

Modelos digitales georreferenciados para el estudio de las cuevas y sus microformas

Georeferenced digital models for the study of caves and their microforms

Marcos VAQUEIRO-RODRIGUEZ^{1,2*}, Reinaldo COSTAS-VAZQUEZ²

¹Investigador asociado Instituto Universitario de Xeoloxía, Universidade de A Coruña, A Coruña, Spain,
*m.vaqueiro@udc.es

²Club de Espeleoloxía A Trapa (CETRA), Vigo, Spain, cетra@cетra.es

<https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2025.47.12835>

recibido: 27/11/2025 aceptado: 20/12/2025

Abstract

The study of caves requires strategies that allow the analysis of their geometry in three dimensions. Applying appropriate criteria during the measurement of the underground network will allow obtaining a digital model that combines the geometry of the different underground volumes with the trace or pattern of discontinuities that the passages follow. The resulting distribution of directions will represent the local structural pattern, which can then be compared with the structural pattern of the territory where the cavity is located. The geometric data of the model can also be exploited, independently or complemented with its spatial location, which allows obtaining, among other things, information relating to preferential drainage or the stability of the vaults.

Cave models can be treated as structured databases where each point of the cave pattern has associated geometric elements (points, segments, polygons, polyhedra...) that model the underground volume. Following this same idea, we can also associate to the model the different information of interest related to each point of the cave. In this way, we create structured and georeferenced databases with records related to geodiversity, geomorphodiversity, biodiversity, cultural heritage, environmental impact, and the environment. These datasets, composed of

simple elements, can be combined and analyzed considering both their characteristics and their geospatial distribution. As a final discussion, it is proposed to integrate the cave model with models of complex elements such as folds, faults, shear zones or other deformations, which would be associated with different points of the cavity, in order to study them in relation to the underground geometry and the pattern followed by the cave itself.

Keywords: cave research, georeferenced models, data models and their applications

Resumen

El estudio de las cuevas requiere plantear estrategias que permitan el análisis de su geometría a nivel tridimensional. La aplicación de un criterio adecuado durante la medición de la red subterránea permitirá obtener un modelo digital que combine la geometría de los diferentes volúmenes subterráneos, con la traza o patrón de discontinuidades que siguen los pasajes. Así la distribución de direcciones obtenida representará el patrón estructural local, que puede compararse con el patrón estructural del territorio dónde se emplaza la cavidad. También se pueden explotar los datos geométricos del modelo, de forma independiente o complementados con su localización espacial, lo que permite obtener entre otras, información relativa al drenaje preferente o la estabilidad de las bóvedas.

Los modelos de las cuevas pueden tratarse como bases de datos estructuradas donde cada punto del patrón de la cueva tiene asociados los diferentes elementos geométricos (puntos, segmentos, polígonos, poliedros...) que modelan el volumen subterráneo. Con esta misma idea, también podemos asociar al modelo la diferente información de interés relacionada con cada punto de la cueva. Así creamos bases de datos estructuradas y georreferenciadas con registros relativos a la geodiversidad, geomorfodiversidad, biodiversidad, patrimonio cultural, impacto ambiental, y medioambiente. Estos conjuntos de datos, formados por elementos simples, se pueden combinar y analizar considerando tanto sus características como su distribución geoespacial. Como discusión final se propone integrar el modelo de la cueva con modelos de elementos complejos como pliegues, fallas, zonas de cizalla u otras deformaciones, que estarían asociados a diferentes puntos de la cavidad, para poder estudiarlos en relación con la geometría subterránea y el patrón que sigue la propia cueva

Palabras clave: investigación de las cuevas, modelos georreferenciados, modelos de datos y sus aplicaciones

1. INTRODUCCIÓN

Una cueva es cualquier espacio natural subterráneo accesible (por dimensiones) al ser humano (STONE, 1953; CHAVERT and COURBON, 1997). Las cuevas son formas que se producen sobre rocas de diferente composición, resultado de algún tipo de acción geodinámica, y que presentan determinadas características geométricas relacionadas con la estructura y los procesos que han intervenido en su formación (BOSTON, 2004; URBAN & OTESKA 1998). Sus dimensiones varían de unos pocos metros hasta superar varios cientos de kilómetros de desarrollo total, con una extensión variable bajo el territorio. Así, aunque presentes en el paisaje, son morfologías (micro o mesoformas) difícilmente visualizables de forma directa.

Por ello, para poder estudiar una cueva es necesario representarla de alguna manera, incorporando mediante formatos de líneas y símbolos los diferentes rasgos geométricos, características, morfologías y depósitos presentes. Pero uno de los grandes problemas es que en muchos casos las cavidades presentan geometrías complejas, con numerosos pasajes superpuestos cuyos procesos, formas y estructuras presentan relación espacial, mientras que los mapas topográficos son proyecciones bidimensionales en los que la representación de unos elementos puede ocultar otros, falseando la visión del conjunto.

Nuestro objetivo es poder tratar, estudiar y analizar las cuevas, entendidas como formas complejas, como el elemento tridimensional que son. Por ello, desde 2009 topografiamos las cuevas con una clara orientación a elaborar modelos digitales tridimensionales. La cartografía y mapas clásicos, los obtenemos a partir de proyecciones o vistas orientadas del propio modelo.

Los modelos de las cuevas los construimos a partir de una polilínea, una sucesión de segmentos relacionados entre sí, dónde cada nodo o estación topográfica, lleva asociada una información geométrica básica (dimensiones L-R-U-D: Left – Right – Up – Down), que nos permiten definir un poliedro irregular para cada par de nodos (figura 1). Además, cada segmento es un vector polar definido por un desarrollo (módulo), una inclinación y un rumbo que describen la discontinuidad donde se desarrolla el pasaje subterráneo. De alguna forma, el método discretiza el volumen subterráneo fragmentándolo en sucesiones de poliedros.

Existen otras metodologías diferentes para producir modelos tridimensionales mucho más realistas de las cuevas. Por ejemplo, la fotogrametría, o el escaneado mediante LIDAR. En las pruebas que hemos realizado, son soluciones que demandan recursos elevados, entre los 383,15 kB/m (nube de puntos monocroma) y los 19.000 kB/m (modelo color texturizado), mientras que los modelos de poliedros, mucho más simples, solamente precisan entre 0,16 kB/m y 5.60 kB/m de memoria. Son modelos menos realistas, pero de calidad suficiente como para trabajar con ellos dentro de la propia cavidad.

