Prueba de Radiolocalización y Radioenlace entre Candanchú y el Túnel Ferroviario Internacional de Canfránc (Huesca)

Radiolocation and radioconnection at the international railway tunnel of Canfranc (Huesca).

N. Ayuso [1,3], J.A. Cuchí [2,3] y J.L. Villarroel [1,3]

[1] Dpto de Informática e Ingeniería de Sistemas. Centro Politécnico Superior. C/María de Molina 3. 50071-Zaragoza.
[2] E. Politécnica Superior de Huesca. Cª.Cuarte s/n. 22071-Huesca.
[3] Grupo de TecnoEspeleología. Universidad de Zaragoza-Peña Guara.

ABSTRACT

A new device for underground radiolocation and radio conection was tested betweeen the railway tunnel of Canfranc and the sky ressort of Candanchú. The results provide a radiolocation through 500 m. of limestone and wet shale, and a radioconection through 890 m. of karstified limestones. Giving the relation between the electrical conductivity of the rock and the attenuation of the signal, the results suggest that the device could be used as a geophysical tool.

Key Words: *radiolocation, radioconnection, limestone response, electrical conductivity, Canfranc.*

Geogaceta, 31 (2002), 67-70
ISSN:0213683X

Introducción

Se define como radiolocalización la localización de un punto azimutal, en la superficie del terreno, de otro situado en una cavidad o subterráneo artificial. Por radioenlace, el envío de señales radioeléctricas entre dos puntos, en el presente caso entre una cavidad y la superficie.

Normalmente, las ondas de radio no penetran en tierra y agua más allá de unos pocos metros debido al efecto pelicular, tendencia de las corrientes a altas frecuencias a circular por la superficie de los conductores. Conforme se disminuye la frecuencia de transmisión se incrementa la profundidad de penetración.

Fundamentos de la radiolocalización

Desde hace 4 décadas, la radiolocalización subterránea se ha utilizado como una herramienta para la localización de puntos situados bajo tierra (Villarroel, 1999). Sugerido en 1960, el uso de la inducción magnética se ha utilizado con éxito en topografía no convencional, rescates y exploración. (O'Dell et al., 1996; Hurni, 1996; Cayla et al., 2000). Como la radiación de señales de muy baja frecuencia requieren grandes antenas, poco prácticas en espeleología y otras actividades bajo tierra, se suele utilizar la comunicación inductiva. Ésta se basa en el campo magnético y requiere únicamente como antena una bobina dimensiones pequeñas (diámetro inferior a 1 metro). En la actualidad existen pocos aparatos en el mundo, ninguno de ellos comercial, con un alcance máximo de 200 metros.

La radiolocalización en cavidades utiliza la dirección de las líneas de flujo en campos magnéticos próximos de baja frecuencia. (Reid, 1984; Bedford, 1993; O'Dell, 1996; Nessler, 2000). Las líneas de flujo magnético producidas por una espira están contenidas en planos con una simetría axial cuyo eje es el propio de la espira emisora Figura 1. Así, una espira contenida en uno de estos planos no cortará ninguna línea de flujo y por lo tanto no se inducirá en ella corriente alguna.

El método de trabajo de trabajo implica la acción de dos grupos de trabajo muy bien coordinados, trabajando simultáneamente en profundidad y superficie. El primero instala la antena emisora mientras que el segundo, con la antena receptora, define el punto azimutal mediante trazado de líneas de flujo nulo.

El método descrito plantea problemas cuando el terreno es anisótropo ya que el campo magnético puede ser distorsionado y sus líneas de flujo dejan de estar contenidas en planos (Stoyer y Wait, 1979). Por otra parte, el trabajo a grandes profundidades en rocas conductivas puede suponer el incumplimiento de la condición de campo cercano. En este caso se trabaja en la zona de transición donde el campo tiene una geometría que imposibilita la medida de la profundidad.

El radioenlace

La comunicación con algún punto situado bajo tierra se realiza por telefonía convencional de dos hilos, telefonía de un hilo con retorno por tierra o radio. Los dos primeros implican el tendido de cables.

