

Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección de formaciones evaporíticas

Prospection of evaporite formations with electric imaging

E. Lugo, E. Playà y Ll. Rivero

Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona. C/ Martí i Franqués, s/n, 08028 Barcelona. E-mails: elisabeth.lugo@gmail.com; eplaya@ub.edu; lrivero@ub.edu

ABSTRACT

The electric imaging permits to obtain a model of the subsurface materials on the basis of the vertical and horizontal resistivity changes along the tomographic profile. The final result, after the processing of the initially measured apparent resistivity, is a 2D profile that shows the real resistivity of the subsurface; it can be interpreted in geological terms, given that resistivity changes are mainly due to the lithological and water contents variations.

Electric imaging has been used in the study of evaporitic formations (gypsum and anhydrite). Differences of resistivity between gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and anhydrite (CaSO_4) are due to the presence of hydration water in gypsum rocks; the levels of water molecules in the mineral structure operate as conductive levels. Thus, anhydrite is expected to be more resistive than gypsum. The tomographic profiles fit the interval of gypsum resistivities between 80 and 1000 $\Omega \cdot \text{m}$, whereas the anhydrite display higher values, from 1000 to 11500 $\Omega \cdot \text{m}$. The ranges of resistivities will depend on the degree of transformation of the anhydrite rock to gypsum. The use of the electric imaging in prospection of evaporite (calcium sulphate) formations with possible economical interest is proposed. This technique is non destructive and comparatively less expensive than classical methods (drilling).

Key words: *Electrical imaging, resistivity, anhydrite, gypsum.*

*Geogaceta, 44 (2008), 223-226
ISSN: 0213683X*

Introducción

La tomografía eléctrica es una técnica geofísica que tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo. Ello se obtiene introduciendo una corriente eléctrica continua en la superficie del terreno a través de dos electrodos y midiendo el voltaje en otro par de electrodos a lo largo de un perfil de medida y hasta un cierto rango de profundidad. Las medidas obtenidas corresponden a los valores de resistividad aparente; una vez procesadas, se obtiene información sobre la resistividad real del subsuelo, que es característica de cada tipo de material. Esta técnica requiere la obtención de un número muy elevado de datos, con un pequeño espaciado entre medidas, y también que las medidas se realicen involucrando de forma progresiva varios rangos de profundidad. En cada dato, el instrumental recoge información sobre las variaciones verticales y horizontales de la resistividad del subsuelo. El resultado final, después del procesamiento de los datos, es una imagen en 2D distancia-profundidad que muestra la resistividad real del subsuelo, y que puede

ser interpretado en términos geológicos, de forma similar a un corte geológico.

La anhidrita (CaSO_4) tiene una estructura cristalina en capas paralelas, formadas por cadenas alternadas de iones Ca^{2+} y grupos SO_4^{2-} tetraédricos. En cambio, en la estructura cristalina del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), las capas sulfato cálcico están separadas por niveles de moléculas de agua. Aunque el yeso no es un material aparentemente conductivo, dado que es una roca compacta de prácticamente nula porosidad, sin presencia de elementos minerales conductivos ni agua libre intersticial, las capas con agua de cristalización actúan como niveles que conducen la electricidad, mientras que las capas de sulfato cálcico son resistentes. Así, la anhidrita presentará valores de resistividad más elevados que el yeso. Existen muy pocas referencias sobre los valores de resistividad de estas litologías, algunas resumidas en la tabla I.

En el presente estudio se propone el uso de esta técnica geofísica en el ámbito de estudio de unidades evaporíticas de sulfatos, con los siguientes objetivos específicos: *a)* ampliar el ámbito de estudio de estas litologías, *b)* identificar las for-

maciones evaporíticas intercaladas entre unidades no evaporíticas en base a su comportamiento eléctrico, *c)* acotar las diferencias de resistividades entre minerales evaporíticos hidratados y no hidratados, y *d)* caracterizar las superficies (o zonas) de hidratación de minerales anhidros en profundidad.

