

MÉTODO INTERACTIVO PARA LA ENSEÑANZA DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

An interactive method for teaching geological mapping

Albert Martínez (*) y Baldo Colldeforns (**)

RESUMEN:

Tradicionalmente, la enseñanza de la cartografía geológica, se ha basado en la interpretación de mapas geológicos. Muchas veces, estos mapas son modelos muy teóricos que no contienen buzamientos o muy pocos. En este trabajo se propone la utilización de un método más interactivo y empírico que simule el proceso que se realiza en una cartografía geológica. Así pues, el alumno, aunque no vaya al campo, puede aprender la metodología y evolución paso a paso de la elaboración de un mapa geológico. Este método, más acorde con la realidad, también permite al estudiante pensar de una manera crítica sobre cómo las interpretaciones geológicas potenciales, varían en función de los datos que se van obteniendo en el campo así como del conocimiento teórico. De esta manera, el método propone algunos ejercicios interactivos que muestran cómo las diversas interpretaciones son diferentes "aproximaciones" a la realidad, y que estas "aproximaciones" varían con un gran número de factores. Así pues, las conclusiones realizadas por el geólogo son la consecuencia de un proceso empírico basado en el análisis de datos, formulación de hipótesis y una eventual vuelta al principio en busca de más datos.

ABSTRACT:

Traditionally, geological cartography has been based on the interpretation of geological maps. These maps are usually very theoretical; very often they do not contain strikes and dips, for instance. This paper proposes a more interactive, empirical method aimed at simulating what is actually done during a "real world" experience in geological cartography. This method will help the student to learn the methodology used in elaborating a geological map, through an interactive approach that does not require him to go to the field. Rather, it is designed to help the student think in a critical manner about how the potential geological interpretations of facts vary in function of the data gathered in the field as well as of the theoretical knowledge. Thus, the method comes up with some interactive exercises that show how the different "interpretations" are just different "approaches to reality", and that these approaches do vary with a large number of factors. And that the conclusions made by a geologist are the consequence of an empirical process based on the analysis of data, the drawing of temporary hypotheses, eventual refusal and back to the beginning, in a permanent quest for explanations. Knowledge comes from trials and interpretation of reality, and very seldom from clear cut, bureau-based formulas.

Palabras clave: Mapa geológico, método interactivo.

Keywords: Geological mapping, interactive method.

INTRODUCCIÓN

La geología es la historia de la Tierra y la cartografía geológica es la quintaesencia de la geología. El mapa geológico permite representar y almacenar la información de la distribución, composición y estructura de las rocas en la superficie terrestre. A partir de los datos del mapa (dos dimensiones) y de datos accesorios como los buzamientos, sondeos, cortes etc. se realizan modelos interpretativos, en tres dimensiones, del subsuelo. Así pues, el proceso de investigación geológica se inicia, siempre, en la adquisición de datos en el campo. Ya en la antigua Grecia, el hallazgo de fósiles de conchas marinas en las montañas, les permitió deducir que el mar no siempre estaba en el mismo sitio. En el libro *De mineralibus* del árabe Avicena (980-1037), se encuentran descripciones de procesos geológicos a partir de ob-

servaciones de campo. Pero no es hasta el Renacimiento, en donde los grandes sabios de la época empezaron a hacer dibujos y croquis de carácter geológico. Destaca Leonardo da Vinci (1452-1519), el cual realizó magníficos dibujos del natural, en donde se veían rocas deformadas, y numerosos bocetos de problemas de hidráulica fluvial. Pero la mayoría de las veces las representaciones gráficas de los temas geológicos, se centraban en la descripción de fósiles o minerales, aunque existen bocetos de cartografías muy rudimentarias como el de las marismas de Saintonge de Bernard de Palissy (1510-1590), o los relacionados con la minería como el *Bergbüchlein* (1500 aprox.) de Von Calw y *De re metallica* (1557) de Agricola. La revolución científica del siglo XVII, permitió el nacimiento de la ciencia moderna. Nicolaus Steno (1638-1686) publicó en 1669 el *Prodromus*, base de la geología moderna. De este autor hay

(*) Geólogo consultor c/Enamorats, 132 - 08026 Barcelona - E-mail: amartinez@redestb.es

(**) Museu de Geologia "V. Masachs Av. De les Bases, 61-73 - 08240 Manresa

que destacar los cortes interpretativos de estratos de la Toscana. Pero no fue hasta el 1815, en que William Smith (1769-1875) realizó el que se considera el primer mapa geológico. Este ingeniero de canales consideró que las capas que tenían las mismas distribuciones de fósiles también tenían la misma edad. Esto le permitió representar, con colores, las edades de distintas capas. Actualmente, las modernas técnicas de investigación han permitido un gran avance del conocimiento geológico de la Tierra. Pero el punto de partida siempre es el mapa geológico, el cual se inicia en la recogida de datos en el campo.

LA ENSEÑANZA DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

Método tradicional

Existen numerosos manuales y libros sobre cartografía geológica. Desde elementales manuales a libros más sofisticados con técnicas de interpretación estructural y de subsuelo. (Roberts, 1984; Butler y Bell, 1988; Bolton, 1989; Barnes, 1993; Lisle, 1988; Maltman, 1995, entre otros). Estos libros suelen ir dirigidos a alumnos de geología de niveles universitarios y exponen los principales elementos de cartografía y representación geológica.

Por otra parte, la necesidad de aportar una información didáctica a docentes y estudiantes que desarrollan prácticas sobre mapas geológicos en distintos niveles de enseñanza también ha generado múltiples publicaciones. Quizás las más completas y utilizadas en el entorno educativo español sean, por citar algunas de las más recientes, las de Martínez-Álvarez (1981), Ramón-Lluch y Martínez-Torres (1993), o Guerra-Merchán (1994), referenciadas en la bibliografía.