El radioenlace se ha desarrollado por diversos grupos de trabajo. En Suiza, la Hölloch Cave Research Association AGH, emitiendo a 46 kHz con una antena de piquetas clavadas en el suelo obtuvo un alcance comprobado en 500 m. (Hurni y Ebi, 1996; Trayner 1997). El Cave Radio & Electronics Group (Reino Unido) ha desarrollado un equipo a 87 kHz con antenas lineales y espiras con el que se han alcanzado los 400 m. (Hey, 2000). A partir de 1996, debido a un trágico accidente en el Gouffre Berger (Francia), se ha desarrollado el sistema NICOLA MK II descrito en Naylor (1998, 1999). Opera a 87 kHz, con antenas de inyección de corriente en tierra, límite teórico en 1200 metros de profundidad y funcionamiento comprobado a 500 m, en un "Rescue Communications Field Meeting" (Laugher, 1999).

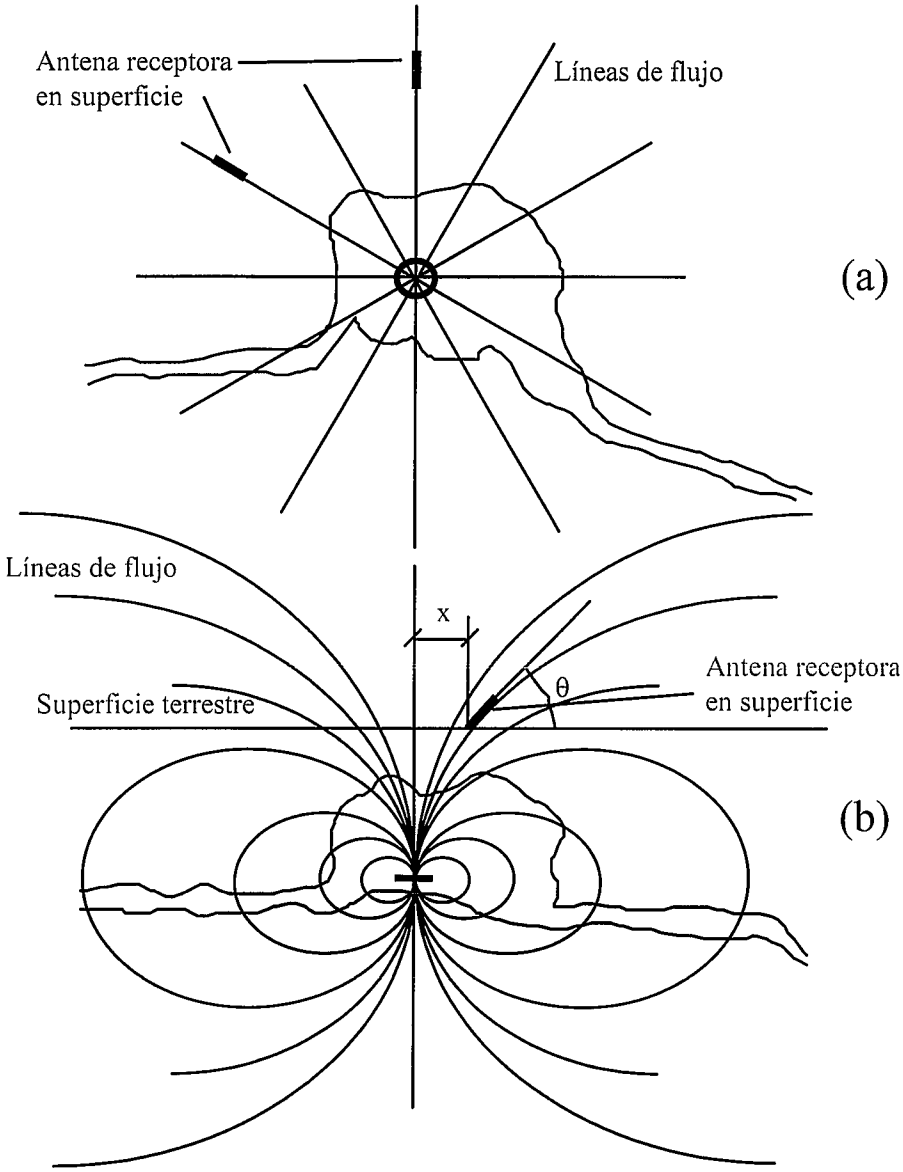

Fig. 1.- Líneas de flujo magnético producidas por un solenoide (dipolo magnético). La antena receptora no corta flujo magnético (no recibe señal) cuando el plano que determina pasa por el centro de la espira emisora. (a) vista en planta. (b) vista de perfil. Adaptación de Bedford (1993).

