricos referidos a la ubicación de las cavidades (capa vectorial de puntos). Así, para cada punto representativo de la entrada de cada cavidad se han obtenido los parámetros de pendiente y orientación. Se ha utilizado para ello la herramienta “Extraer valores múltiples a puntos”, de la caja “Extracción” de Herramientas de Análisis Espacial, de ArcMap. Así se añaden nuevos campos en la base de datos con los valores para el punto de la entrada de cada cavidad de la pendiente y de la orientación.

También se ha completado la información de la base de datos referida a cada cavidad con datos sobre el tipo de roca, la ocupación del suelo, la permeabilidad y la cuenca hidrográfica. Estos datos se han obtenido por unión de tablas por localización espacial.

Otro campo que se ha añadido es la distancia a contactos y ejes estructurales por medio de la herramienta de análisis de proximidad: cercano (near).

Por otro lado, se ha obtenido también, la tabla de matriz de distancias entre cavidades con la herramienta “PointDistance” (distancia a punto). Y, finalmente, la tabla de rocas por altitud se obtiene con la herramienta de estadística zonal como tabla.

5.3. Cartografía geológica de cavidades

La hoja geológica (nº 179, Bielsa) a escala 1:50.000 obtenida de la web del IGME está, como se indicó, georreferenciada en el Datum ED1950. Así pues, una vez transformada al

Datum ETRS89, se procedió a su digitalización. Para ello se utilizó el CAD MicroStation. La capa derivada (en formato *.dgn) se abrió con ArcMap y se importó a una capa *.shp. El segundo paso fue la composición y simbolización del mapa geológico, para lo que se empleó “la vista de composición” de ArcMap. A los recintos o polígonos que definen las distintas unidades geológicas, a las líneas que indican los contactos, los accidentes tectónicos (fallas) y los ejes de las estructuras de plegamiento se les asignan símbolos y colores lo más similares posibles a los normalizados por el IGME en el plan GEODE de cartografía geológica continua, para conseguir una coherencia del resultado con la cartografía geológica oficial. Posteriormente se añadió la capa de poblaciones y algunas curvas de nivel con sus etiquetas como ayuda de localización.

Sobre la base de esta información geológica se prepararon dos tipos de mapas en relación con las cavidades:

- a) Mapa de la ubicación de las cavidades con un símbolo puntual. Se realiza un mapa de toda la zona de estudio y un mapa de detalle sobre un sector.
- b) Mapa con la topografía de las cavidades como polígonos resaltados en rojo. Se elige un sector para hacer “zoom” dadas las pequeñas proporciones de las cavidades respecto a toda el área de estudio.

5.4. Cartografía y visualización en 3D de las cavidades

Una de las aplicaciones más novedosas implementadas en las TIGs, aunque no exenta de complejidad, es la representación y visualización de las cavidades en tres dimensiones. Sin duda, puede decirse que cualquier estudio de cavidades queda incompleto si no se incluye su desarrollo subterráneo en su representación. Los espeleólogos exploran, estudian y levantan la topografía del interior de las cuevas y, gracias a las herramientas 3D de los SIG o CAD, se puede integrar la topografía de la cavidad con la de la superficie exterior y estudiar y analizar su relación.

Para una visualización en 3D se utiliza el módulo ArcScene de ArcGIS representando el MDT05 del área de estudio y la capa de puntos de ubicación de cavidades. Esta aplicación carece de vista de composición de mapas pero permite navegar girando sobre el terreno para conseguir la visualización adecuada e imprimir la pantalla para mostrar los resultados. Se han añadido también las poblaciones, masas de agua y rutas de acceso a alguna cavidad como posible aplicación de resultados.

Finalmente, se han añadido las capas de las topografías de las cavidades bajo el MDT con transparencia para poder visualizar el desarrollo subterráneo hasta hoy día explorado buscando la orientación más adecuada.

6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos pueden agruparse en tres bloques: la elaboración de una base de datos de las cavidades, la cartografía espeleológica en su contexto geológico y la representación en 3D de las cavidades.

6.1. La elaboración de una base de datos de las cavidades

A partir del fichero de la ubicación de las cavidades proporcionado por la ACEC, que se correspondía con fichero vectorial de puntos con la localización geográfica de cada cavidad, se ha completado a lo largo de este trabajo el fichero inicial incorporando diversa información, cuyo resultado ha sido la creación de una completa base de datos asociada (Figura 14), que incluye los siguientes campos (además de las coordenadas de la ubicación de cada cavidad):

- **Nombre:** que indica el sector donde se encuentra y un nº de orden según fecha de descubrimiento.
- **Otro nombre:** si hubiese otro nombre conocido de la cavidad.
- **Sector:** letra que indica una de las 11 zonas en que se ha subdividido el macizo.
- **Desnivel:** diferencia de cota entre el punto más profundo de exploración y el punto más próximo a la superficie (en metros).
- **Recorrido:** desarrollo horizontal de la cavidad (en metros).
- **Origen de datos:** triangulación, GPS.
- **Topografía:** si se ha realizado y está disponible se hace link con el archivo.
- **Foto:** enlace a fotografías, si las hubiese.
- **Observaciones:** otros datos de interés.
- **Pendiente:** pendiente del terreno en grados.
- **Orientación:** en grados respecto al norte.
- **Suelo:** bosque, roquedo o mixto.
- **Roca:** tipo de roca, periodo y edad geológica.
- **Cuenca:** cuenca hidrográfica en la que se encuentra.
- **Distancia a contactos/ejes:** distancia a contactos o ejes estructurales (en m).
- **Altura geoidal:** valor de la ondulación del geoide (en m).