Las propuestas de ejercicios suelen ser muy parecidas pero siempre el proceso es el mismo: a partir de un mapa teórico se realizan cortes y, posteriormente, una interpretación de la estructura e historia geológica (figura 1). Indudablemente este método es necesario para comprender las geometrías más características y formas cartográficas. Estos ejemplos y ejercicios permiten adquirir al alumno una visión espacial de la geometría tridimensional de las estructuras geológicas. Pero este método no presenta el proceso real que se da lugar en la realización de una cartografía geológica, y puede dar una idea excesivamente simplista de la geología y a veces un poco engañosa, ya que muchos mapas carecen de datos geológicos (buzamientos, estructuras). Otro problema es que estos

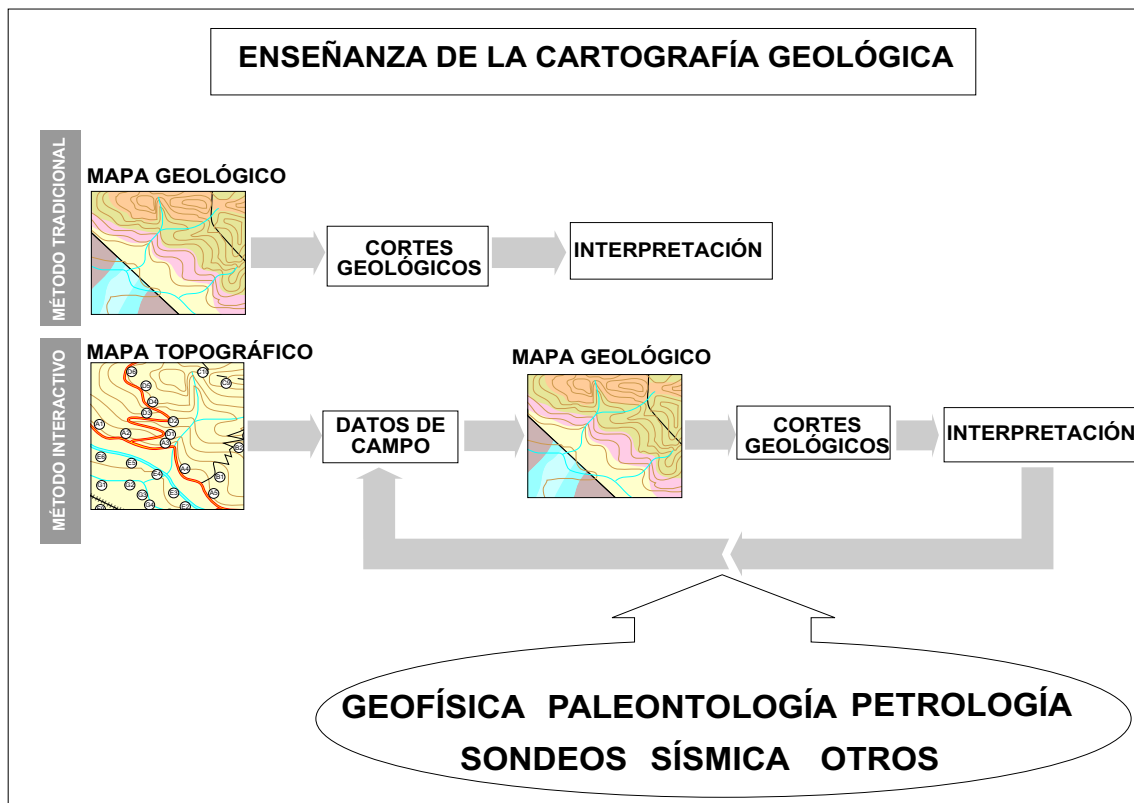


Figura 1. Normalmente, el método tradicional de la enseñanza de la cartografía geológica es a partir de mapas geológicos ya realizados y de éstos se realizan los cortes y las interpretaciones. En este trabajo se propone el método interactivo, en donde el proceso de enseñanza quiere simular el proceso que se realiza en realidad. A partir de los datos de campo se genera una primera versión de mapa, unos cortes y unas interpretaciones. La adquisición de nuevos datos completan el mapa y pueden hacer variar las interpretaciones y así sucesivamente hasta que el profesor lo considere oportuno. De esta manera existe un proceso interactivo entre los alumnos, sus interpretaciones, el profesor y los datos que va proporcionando.

mapas son como problemas matemáticos que tienen sólo una solución. Este hecho puede inducir a pensar al alumno, que la interpretación geológica es sólo una y verdadera.

Aunque la mayor parte de los materiales de este tipo suelen incluir unas breves nociones sobre la representación gráfica de estructuras geológicas, difícilmente abordan los procedimientos de campo laboratorio y gabinete que conducen a la elaboración de un mapa geológico. Pensamos que estos aspectos metodológicos resultan fundamentales para asumir la complejidad del proceso y permiten plantear con una mayor precaución las interpretaciones realizadas a partir de los mapas y cortes geológicos.

Método interactivo

En el presente trabajo, se propone que una vez superada la etapa básica de interpretación de modelos simples, se pase a una fase más interactiva. El método se basa en simular el proceso que se da lugar cuando se realiza una cartografía y estudio geológico de una zona. De esta manera, a partir de un mapa topográfico, se elabora un mapa geológico con los datos que proporciona el profesor (fig.1). Posteriormente se proporcionan nuevos datos y se obtienen nuevas interpretaciones, actuando de una manera interactiva con el profesor. En la realidad, una cartografía se inicia en la observación y recolecta de datos en el campo. Estos datos se elaboran en el gabinete construyendo la primera versión del mapa geológico y de cortes interpretativos. El resultado es una primera interpretación, en la cual se observan posibles problemas y contradicciones. Se vuelve al campo a obtener más datos e intentar resolver los problemas planteados. Con los nuevos datos se modifica o mejora la cartografía geológica, se realizan nuevos cortes y se llega a la segunda interpretación. Probablemente los problemas no se han solucionado satisfactoriamente o han surgido de nuevos. Esto puede propiciar nuevas salidas al campo y nuevas interpretaciones. A este ciclo hay que añadir la posibilidad de obtener otros datos muy valiosos que nos aportan nueva información en las interpretaciones: datos geofísicos, dataciones paleontológicas, datos petrológicos, líneas sísmicas, columnas estratigráficas de los sondeos, etc. La obtención de estos datos en cualquier momento del ciclo cartográfico, da lugar a nuevas interpretaciones y quizás motive una vuelta al campo para cotejar datos y observaciones.

