

«Aplicación de la prospección geofísica por georradar (GPR) a la delimitación y caracterización de estructuras arqueológicas. Ejemplo de las ruinas del convento agustino de Fraga (Huesca)»

«GPR geophysical prospection applied to delimit and characterize archaeological structures. Case study of the Augustinian monastery remains in Fraga (Huesca)»

Ó. Pueyo Anchuela ⁽¹⁾, S. A. Zamora Iranzo ⁽²⁾ y A. Pocoví Juan ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Área de Geodinámica Interna. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, nº 12. CP. 50.009 (Zaragoza)

⁽²⁾ Área de Paleontología. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, nº 12. CP. 50.009 (Zaragoza)

ABSTRACT

A ground penetrating radar survey has been applied to an archeological site before its excavation. GPR survey has been very useful to localize and characterize the remains of the Augustinian monastery of Fraga (Huesca). The presence of metallic remains at the surface and topographic anomalies hasn't allowed us to use mathematical interpolations to produce 3D anomaly maps. The characterization has been made manually with the definition of several degrees of reliability. These degrees allow us to make excavation guides very comprehensive where we can express all the information furnished by the GPR profiles.

Key words: GPR, archaeology, site

Geogaceta, 38 (2005), 131-134
ISSN: 0213683X

Introducción

El georradar es un método de prospección geofísica basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas. Sus aplicaciones son numerosas: caracterización de elementos constructivos (cimentaciones, hormigones, asfaltos...), prospección mineral, cartografía, estratigrafía, arqueología, paleontología, tectónica y sismología, contaminación ambiental, determinación de la profundidad del permafrost, caracterización de perfiles edáficos, búsqueda de víctimas en aludes,... Esta versatilidad del GPR se basa en que ofrece un registro de alta resolución, es un método rápido y la utilización de intervalos de disparo pequeños permiten considerarlo como un método casi continuo.

La aplicación del georradar a yacimientos arqueológicos permite la caracterización del subsuelo de forma no invasiva, lo cual lo hace una herramienta muy útil para la delimitación y caracterización de estructuras arqueológicas. La técnica, independientemente de los resultados obtenidos, permite dimensionar las labores de excavación arqueológica, delimitar sectores interesantes y, en los mejores casos, realizar guías de intervención arqueológica. El éxito de la técnica depende tanto de las características naturales del terreno, de las características de las estructuras arqueológicas analizadas, del equipo utilizado y de la correcta interpretación de los datos.

Los datos obtenidos son registrados directamente en un equipo informático, donde pueden ser visualizados casi en tiempo real durante las labores de prospección. Este tipo de equipos permiten un procesamiento preliminar de los datos durante la prospección, permitiendo de esta forma obtener resultados directamente en el campo, aunque sea necesario un procesamiento posterior.

La antena emisora manda una señal al suelo, la cual puede sufrir reflexión, refracción o difracción. Las ondas reflejadas son captadas por la antena receptora y visualizadas directamente en el monitor del equipo.

Por tanto los datos que obtiene el equipo indican variaciones de las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo. Las características de las ondas recibidas dependerán tanto de variaciones de la permisividad eléctrica, conductividad y permeabilidad magnética del subsuelo, como de las características de la onda emitida. Estos datos se componen de la intensidad de la señal recibida y el tiempo de llegada de las ondas (normalmente tiempos dobles o *TWT*).

Descripción de la zona de trabajo y metodología de muestreo

La zona estudiada es un solar que se encuentra en la confluencia de las calles Jaime I y Belén, de la localidad de Fraga

(Huesca). El estudio geofísico se realizó para la delimitación de las estructuras arqueológicas que habían aparecido durante las labores preliminares de excavación.

En el momento de la realización del estudio geofísico, el solar se encontraba excavado a la cota del garaje, y sólo existían

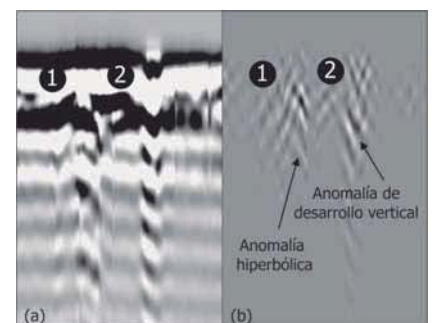


Fig. 1.- Ejemplos de anomalías en un perfil de georradar. (a) Detalle de uno de los perfiles sin filtros aplicados. (b) Mismo perfil tras haber sido aplicado Background Removal. Nótese la pérdida de la capacidad de discriminación entre 1 y 2 con un filtrado intenso. (1) Anomalia hiperbólica y (2) anomalía de desarrollo vertical.