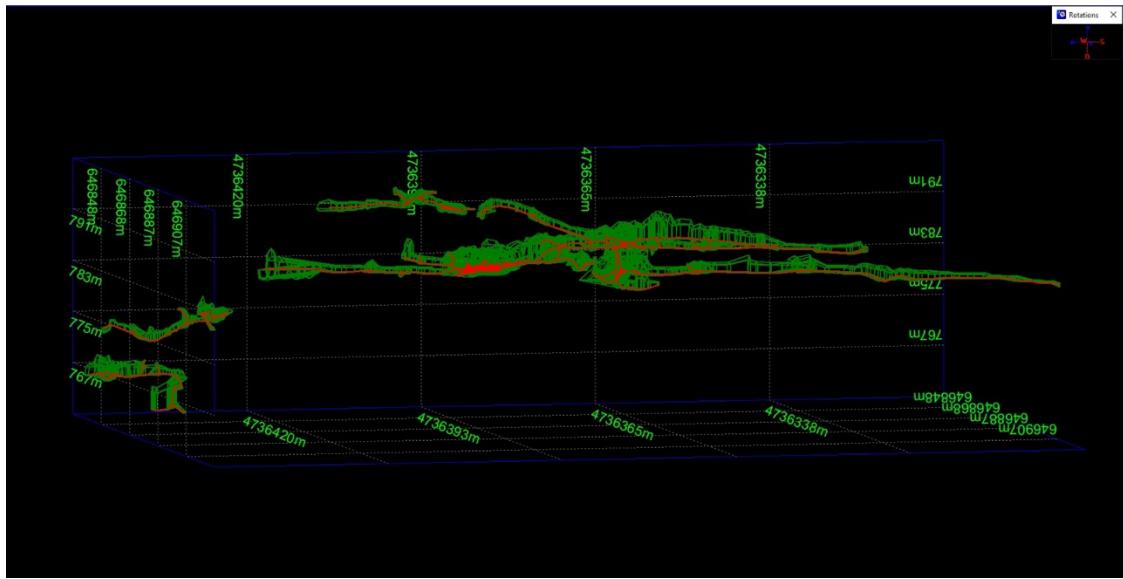


Figura 1: Los modelos digitales que utilizamos están formados por cadenas de poliedros. En la figura se visualizan en perspectiva los modelos de Covas das Cabras, Covas das Ovelhas (Cova Eirós), Cova do Osso y Pozo Pequeno de Eirós en Triacastela (Lugo). La composición espacial de los cuatro modelos nos revela “conexiones” entre las diferentes cavidades.

Aunque un modelo de poliedro supone una representación simplificada de las geometrías de una cueva, lo realmente importante es que los vectores y geometrías asociadas a cada estación definen un conjunto de datos que denominamos nativos o intrínsecos, y que se pueden estudiar y analizar. Por un lado, el subconjunto de los vectores entre estaciones determina lo que llamamos el patrón de la cueva (*cave pattern*), esto es, el esqueleto que traza en el espacio la cavidad y la red de drenaje subterránea asociada. Como subconjunto de datos homogéneos permite determinar distribuciones de discontinuidades a partir del desarrollo acumulado por rumbo, obteniendo así un equivalente al patrón estructural reflejado en la cueva, o simplemente las direcciones predominantes de la red subterránea. Por otro lado, tenemos las coordenadas absolutas de cada estación, que, combinado con el subconjunto de vectores, nos permite determinar los desarrollos de cueva por elevación, concretando niveles y paleoniveles.

Un aspecto interesante es que cada nodo o estación topográfica está georreferenciado., y por tanto también lo están todos los elementos asociados (segmentos, secciones...). Esto nos permite analizar esos datos y las geometrías que describen, a nivel espacial, como formas asociadas e integradas en el territorio dónde se emplaza (figura 2).

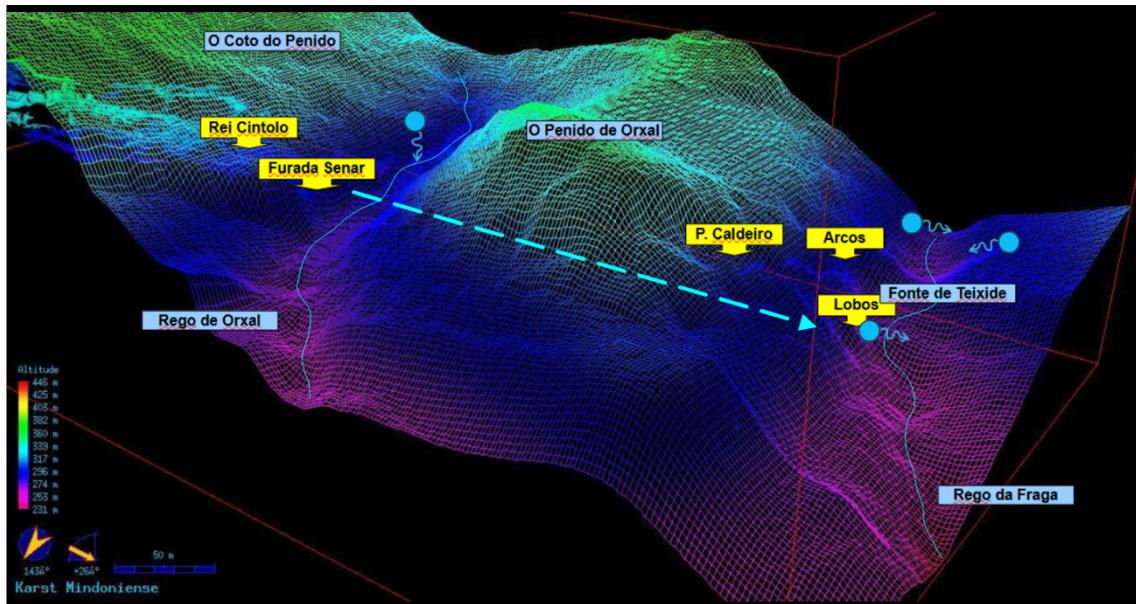


Figura 2: La figura integra una capa de puntos con las ubicaciones de las bocas de diferentes cuevas, con capas formadas por los modelos digitales de varias cuevas de la zona, con una malla derivada del modelo de elevaciones del terreno, y con una capa en la que se sitúan ríos, sumideros y manantiales. Color por elevación (componente Z del elemento georreferenciado). Este tipo de maquetas, fácilmente actualizables, permiten construir modelos del territorio integrando las cuevas como una forma más.