Procedimiento

1. **Búsqueda de afloramientos.** Se explica que cuando el geólogo va al campo a cartografiar, su función principal es observar la mayor cantidad de afloramientos de la zona a estudiar. Para ello tiene que escoger diversos posibles itinerarios. Las vías de tren proporcionan buenos cortes con abundantes afloramientos, así como las carteras nuevas y autopistas. Otra fuente de afloramientos pueden ser los lechos de ríos secos o torrentes. En las zonas montañosas con mucha vegetación, las pistas forestales permiten un buen acceso y bastantes buenos afloramientos. En muchos casos será necesario realizar recorridos por senderos de montaña, muchos de los cuales pueden estar muy abandonados, dificultando el paso del geólogo y disminuyendo la posibilidad de encontrar afloramientos. De todas maneras, hasta que no se ha ido no se puede saber ni la cantidad de afloramiento que hay ni la cualidad.
2. **Itinerarios.** A partir de un mapa geológico real o un modelo simulado, se proporciona a los alumnos el mapa topográfico con la situación de distintos itinerarios (fig.2). Se pueden hacer diversos grupos a los cuales se les proporcionan itinerarios diferentes o bien se les deja escoger.
3. **Datos geológicos de campo.** Cada itinerario consta de una serie de estaciones situadas en el mapa topográfico. Cada estación puede tener diversa información: buzamiento, tipo de roca, fósiles, características petrológicas, edad, etc.
4. **Elaboración del mapa geológico.** Con los datos aportados por los itinerarios, se empieza a realizar el mapa geológico, con los buzamientos, distintos colores para las rocas, edades (relativas o absolutas si se sabe), tipos de contactos, etc.
5. **Elaboración de cortes geológicos.** A partir del mapa geológico realizado (teniendo especial cuidado en colocar los ángulos de buzamiento correctamente), se construyen cortes geológicos interpretativos, con todos los datos disponibles.
6. **Interpretación inicial.** A partir de los cortes se realiza una interpretación estructural y su historia geológica.
7. **Problemas.** Esta interpretación, probablemente, presenta numerosas incógnitas y contradicciones geológicas y geométricas. Es importante que los alumnos sean conscientes de los problemas planteados y vean la necesidad de obtener nuevos datos. A partir de este punto el profesor puede aportar datos accesorios como los enumerados anteriormente (geofísicos, líneas sísmicas, etc.) y los alumnos pueden pedir nuevos itinerarios que ellos pueden considerar interesantes para completar sus modelos interpretativos o solucionar problemas.
8. **Nuevos datos.** Con los nuevos itinerarios y/o los datos accesorios, los alumnos realizan correcciones en el mapa geológico, nuevos cortes y por consiguiente, nuevas interpretaciones o reafirman las anteriores. El ejercicio puede durar el tiempo que el profesor considere necesario. En ejemplos sofisticados puede durar varios días o meses, según la cantidad de datos que se vayan dando progresivamente a los alumnos y del interés mostrado por los mismos.

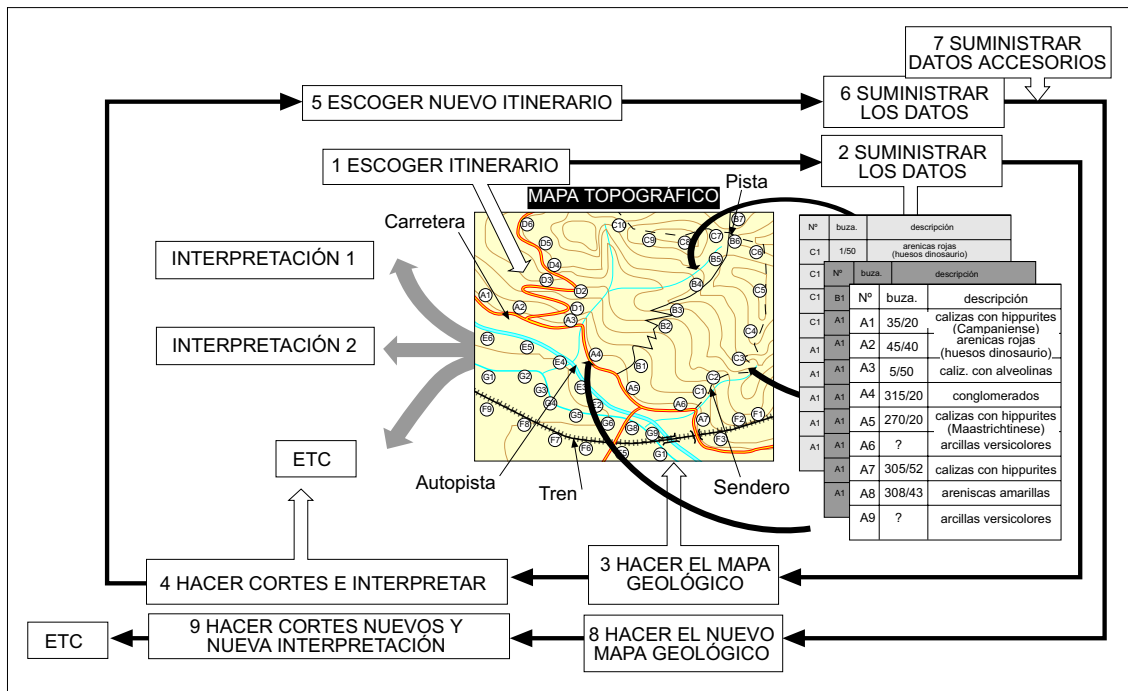


Figura 2. Proceso en el método interactivo. El profesor da a los alumnos el mapa topográfico y unos itinerarios (1). O bien se pueden escoger por los alumnos o el profesor los proporciona directamente de una manera individual o por grupos. (2) En los itinerarios vienen una serie de datos como los que se obtienen en el campo: buzamientos, tipo de rocas, tipo de contactos, fósiles, etc. (3) A partir de estos datos se realiza el mapa geológico. (4) Con los datos disponibles y el mapa se realizan cortes geológicos e interpretaciones, que seguramente variarán según el grupo y se puede entablar una discusión. A partir de las discusiones, queda evidente la necesidad de más datos. (5) El profesor proporciona nuevos itinerarios y, por consiguiente, nuevos datos de campo (6). En este proceso se pueden añadir datos accesorios (7) como: sondeos, sísmica, dataciones de rocas, etc. (8) Se completa el mapa geológico y se realizan cortes nuevos y, seguramente, nuevas interpretaciones (9). Así sucesivamente hasta que el profesor considere que se ha llegado a unas conclusiones satisfactorias.