Fig. 1.- Anomaly examples in a GPR profile. (a) Detail from a gpr-profile without filters. (b) Same profile where has been applied Background Removal. See the discrimination loose between 1 and 2 with the filters application. (1) hyperbolic anomaly and (2) vertical propagation anomaly.

GRADOS DE IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS ARQUEOLÓGICAS	
GRADO 1	Anomalías hiperbólicas identificadas en los perfiles de georradar donde existen evidencias superficiales de estructuras o cuando representan la continuidad lateral en profundidad de estructuras identificadas superficialmente.
GRADO 2	Anomalías hiperbólicas que no pueden contrastarse con estructuras arqueológicas superficiales. Estas anomalías identificadas en los perfiles de GPR pueden representar restos arqueológicos de los que no se tiene evidencia directa superficial pero que han sido determinados a partir de la interpretación de los perfiles electromagnéticos con una alta fiabilidad. En este grado se incluyen aquellas estructuras que han sido localizadas en todos los perfiles realizados y existe una continuidad lateral de las anomalías.
GRADO 3	Anomalías encontradas a partir de la interpretación de los perfiles electromagnéticos que, bien por no haberse constatado su continuidad a lo largo de todos los perfiles, o por el bajo grado de resolución de los mismos, no existe una fiabilidad sobre la verdadera causa de las alteraciones estudiadas en los perfiles.
GRADO 4	Zonas que bien por la inexistencia de anomalías, o por la escasa resolución y continuidad de las mismas, hace pensar que no existen estructuras antrópicas enterradas. Este límite viene determinado por las propias limitaciones del método y del equipo utilizado. Así mismo, se incluyen dentro de este grado aquellas zonas que no pudieron ser prospectadas en el momento de la realización de los perfiles.

Fig. 2.- Clasificación de Grados de Identificación de Restos Arqueológicos.

Fig. 2.- Degrees of reliability of Archaeological Structures classification.

tían evidencias de restos arqueológicos en la excavación realizada para el emplazamiento de la grúa, sin existir en el resto del solar.

La metodología empleada empieza por realizar un cuadrículado del solar, disponiendo la realización de perfiles en direcciones perpendiculares, a fin de obtener una caracterización doble de la zona. De este modo se asegura la realización de al menos una familia de perfiles no paralela a los elementos arqueológicos, siendo habitualmente dos direcciones oblicuas a los elementos. Esta cuadrícula se realizó con una equidistancia de 1 metro entre perfiles.

La cuadrícula realizada no pudo ser completa, puesto que ya existía en el solar maquinaria y materiales de construcción, por lo que se realizaron distintas cuadrículas parciales que fueron localizadas mediante teodolito. La realización de esta investigación tras el inicio de las obras presenta problemas, debidos por un lado a la existencia de obstáculos en la zona, y por otro a la ubicuidad de restos metálicos en el solar. El uso de una antena apantallada (shielded) reduce la influencia de elementos que se encuentran en las proximidades del equipo, sin embargo, la presencia de cables y virutas metálicas en todo el solar, afecta al equipo durante la prospección. En los perfiles realizados este tipo de incidencias se presentan como reflexiones múltiples o anomalías de desarrollo vertical.

El perfil estratigráfico estaba compuesto por arcillas de coloración parda con cantos dispersos de morfología redondeada. En

la superficie del terreno prospectado existían elementos metálicos y rodadas de maquinaria, que en el momento de la prospección se encontraban endurecidas. A partir de la descripción estratigráfica se realizó una valoración de la velocidad de propagación de las ondas en el medio, considerando una velocidad de propagación en suelos arcillosos y arenosos comprendida entre 55 y 150 m/ms (Mala Geoscience, 2000), se utilizó una velocidad de propagación de 110 m/ms. El cálculo de velocidades a partir de datos bibliográficos puede inducir a errores, debido a la amplia variabilidad de los parámetros del suelo en función del estado, estructura y composición. Esta ponderación fue utilizada para la caracterización preliminar del subsuelo, determinar la configuración del equipo de trabajo y determinar la viabilidad del equipo utilizado.