Por otro lado, cuando estudiamos una cavidad se producen diferentes registros de datos que pueden dar lugar a distintos conjuntos de datos e información: Unos reflejo de la biodiversidad (espeleobiológicos); otros reflejo de la geomorfodiversidad (espeleotemas y bioespeleotemas, depósitos, microformas esculpidas por la erosión, microformas asociadas a procesos de corrosión, ... microformas estructurales, ...); otros relacionados con el patrimonio cultural (arqueológicos, paleontológicos, manifestaciones de arte); y otros microambientales (temperaturas, humedades relativas, parámetros físico-químicos de aguas, parámetros isotópicos de aguas, niveles de radiación, ...), y también los relacionados con el impacto humano en el medio subterráneo (contaminantes, residuos, alteraciones o modificaciones de origen antrópico).

Nuestra propuesta, aunque relativamente sencilla, consiste en aprovechar que todas las estaciones, segmentos, secciones, superficies y volúmenes del modelo están georeferenciadas, para asociar todos los registros de los diferentes conjuntos de datos a nodos o elementos del propio modelo (PARADA-NÚÑEZ and VAQUEIRO-RODRÍGUEZ, 2024; VAQUEIRO-RODRÍGUEZ and RODRÍGUEZ-BLANCO, 2025). Incluso hemos incorporado nodos auxiliares al modelo, no relacionados con el patrón de la cueva, para situar con precisión los registros de interés.

Esta asociación la resolvemos mediante bases de datos específicas, relacionales y estructuradas para cada conjunto de datos homogéneos que estudiamos, contextualizándolos dentro del modelo tridimensional, asociados de forma unívoca a

estaciones topográficas, de forma que esos datos se puedan tratar también como elementos geoespaciales (figura 3).

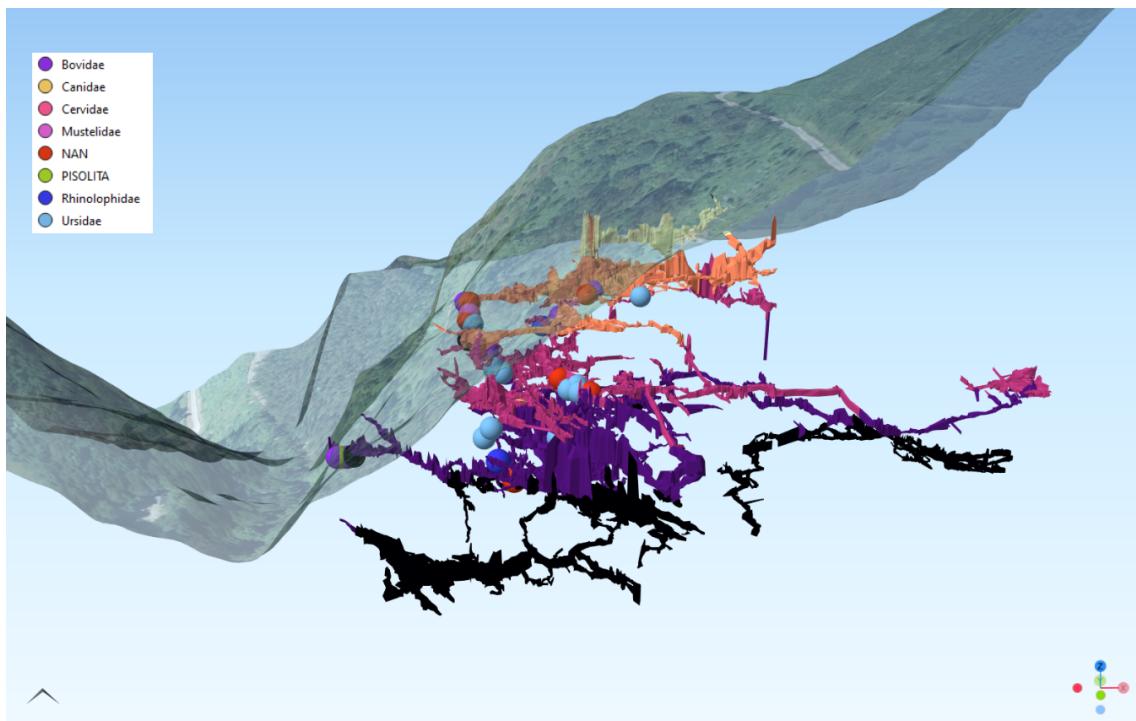


Figura 3: Vista del modelo digital de Cova do Rei Cintolo (Mondoñedo, Lugo) integrado en el territorio (imagen del PNOA plegada sobre el modelo de elevaciones MDT del IGN). La cueva es una capa SHP formada por unos 17.000 poliedros tridimensionales. Sobre el modelo incorporamos los registros de la base de datos paleontológicos, clasificados por Orden. Con el código NAN se indican los registros sin identificación. Con el código Pisolita se sitúan los depósitos de conchas de caracoles transformados en perlas de cueva por recubrimiento de carbonato. Esta integración muestra cueva y conjunto de datos de interés patrimonial relacionados a nivel espacial.

Así, los diferentes conjuntos contextualizados (bases de datos georreferenciadas) se pueden transformar en información específica a través de análisis en los que la componente espacial también pueda ser importante. Por ejemplo, aplicando técnicas de clustering, podríamos llegar a agrupar espacialmente los registros disponibles en función de las similitudes que presentan entre ellos: Así, en el caso de usar la base de datos sobre biodiversidad (bioespeleológica), podríamos ver las distribuciones, colonizaciones o zonación de los diferentes órdenes de una clase a lo largo de la cueva. O aprovechando las capacidades gráficas de los sistemas de información geográfica, ver los datos ambientales dinamizados como secuencia temporal. O también, organizando los registros de forma adecuada podríamos combinar registros morfológicos relativos a recursos sensibles, con registros relativos a la distribución de poblaciones troglobias y troglófilas, al tiempo que incorporamos registros relativos a impactos asociados a residuos y vertidos. De esta manera podemos automatizar la producción de mapas tridimensionales tipo

VIPM (Visitor Impact Point Mapping) y VIAM (Visitor Impact Area Mapping) (BODENHAMER, 2006). (Figura 4).