Resultado

Es muy importante que durante este proceso los alumnos sean conscientes de que con pocos datos se pueden hacer muchas interpretaciones geológicas muy simples pero que disminuye la posibilidad del acierto, pero al aumentar la cantidad y calidad de los datos, las interpretaciones son cada vez más restringidas y son mucho más ajustadas a los modelos teóricos. También es importante transmitir al alumno que los conceptos teóricos geológicos (principios básicos, mecánica de rocas, tectónica, sedimentología, etc.) han evolucionado a lo largo del tiempo y, por consiguiente, también las interpretaciones geológicas. Estas interpretaciones, que en un momento dado, parecen buenas y únicas, pueden pasar a ser erróneas, posteriormente. De esta manera, un ejercicio que permite, por un lado, conocer el proceso de cartografía geológica, también sirve para evidenciar que el conocimiento geológico que se tiene de una zona, puede ser, actualmente, muy parcial o incluso equivocado. La figura 3, representa un esquema que intenta reflejar, a grandes rasgos, el proceso científico de la geología. Los datos geológicos están en el campo como si fueran piezas de un puzzle. Cuando se va a realizar un estudio de una zona, se parte de una serie de premisas: el dinero de que se dispone, el tiempo, objetivos planteados, etc.

No tiene el mismo objetivo ni medios, una prospección petrolera, una cartografía básica de un organismo público o un pequeño estudio geotécnico. La metodología que se utilizará está en función de las premisas anteriores. El resultado es que, según la cantidad de datos, calidad de ellos, y la magnitud de la zona de estudio, poco a poco se van uniendo las piezas del puzzle y se van formulando diversas interpretaciones. Existen unos factores incontrolables, que pueden modificar substancialmente las interpretaciones o el estadio de construcción del puzzle. Por ejemplo, la aparición de nuevos afloramientos (autopista nueva, incendio, etc.); la suerte de dar con un dato muy importante, o sencillamente la intuición o genialidad del investigador. En un momento dado el proceso de adquisición de datos se da por terminado (imperativos económicos, el tiempo, etc.) y a partir de ellos, diferentes autores pueden realizar diversas interpretaciones. Por lo tanto, podríamos decir que la interpretación geológica que se realiza de una zona es una mayor o menor "aproximación" a la realidad. Esta mayor o menor aproximación estará en función de todo lo dicho anteriormente. Pero aunque creamos que poseemos suficientes datos para realizar una interpretación acorde con la realidad, puede ser que a la hora de la verdad no sea tampoco la correcta.

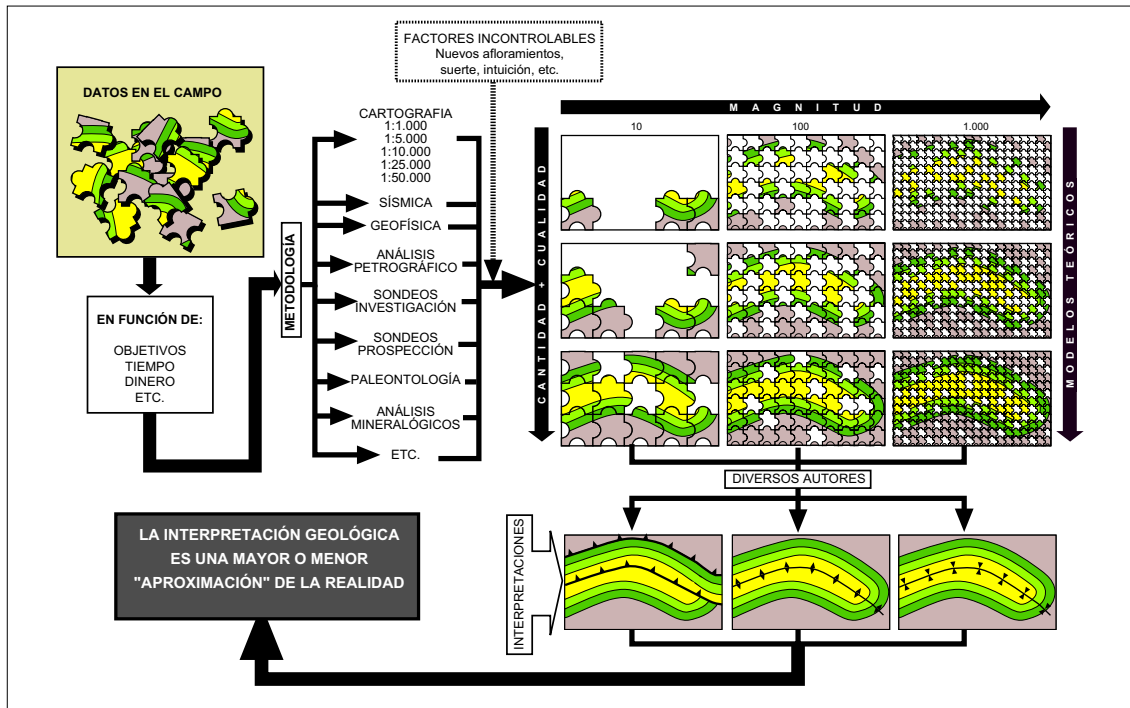


Figura 3. Este método de enseñanza de la cartografía, permite hacer una serie de reflexiones sobre nuestro conocimiento de la realidad desde el punto de vista geológico. El estudio geológico se inicia en el campo, que es como un puzle de datos que hay que recoger. Según el objetivo planteado, del tiempo disponible, del presupuesto, etc. se utiliza una metodología determinada (tipo de cartografía, estudios complementarios, etc.). Poco a poco se van componiendo las piezas del puzle y nos van mostrando una imagen que tenemos que interpretar. Cuanto más datos y mejor sea su calidad mejor será la interpretación. Pero también influye un factor que es la magnitud. No es lo mismo 100 estaciones en una mapa 1:5.000 que en un 1:50.000. Otro factor importante que afecta a las interpretaciones es el grado de conocimiento teórico de que se dispone, cuanto mayor sea éste, mayor será la posibilidad de realizar una interpretación correcta. Pero nunca se llega a obtener el 100 % de los datos. Por este motivo, en un momento dado diversos autores pueden realizar diferentes interpretaciones, con los datos disponibles. Estas interpretaciones, son aproximaciones de la realidad, y que sólo en los casos de obra civil o de prospección mineralógica o petrolera, se puede saber cuál de las interpretaciones es la verdadera o ninguna de ellas.