El equipo utilizado fue una antena monoestática apantallada de «Ramac X3M™», con una frecuencia central de 250 Mhz. La resolución viene determinada por la posibilidad de discriminar dos señales como objetos independientes, pudiendo valorarse de forma horizontal como vertical. La resolución vertical viene determinada por la frecuencia central de la antena utilizada y la velocidad de propagación ($R = (V/f) / 4$, siendo V la velocidad de propagación de las ondas en el medio, f la frecuencia central de la antena y R la resolución). De este cálculo se obtiene una resolución vertical de 0.055 a 0.15 metros para los valores bibliográficos considerados, y 0.11 m para la ponderación media utilizada.

La resolución horizontal (Annan, 2004) viene determinada por la velocidad, la profundidad del objeto estudiado y la frecuencia central de la antena ($R = ((r \cdot 1c) / 2)^{1/2}$), siendo r la profundidad del objeto estudiado y 1c la longitud de onda en el medio estudiado. Considerando la velocidad de propagación ponderada la resolución horizontal sería de 0.47 m para un objeto situado a una profundidad de 1 metro.

Esta determinación de la resolución permite dimensionar el intervalo de disparo utilizado (*trig interval*), considerando estos datos, la prospección se realizó con intervalos de disparo de 8 y 10 mm. En los perfiles de calibrado realizados se comprobó que la señal se atenúa antes de los 2 metros, por lo que se delimitó la profundidad de estudio a los 3 primeros metros de profundidad. Esta delimitación de la profundidad permite obtener una mayor resolución de los metros considerados.

Resultados obtenidos

Durante las labores de prospección, y a partir del estudio preliminar de los datos obtenidos, se determinó un sector para la realización de un sondeo comprobatorio. En este sondeo se localizó un muro de orientación N-S en el sector central de una de las cuadrículas.

Los trabajos de gabinete consistieron en el filtrado de ruidos en las medidas y la ganancia de la señal (disminuir la atenuación de la señal con la profundidad). Algunos de los filtros aplicados consisten en el filtrado de las frecuencias (limitar el intervalo de frecuencias de los registros al intervalo próximo a la frecuencia central de la antena), filtrado del ruido de fondo (*background removal*), ampliación de la amplitud de la onda con el tiempo (las señales recogidas de reflectores más profundos presentan menor intensidad), esto puede realizarse de forma exponencial o bien creando una curva de variación si se conocen variaciones estratigráficas de la columna, se puede aplicar un método de agrupación de disparos que permite disminuir la relación ruido/señal aunque con este método puede disminuirse la resolución horizontal (*tracking*).

Habitualmente cuando las estructuras buscadas presentan una constante dieléctrica relativa importante puede someterse a los perfiles a un filtrado intenso de las señales (*background removal, dc stacking, tracking*) de forma que se obtienen las típicas anomalías en forma de hipérbola (hipérbolas de reflexión). Sin embargo en casos en que existen anomalías de desarrollo vertical (anomalías cau-

