

Métodos no invasivos ni destructivos para el estudio del patrimonio cultural: método electromagnético de georadar en prospección arqueológica, detección de fracturas y humedad en monumentos históricos, murales y pintura sobre tabla.

José Ortega Ramírez^{a1}, Luis Ángel Villa Alvarado¹, Maksim Bano² y Pascal Sailhac²

¹Laboratorio de Geofísica del INAH, Moneda No. 16, Centro Histórico, México, D.F 06060.

²Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université de Strasbourg/CNRS. 5, rue René Descartes, 67084, Strasbourg Cedex, France, C.N.R.S

Prólogo.

Como parte de las actividades de colaboración y participación en investigación aplicada que el Laboratorio de Geofísica desarrolla en el marco de los diferentes proyectos institucionales relacionados con el patrimonio cultural que requieren información sobre: el estado textural y estructural de muros y acabados que soportan pintura mural, la condición o situación física de la madera que sostiene pintura al óleo, la localización de fracturas, fisuras y su distribución espacial en profundidad en trabajos de restauración de inmuebles históricos e igualmente para la detección de oquedades y prospección arqueológica, aplicamos los métodos geofísicos no invasivos ni destructivos y producimos por medio de la imaginología modelos en 3-D.

Como sabemos que no existe un método universal en geofísica, en la mayoría de los trabajos de investigación aplicada que hemos realizado, hemos utilizado los métodos de tomografía de resistividad eléctrica y de georadar multi-frecuencias, además de contar con magnetometría y electromagnéticos de inducción. No obstante, en este trabajo nos limitaremos a la presentación de ejemplos de estudios en donde el georadar es el método predominante aplicado a la prospección de muros con murales para identificar sistemas de fracturas y de edificios arqueológicos con problemas de estabilidad de estructuras así como a la identificación de grietas y fisuras de estructuras arquitectónicas coloniales del siglo XVI o de galerías de insectos en madera que sirven de soporte a obras pictóricas antiguas. Con estos ejemplos ponemos de manifiesto la importancia, la rapidez y la alta definición que tiene el método electromagnético de georadar en el estudio del patrimonio cultural.

^aE-mail: jorteg@gmail.com

Introducción

La herencia arqueológica y cultural de México es muy abundante, ocupa el sexto lugar entre las más ricas del mundo después de Italia, España, China, Alemania y Francia con un total de 29 sitios considerados Patrimonio de la Humanidad. Tenemos a lo largo del territorio importantes y bien conocidos vestigios arqueológicos que varían desde pinturas rupestres hasta arquitectura monumental arqueológica del periodo Posclásico. Igualmente, los edificios históricos son considerados trascendentes para la humanidad y deben ser protegidos por las instituciones y autoridades en acuerdo con la sociedad, por lo que en los estudios de restauración y de conservación, el uso de técnicas o métodos no destructivos incluyendo los geofísicos, son importantes para identificar aspectos o rasgos problemáticos dentro y fuera de las estructuras.

Dentro de las técnicas geofísicas, el Radar de Penetración Terrestre o georadar es un método de investigación muy rápido y sensible a las variaciones de los tres componentes o parámetros físicos: la permitividad dieléctrica, la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética del subsuelo (Davis and Annan, 1989) y ofrece una mayor resolución que las otras técnicas geofísicas para la localización de estructuras enterradas cercanas a la superficie.

Este método ha sido aplicado al menos desde hace 25 años en la prospección arqueológica en varias partes del mundo para el mapeo y prospección de objetos enterrados. Por medio de esta técnica, podemos detectar materiales no muy profundos en el subsuelo, incluyendo aquellos que no son magnéticos como plásticos y madera y definir la profundidad a la que se encuentran.