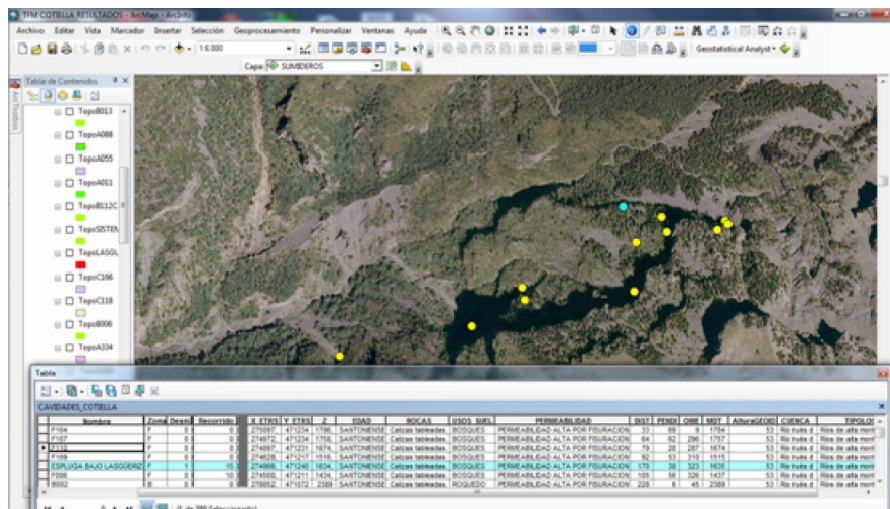


Figura 14. La imagen representa ArcMap mostrando un detalle de las cavidades sobre la ortofotografía con la tabla de atributos de cavidades con una fila seleccionada. Elaboración propia a partir de datos de ACEC e IGN.

Entre las aplicaciones de la base de datos está la posibilidad de representar la ubicación geográfica de las cavidades sobre la topografía o sobre ortofotos. Por ejemplo, la figura 15 muestra el mapa de la representación de las cavidades sobre la ortofotografía PNOA.

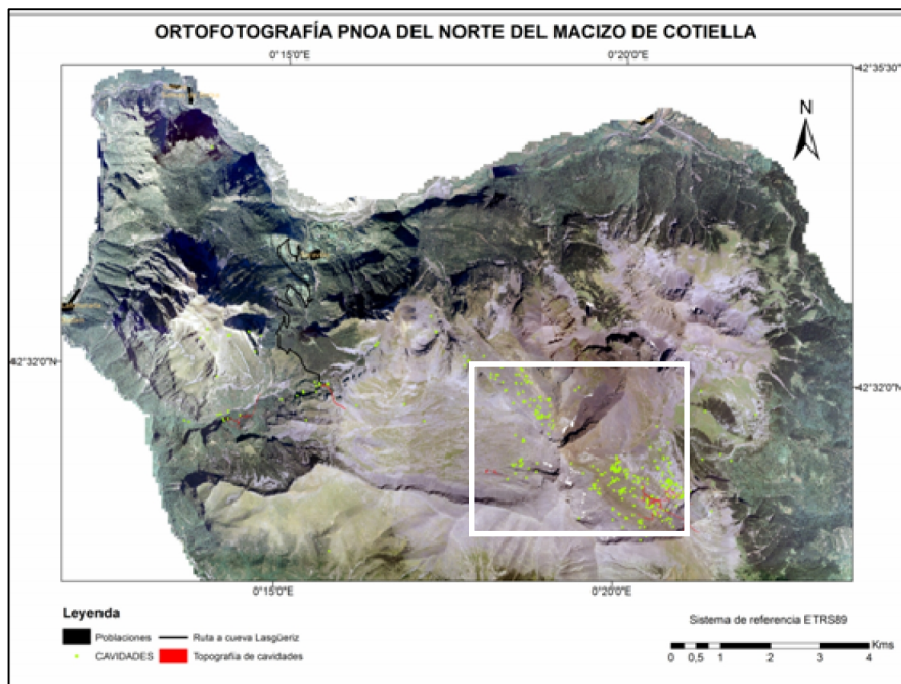


Figura 15. Mapa del norte del macizo de Cotiella. Elaboración propia. Fuente: IGN, ACEC.

Acercándonos a la imagen en la zona del pico Cotiella (figura 16) podemos apreciar la topografía de las cavidades con su representación en planta sobre la ortofotografía PNOA junto al punto negro que representa la entrada o boca de la cavidad.

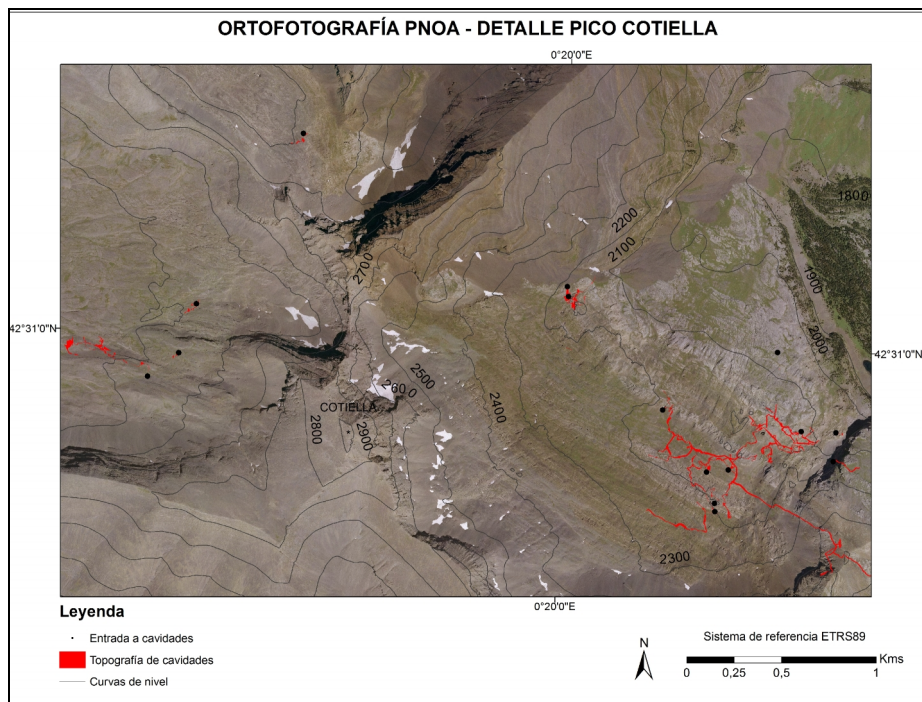


Figura 16. Detalle de ortofoto del Pico Cotiella. Elaboración propia. Fuente: IGN, ACEC.