Fig. 1.- Magnetic flow lines produced by a solenoid (magnetic dipole). The reception antenna does not receive magnetic flow (no signal) when its plane goes through the center of the emiting antenna , and it is . (a) plant view. (b) profil view. Adapted from Bedford (1993).

En 1998, el Dpto. de Informática e Ingeniería de Sistemas, de la U. De Zaragoza, en colaboración con el Grupo de Investigaciones Espeleológicas de Peña Guara, desarrolló un prototipo de radiolocalizador probado en varias cavidades y túneles artificiales. Paralelamente se comprueba que este equipo puede transmitir datos (Alonso, 1998; Villarroel, 1999).

El éxito configura el GTE, y lanza el proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional de I+D y fondos FEDER "Emisión en campo magnético próximo de baja frecuencia. Aplicaciones de radiolocalización y comunicaciones para actividades subterráneas". Dentro del mismo se ha desarrollado un segundo prototipo para realizar radiolocalizaciones a profundidades de 500 metros, asociada a una comunicación de datos unidireccional cuya portadora es la misma que la utilizada en radiolocalización y con la que se pretende comunicar datos a través de 750 m. de roca.

El equipo emite a 233.2 y 976 Hz, con dos antenas emisoras hexagonales desmontables, de menos de 4 kg. de peso, alimentadas por baterías de 12 V. El receptor, alimentado por dos baterías de 9 V, dispone de dos antenas. La primera, denominada ARL, especialmente diseñada para radiolocalización, permite un fácil transporte, con giro con respecto a un eje vertical en una estructura soporte totalmente plana. La segunda antena, nominada ABM, consiste en un solenoide flexible que puede ser desplegado hasta formar un círculo de 20 metros de diámetro. Esta antena no está montada en ninguna estructura y pesa 30 kg. Sólo está diseñada para realizar radioenlaces y no permite la radiolocalización.

Este equipo de probó el 30 de julio de 2001, entre el túnel ferroviario del Canfranc y la estación de esquí de Candanchú (Huesca).

Marco de la prueba

Se eligió Candanchú debido a que se encuentra sobre el túnel ferroviario del Canfranc, con presencia de calizas karstificadas, y un espesor entre los 380 y 780 m. dentro del rango deseado. Túnel y superficie permiten un rápido acceso.

Desde la boca española, el túnel atraviesa dos unidades geológicas diferentes. Inicialmente atraviesa las calizas y areniscas del Carbonífero que conforman el valle de Rioseta y el pico Tobazo cuya cima está formada por calizas coralíferas. Tras cruzar la falla de Candanchú, bajo esta urbanización y el puerto del Somport se pasa a otra unidad. Esta ofrece en superficie lutitas y areniscas rojizas, de la serie Somport, de la base del Pérmico, que sobremontan areniscas en facies Culm y calizas negras de Namuriense. El sondeo 2 del túnel, situado a la altura de la estación de esquí, muestra 141 m. de areniscas grises, lutitas negras y brechas. El resto, hasta 236 m. está formada por calizas grises, con corales, del Devónico medio que presentan localmente oquedades y crecimientos de calcita (López Guarga, 1990). Los materiales finos se encuentran probablemente saturados en agua.

Las calizas del Tobazo presentan abundantes rasgos karsticos. Existe un flujo activo reconocido por Llopis (1947). No se conocen cavidades de importancia, salvo la Sima de La Zapatilla.

Características de la prueba

Para la prueba de radiolocalización se eligió la frontera franco-española en el interior del túnel, (punto PRL), situado a 4700 m. de la boca española, y una profundidad aproximada de 500 m. Para la prueba de radioenlace (PRE), se situó el emisor en un punto situado a 2900 m. de la boca española, desplazado 400 m. al