EJEMPLO

Se propone un ejemplo, que para simplificar, se ha utilizado un corte. Con él se observa la evolución de varias interpretaciones conforme se van obteniendo nuevos datos.

Estadio 1: En el campo se han observados los datos del corte de la figura 4. Se interpreta como un anticlinal con un pequeño cabalgamiento a la derecha. Se realiza una columna estratigráfica en donde sólo dos fósiles dan edad. Se observa que la capa E es más potente a la izquierda que a la derecha. Esta característica se interpreta como un fenómeno sedimentológico: la cuenca era más distal hacia la izquierda.

Estadio 2: Posteriormente se realiza una autopista en la parte derecha del corte (fig.5) y se observa una geometría de rampa de bloque inferior. Esto indica de que se trata de un cabalgamiento que duplica la capa E. Se vuelve a la parte izquierda del corte y con detalle se observa una geometría de anticlinal de bloque superior que se había ignorado.

Con lo cual se puede saber el desplazamiento de dicho cabalgamiento (fig.5b)

Estadio 3: Casualmente se encuentran indicios de petróleo en la capa B (fig.6a). Se toman muestras y se realizan análisis petroquímicos. El resultado es que se trata de una buena roca madre. Con las nuevas teorías de geometría de cabalgamientos, se interpreta que el anticlinal estas formado por el apilamiento de unidades de la capa C (porosa) y que puede servir como almacén de petróleo, ya que la capa D es impermeable (fig.6b). El resultado es la realización de un sondeo.

Estadio 4: Los datos del sondeo son los que aparecen en la figura 7a. En lugar de la estructura prevista se encuentra una acumulación de materiales evaporíticos. Una nueva prospección detallada en el campo, permite encontrar pequeños afloramientos de yesos entre la capa C y D, hecho que hace modificar la columna estratigráfica original (fig. 7b).

Estadio 5: Unas excavaciones en la parte superior de la montaña (fig.8a), permiten descubrir en las calizas F, los mismos fósiles que en la capa A.

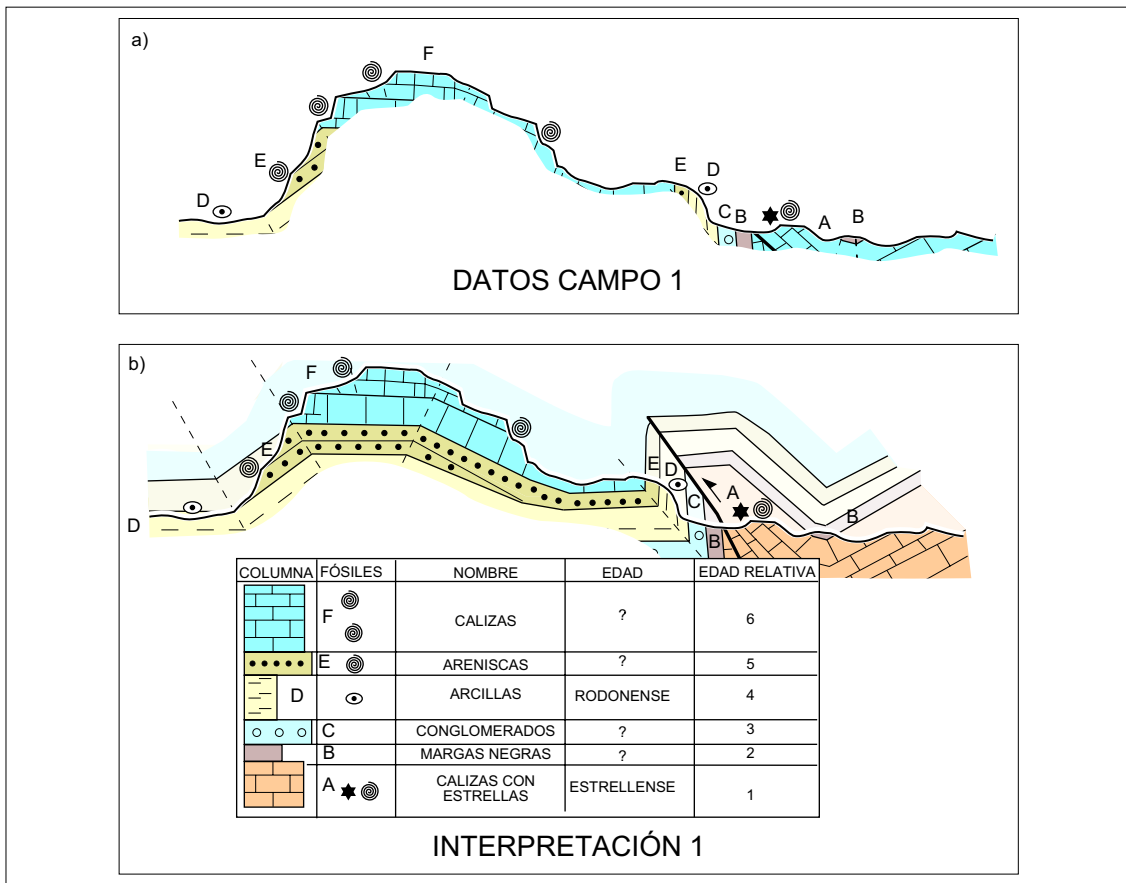


Figura 4. Se propone un ejercicio como ejemplo, en este caso sobre un corte. Se suministra un corte con distintos niveles, y sus buzamientos.