6.2. Cartografía espeleológica en su contexto geológico.

Otro de los resultados remarcables es la posibilidad de representar conjuntamente las características geológicas del área de estudio con la distribución y/o el desarrollo topográfico de las cavidades. Esta información cartográfica, desde un punto de vista científico, puede resultar de gran utilidad para mostrar el control y factores geológicos en la distribución y localización de las cavidades así como su desarrollo (Figura 17).

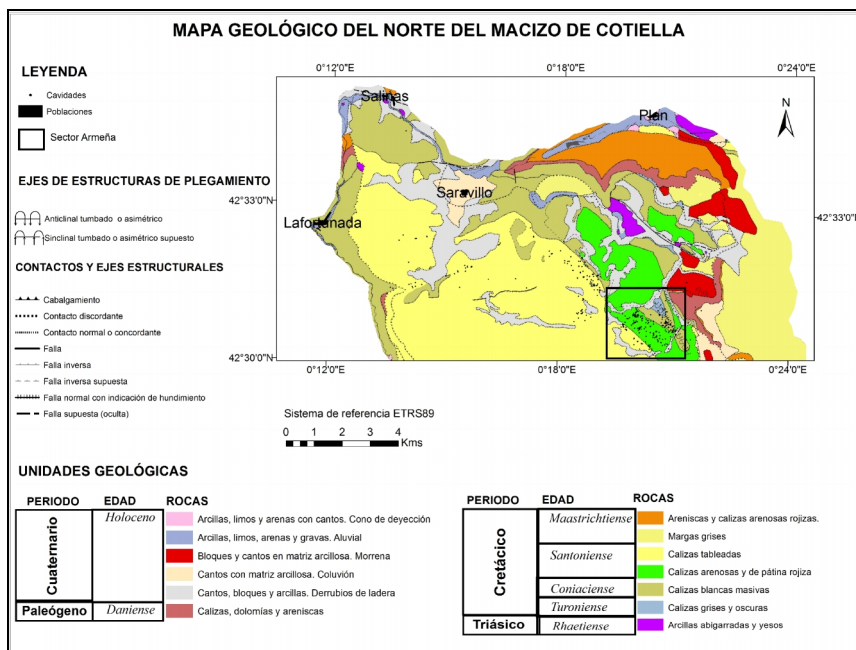


Figura 17. Mapa geológico de cavidades del macizo de Cotiella. Elaboración propia. Fuente: IGME.

En detalle se muestran varios ejemplos de la distribución geográfica y las topografías de las cavidades en el circo de Armeña (Figuras 18 y Figura 19):

- Representando la ubicación de cavidades:

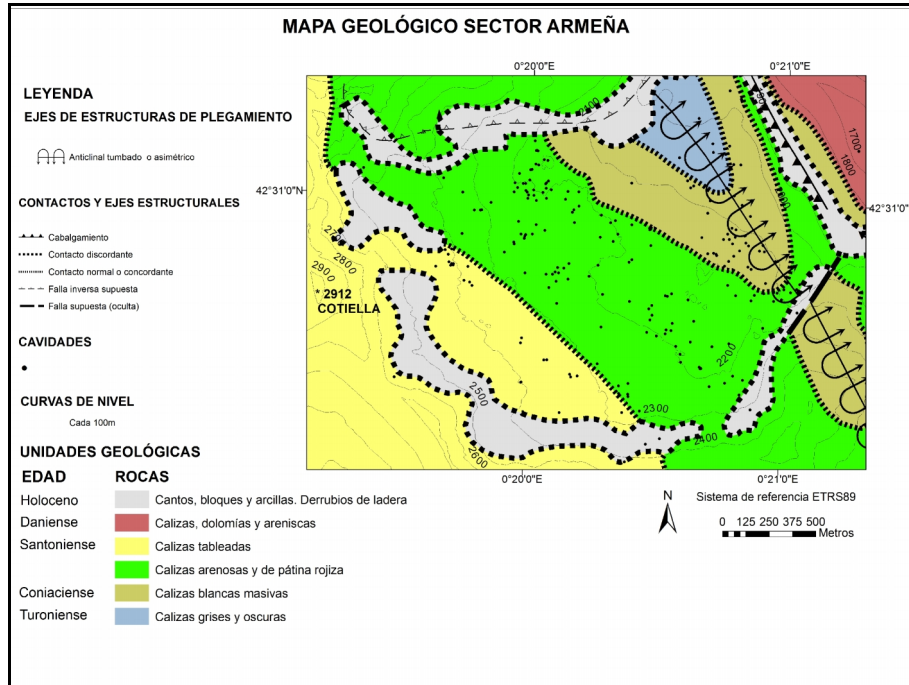


Figura 18. Ubicación de cavidades sobre mapa geológico. Elaboración propia. Fuentes: IGME y ACEC.