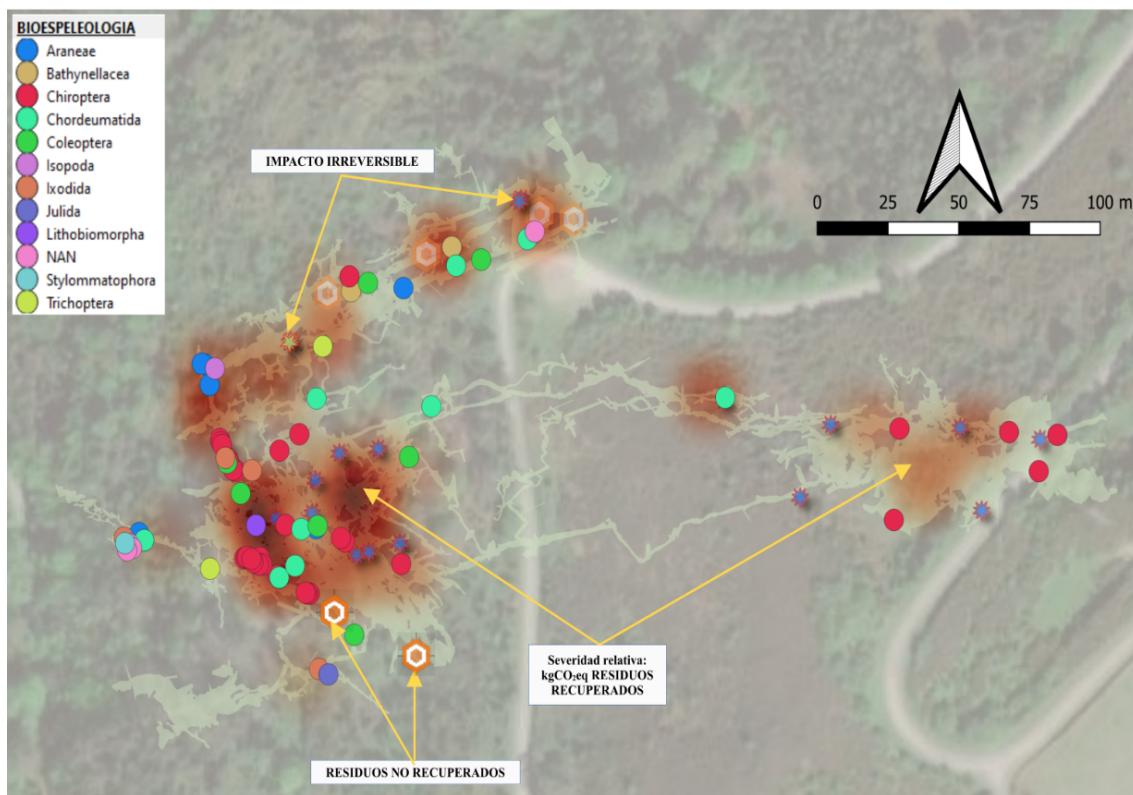


Figura 4: Modelo digital de Cova do Rei Cintolo (Mondoñedo, Lugo) cargado como SHP en QGIS visualizando al mismo tiempo la base de datos de biodiversidad (registros filtrados por Orden), con la base de datos que incluye la localización de impactos irreversibles, de residuos no recuperados, y de residuos recuperados. Estos últimos se muestran como un mapa de calor generado a partir de los kgCO₂ equivalente a los residuos recuperados en el área.

Las posibilidades que nos brindan modelos georreferenciados combinados con bases de datos son muy amplias. En el presente trabajo nos centraremos en el análisis de los datos intrínsecos y en la integración de los registros relacionados con las diferentes microformas que contienen las cuevas, como herramienta para el estudio de grandes cavidades.

2. METODOLOGIA

La figura 5 esquematiza el proceso que seguimos para el modelado digital y estudio de una cueva. En dicho proceso existen dos elementos críticos::

- Mantener el criterio topográfico durante todo el trabajo de campo para poder generar un modelo digital homogéneo y coherente con la estructura de la cueva;

- Definir bases de datos relacionales, estructuradas, georreferenciadas y coherentes con la información que se va a manejar.



Figura 5: Secuencia de trabajo propuesta.

2.1. Criterio topográfico

Cuando medimos las cuevas adaptamos las mediciones a los ejes estructurales de los pasajes al tiempo que emplazamos nuestras estaciones tratando de situar y trazar las discontinuidades transversales más relevantes. Incluso en los volúmenes complejos, originados por coalescencia e intersección de varios pasajes, tratamos de “separar” los diferentes elementos primigenios, topografiándolos individualmente, con el objeto de reflejar en el modelo las diferentes discontinuidades involucradas en la geometría final.

Ello conlleva un número elevado de mediciones que, aunque no computan en el desarrollo total de la cueva, incorporan información estructural al modelo. Este hecho es importante, ya que el modelo digital debe ser algo más que el esqueleto topográfico de la cueva: Buscamos obtener un conjunto de nodos georreferenciados en el que para cada uno de ellos se haya concretado información geométrica (sección en un determinado plano), estructural (direcciones y buzamientos de discontinuidades) al tiempo que se define una relación o solución de continuidad con parte de los nodos adyacentes. Podría parecer algo abstracto, pero la realidad es que las distintas familias de discontinuidades condicionan y guían los pasajes de una cueva (PALMER, 2012).

Como criterio topográfico (VAQUEIRO-RODRIGUEZ, 2017) espaciamos las estaciones topográficas adaptándonos a las discontinuidades estructurales significativas, delimitando con estaciones las variaciones de sección, derivaciones laterales, cambios de

dirección o pendiente, escalonamientos naturales o artificiales del pasaje, etc. El trabajo podría acelerarse obviando este aspecto, pero se perdería parte de la información estructural de la cavidad, además de que obtendríamos un modelo mucho menos realista.

Esta misma metodología la aplicamos indistintamente del tipo de cueva o del tipo de roca en que se emplaza (cavidades kársticas, parakársticas, pseudokársticas y también en cuevas de consecuencia).

2.2. Equipamiento

El levantamiento topográfico de las poligonales principales se realizó con instrumentos de lectura combinada (rumbo, distancia, inclinación). Entre 2012 y 2023 usamos un equipo Laser Range AC1000 de Trimble Navigation con calibración magnética *in situ*. En 2023 incorporamos unidades Caveatron (versiones con y sin LIDAR) con calibración magnética también *in situ*, y un Hipsómetro Laser Haglof Laser Geo con calibración magnética de laboratorio. Posteriormente se incorporaron unidades tipo DistoX con calibración magnética *in situ*.

2.3. Software

Los datos de los modelos digitales y sus derivados se procesaron con el paquete Compass – Project Manager Version 5.22.6.18.222, de Fountaine Computer Products (FISH, 2022). Este programa permite referenciar de forma absoluta estaciones del modelo. También permite ajustar la declinación magnética del modelo para los datos medidos en cada sesión topográfica. El valor de la declinación la obtenemos para cada sesión de campo en la sección de Actividades/Geomagnetismo, Cálculo de la declinación magnética en la Península y Baleares, del Instituto Geográfico Nacional.