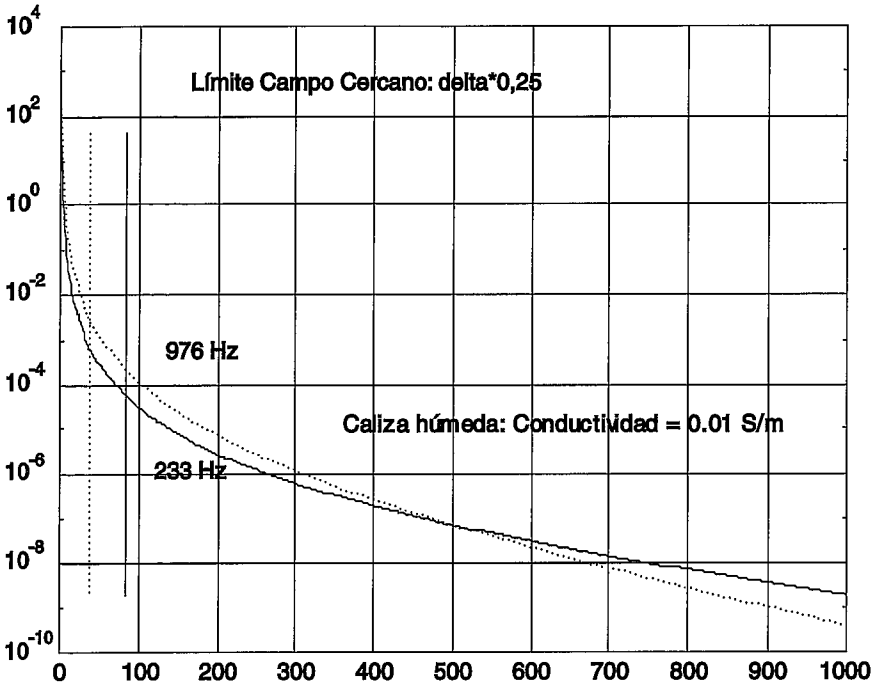

Fig. 2.- Tensión inducida en la antena receptora en función de la profundidad para las frecuencias: 233.2 Hz y 976 Hz.

Fig. 2.- Electric voltage induced at the reception antenna related with the rock depth for work frecuencies: 233.2 Hz y 976 Hz

norte de la vertical de la cima del Tobazo, máximo espesor de roca con 780 metros.

En el exterior se eligieron dos puntos diferentes para situar el equipo receptor en el radioenlace. El PRE1 situado en la falda norte del monte Tobazo sobre el túnel, a una altura de 1940 m. y a 760 m. de distancia efectiva al emisor. El punto PRE2 está situado en la cima del monte Tobazo, también sobre el túnel, a una altura de 1982 m. y a una distancia de 890 m. en línea recta al emisor.

Resultados de la radiolocalización

El punto cenital del PRL se localizó, emitiendo a 233.2 Hz, tras 1,5 horas de emisión, con un triángulo de incertidumbre de 10 m. de lado. La radiolocalización fue compleja y larga por la debilidad de la señal y una perturbación local, de origen desconocido. No se pudo determinar la profundidad. La emisión a 976 Hz fue prácticamente imperceptible en superficie.

Resultados del radioenlace

En dos puntos del monte Tobazo se utilizó la antena ARL en PRE1, para 976 Hz, y PRE2, con 233.2 Hz. En ambos casos se detectó la señal emitida desde el túnel bajo PRE tras atravesar, respectivamente, 760 y 890 m. de calizas karstificadas.

Análisis de la prueba de radiolocalización

La magnitud de la señal recibida a una cierta distancia del emisor y a una frecuencia dada depende del factor de calidad Q de las antenas emisora y receptora y de la conductividad del medio que determina la atenuación que sufre la señal. La figura 2 presenta la tensión inducida en la antena receptora en función de la profundidad para las frecuencias: 233.2 Hz y 976 Hz. Se supone un valor de conductividad eléctrica, s = 0.01 S/m, para la caliza húmeda. Se representa también el límite del campo cercano para ambas frecuencias.

La figura muestra como a 500 metros de profundidad el comportamiento de la frecuencia 233.2 Hz es igual a la frecuencia 976 Hz. Un aumento de la conductividad del medio supondría una mayor atenuación para la frecuencia mayor de 976 Hz que para la de 233.2 Hz. Por ello parece claro que la conductividad del medio en la prueba de radiolocalización es superior a s = 0.01 S/m, de acuerdo con la existencia en la columna litológica sobre el PRL, de lutitas y areniscas rojizas que se asumen saturadas de agua, y con una conductividad eléctrica muy superior, a las calizas.