- Con la inserción de topografía de cavidades:

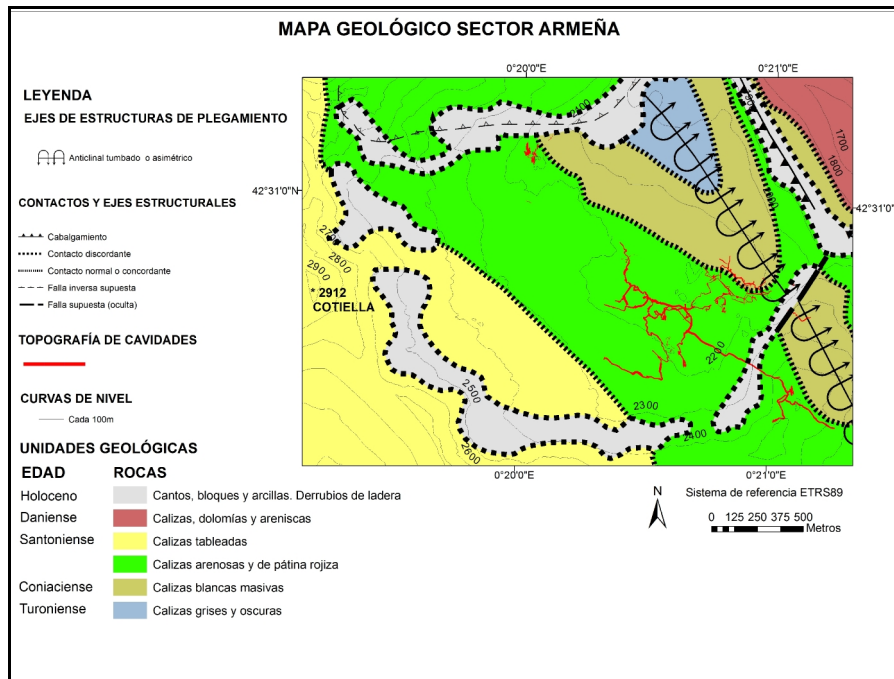


Figura 19. Topografía de cavidades sobre mapa geológico. Elaboración propia. Fuentes: IGME y ACEC.

Pero también, esta cartografía es una valiosa fuente de información para grupos de espeleología, así como para mostrar aspectos divulgativos del área kárstica de Cotiella. En este sentido, como aplicación del mapa geológico con topografía de cavidades se ha realizado un mapa geológico simplificado (Figura 20) con la ruta de acceso a la cavidad de Lasgüeriz junto con la representación de su topografía.

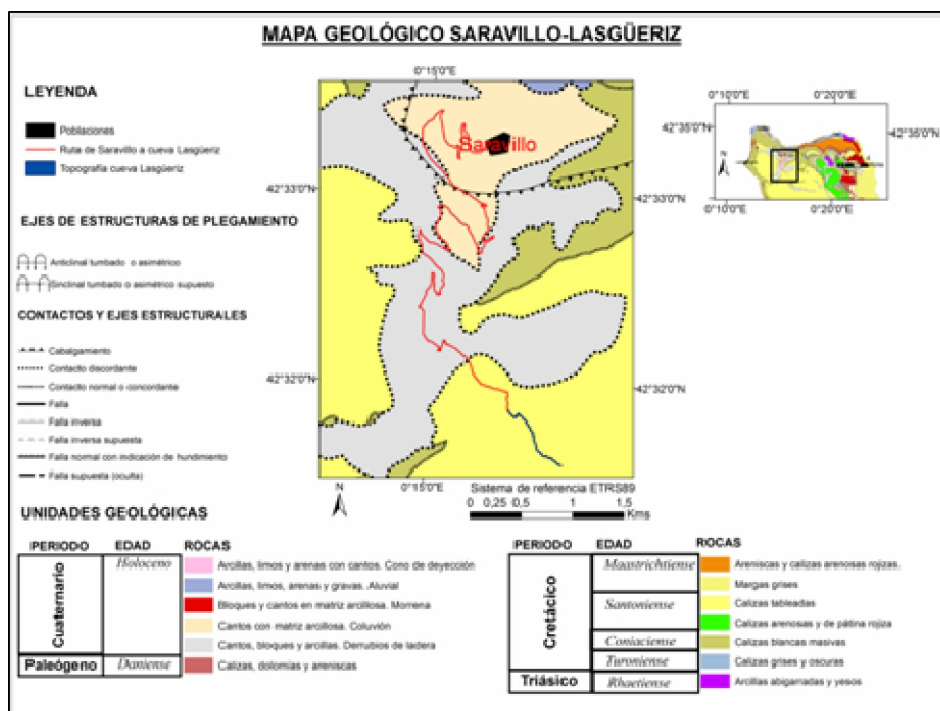


Figura 20. Mapa geológico Saravillo-Lasgüeriz. Elaboración propia. Fuentes: ACEC, IGME.

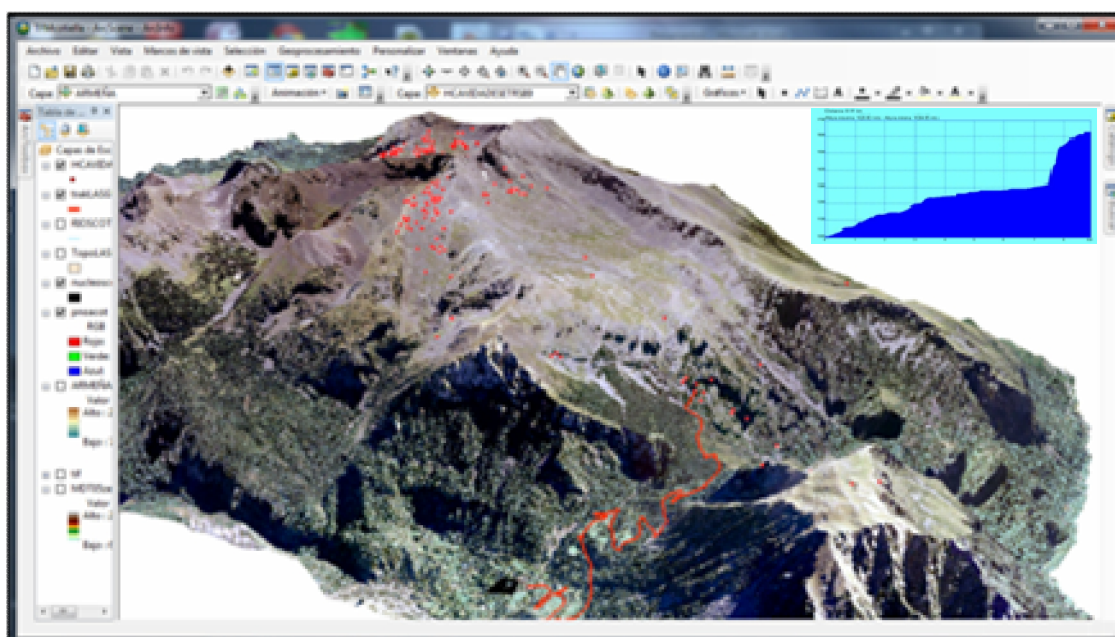


Figura 21. Imagen de ArcScene con ortofotografía de la zona mostrando la ruta desde Saravillo a la cueva Lasgüeriz, junto al perfil de la ruta. Elaboración propia. Fuente IGN, ACEC.