El interés científico de este trabajo se podrá trasladar a un uso aplicado: los perfiles tomográficos se obtienen mediante una técnica geofísica sencilla, no invasiva ni destructiva y comparativamente mucho más económica que los sondeos y perforaciones. En consecuencia, un último objetivo de este trabajo es valorar el interés aplicado del uso de la tomografía eléctrica a la prospección de unidades de yesos para su explotación industrial.

Metodología y área de estudio

El equipo utilizado para la adquisición de los datos de campo ha sido un Resistivímetro SYSCAL SWITCH. Todos los perfiles se han realizado con una longitud de 96 m, con una separación de los electrodos de 2 m. Los datos se gestionan mediante un ordenador portátil que actúa

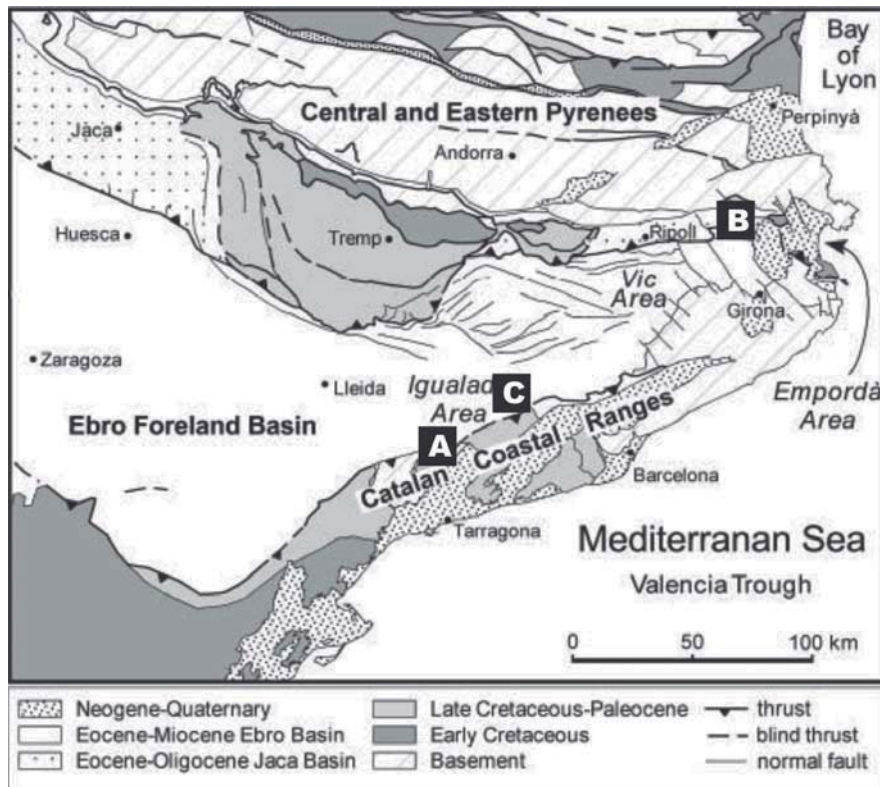


Fig. 1.- Situación geológica de los perfiles tomográfico realizados. A. Formación de Yesos de Pira (Zona de Pira-Guàrdia de Prats, Tarragona). B. Formación de Yesos de Beuda (Zona de Maià de Montcal-Beuda, Girona). D. Formación de Yesos de Ódena (Zona de Ódena, Barcelona). Mapa extraído de Serra-Kiel *et al.* (2003).