El visor gráfico Compass – Plot Viewer Version 5.22.6.18.344, de Fountaine Computer Products (FISH, 2022), permite exportar el modelo de la cueva en diferentes formatos *shape* (SHP) para su uso en sistemas de información geográfica (GIS). También nos permite exportar el modelo a formato VRML texturizado (con color por profundidad, por ejemplo), que postprocesamos en MeshLab v2022.02 (CIGNONI, 2008) para generar objetos OBJ/MTL que usamos en campo (Emb3D), o que podemos imprimir en 3D.

El módulo estadístico del programa Compass permite exportar tablas con los datos nativos georreferenciados, a partir de los cuales, usando como clave primaria la cadena *[provincia, lugar, nombre de cueva, código de estación]*, podemos componer las bases de datos que integran los registros de una o varias cuevas.

La visualización y análisis de datos geoespaciales se realizaron con herramientas específicas para información geográfica como QGIS 3.18 Zurich (QGIS.org, 2021). Para las vistas 3D usamos el plugin Qgis2threejs (AGAKI, 2013-2024). Para el análisis y minería de datos usamos los paquetes GNU OCTAVE (EATON, 1988-2025) y ORANGE Data Mining Version 3.39.0 (DEMSAR et al. 2013).

2.4. Cartografía

Aunque la mayoría de los análisis de datos de la cueva se realizaron sobre el modelo digital tridimensional, se elaboró también cartografía como parte de la documentación gráfica de síntesis.

El modelo digital nos permite generar vistas (proyecciones) en los planos naturales XY, XZ y ZY o en cualquiera de sus rotaciones. El postprocesado como lámina morfológica, integrando formas y procesos, hace uso de los criterios establecidos en VAQUEIRO-RODRÍGUEZ (2017). Como elementos básicos partimos de la simbología propuesta por la International Union of Speleology (UIS).

3. ANÁLISIS DE DATOS NATIVOS EN EL ESTUDIO DE LAS CUEVAS

3.1. Patrón de la cueva (cave pattern)

El esquema estructural de un área representa en un histograma semicircular las direcciones generales de los rumbos de planos de discontinuidades. Normalmente se realiza por conteo del número de discontinuidades que se observan para cada dirección dentro del área de estudio.

En el caso de las cuevas la geometría que se estudia puede estar definida en numerosas “capas” o niveles superpuestos. Así, nos podemos encontrar con pasajes en niveles superpuestos asociados a una misma discontinuidad (y sin contacto directo) o a una misma familia de discontinuidades. Además, debido a cómo se construye el propio modelo digital, varias estaciones topográficas sucesivas pueden trazar la misma discontinuidad. Por ello, para determinar el esquema estructural de la cueva a partir del modelo, en lugar de “contar discontinuidades”, calculamos el desarrollo total de cueva por dirección, construyendo un histograma en rosa que muestra cuánta cueva existe asociada a cada familia de discontinuidades (figura 6).

El patrón estructural de la cueva que hemos obtenido puede compararse con el patrón estructural del territorio dónde se emplaza. Por ejemplo, en la figura 7, se muestra la comparativa entre la distribución obtenida para Cova do Rei Cintolo con el diagrama de roseta que representa el esquema estructural para el Manto de Mondoñedo propuesto por MARCOS (2013). Puede apreciarse que el 75 % de la cueva presenta direcciones coincidentes con fracturas asociadas a la tectónica Alpina, por lo que la formación de estos pasajes no podría ser anterior a la propia tectónica, lo que nos permite fijar una edad de muro para una parte importante de esta cueva.

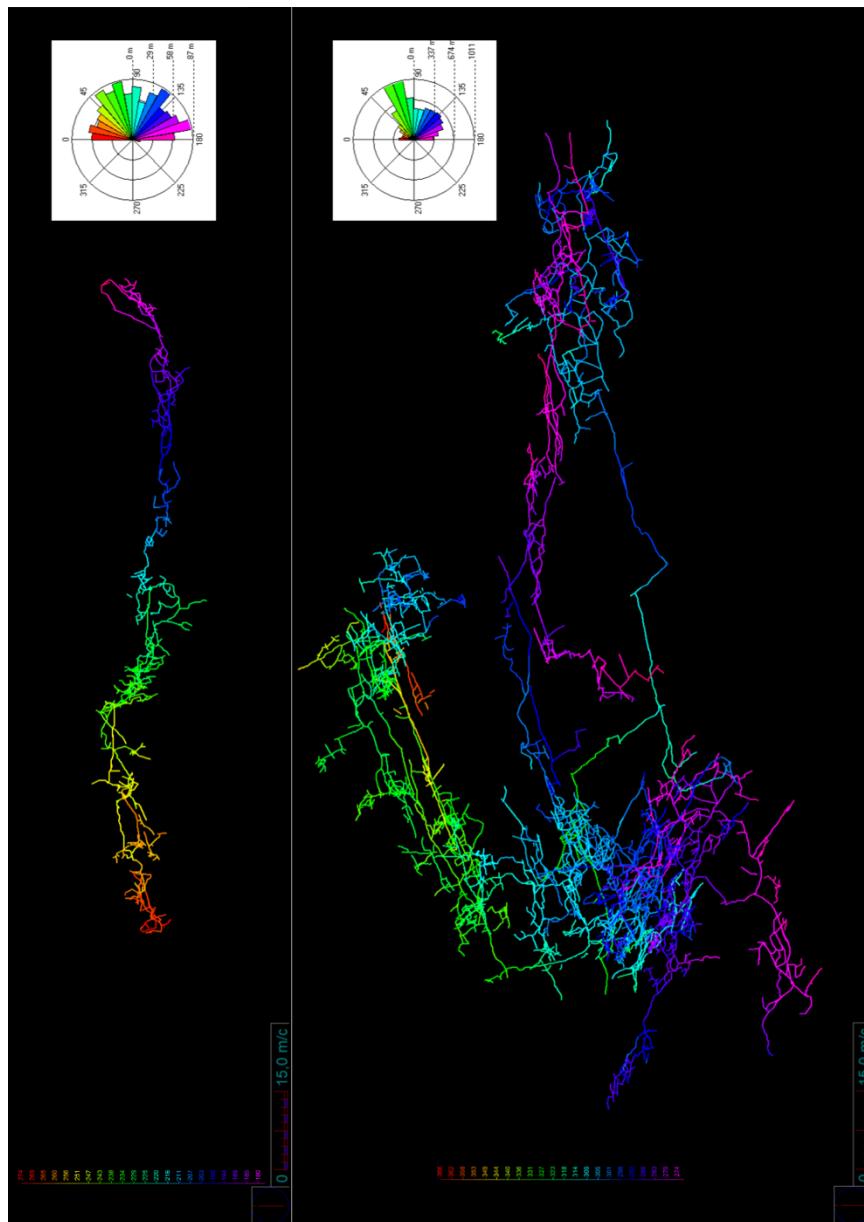


Figura 6: El patrón de la cueva es la representación de los vectores que definen los enlaces entre estaciones topográficas que presentan solución de continuidad. El color del vector se asigna por elevación, aprovechando en la representación los valores de datos intrínsecos al propio modelo. A la derecha de cada cueva hemos situado el histograma en rosa que representa el desarrollo de cueva por rumbo o dirección. Arriba proyección en planta (XY) del Sistema de A Trapa (Tui, Pontevedra), la mayor cueva pseudokástica de Galicia, con un desarrollo total de 1658 m y un desnivel total de 102 m. Abajo, proyección (XY) de Cova do Rei Cintolo (Mondoñedo, Lugo), la mayor cueva kárstica de Galicia, con un desarrollo total de 10680 m, con un desnivel total de 101 m.