Al tener un objetivo más divulgativo, resulta muy apropiado combinar la información geológica con la representación y visualización del relieve en 3D, apoyándose en la ortofotografía del PNOA. Para ello se utiliza ArcScene sobre el MDE, orientado de manera que permita ver la población de salida de la ruta (Saravillo) y la localización de la cavidad a visitar, incluyéndose además el perfil del recorrido (Figura 21).

6.3. La visualización y la representación en 3D de las cavidades

La geovisualización en 3D es una herramienta de difusión y transmisión de información muy eficaz; el mundo de la espeleología no es ajeno a la posibilidad de representar el desarrollo de las cavidades en 3D.

En este trabajo, los resultados más significativos de la aplicación de las TIGs y su representación en 3D se muestran en diferentes ejemplos con las topografías de algunas de las cavidades, próximas entre sí, del circo de Armeña, que se han obtenido con el módulo ArcScene de ArcGIS. No resulta fácil obtener imágenes en 3D de las cavidades, por este motivo resulta conveniente utilizar colores diferentes para cada cavidad, así como buscar la orientación adecuada, pues permitirá que nuestros ojos y nuestro cerebro capten más información y esta pueda interpretarse y percibirse de manera más realista.

En todo caso, lograr una representación ilustrativa y realista de la topografía de las cavidades, además de su indudable valor divulgativo, puede ser de gran ayuda científica a la hora de obtener información sobre la dirección del flujo hídrico subterráneo.

Así, por ejemplo, en el área de estudio las aplicaciones de visualización en 3D pueden servir de gran apoyo a la interpretación de la compleja hidrogeología del sistema kárstico del macizo de Cotiella: en el verano de 1985 se inyectó fluoresceína en una de las cavidades del circo de Armeña, que drena a la cuenca del río Ésera, sin embargo los fluocaptadores dieron positivos en la estación de medida instalada en Fuentes Blancas, que pertenece a la cuenca del río Cinca, y se sitúa a unos 10 km en línea recta de la cavidad anterior (ACEC 2012). En la imagen 3D de las cavidades puede apreciarse no sólo la gran distancia entre dichas cavidades sino también el hecho de que pertenecen a cuencas hidrográficas superficiales diferentes (Figura 22).

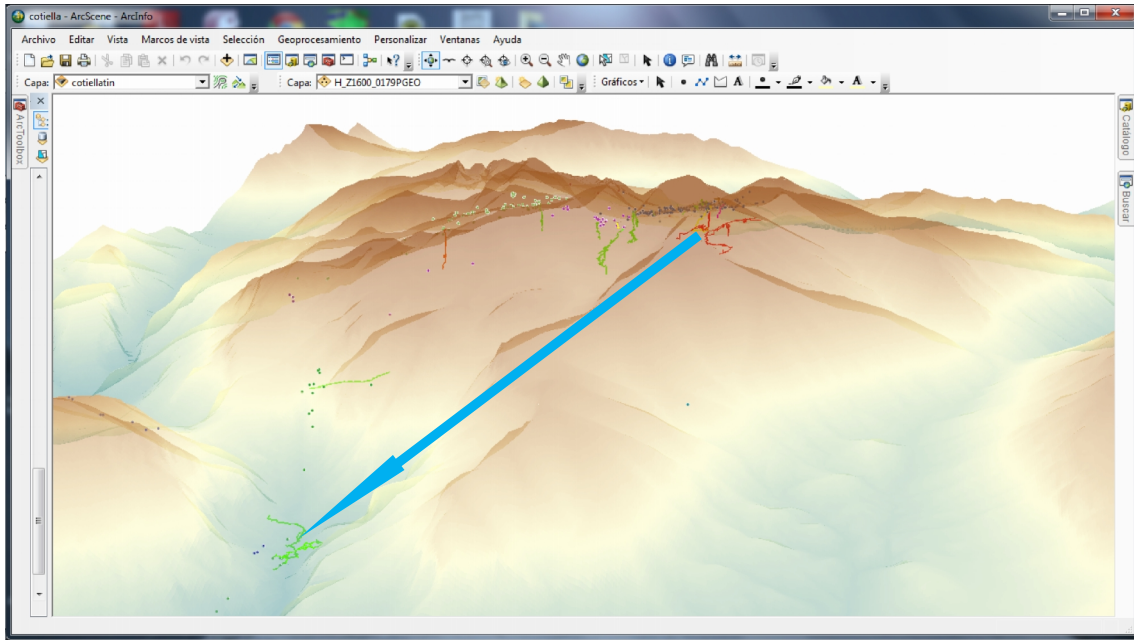


Figura 22. Imagen de ArcScene con la representación de topografía de cavidades. La flecha de flujo añadida indica la dirección del agua subterránea. Elaboración propia. Fuente: ACEC, IGN.

También la proyección en 3D de las cavidades puede ser utilizada para espeleólogos. En este sentido, en la próxima campaña de julio 2012 espeleobuceadores de ACEC van a intentar unir las simas A011 y A008 a través de los respectivos sifones terminales que se señalan en la figura 23. Se puede apreciar que la distancia es corta (unos 40m) y la cota es parecida (5 m de desnivel).