Fig. 1.- Geological location of the electric imaging profiles. A. Pira Gypsum Formation (Pira-Guàrdia de Prats area, Tarragona). B. Beuda Gypsum Formation (Maià de Montcal-Beuda area, Girona). C. Ódena Gypsum Formation (Ódena area, Barcelona). Map extracted from Serra-Kiel *et al.* (2003).

a través de los programas ELECTRE II para la creación de la secuencia de toma de datos y PROSYS para la descarga de la información y posterior interpretación de los mismos. Este proceso ha sido efectuado mediante el programa RES2DINV, obteniendo las pseudosecciones de los valores de las diferentes campañas realizadas. Se han utilizado los dispositivos Wenner-Schlumberger (ya que puede detectar estructuras verticales y horizontales) y dipolo-dipolo (puesto que su profundidad de investigación es normalmente mayor a la del dispositivo anterior). El procesado de los datos se realizó mediante los métodos de inversión Standard Constrained y Robust.

Las campañas de campo se han diseñado en función de los objetivos inicialmente presentados. En el primer nivel se procedió a la detección de las unidades evaporíticas (principalmente de yeso) y a su diferenciación de las litologías alternantes de resistividad conocida (lutitas). Se han realizado dos perfiles tomográficos en unidades alternantes de yesos y lutitas aflorantes, pertenecientes a la Formación de Yesos de Pira (Ortí *et al.*, 2007), en las localidades de Pira y

Guàrdia de Prats (Tarragona). El área de estudio se sitúa en el borde SE de la Cuenca del Ebro y corresponde a materiales del Eoceno superior-Oligoceno basal.

En el segundo nivel de investigación se ha pretendido detectar el tránsito yeso- anhidrita en profundidad. Las formaciones yesíferas estudiadas han sido: a) Formación de Yesos de Beuda, de edad Eoceno medio, aflorantes al este de la Cuenca Surpirenaica Catalana (Ortí y Rosell, 1990); y b) Formación de Yesos de Ódena, con una potencia de unos 30 m y ubicada en el margen E de la cuenca potásica surpirenaica; esta formación corresponde a la corona sulfatada exterior a las unidades de cloruros (sódicos y potásicos) del Eoceno superior de las cuencas catalana y navarra (Busquets *et al.*, 1985). Las dos campañas (a, Maià de Montcal-Beuda, Girona; y b, Ódena, Barcelona) se han realizado en una área de canteras abandonadas, donde se explotaron las capas yesíferas principales hasta la aparición de masas anhidríticas, que actualmente permanecen aflorantes.

Todas las formaciones de yeso estudiadas están constituidas por yeso secundario microcristalino masivo (en afloramiento); esto es, aquel que proviene de la hidratación de anhidrita al entrar en contacto con aguas meteóricas. Estas rocas de yeso se muestran acompañadas por proporciones variables de material encajante (<5 a 10%), principalmente de carbonatos y lutitas.

Se ha calculado la densidad de alguna de las muestras tomadas mediante el método de la pesada hidrostática, con el fin de semicuantificar la pureza en yeso (o en anhidrita) de las rocas estudiadas.

Cita bibliográfica	Resistividad Yeso (Ωm)	Resistividad Anhidrita (Ωm)	Comentarios
Ball <i>et al.</i> (2006)	25-500		No se presenta un rango de valores específicos, sino que son deducidos de los perfiles tomográficos
Arlandi (2005)	150-500 1000-5000		Los valores menos resisitivos son atribuidos a la roca yesífera en superficie; los más resisitivos se atribuyen a la roca yesífera
Asfahani y Mohamad (2002)	94-12000		Valor asociado a una formación geológica compuesta de yeso y anhidrita
Benson y Kaufmann (2001)	150-1000		El autor hace la diferencia de los valores de resistividad baja para yeso y alta para yeso en profundidad no meteorizado
Chouteau <i>et al.</i> (1997)		1000	La anhidrita se presenta asociada con halita, carnalita y taquidrita
Robinson y Çoruh (1988)		10^9-10^{10}	
Rider (1986)	1000	10^4-10^{10}	Valores de yeso y anhidrita, en la interpretación de diagragías eléctricas, a partir de diferentes fuentes
Orellana (1982)	1-1000	1000-10000	Se cita que los valores de los yesos son variables y que los valores altos deberían corresponderse con el paso de yeso a anhidrita

Tabla I.- Valores publicados de resistividad de formaciones yesíferas y anhidríticas.