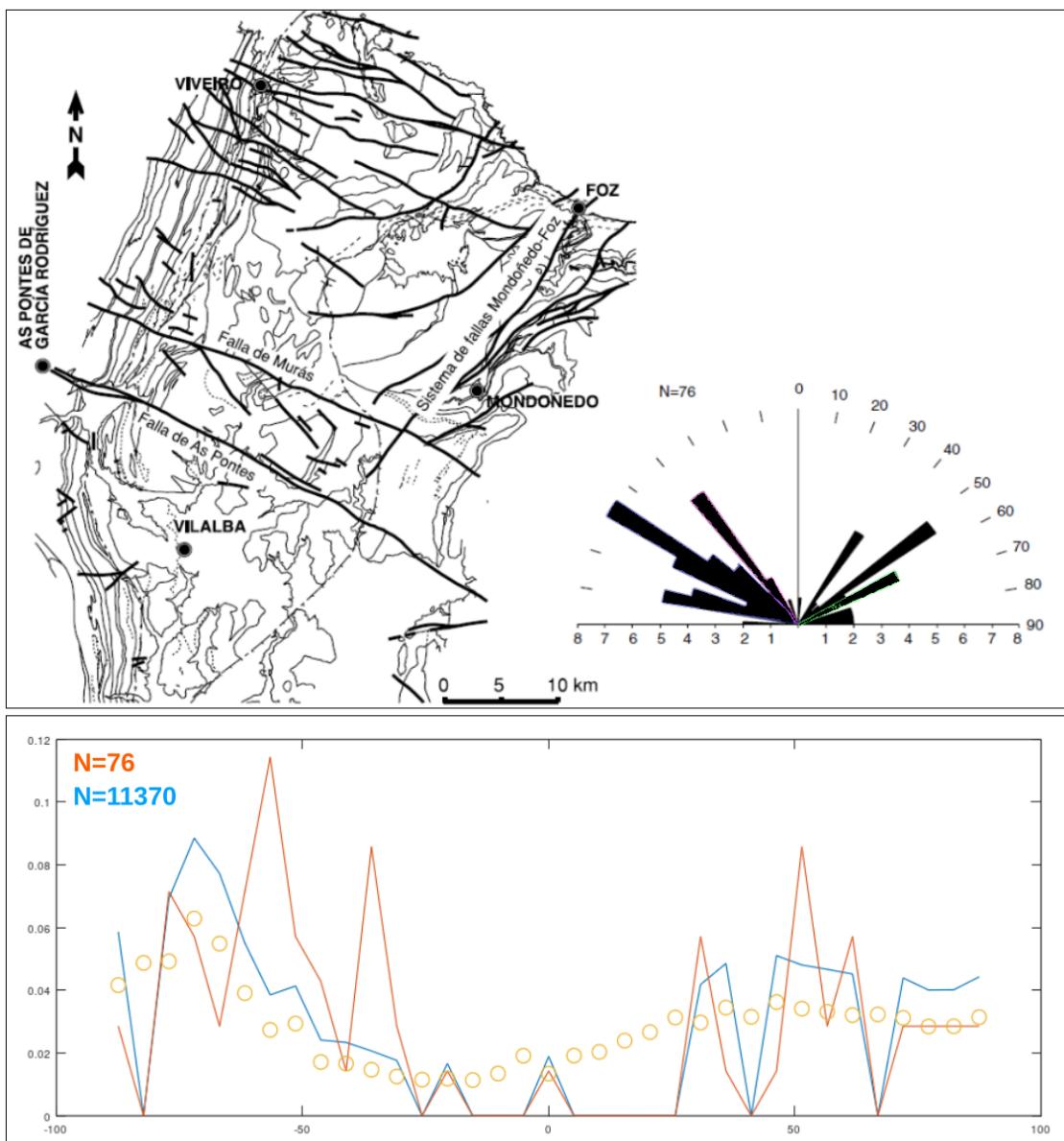


Figura 7: Arriba esquema estructural incluido en MARCOS (2013). Abajo distribución -90°/+90° del esquema estructural a escala regional (rojo), sobre el que superponemos el esquema estructural de la cueva (círculos amarillos). La distribución en azul incluye solamente la parte del patrón de la cueva que se ajusta al patrón estructural regional.

3.2. Espesor crítico y estabilidad

En las cavidades en calizas, si las condiciones son adecuadas, las bóvedas de los pasajes más amplios tienden a formar cúpulas escalonadas. Sin embargo las distintas discontinuidades subverticales y planares que afectan a estas bóvedas, favorecen la aparición de inestabilidades que pueden dar lugar a importantes colapsos.

Hemos indicado en apartados anteriores que el modelo digital es un modelo en el que todos sus elementos están georreferenciados, por lo que podemos usar los diferentes datos para estudiar espacialmente la distribución de determinadas características.

Como ejemplo, vamos a determinar una medida orientativa de la estabilidad de las diferentes bóvedas aplicando la formulación de THARP and HOLDREGE (1994) y THARP (1995), como se citan en WHITE (2005). Esta formulación trata las secciones como vigas superpuestas, calculando el espaciamiento mínimo entre capas de roca (espesor crítico) que garantiza dicha estabilidad. Influyen en este espesor las características del material (resistencia a flexión), el buzamiento, y el espaciamiento entre discontinuidades planares (estratificación) y subverticales (partición de las bóvedas en bloques). Así, podemos determinar un índice de estabilidad relativa, mostrando mediante recintos de color, las áreas donde se requerirían mayores espesores críticos para mantener la estabilidad de sus bóvedas (ver figura 8).