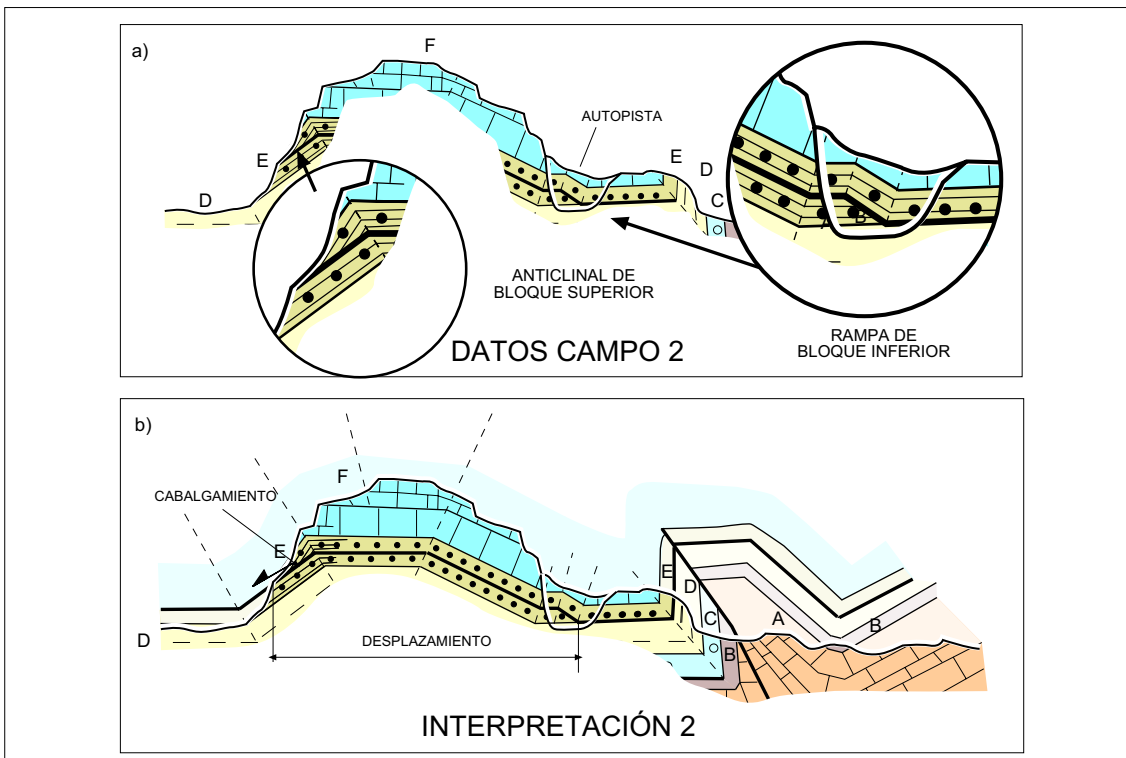


Figura 5. A partir de los datos, se realiza la interpretación de la figura. También se realiza una columna estratigráfica. Los únicos fósiles que dan edad son las estrellas y las redondas con punto.

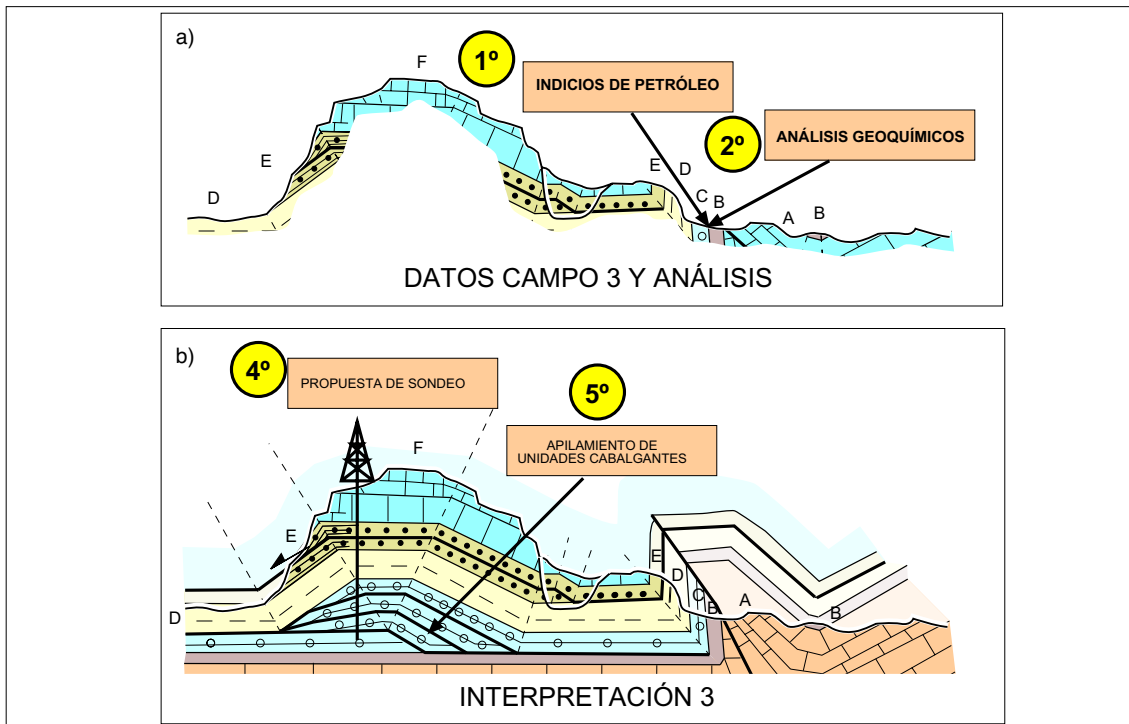


Figura 6a. La realización de una autopista pone de manifiesto, en el talud, una rampa de bloque inferior. Se va al campo en la zona de la izquierda y se descubre que las capas E forman un anticlinal de bloque superior. Se realiza una nueva interpretación: El aumento de grosor de la capa E que se observa en la zona izquierda es debido a un cabalgamiento que duplica la serie. Figura 6b. Se observan indicios de petróleo en la capa B. Se realizan análisis geoquímicos y muestran que dicha capa es una roca madre excelente.