El georadar o GPR puede darnos igualmente imágenes en 3-D del subsuelo para obtener mayor información sobre las estructuras arqueológicas enterradas y de esta manera, proporcionarnos un contexto más comprensivo del mismo. Además, el GPR es la primera técnica en la investigación de monumentos culturales que tienen importancia histórica y/o artística (Gracia et al., 2000; Leckebush, 2000; Leucci, 2002; Barilaro et al., 2007; Blanco et al., 2008; Perez-Gracia et al., 2009). También en el contexto de la restauración y conservación, este método puede ser aplicado para obtener información principalmente sobre ciertos daños estructurales, incluyendo fracturas, fisuras, y arreglos texturales que provocan desprendimientos de acabados dentro de la construcción, por lo que el GPR

puede ser usado para mejorar los planes o proyectos de acción para los estudios de restauración y conservación. En efecto, desde la Carta de Atenas de 1931, la Carta de Venecia en 1964 y la Conferencia General de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura en su 17a reunión de 1972, muchas organizaciones dedicadas a la conservación, protección, restauración y valoración del patrimonio cultural, tales como ICOMOS (International Council Of Monuments and Sites) y UNESCO han afirmado la importancia de los análisis no destructivos (*NDT* por sus siglas en inglés) para evaluar monumentos históricos y más recientemente, el ICOMOS en su 14ava Asamblea en Victoria Falls, Zimbabwe, de Octubre de 2003, estableció en su Artículo 2 que: « la investigación científica de la pintura mural debe realizarse hasta donde sea posible por medio de métodos no destructivos ni invasivos ». Incluso se ha instaurado el 18 de abril como el Día Internacional de Monumentos y Sitios ('World Heritage Day'), considerados como Patrimonio Cultural, reflejando así la preocupación de la sociedad por su mantenimiento y conservación, lo cual se traduce en la última década en un incremento continuo en el uso de métodos no destructivos (*NDT*) para detectar defectos y anomalías en edificios históricos y en general, en muchos de los bienes considerados como patrimonio cultural.

Por ejemplo, la arquitectura tradicional de edificios históricos es a menudo frágil e irremplazable y debe ser salvaguarda a través de la conservación y la restauración con el propósito de mantenerlos con un mínimo de intervención, para lo cual el conocimiento de la estructura del subsuelo, del estado de las fundaciones, de las características estructurales y de los posible daños en sus elementos es importante. Este conocimiento puede ser obtenido a través de la aplicación de métodos geofísicos como medio de monitoreo y diagnóstico para prevenir o retardar la degradación de los inmuebles considerados herencia cultural, ya sean prehispánicos y/o coloniales.

Metodología.-

El GPR es un método de prospección con amplias aplicaciones en arqueología y patrimonio cultural (e.g., Goodman D., 1994; Conyers, L.B., and Goodman, D., 1997; Pérez-Gracia V., et al., 2000; Pieraccini et al., 2005; Pérez-Gracia, V. et al., , 2008), y ha probado ser exitoso en una gran variedad de aplicaciones, por ejemplo: 1) para la búsqueda

de tumbas o de restos humanos (cf. Vaughan, 1986; Bevan, 1991); 2) para la detección de fundaciones enterradas, muros, pisos y objetos hechos por el Hombre (cf. Vaughan, 1986; Imai et al., 1987; Sternberg y McGill, 1995) y 3), y en la restauración de antiguas ciudades enterradas por erupciones volcánicas (Conyers, 1996; Tohge et al., 1998).

El georadar está compuesto por antenas que emiten pulsos electromagnéticos cortos (1-60 ns) cercanos a la banda de VHF/UHF (30-3000 MHz). Los pulsos son transmitidos hacia el medio estudiado. La reflexión de estos pulsos se produce en la interface entre las zonas con diferentes propiedades electromagnéticas. Parte de la energía es regresada a la superficie y recibida por la antena receptora y parte es propagada a través del medio discontinuo.

La antena receptora incorpora un circuito electrónico denominado “demodulador”, conectado a un circuito receptor amplificador a donde llegan las ondas electromagnéticas causando la generación de una banda de pulsos de audiofrecuencia, mismos que son enviados a través de un cable de fibra óptica a la unidad central, donde la señal es reconstruida, procesada y guardada. Cada pulso recibido se presenta como una traza por lo que, moviendo la antena sobre la superficie del medio, se puede obtener una imagen que revele la existencia de anomalías debidas a variaciones de las propiedades electromagnéticas y la resolución dependerá principalmente de las características de los materiales y de la banda de frecuencia de la onda. Entre más alta sea la frecuencia, más grande será la resolución, sin embargo tendremos una menor penetración en profundidad (Orlando, 2007); al contrario, con las de bajas frecuencias, se tiene mayor penetración pero menor resolución.