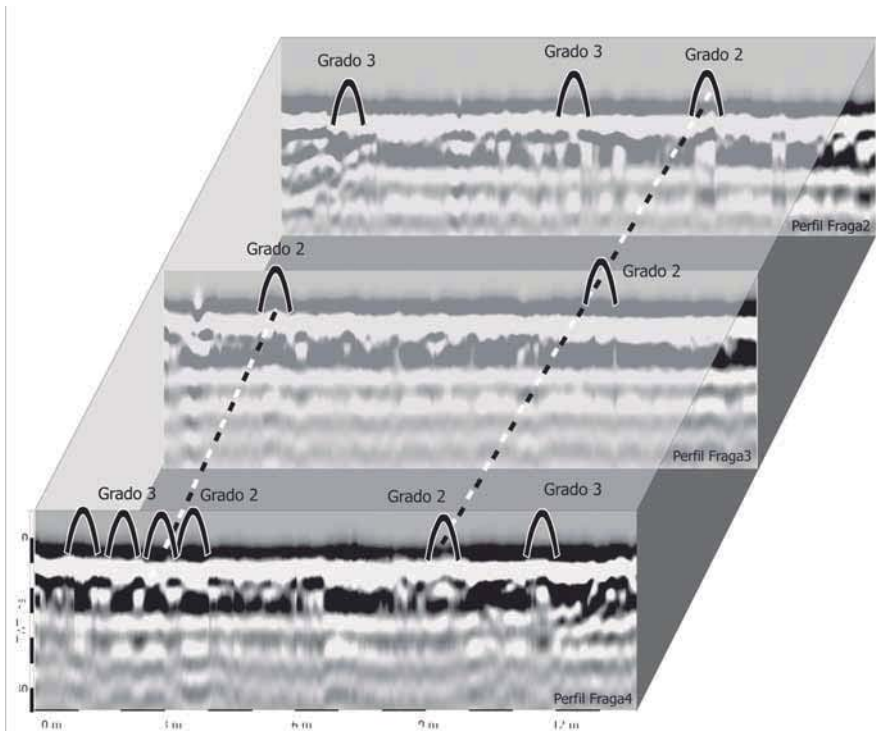


Fig. 3.- Metodología empleada en la correlación lateral entre perfiles de georradar. Se han señalado las anomalías más significativas en el gráfico a través de una hipérbola. Las anomalías señaladas pertenecen a los Grados 2 y 3 de Identificación de Estructuras Arqueológicas. La separación entre perfiles es de 1 metro.

Fig. 3.- Applied methodology in the lateral correlation between GPR profiles. The most important anomalies has been indicated by an hiperbola. These anomalies can be grouped in the second and third degree of reliance of archaeological structures. Distance between profiles is 1 meter.

sadas por reflexiones múltiples) la constante eléctrica relativa es mucho mayor y no pueden discriminarse directamente unas anomalías de otras.

Con la aplicación de un filtrado intenso puede perderse información sobre los reflectores planos, los cuales pasarían desapercibidos con este tipo de filtrado, y se pierde capacidad de discriminación entre anomalías hiperbólicas y de desarrollo vertical.

Durante el trabajo de gabinete se realizó una estimación de la velocidad de propagación de las ondas en el medio, a partir del ajuste de hipérbolas, obteniendo una velocidad de propagación media de 60 m/ms, velocidad que ofrecería una resolución vertical de 0.06 m y una resolución horizontal de 0.34 metros, valores compatibles con la configuración establecida a partir de la ponderación de velocidades previa.

Ponderaciones relativas

El fin último de la interpretación de los perfiles de georradar, es la representación en planta de las anomalías obtenidas. Este proceso puede realizarse manualmente o a través de interpolación matemática. En este caso se ha llevado a cabo mediante el

programa *Gpr_process* del Dr. Lawrence Conyers (Conyers *et al.*, 2002).

La aplicación de procesos de interpolación matemática en cuadrículas de pequeño tamaño, donde existen anomalías que producen reflexiones múltiples y existen irregularidades topográficas, plantea un serio problema en la discriminación de los datos significativos. Por otro lado, la realización de cuadrículas parciales no permite un estudio integrado de todo el solar estudiado.

La interpretación de los perfiles, en estos casos, debe realizarse de forma manual. Las anomalías causadas por elementos metálicos (reflexiones múltiples) son fácilmente identificables en el estudio de los perfiles con un filtrado somero, mientras que la capacidad de discriminación disminuye con la intensidad del filtrado (Fig. 1).

Para la realización de mapas de anomalías, de forma manual, es recomendable hacer valoraciones cualitativas de los tipos de anomalías identificadas, lo cual otorga distintos grados de confianza. Para este cometido se han definido una serie de Grados de Identificación de Estructuras Arqueológicas, aplicable al reconocimiento de estructuras arquitectónicas en-

terradas, basada principalmente en la continuidad lateral de las anomalías presentes (Fig. 2). Aunque esta clasificación pueda parecer innecesaria, permite sin embargo, una valoración cualitativa de las anomalías identificadas, lo cual permite una ponderación de los resultados de fácil interpretación por parte de los equipos de excavación. Esta clasificación sencilla se puede aplicar a gran número de yacimientos arqueológicos donde la problemática de la interpretación se reduce, y donde la ponderación aplicada puede variar y contrastarse durante la excavación arqueológica.