Table I.- Published resistivity values of gysiferous and anhydritic formacions.

Resultados

Yesos de Pira (alternancia yeso-lutitas; Tarragona): Los perfiles tomográficos realizados muestran claros contrastes de resistividad entre los niveles de yeso (ligeramente resistivos) y los de lutitas (muy conductivos, con valores de $R < 80$ m). En la figura 2A se observa una potente capa resistiva con valores que oscilan entre 100 y > 1000 m, correspondiendo a la capa yesífera aflorante. La capa se encuentra intercalada en el un medio menos resistivo (50 a 100m) que corresponde al material lutítico supradistante. En la figura 2B se observan dos niveles más resistivos (80-1000m) que se encuentran localizados entre la posición 34 y 52 m del perfil; esta posición coincide con el electrodo 26 el cual se colocó directamente sobre la capa de yeso aflorante en superficie, corroborándose la observación.

Yesos de Beuda (tránsito yeso-anhidrita; Girona): La respuesta eléctrica del yeso frente a la de la anhidrita ha sido estudiada en un afloramiento de yeso con intercalación de masas anhidríticas irregulares aflorantes (Fig. 3A). Entre las posiciones del perfil tomográfico 22 y 26 m del perfil (correspondiente a los electrodos 11 y 13; Fig. 2C) se encuentra un montículo de anhidrita aflorante; en esta posición se observa un ligero aumento de la resistividad del terreno que asciende a valores entorno a 1500 m. El resto del substrato está cubierto por un nivel poco potente de lutitas superficiales. La densidad de la roca aflorante en este punto oscila entre $2,8 \text{ g/cm}^3$ y $2,6 \text{ g/cm}^3$. Considerando los valores de densidad de la anhidrita ($2,9\text{-}3,0 \text{ g/cm}^3$) y el yeso ($2,3\text{-}2,5 \text{ g/cm}^3$) puros, se interpreta que esta roca anhidrítica contiene también yeso (está parcialmente hidratada), motivo por el cual no presenta los valores elevados esperados de resistividad. Por consiguiente, se pueden distinguir dos rangos de valores correspondientes a la masa de anhidrita (1000 a 11500 m), mientras que los yesos presentan resistividades comprendidas entre 300 y 1000 m.

Yesos de Ódena (tránsito yeso-anhidrita; Barcelona): En el perfil tomográfico se colocaron los electrodos muy próximos a varias masas anhidríticas aflorantes (Fig. 3B). La figura 2D muestra la aparición en superficie de dos cuerpos resistivos de morfología irregular ($R=1000$ a 3500 m) entre las posiciones 60-64 m y 76-80 m; estos puntos coinciden con la observación en superficie del cuerpo de anhidrita. Estas masas se encuentran intercaladas en un medio menos resistivo