En los ejemplos presentados en este trabajo, utilizamos antenas con centro de frecuencia de 200 MHz, 400MHz, 900 MHz, 1500 MHz y 2600 MHz para resoluciones de varios decímetros hasta centímetros respectivamente.

Los datos fueron analizados usando las paqueterías de programas de cómputo especializadas para el procesamiento de señales electromagnéticas: Post-Processing software for Subsurface Interface Radar; Radan 7.0 for Windows XP TM Profesional y el 3D QuickDraw for Radan 7.0, ambos de la Geophysical Survey Systems.

Estudios de caso.

1.- Determinar la distribución y profundidad de fracturas previa restauración del mural “La Unión de América Latina”, del Maestro Roberto Montenegro, ubicado en la Secretaría de Educación Pública, en el centro histórico de la ciudad de México.

El mural «La Unión de América Latina» (1924), del Maestro Roberto Montenegro (Guadalajara, 1887-DF, 1968) tiene 137.85 metros cuadrados y se ubica en las instalaciones de la Secretaría de Educación Pública (SEP), sobre el muro que ocupaba el altar principal del antiguo templo del Convento de Santa María de la Encarnación del Divino Verbo, construido entre 1639 y 1648 y clausurado en 1918 por instrucciones del entonces titular de la SEP, José Vasconcelos, para convertirse en la Biblioteca Iberoamericana desde 1924; sin embargo, después del terremoto de 1985, el edificio fue cerrado debido a fallas estructurales y el acervo bibliográfico transferido a otras instituciones.

Posteriormente el edificio se restauró y las obras concluyeron en 1991, año en el que se acondicionó como Salón Hispanoamericano y desde entonces, funciona como salón de recepciones de la Secretaría de Educación Pública.

El mural presentaba fisuras superficiales en el lado sur (ver Fig. nº1) y se requería para su restauración del conocimiento de éstas, su profundidad y distribución, así como del arreglo y distribución de los componentes del muro que sirve de soporte a la obra pictórica considerada como un bien cultural. Por ello, su estudio se programó siguiendo las normas establecidas en el 14ava Asamblea del ICOMOS de 2003, utilizando el método no invasivo ni destructivo electromagnético de georadar, con las frecuencias de 2600 MHz y 400 MHz.

Debido a la necesidad urgente de resultados para programar las actividades de restauración, los trabajos de prospección geofísica se limitaron a una parte de la superficie en donde someramente se observaban las fisuras, para lo cual dividimos dicha porción en diferentes tamaños y las denominamos como Superficie I, II, III y IV. (ver Fig. nº 2). Los resultados más sobresalientes de acuerdo a los objetivos planteados son:

a).- En la Superficie I, de 6.0m de ancho por 4.8m de largo y con la frecuencia de 2600 MHz, se observan reflexiones múltiples e hipérbolas (ver Fig. nº3). Las primeras corresponden a la fractura principal que muestra una profundidad máxima de 15 cm y las

segundas son difracciones provocadas por un objeto dentro del muro. Estas últimas con la frecuencia de 400 MHz y modeladas en 3-D, definen una zona reflectora originada por una estructura cilíndrica a aproximadamente 25 cm de profundidad (ver Fig. nº 4).

b).- Sobre la Superficie II de 2.0 m de ancho por 2.30 m (ver Fig. nº 2), se elaboró un modelo en 3-D a partir de los resultados de los sondeos con la antena de 2600 MHz. En este modelo, se confirma que la fractura principal no tiene más de 15 cm de profundidad (ver Figs. 5A, B, C y D), identificada por medio de los cambios de las propiedades electromagnéticas entre los materiales constructivos y el aire.



Figura nº1 - Mural «La Unión de América Latina ». Los puntos rojos y blancos señalan la fractura visible en superficie.