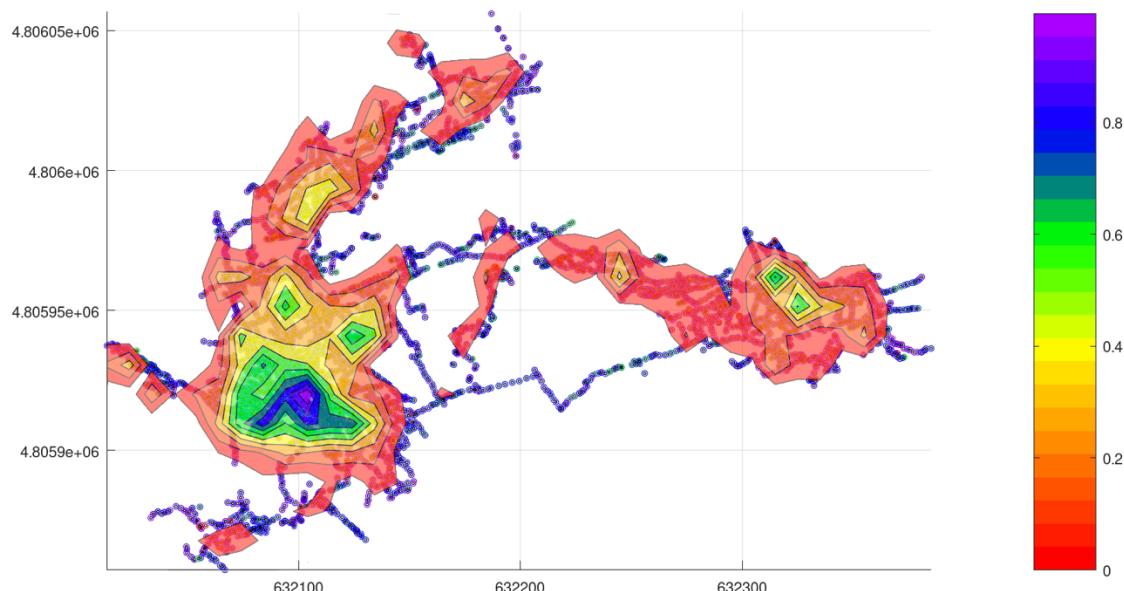


Figura 8: Indice de estabilidad relativa determinada mediante la formulación de espesores críticos aplicada a la geometría del modelo. Algunos de los recintos coinciden con áreas afectadas por derrumbes antiguos. El modelo digital se ha importado y postprocesado en OCTAVE

4. DISCUSIÓN – HACIA UNA BASE DE DATOS MORFOLÓGICA

Una de las bases de datos más complejas que hemos empezado a construir es la morfológica (geomorfodiversidad) en la que pretendemos incluir las diferentes microformas presentes en las cuevas, junto a su caracterización: depósitos y espeleotemas, formas esculpidas por la erosión, estructurales, ... donde las características que las definen, como dimensiones, ejes, inclinaciones, orientaciones, etc. pasan a ser también datos geoespaciales (ver figura 9). Creemos, al igual que ocurre con otros conjuntos de datos, que es posible estudiarlos, bien de forma aislada, bien relacionándolos por determinadas características y tratándolos conjuntamente, para entender determinados procesos y su influencia en la evolución de una parte de la cueva.

Esta idea no es nueva ya que VAQUEIRO-RODRIGUEZ *et al.* (2006) propusieron reconstruir la evolución del sistema de O Folón (Vigo, Pontevedra), a partir de la sucesión de paleoniveles originados durante la incisión del curso subterráneo. La secuencia se definió reconstruyendo manualmente cada nivel a partir de la distribución de determinadas familias de discontinuidades y de la disposición (y medida) de los fragmentos de paleoconductos y notches asociados. También en VAQUEIRO-RODRIGUEZ (2017) se plantea la elaboración de cartografía morfológica, integrando en capas, información relativa a microformas extensionales o puntuales, usando recintos de color y símbolos, cuyo color representa el grupo morfogenético o proceso en el que se incluye la microforma.

Frente a ese proceso manual, creemos que el uso de modelos digitales combinados con bases de datos, permitiría “automatizar” parte del proceso de estudio, principalmente de cuevas muy grandes y complejas, simplificando el análisis, la síntesis de los datos y su posterior representación espacial. Y con bases de datos correctamente definidas, posibilitaría el analizar características de microformas de distinta naturaleza y tipología, pero que a priori se considera podrían estar relacionadas.

En todo este proceso, uno de los problemas es construir una base de datos estructurada, manejable y que incluya los diferentes tipos de microformas que se quieren estudiar y potencialmente relacionar, la geolocalización de cada una de ellas, y también sus características descriptivas, que en un momento dado no tienen por qué abarcar el mismo grupo de campos que otro tipo de microformas. Por lo tanto, resulta clave organizar y estructurar los conjuntos de datos que se vayan a manejar y no pensar únicamente en un uso a nivel local, si no para el estudio de un territorio o comunidad.

AGRADECIMIENTOS

A los compañeros del Club de Espeleología A Trapa y colegas del proyecto “Rei Cintolo: Objetivo 11.000 m”, que posibilitan las mediciones para la elaboración de los diferentes modelos digitales de las cuevas.

In memorian

Reinaldo Costas Vázquez, gran compañero y amigo, infatigable espeleólogo, incansable cartógrafo, con una, curiosidad e intuición científicas, inagotable: Hemos explorado y cartografiado numerosas cuevas de España, Portugal, Suecia, Alemania y Polonia, desde finales de los años 90 del pasado siglo, rescatando para los que vengan detrás, más de 18.000 m de cueva en modelos digitales en el período 2012 - 2023. Que la tierra te sea leve. En reconocimiento a su legado y a la huella imborrable que dejó. D.E.P.