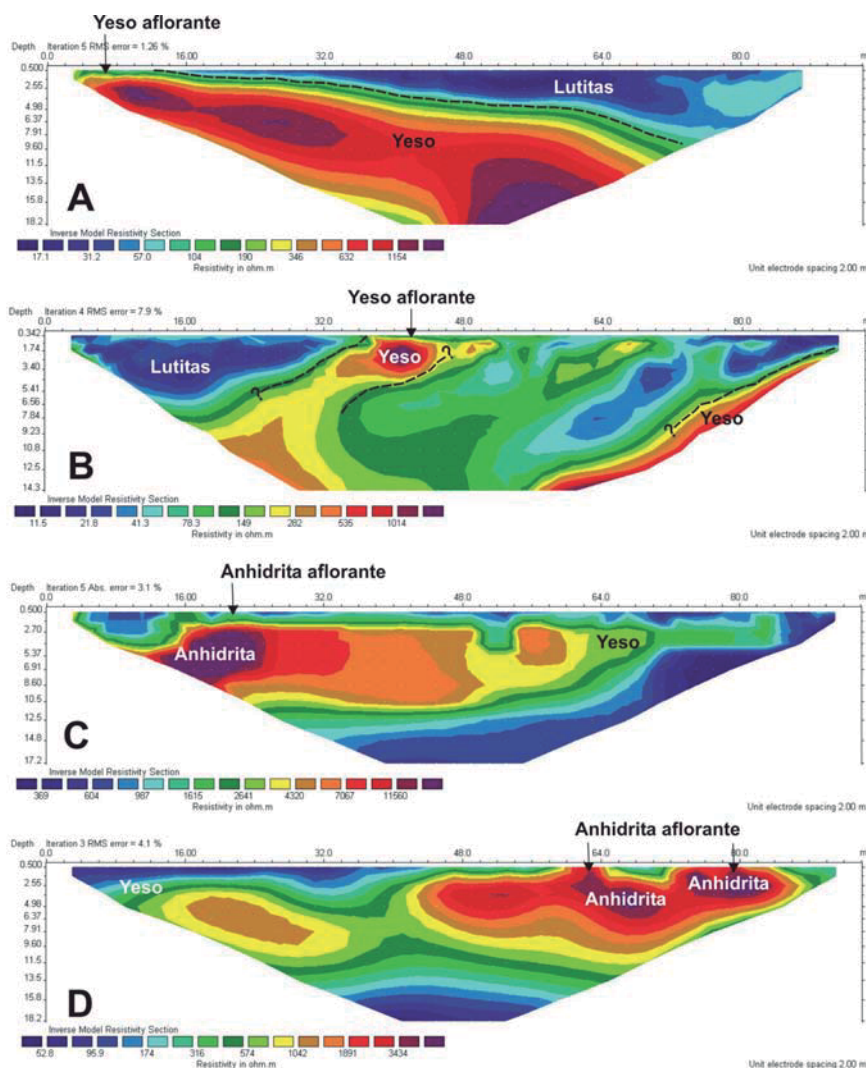


Fig. 2.- Secciones de resistividades reales obtenidas. A. Formación de Yesos de Pira (Pira, Tarragona); B. Formación de Yesos de Pira (Guàrdia de Prats, Tarragona). C. Formación de Yesos de Beuda (Maià de Montcal-Beuda, Girona). D. Formación de Yesos de Ódena (Ódena, Barcelona). Los perfiles presentados se han realizado mediante el dispositivo Wenner-Schlumberger y los datos se han procesado con los métodos de inversión Standard Constrained (A, D) y Robust (B, C).

Fig. 2.- Real resistivity sections. A. Pira Gypsum Formation (Pira, Tarragona); B. Pira Gypsum Formation (Guàrdia de Prats, Tarragona). C. Beuda Gypsum Formation (Maià de Montcal-Beuda, Girona). D. Ódena Gypsum Formation (Ódena, Barcelona). The showed profiles have been performed with the Wenner-Schlumberger dispositive, and the data have been processed with the Standard Constrained (A, D) and Robust (B, C) inversion methods.

con valores comprendidos de < 100 y 1000 m, correspondiente al rango de valores del yeso.

Discusión: interés aplicado

España es el primer exportador europeo de yesos y probablemente el tercer productor mundial (tras EUA y China). Considerando que la tomografía eléctrica es una técnica no invasiva ni destructiva y relativamente económica, la exploración de nuevas técnicas de estudio puede ser de especial interés para aquellas em-

presas dedicadas a la prospección y/o explotación de formaciones de yesos para uso industrial (principalmente para la industria de la construcción).