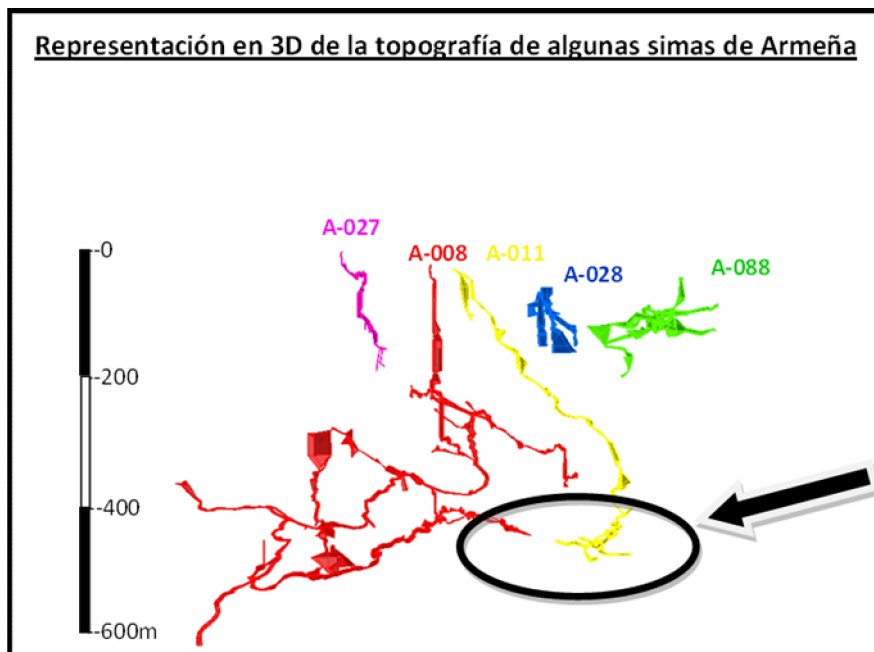


Figura 23. Imagen de ArcScene representando la topografía de cavidades próximas del circo de Armeña. Elaboración propia. Fuente ACEC.

Una última aplicación de este trabajo ha consistido en transformar los resultados de la topografía de las cavidades en 3D en un formato compatible con cualquier navegador de Internet, que permita visualizarlos en cualquier equipo (sin necesidad de tener instalado ArcGIS) (Figura 24). Desde ArcScene se ha exportado la escena de un recorte de la capa MDT junto a la topografía de cavidades a un formato 3D virtual VRML (*.wrl).

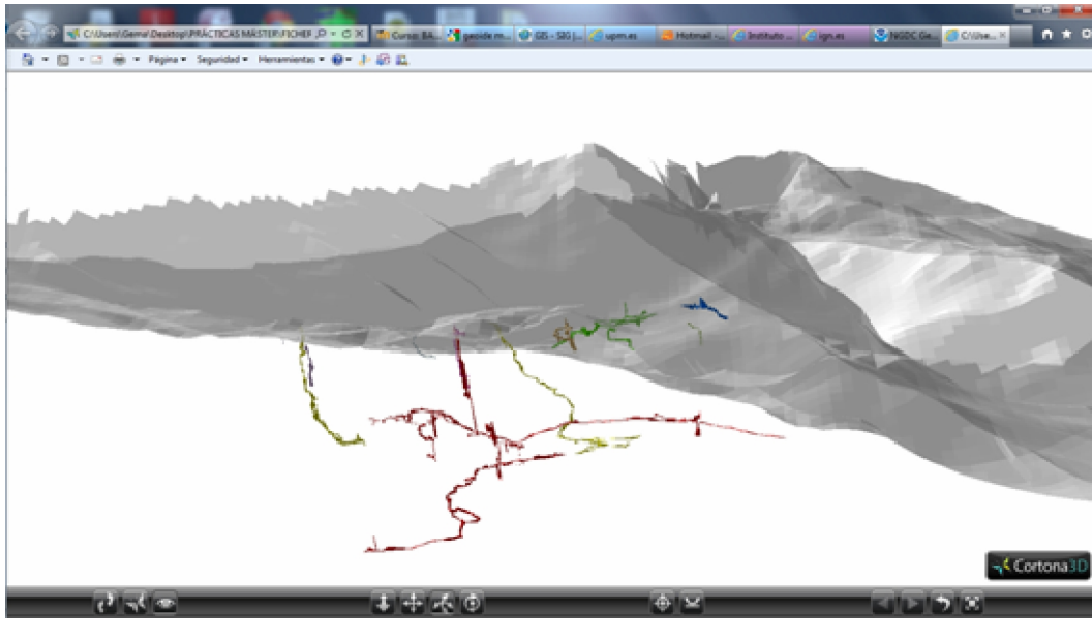


Figura 24. Imagen de navegador de internet mostrando un recorte de la zona de Armeña con la topografía de cavidades 3D sobre el visor Cortona3D. Elaboración propia. Fuente ACEC, IGN.

Para poder visualizar este formato de archivos es necesario tener instalado en el equipo el plugin visor de VRML. Uno de estos programas es el de Cortona3D disponible gratuitamente en la dirección URL: <http://www.cortona3d.com/Products/Viewer/Cortona-3D-Viewer/install.aspx>. Se trata de un visor de 3D interactivo para visualizar mundos virtuales en la web. Es compatible con los navegadores web y con diversas tecnologías para desarrollo 3D y con todos los formatos de VRML.

7. CONCLUSIONES

Dado que el objetivo general que nos planteábamos con este Trabajo Fin de Master era adquirir mayores conocimientos y destrezas en el uso de diferentes tecnologías de la información geográfica (TIGs) y sus posibles aplicaciones en el campo de la espeleología, el estudio ha mostrado, a lo largo de los ejemplos expuestos en este TFM, la utilidad y potencialidad que los programas de SIG y CAD (ArcGIS y MicroStation), así como de otros

más específicos (VisualTopo), tienen para desarrollar y llevar a cabo trabajos relacionados con la espeleología.