En el solar estudiado se han realizado 84 perfiles de georradar que cubren una distancia lineal de 909 metros. A partir del estudio de los radargramas realizados, y tras la aplicación de un filtrado somero de los datos, se realizaron mapas de anomalías de las cuadrículas realizadas, donde se contempla la continuidad lateral de las anomalías y la identificación de estas anomalías en las dos familias de perfiles perpendiculares.

La identificación de las anomalías de morfología de hipérbola fueron correlacionadas entre perfiles y plasmadas en un mapa a escala (Fig 3), omitiendo las anomalías relacionadas con reflexiones múltiples de reflejo superficial (anomalías relacionadas con objetos metálicos superficiales). Estas anomalías en función de su continuidad lateral fueron caracterizadas según los Grados de Identificación definidos.

Discusión

El estudio geofísico realizado permitió realizar una guía de intervención. Esta guía de intervención

favoreció la velocidad y eficacia de los medios empleados en la excavación de dicho solar.

La excavación del solar permitió comprobar la validez del estudio geofísico. Las estructuras arqueológicas identificadas tras ser excavadas representaban la cimentación de la Iglesia anexa al Convento de Agustinos de Fraga y los muros de los jardines del mismo. De este convento sólo se tenían referencias históricas, y no se conocía su localización exacta.

Los muros estaban compuestos por hiladas de piedras, de composición carbonatada principalmente, y no presentaban normalmente una altura superior a dos hiladas y una anchura máxima de 3 bloques (0.50-0.75 m)

En la figura 4 se presentan los mapas de anomalías realizados sobre la fotogra-

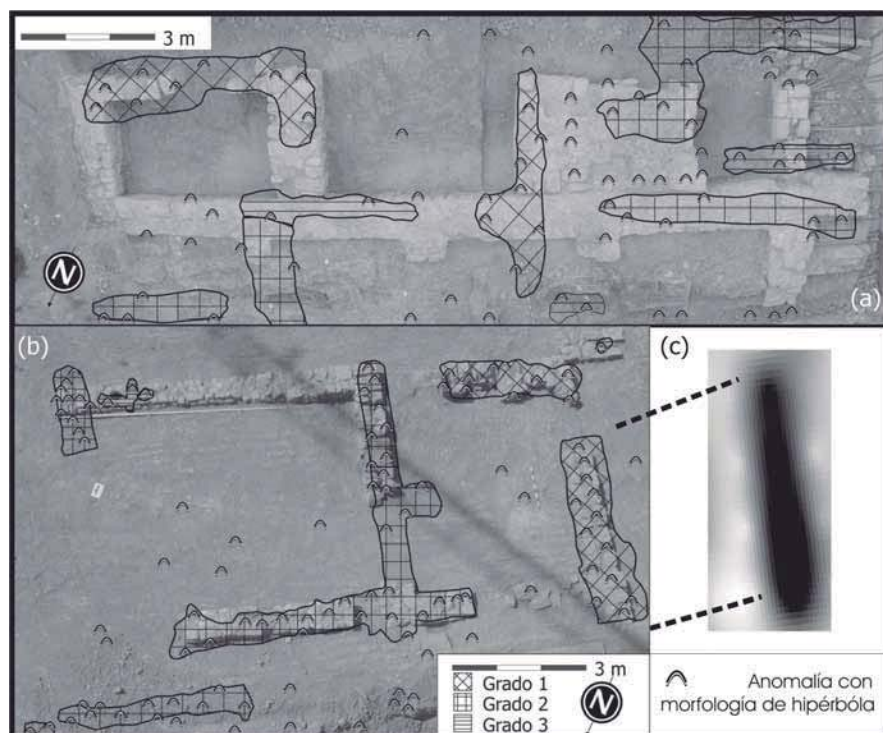


Fig. 4.- Fotografías aéreas de la zona estudiada después de su excavación y mapa de anomalías realizado utilizando la metodología planteada en este trabajo. (a) Sector occidental del solar, (b) sector oriental, (c) estructura arqueológica obtenida por interpolación matemática.