En aquellas explotaciones donde se extrae yeso que procede de la hidratación de anhidrita (yeso secundario, que ha sufrido todas las etapas diagenéticas del sulfato cálcico), la profundidad de los frentes de hidratación de la anhidrita (en profundidad) a yeso (en superficie) determinará la vida de las canteras. De hecho, se ha constatado que en las canteras visitadas afloran masas relativamente grandes (va-

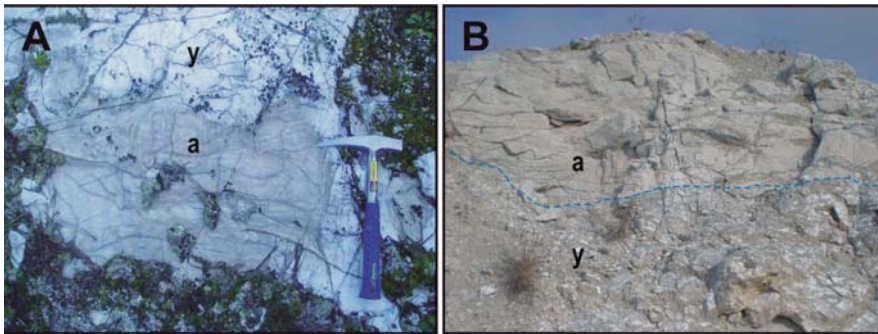


Fig. 3.- Masas anhidriticas residuales entre yeso secundario microcristalino (procente de la hidratación en superficie de la anhidritia). A. Formación de Yesos de Beuda (Maià de Montcal-Beuda, Girona). B. Formación de Yesos de Ódena (Ódena, Barcelona); el montículo tiene una altura de 4 m. a, anhidrita; y, yeso.

Fig. 3.- Residual anhydrite bodies in microcrystalline secondary gypsum (coming from the surficial hydration of anhydrite). A. Beuda Gypsum Formation (Maià de Montcal-Beuda, Girona). B. Ódena Gypsum Formation (Ódena, Barcelona); the mound is 4 m high. a, anhydrite; y, gypsum.

rios m³ visibles) de anhidrita, y en al menos una de ellas, se ha verificado que la explotación no continuó en profundidad por la presencia de dicho cuerpo anhidritico. La realización de perfiles tomográficos durante la propia fase de explotación puede ser una buena herramienta para el control de la profundidad de la zona de transformación yeso-anhidrita.

La hidratación de la anhidrita se produce por la circulación descendente de aguas meteóricas infiltradas en la formación evaporítica; por lo tanto, el tránsito mineralógico no se produce de forma brusca a lo largo de una superficie planar bien definida, sino que tiene lugar en una franja de varios metros de espesor y de contorno totalmente irregular. Los sondeos permiten establecer con exactitud el tránsito en el punto de realización del sondeo y en su entorno más próximo, pero no permiten acotar su evolución lateral, mientras que la tomografía eléctrica ofrece un perfil en dos dimensiones. Sin embargo, los perfiles tomográficos presentan dos grandes inconvenientes: a) relativamente poca resolución (no se identifican estructuras de dimensiones menores a algunos metros y el rango de precisión estimado para las lecturas obtenidas es de ± 2 m), y b) poca profundidad de trabajo (situada entorno a los 15-20 m). La profundidad de trabajo puede aumentarse hasta un centenar de metros si se aumenta la distancia del perfil a 500 m. Esta ampliación de la longitud de los perfiles podría permitir elaborar también trabajos de prospección de yacimientos explotables de yeso, aunque lógicamente disminuye la precisión de los resultados (± 5 m) y además requiere de una superficie topográfica relativamente poco abrupta, más difícil de localizar y realizar que en el caso de los perfiles de 100 m.