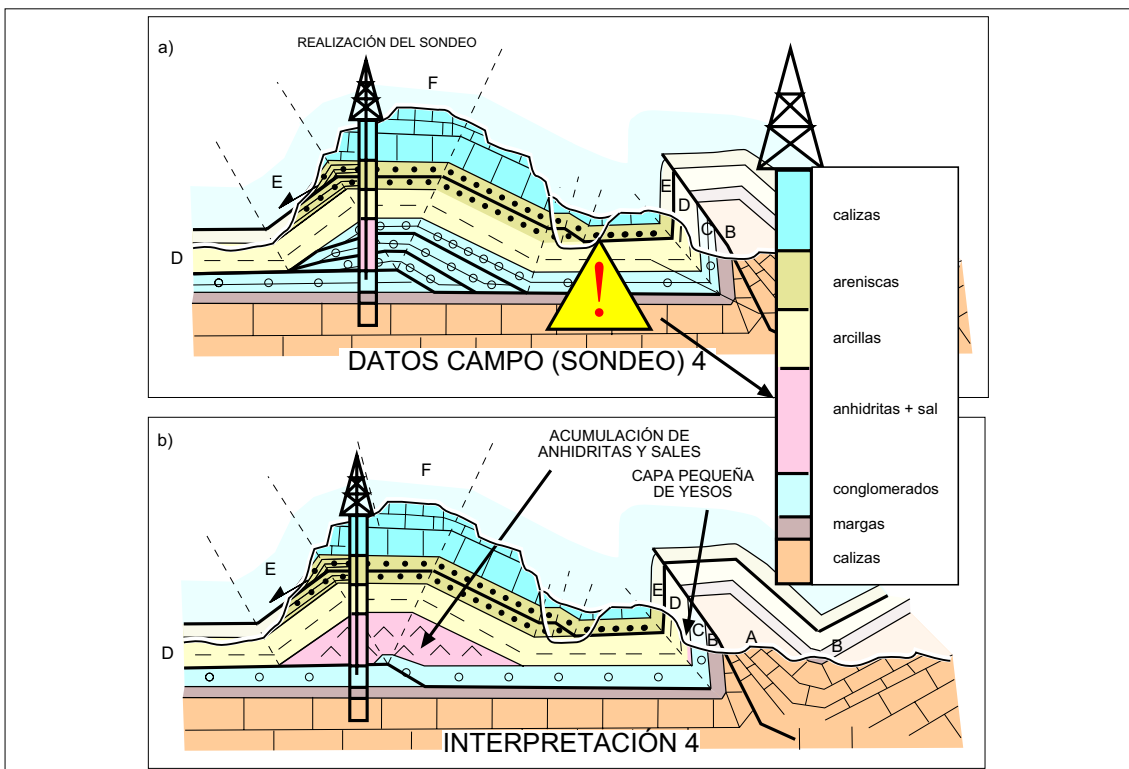


Figura 7a. Se realiza una nueva interpretación con el fin de buscar petróleo. La estructura antiforme se interpreta como un apilamiento de láminas cabalgantes de la capa C. Como esta capa es porosa se supone que puede ser el almacén de petróleo generado por la capa B. Figura 7b. Se realiza un sondeo. En lugar de encontrar lo previsto se encuentra un engrosamiento de materiales evaporíticos, hasta ahora desconocidos en la zona. Un examen detallado en el campo entre la capa C y D pone de manifiesto pequeños afloramientos de yesos.

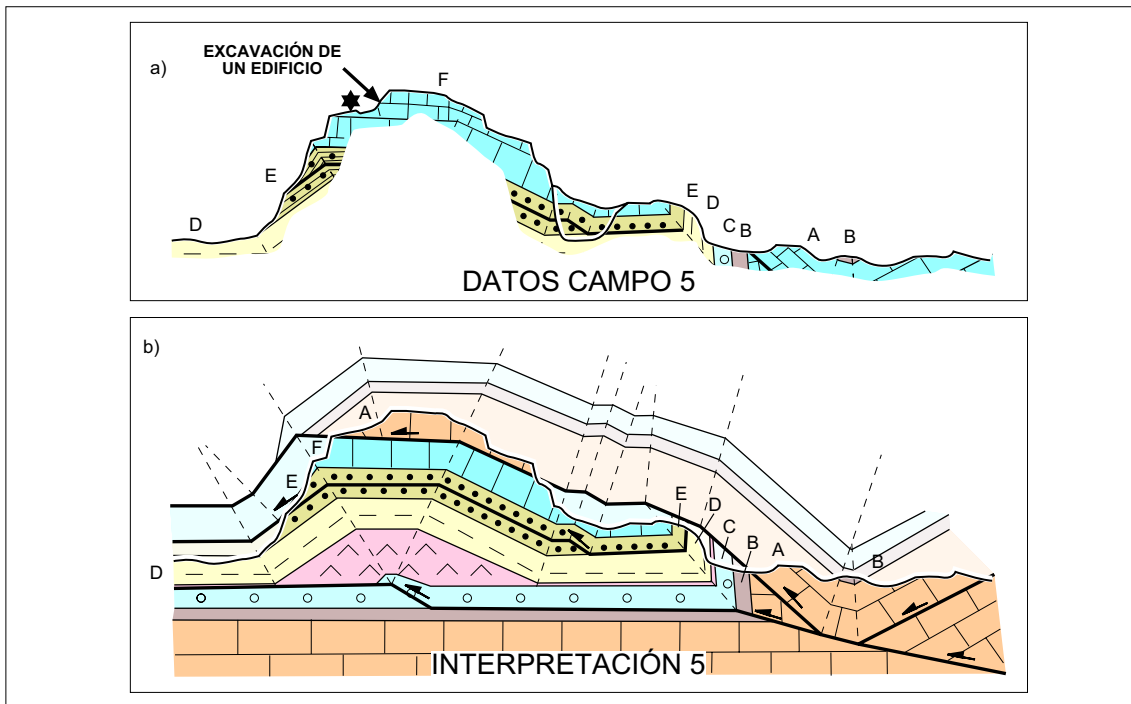


Figura 8. Una excavación en la capa F, descubre un yacimiento de fósiles tipo estrella como los de la capa A. Esto indica que son los mismos materiales. Una nueva interpretación muestra que el pequeño cabalgamiento de la derecha, en realidad es la rampa de un manto de corrimiento que sitúa la capa A encima de F.