Una conductividad tan elevada del medio condiciona fuertemente una radiolocalización a gran profundidad por que afecta a la condición de campo cercano y a la atenuación que sufre la señal de radiolocalización. Con respecto a este último aspecto, la figura 3 muestra la atenuación que sufre una señal de 233.2 Hz en función de la distancia a punto emisor para varios medios diferentes: espacio libre, caliza seca (s = 0.00001) y caliza hú-

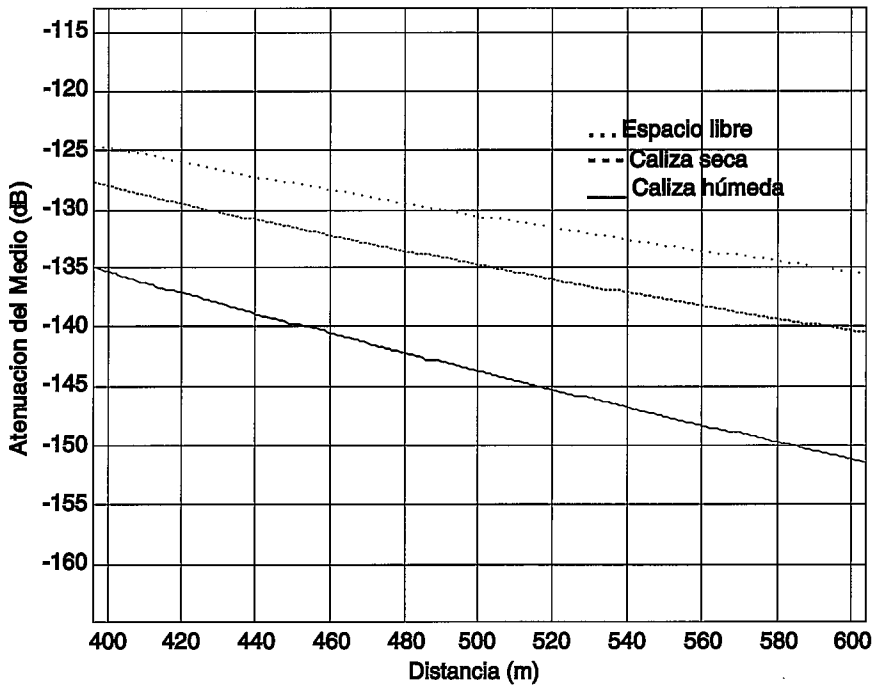

Fig. 3.- Atenuación que sufre una señal de 233.2 Hz en diversos medios: espacio libre, caliza seca (s = 0.00001 S/m) y caliza húmeda (s = 0.01 S/m).

Fig. 3.- Atenuation of a signal of 233.2 Hz at several media: free space, dry limestone (s = 0.00001 S/m) and wet limestone (s = 0.01 S/m).

meda (s = 0.01 S/m). En esta figura se observa claramente que la magnitud de la señal en el medio de conductividad s = 0.01 S/m se verá atenuada 9dB con respecto a la caliza seca, o equivalentemente, de una magnitud 2.8 veces menor.

Por ello se deduce que la radiolocalización realizada en Candanchú se llevó a cabo en unas condiciones con mayor atenuación que la que corresponde a la caliza seca. Además no se cumplían las condiciones de campo cercano, que para esta frecuencia es de unos 90 metros de roca, para determinar la distancia emisor-receptor. En estas condiciones, el éxito de la radiolocalización a 233.3 Hz es una prueba del alcance del equipo probado y de la experiencia de los operadores.

Análisis de la prueba de radioenlace

Las pruebas de radioenlace realizadas a 760 metros y 890 metros de distancia entre el emisor y el receptor en un medio de roca caliza demuestran la posibilidad de establecer comunicaciones de datos con portadoras de 233.2 Hz y 976 Hz a profundidades de 750 metros, objetivo planteado para la prueba, mediante acoplamiento inductivo utilizando la tecnología de emisión y recepción desarrollada.