Fig. 4.- Aerial photographs of the studied area after its excavation and anomaly map made with the methodology here described. (a) Western sector (b) Eastern sector, (c) archaeological structure that has been get by mathematical interpolation.

fía aérea oblicua realizada después de la excavación. En algunos casos se ha realizado el procesado de interpolación matemática en zonas sin irregularidades topográficas ni anomalías de desarrollo vertical. Puede verse uno de los resultados en la figura 4c. Las estructuras arqueológicas identificadas fueron catalogadas dentro de los Grados 1 y 2 de Identificación de Estructuras Arqueológicas. La presencia de bloques y fragmentos enterrados, o restos aislados de la construcción aparecieron incluidas dentro del Grado 3 de Identificación de Estructuras Arqueológicas.

La presencia de acumulaciones de bloques y fragmentos en algunos sectores aparecen también en los mapas de anomalías, catalogados dentro de los Grado 2 y 3, este tipo de acumulaciones no representan estructuras arqueológicas, sin embargo son acumulaciones posiblemente de tipo antrópico.

Algunas de las morfologías de estructuras expresadas, en el mapa en planta, no refleja exactamente la geometría de las estructuras identificadas, esto se debe a que algunas de las estructuras arqueológicas se encontraban parcialmente derruidas y existían algunas piezas desestructuradas junto a los restos *in situ*.

Así mismo, la utilización de hipérbolas de reflexión para la caracterización de estructuras arqueológicas presenta una ligera problemática de localización, puesto que la anomalía se extiende ligeramente más que la estructura arqueológica enterrada. Por otro lado, se deben valorar también los errores asociados con la técnica de muestreo.

Pese a los problemas mencionados, los resultados obtenidos no son nada desdeñables, puesto que contribuyen significativamente a aumentar el factor de seguridad y a reducir el riesgo de dañar las estructuras.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio permiten proponer las siguientes recomendaciones sobre la aplicación de la prospección geofísica por georradar en yacimientos arqueológicos en zonas urbanas:

- La realización de mapas de anomalías en planta y en tres dimensiones por interpolación matemática, deben ser aplicados con precaución en medios urbanos con irregularidades topográficas y materiales de alta conductividad próximos a la superficie.

- La aplicación de filtros a los perfiles, puede hacer perder información y disminuir la capacidad de discriminación cuando existen elementos con contrastes altos de la permisividad relativa.

- La aplicación del georradar se revela como una herramienta eficaz para la peritación de yacimientos arqueológicos. Estos estudios permiten la delimitación y caracterización de estructuras arqueológicas y la creación de guías de intervención arqueológica destinadas a conseguir un mejor dimensionamiento de los trabajos de campo y en ocasiones podrían delimitar áreas susceptibles de utilización de medios mecánicos en la excavación de yacimientos.

- La aplicación de valoraciones cualitativas, Grados de Identificación de Estructuras Arqueológicas, permiten optimizar la presentación de resultados en las guías de excavación arqueológica y una ponderación sobre su fiabilidad. Los mapas de anomalías, realizados a partir de la interpretación manual y teniendo en cuenta estos grados, constituyen un documento sencillo y eficaz de las guías de intervención arqueológica. Estas guías permiten de forma comprensiva comunicar toda la información obtenida en los perfiles a los responsables de realizar la excavación.

Agradecimientos

Los trabajos aquí expuestos representan los expedientes 094/2003 y 105/2003 del Departamento de Patrimonio del Gobierno de Aragón. Los medios técnicos y la excavación corresponden a la empresa Arqueología y Restauración S.L.. Los trabajos fueron realizados bajo la dirección de los arqueólogos Francisco Javier Navarro Chueca y Esther Ripoll López-Higuera. Queremos agradecer al Dr. Lawrence Conyers (Universidad de Denver) la cesión de su programa *GPR Process* y los consejos ofrecidos para la realización de este trabajo, queremos agradecer también los comentarios y sugerencias de un revisor anónimo.

Referencias

Annan, A.P. (2004). *Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications*. Sensors & Software Inc. 293 p.

Conyers, L., Ernenwein, E. y Bedal, L. (2002). *E-tiquity 1*. (<http://e-tiquity.saa.org/~etiquity>)

Mala Geoscience. (2000) *Ground Vision*. Software manual. Mala Geoscience, 35 p.