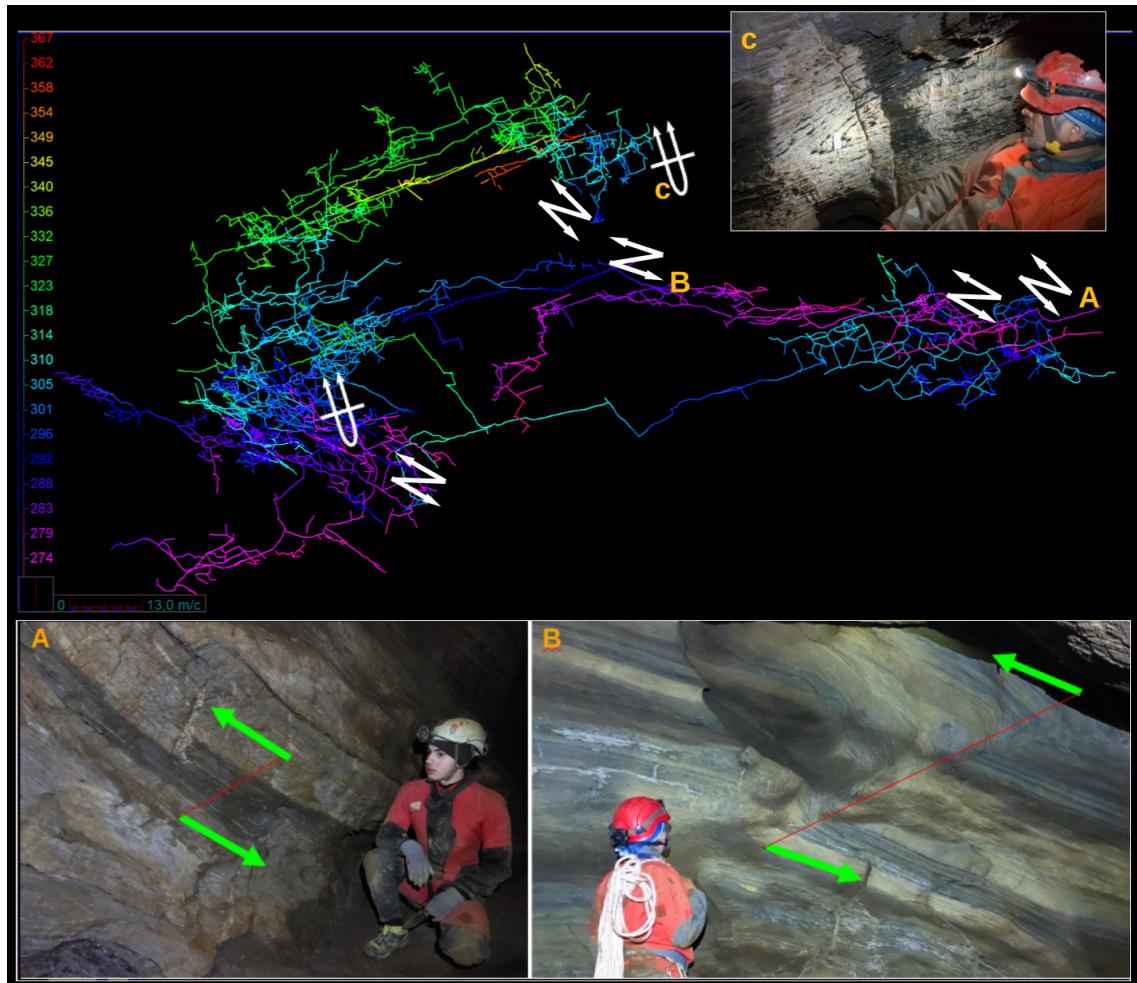


Figura 9: En este ejemplo visualizamos registros de microformas estructurales como micropliegues, zonas de cizalla, fallas normales e inversas, etc. En una primera fase la base de datos incluye solamente referencia espacial y tipología. En una segunda fase pretendemos incluir las medidas que las caracterizan para tratar de relacionarlas con la propia geometría y evolución de parte de la cueva.

BIBLIOGRAFÍA

- Akagi, M. 2013-2025. Qgis2threejs - 3D map visualization and web export powered by three.js JavaScript library. <https://plugins.qgis.org/plugins/Qgis2threejs/#plugin-about>
- Bodenhamer, H. 2006. Visitor Impact Mapping in Caves. En: Hildred-Werker, V., Werker, J.C. (eds), *Cave Conservation and Restoration*, 193-202. National Speleological Society. Huntsville, Alabama (USA).
- Boston, P.J. 2004. Extraterrestrial caves. En: Gunn, J. (ed.), *Encyclopedia of Cave and Karst Science*. 355–358. Fitzroy-Dearborn Publishers, Ltd., London.
- Chabert C., Courbon, J. 1997. *Atlas des cavités non calcaires du monde*. Ed. Au Pré de Madame Carle, Paris, 1997.

- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., Ranzuglia, G. 2008. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*, 129–136.
- Demšar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, C., Hocevar, T., Milutinović, M., Mozina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Staric, A., Stajdohar, M., Umek, L., Zagar, L., Zbontar, J., Zitnik, M., Zupan, B. 2013 Orange: Data Mining Toolbox in Python, *Journal of Machine Learning Research* 14(Aug): 2349–2353.
- Eaton, J.W. 1988-2025. GNU Octave – Scientific Programming Language. <https://octave.org/>
- Fish, L. 2022. Compass Cave Survey Software. Fountaine Computer Products. <https://fountainware.com/compass/>
- Marcos, A. 2013 Un nuevo mapa geológico de la parte septentrional del Domo de Lugo (Galicia oriental, NO de España): implicaciones sobre la estratigrafía, estructura y evolución tectónica del Manto de Mondoñedo. *Trabajos de Geología* 33, 171–200.
- Palmer, A.N. 2012. *Geología de cuevas*. Dayton: Cave Books.
- Parada-Núñez, S., Vaqueiro-Rodríguez, M. 2024. Un mapa para la biodiversidad de las cuevas gallegas (N.O. de la península ibérica). *Gota a Gota* 30, 87–94.
- QGIS.org 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Stone R.W. 1953. Description of Pennsylvania's Undeveloped Caves. *National Speleological Society Bulletin* 15, 51–137.
- Urban, J., Oteska-Budzyn J. 1998. Geodiversity of pseudokarst caves as the reason for their scientific importance and motive of protection. *Geologica Balcanica* 28 (3-4), 163–166.
- Vaqueiro-Rodríguez, M. 2017. *Cavidades Naturales En Rocas Magmáticas - Las Cuevas En Rocas Plutónicas*. Tesis Doctoral, programa de Ciencia y Tecnología Ambiental da Universidade de A Coruña. 497 pp. <http://hdl.handle.net/2183/19154>
- Vaqueiro-Rodríguez, M., Barreiro-Ben, B., Costas-Vázquez, R., Suárez-Pérez, R., Groba-González, X. 2006 Rebuilding paleoflows and structures in the granitic system cave of "O Folón" (Vigo, Galicia – Spain). *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 31, 88–105.
- Vaqueiro-Rodríguez, M., Rodríguez-Blanco, M.L. 2025. Modelos digitales y monitorización ambiental. Aplicaciones del modelo construido en el “Proyecto Rei Cintolo: Objetivo 11.000 m” como herramienta de gestión ambiental. *Gota a Gota* 33, 19–28.
- White, E.L. 2005. Breakdown. En: Culver, D.C., White, W.B. (eds), *Encyclopedia of Caves*, 56–60. Elsevier Academic Press.