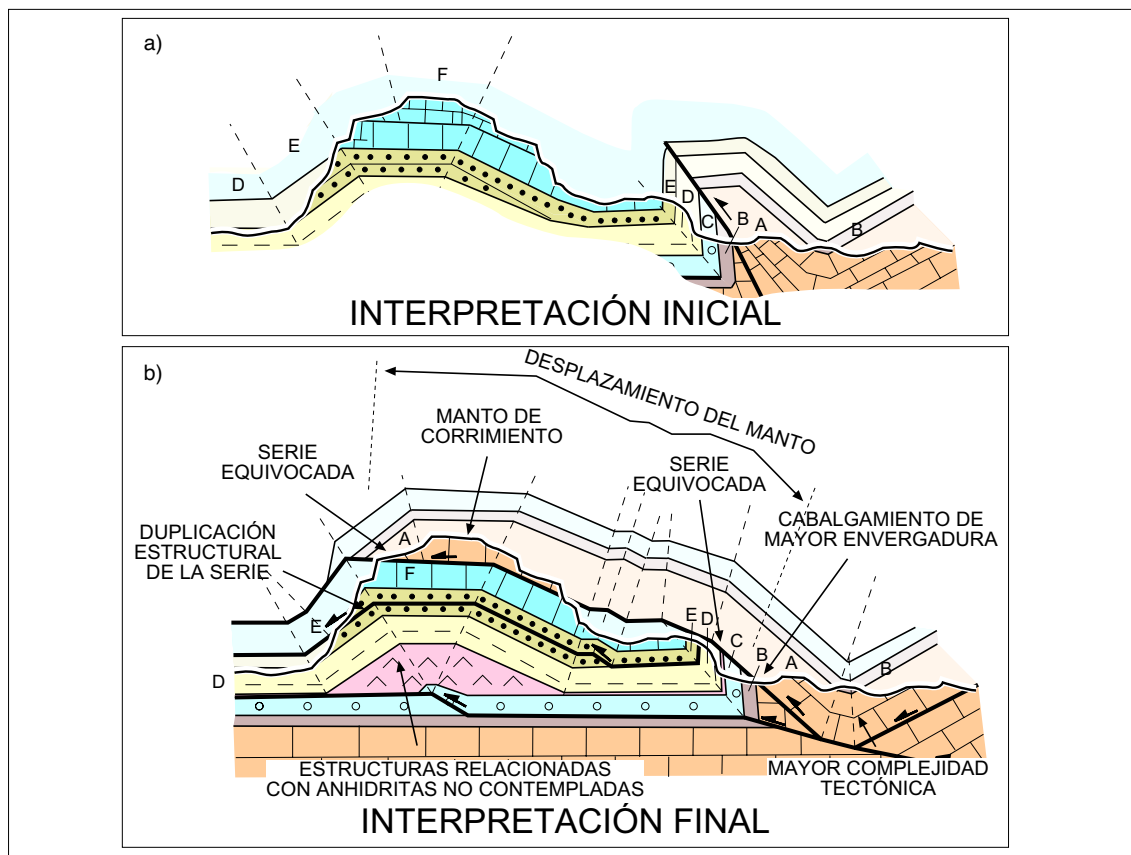


Figura 9 . El resultado es que, conforme se han obtenidos nuevos datos, las interpretaciones han variado y la última interpretación es muy diferente de la primera: la serie es distinta (hay un nivel de evaporitas no descrito), las calizas F son menos potentes, el cambio de grosor de la capa E es debido a la tectónica, la forma antiformal es debida a la acumulación de evaporitas y que existe un manto de corrimiento importante.

Esto demuestra que existen materiales más antiguos encima de más modernos y que la columna inicial estaba equivocada. A partir de estos datos se realiza una nueva interpretación estructural. El cabalgamiento de la derecha, aparentemente de poca importancia, resulta ser una rampa de bloque inferior de un manto de corrimiento que sitúa su bloque superior sobre la cima de la montaña del corte. La comparación entre el corte inicial (fig. 9-a), con la última interpretación (fig.9b) nos pone de manifiesto la existencia de grandes diferencias, tanto de tipo sedimentológico, estratigráfico, y tectónico.

CONCLUSIONES

- Es interesante que los ejemplos de mapas, que se usan tradicionalmente como ejercicios, contengan los buzamientos con el ángulo para una correcta construcción de los cortes.
- La enseñanza de la cartografía geológica con el método interactivo puede proporcionar al alumno una idea más aproximada de el proceso cartográfico.
- Si se trabaja en grupos separados se puede observar que, con los mismos datos, pueden haber diversas interpretaciones, todas ellas posibles.
- Estos ejercicios sirven como reflexión acerca de la relatividad de las interpretaciones geológicas y como reconocimiento de las limitaciones a que el geólogo está sometido.
- Solamente la disposición de una gran cantidad y cualidad de datos, puede permitir una mayor aproximación a la realidad, hecho que, generalmente, queda reducido a grandes compañías de investigación.

AGRADECIMIENTOS

A Xon Borrell, Alfons Cornella, Catalina Sureda y David Brusi por las correcciones y sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

Barnes, J.W. (1993). *Basic Geological Mapping*. John Wiley & Sons. Chinchester. England. (reimpresión de la misma obra publicada en 1981 por la Open University Press).

Bolton, T. (1989). *Geological Maps. Their solution and Interpretation of Geological Maps*. Cambridge University Press. England.

Butler, B.C.M. & Bell, J.D. (1988). *Interpretation of Geological Maps*. Lonman Sciebtific & Technical. England.

Guerra-Merchán, A. (1994). Mapas y cortes geoplógicos. Interpretación y resolución de problemas geológicos. Col. Ciencia y Técnica. C.E.P. de Málaga. Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía.

Lisle, R.J. (1988). *Geological structures and maps*. Pergamon Press. GB.

Maltman, A. (1995). *Geological Maps: an introduction*. John Wiley & Sons. Chinchester. England. (reimpresión de la misma obra publicada en 1990 por la Open University Press).

Martínez-Álvarez, J.A. (1985). Mapas geológicos. Explicación e interpretación. 3ª edición. Ed. Paraninfo. Madrid.

Ramón-Lluch, R. y Martínez-Torres, L.M. (1993). *Introducción a la Cartografía Geológica*. 3ª edición. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. Bilbao.

Roberts, J. L. (1984). *Introduction to Geological Maps and Structures*. Pergamon Press. Oxford. England.■