Una frecuencia portadora de 976 Hz puede llegar a permitir una velocidad de transmisión de datos de casi 2 Kbits/segundo utilizando la modulación OQPSK que se está desarrollando en el proyecto. Para rocas muy conductivas puede utilizarse la portadora de 233.2 Hz que presentará menos atenuación pudiendo llegarse a una velocidades de transmisión de 466 bits/segundo. En el caso de comunicación entre equipos de interior y exterior, por ejemplo en un rescate, la comunicación se realizaría mediante un teclado y una pantalla. Para soportar este tipo de comunicación tan sólo es necesario una tasa de 48 bits/segundo (360 pulsaciones/minuto) y por lo tanto puede establecerse con ambas frecuencias portadoras.

Conclusiones

La prueba, en condiciones reales, de radiolocalización y radioenlace subterráneos. entre Candanchú , y el túnel ferroviario internacional de Canfranc muestra que se ha desarrollado un equipo que permite realizar radiolocalizaciones hasta profundidades de 500 metros y transmisión de datos a través de 750 metros metros de roca.

Los equipos probados presentan las características adecuadas de peso, portabilidad, tamaño y resistencia a medios adversos para poder ser utilizadas en medios subterráneos.

Se realizado la prueba con dos frecuencias diferentes que tienen una atenuación distinta frente a la conductividad eléctrica de la roca atravesada. Esta respuesta diferencial permite una primera estimación de la conductividad eléctrica del medio. Un desarrollo futuro del equipo puede permitir el desarrollo de una herramienta geotécnica.

La prueba ha realizado los radioenlaces más profundos basados en acoplamiento inductivo y la radiolocalización a mayor profundidad de los que se tiene constancia.

Agradecimientos

El trabajo se presenta como una aportación al proyecto IGCP 448. La investigación se ha financiado dentro del proyecto 2FD97-2088 del Plan Nacional de I+D / fondos FEDER: "Emisión en campo magnético próximo de baja frecuencia. Aplicaciones de radiolocalización y comunicaciones para actividades subterráneas". El trabajo de campo fue realizado por P. Molina, V. Viñals, E. Anía, J.M. Navarro, F. Royo, N. Ayuso, J.A. Cuchí, J. Alastruey y J.L. Villarroel. Las comunicaciones fueron aseguradas por la Escuela Militar de Montaña y la Guardia Civil. Agradecer también la facilidades dadas por NECSO, ETUKSA, Demarcación de Carreteras de Huesca, Laboratorio Subterráneo de Canfranc de la U. de Zaragoza, y la Federación Aragonesa de Espeleología.

Bibliografía

Alonso, Y (1988): *«Desarrollo de un sistema radiolocalizador con capacidad de transmisión de datos para espeleología»*. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería de Telecomunicación. C. Politécnico Superior. U. de Zaragoza.

M. Bedford, M. (1993): *J. of Cave Radio & Electronics Group*. 14. 16-18.

Cayla, A., David, E., Dodelin, C., Gudefin, J., Labat, M., Lafarguette, A., Tourte, B. (2000): Fed. Franç. Spéléologie. Spéléo Secours français. 27 p.

O'Dell, G.A., Householder, R y Reid, F.S. (1996): *GPS World*. 20-33.

Hurni, J y Ebi, C. (1996): *J. of Cave Radio & Electronics Group*. 25. 4-5.

Hey, J. (2000): *J. of Cave Radio & Electronics Group*. 41. 4-10.

Hurni, J. (1996): *J. of Cave Radio & Electronics Group*. 26. 21-21.

Laugher, S. (1999): *J. of Cave Radio & Electronics Group*. 26. 13-15.

Llopis Lladó, N, (1947): *Pirineos* 5. 81-166.

López Guarga, R. (1990): Estudio geológico, hidrogeológico y geotécnico del túnel de Somport (Huesca). MOP. Dirección General de Carreteras.

Naylor, G. (1998): *J. of Cave Radio & Electronics Group*. 34. 3-6.

Naylor, G. (1999): *J. of Cave Radio & Electronics Group*. 38. 3-6.

Nessler, N.H. (2000): *Subsurface Sensing Tech. and Appl*, 1. 2. 229-246.

Reid, F.S.(1984): *73 Magazine*. 42-49

Stoyer, C.H y Wait, J.R (1979):*Pure Appl. Geophys., Pageoph*,. 114. 39-51.

Trayner, C.(1997): *J. of Cave Radio & Electronics Group*. 28. 20-21.

Villarroel, J.L. Viñals, V., Cuchí, J.A., Anía, E.(1999): Subterránea. 12. 53-57