Este estudio ha demostrado la necesidad, al menos en el campo de la espeleología, de homogeneizar los datos de partida. El hecho de tener datos de diferentes años, en distintos sistemas de referencia geodésicos o diferente sistema de proyección u origen de coordenadas no invalida su uso. Se disponen de herramientas informáticas precisas de libre uso y fácil utilización para hacer transformaciones de datos georreferenciados en distintos sistemas de referencia. En cuanto a la operatividad de estas aplicaciones de homogeneización de la información se trata de herramientas sencillas, precisas y de fácil manejo para el usuario.

Asimismo, los modelos deportivos de receptores GPS, aunque son económicamente accesibles, de fácil manejo y facilitan la orientación y ubicación, se debe tener en cuenta que miden la altimetría sobre vertical geodésica (no es vertical astronómica o física).

Algunos problemas detectados se relacionan con los datos de campo: así por ejemplo, la campaña de campo para ubicar la cavidad de Lasgüeriz sobre la base de triangulación sobre el mapa topográfico no proporciona datos precisos y requiere mayor destreza e inversión de tiempo..

Una de las principales aplicaciones de este estudio, mediante el uso de los SIG, ha sido la creación de una base de datos de las cavidades. El fichero original proporcionado por la ACEC (fichero vectorial de puntos con la localización geográfica de la entrada de las cavidades), ha sido la base para elaborar una base de datos incluyendo información topográfica, geológica, etc. La futura aplicación y utilidad de esta base de datos puede ser diversa, pues se trata en definitiva de un inventario del sistema kárst de Cotiella. Si tenemos en cuenta la reciente Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, que contempla expresamente el patrimonio geológico como parte del patrimonio natural y se formula la necesidad de crear un Inventario de Lugares de Interés Geológico, la base de datos de las cavidades del macizo de Cotiella creada constituye ya un documento de partida de gran valor científico y divulgativo.

Dentro de esta misma línea, la plasmación cartográfica de las cavidades (ubicación y desarrollo subterráneo) sobre diferentes capas de información (geología, topografía, ortofotos, etc.) ha mostrado el papel de las TIGs como herramientas muy útiles para la posterior interpretación de los resultados con fines, tanto científicos (relación de las

cavidades con las diferentes variables o capas de información), como divulgativos y didácticos (posibilidad de usar la información en guías de excusiones, folletos de geoturismo). En este sentido, este macizo queda integrado dentro del Parque Geológico del Sobrarbe, de ahí que tanto la base de datos como la plasmación cartográfica de las cavidades de este sector sean de gran valor para los administradores del Geoparque.

También, en la sociedad de la información actual, la geovisualización en 3D es una herramienta de difusión y transmisión de información muy eficaz. Los mapas en 3D son más sencillos de interpretar y asimilar y nuestros ojos y nuestro cerebro captan más información; incluso, ya se está trabajando en añadir la componente temporal (4D) a la cartografía del futuro. En el campo de la espeleología, los resultados obtenidos en este estudio muestran que la representación y visualización 3D con posibilidad de movimiento (dinámica) permite entender mejor la geometría de la cueva, así como su posición y tamaño respecto a las cavidades de su entorno. Al igual que en el caso anterior la representación 3D de las cavidades tiene enorme interés también desde el punto de vista científico como didáctico-divulgativo.

En definitiva, este Trabajo Fin de Máster ha permitido poner en práctica los conocimientos y habilidades conseguidos durante el desarrollo del Máster de TIGs y la adquisición de nuevas destrezas aprendidas, principalmente en la integración de los SIG, CAD y la creación de Bases de Datos. La unión de bases de datos de todo tipo interactuando con ficheros gráficos de mapas, topografías, gráficos estadísticos, etc. permite mejores resultados e interpretaciones en determinadas tareas de la espeleología. Las aplicaciones de las herramientas de análisis espacial, 3D, estadísticas, etc. de los SIG a la cartografía espeleológica en un contexto geológico son múltiples e indispensables para afrontar un estudio en profundidad de un sistema kárstico.

8. BIBLIOGRAFÍA

ABISMOS. Grupo de Espeleología (1992-2012). Manuales, exploraciones y planos de cavidades. Madrid (material inédito)

ACEC (ASOCIACIÓN CIENTÍFICO ESPELEOLÓGICA COTIELLA) [en línea]. Dirección URL: <<http://www.acecotiella.com/>> [Consulta: 12-04-2012]

ArcGIS 10.0 (2010). GIS Software. ESRI, New York

BELMONTE RIBAS, A. (2004): Aportaciones a la geomorfología del macizo de Cotiella (Pirineo oscense). *Lucas Mallada: revista de ciencias*, 11: 25-40.