Conclusiones

a) La tomografía eléctrica se presenta como una herramienta útil en la detección de cambios litológicos entre rocas evaporíticas (sulfatos de calcio) y litologías no evaporíticas (lutitas) alternantes y en la detección del tránsito yeso-anhidrita en las propias formaciones evaporíticas.

b) La diferencia de resistividad entre el yeso y la anhidrita se debe a la presencia de niveles con moléculas de agua en la estructura cristalina del yeso, que actúan como niveles conductores. La anhidrita da una respuesta eléctrica más resistiva que la del yeso, debido a la ausencia del agua de hidratación en el mineral. Se asignan unos valores de resistividades para el yeso y la anhidrita entre 80 hasta 1000 m y de 1000 a 11500 m, respectivamente. El amplio espectro de resistividades para cada litología depende del grado de transformación de la roca anhidritica a yeso (y de la presencia de material encajante).

c) Dado que la tomografía eléctrica ha dado buenos resultados en la detección del tránsito yeso-anhidrita, esta técnica podría aplicarse como apoyo en la fase de investigación de la prospección de sulfatos o en canteras donde el yeso ya está en fase de explotación, en las que la presencia de masas anhidriticas podría impedir el avance de la explotación. Esta técnica puede ser un apoyo (o una alternativa) a otros métodos convencionales (sondeos, perforaciones), puesto que presenta las ventajas de ser un método no destructivo y de bajo coste. Sin embargo presenta la limitación de la profundidad de trabajo a no más de 20 metros. La profundidad de trabajo puede aumentarse hasta un centenar de metros si se aumenta la distancia del perfil a 500

m (aunque se disminuye la precisión a ± 5 m).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por los proyectos CICYT CGL2006-04860, CGL2005-05337, «Grup Consolidat de Recerca Geologia Sedimentària» 2005SGR-00890 y «Grup Consolidat de Recerca Geologia Econòmica i Ambiental i Hidrologia». Los autores quieren agradecer la ayuda prestada al Dr. F. Ortí, E. Carrillo, R. Lovera y R. Lázaro.

Referencias

- Arlandi, M. (2005). *XII Curso de Geotecnica Aplicada*. Univ. de Jaén, 64 pp.
- Asfahani, J. y Mohamad, R. (2002). *Exploration and Mining Geology*, 11, 49-59.
- Ball, L.B., Lucius, J.E., Land, L.A. y Teeple, A.P. (2006). *Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5176*. U.S. Geological Survey, 35 pp.
- Benson, R. C. y Kaufmann, R.D. (2001). *Geotechnical and Environmental applications of Karst geology and hydrology* (Beck y Herring, Eds.). Balkema, 103-112.
- Busquets, P., Ortí, F., Pueyo, J. J., Riba, O., Rosell, L., Sáez, A. y Taberner, C. (1985). En: *Excursion Guide-book 6th European Meeting* (M.D. Milà y J. Rosell, Eds.). 13-59.
- Chouteau, M., Phillips, G. y Prugger, A. (1997). En: *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference of Mineral Exploration* (A.G. Gubins, Ed.). 927-940.
- Orellana, E. (1982). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo, 564 p.
- Ortí F. y Rosell L. (1990). En: *Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas y de la zona de Levante. Nuevas aportaciones y guía de superficie* (F. Ortí, F. y J.M. Salvany, Eds.). ENRESA - Dep. Geoquímica, Petrología i Prospecció Geològica (Universitat de Barcelona). 139-140.
- Ortí F., Rosell L., Inglès M. y Playà E. (2007). *Geologica Acta*, 5, 19-34.
- Rider, M.H. (1986). *The Geological interpretation of well logs*. Blackie Halsted Press, 175 p.
- Robinson, E.S. y Çoruh, C. (1988). *Basic Exploration Geophysics*. John Wiley & sons, 562 pp.
- Serra-Kiel, J., Travé, A., Mató, E., Saula, E., Ferràndez-Cañadell, C., Busquets, P., Tosquella, J. y Vergés, J. (2003). *Geologica Acta*, 1, 177-200.