- CHEBRO (CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO) [en línea]: Masa de agua subterránea de Cotiella- Turbón (Acuífero 037). [Versión electrónica] <ftp://ftp.chebro.es/Hidrogeologia/FichasMasas/037%20Cotiella.pdf>
- ESRI (2007): GIS for cave and karst. ESRI, New York, 51 págs. [on-line. www.esri.com/cave]
- CÓRDOBA JIMÉNEZ, J. R.; CAMACHO SÁNCHEZ, J.; MESA MINGORANCE, J. L. y RUIZ ARMENTEROS, A. M. (2004): Levantamiento topométrico y elaboración de la cartografía de la Cueva de los Murciélagos (Zuheros, Córdoba). VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía, Madrid, 1-16 pp.
- FLOREA, L. J.; PAYLOR, R. L.; SIMPSON, L. y GULLEY, J. (2002): Karst GIS advances in Kentucky. *Journal of Cave and Karst Studies*, 64(1): 58-62.
- GAO, Y. (2008): Spatial operations in a GIS-based karst feature database. *Environ Geol.*, 54:1017–1027; DOI 10.1007/s00254-007-0896-2.
- GAO, Y.; TIPPING, R. G. y ALEXANDER E. C. Jr. (2006): Applications of GIS and database technologies to manage a karst feature database. *Journal of Cave and Karst Studies*, 68(3): 144–152.
- GAO, Y., ALEXANDER, E. C. JR., y TIPPING, R. G. (2002): The development of a karst feature database for southeastern Minnesota. *Journal of Cave and Karst Studies*, 64(1): 51-57.
- GARCÍA SENZ, J. (2002): *Cuencas extensivas del Cretácico Inferior en los Pirineos centrales. Formación y subsecuente inversión*. Tesis Doctoral. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. [Versión electrónica] <http://www.tesisenred.net/handle/10803/1913>
- HARLEY, G. L.; REEDER, P. P.; POLK, J. S. Y VAN BEYNEN, P. E. (2010): Developing a GIS-based inventory for the implementation of cave management protocols in Withlacoochee State Forest, Florida. *Journal of Cave and Karst Studies*, 72(1): 35–42. DOI: 10.4311/jcks2008lsc0063.
- HÄUSELMANN, P. (2011). UIS Mapping Grades. *International Journal of Speleology*, 40 (2): IV-VI (Technical Note). [Versión electrónica] <http://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=ijs>
- HERRERO RICO, J. L. (2000): Cartografía digital y Espeleología. Revista Lapiaz, 27 [Versión electrónica] <http://www.cuevascastellon.uji.es/varios/cartogrDIGIYESPELEO.PDF>
- HUNG, L. Q.; DINH, N. Q.; BATELAAN, O.; TAM, V.T. y LAGROU, D. (2002): Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment (Son La - NW Vietnam). *Journal of Cave and Karst Studies*, 64(1): 23-33.
- LAMELAS GRACIA, M. T. (2007): Análisis y cartografía mediante SIG de la susceptibilidad a la formación de dolinas en el entorno de Zaragoza. *Geographicalia*, 52: 79-111.
- LITWIN, L. (2008): Atlas of karst area based on Web GIS technology. *Environ Geol.*, 54:1029–1036. DOI 10.1007/s00254-007-0892-6.
- LITWIN L. y ANDREYCHOUK, V. (2008): Characteristics of high-mountain karst based on GIS and Remote Sensing. *Environ Geol.*, 54: 979–994.

- LLOBET, S. (1994): *Pirineo Aragonés. Cotiella*. Guía excursionista y turística. Memoria y Mapa Topográfico 1/25.000. Editorial Alpina - Edicions Cartogràfiques, Granollers, 24 págs.
- MARTÍNEZ i RIUS, A. (1992): *Topografía Espeleológica*. Ed. Federación Española de Espeleología. Barcelona, 132 págs.
- MULET, A. (2006): Algunos apuntes sobre topografía espeleológica digital. *ENDINS*, 30: 135-139. [Versión electrónica]
<http://www.federaciobalearespeleologia.org/endins/endins30/30-135-139.pdf>
- PHELAN T. L. (2002): Public datasets integrated with GIS and 3-D visualization help expand subsurface conceptual model. *Journal of Cave and Karst Studies*, 64(1): 77-81.
- RÍOS ARAGÜES, L.M.; LANAJA DEL BUSTO, J. M.; RÍOS MITCHELL, J.M. y BARNOLAS, A. (1982). *Mapa Geológico de España 1:50.000. Hoja 179 (Bielsa)*. Segunda serie. Instituto Geológico y Minero de España, Ministerio de Industria y Energía, Madrid [versión electrónica]
<http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=179&bis>.
- RODRIGUEZ VELASCO, G. (2012): Apuntes de la asignatura de “Cartografía Geodésica”. Master en Tecnologías de la Información Geográfica (TIGs). Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid. . Curso 2011/12.
- SAN ROMÁN SALDAÑA, J. (2006): La geología. En: J. del Valle Melendo y J. Espona Vila (coord.). *Comarca de La Ribagorza*. Diputación General de Aragón. Departamento de Presidencia y Relaciones Institucionales, Zaragoza, 29-37 pp. [Versión electrónica]
http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Departamentos/PoliticaTerritorial/Interior/AreasGenericas/Publicaciones/InformacionTerritorial/ColeccionTerritorio/ci.19_Comarca_Ribagorza.detalleDepartamento?channelSelected=0
- SLOCUM, T.A., MCMASTER, R.B., KESSLER, F.C y HOWARD, H.H. (2009): *Thematic Cartography and Geovisualization*, 3rd edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson, Prentice Hall.
- SZUKALSKI, B. W. y GLASSPOOL, A. F. (2007): The Bermuda cave and karst information system: a GIS decision-support tool for cave and karst management and conservation. *Proceedings of the 18th National Cave & Karst Management Symposium*, St. Louis, Missouri, October 8-12, 2007 186-192 pp.
- UIS working group on cave survey and mapping. Cave Symbols: The Official UIS List [en línea] Dirección URL: <http://www.carto.net/neumann/caving/cave-symbols/> [Consulta: 23-04-2012]
- WEARY D. y ORNDORFF, R. C. (2001): Physical controls on karst features in the Ozark Plateaus of Missouri, U.S.A., as determined by multivariate analyses in a geographic information system (GIS). *Acta Carsologica*, 30/2 (3): 181-194.
- WU Q., XU H. y ZHOU W. (2008): Development of a 3D GIS and its application to karst areas. *Environ Geol.*, 54: 1037–1045

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Cales Pons y al resto de miembros de la Asociación Científico Espeleológica Cotiella ACEC (en la figura de su Presidente Ramón Queraltó) por todos los datos e información que han puesto a mi disposición y que es el resultado de muchos años de esfuerzo y dedicación altruista.

Expresar mi gratitud a mi tutor Luis Miguel Tanarro García por sus consejos y correcciones así como por la transmisión de conocimiento y experiencia haciendo posible la realización de este trabajo.