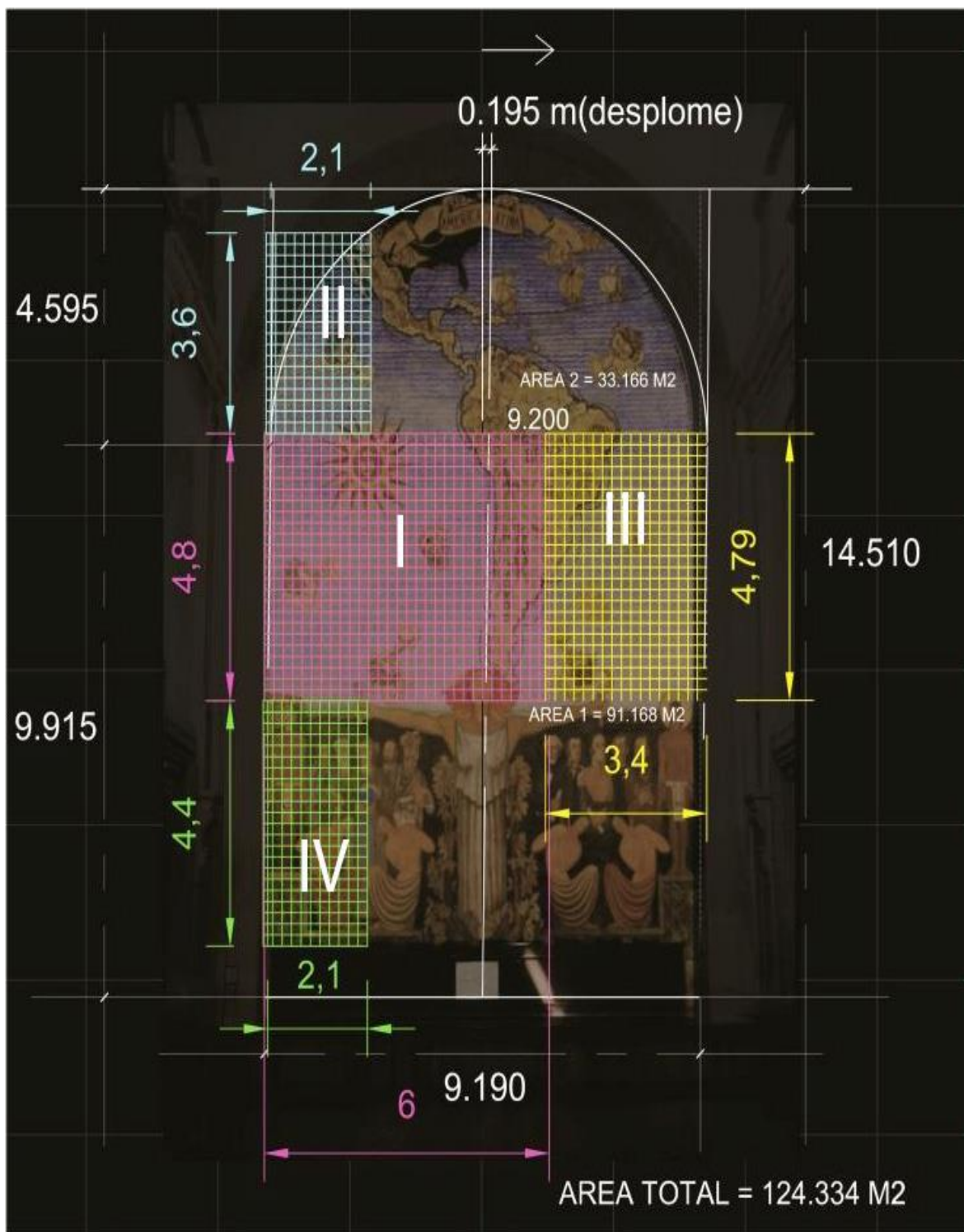


Figura nº 2 - Superficies sondeadas denominadas I, II III y IV (gráfica elaborada por el Rest. Israel García Corona del CENCROPAM-INBA).

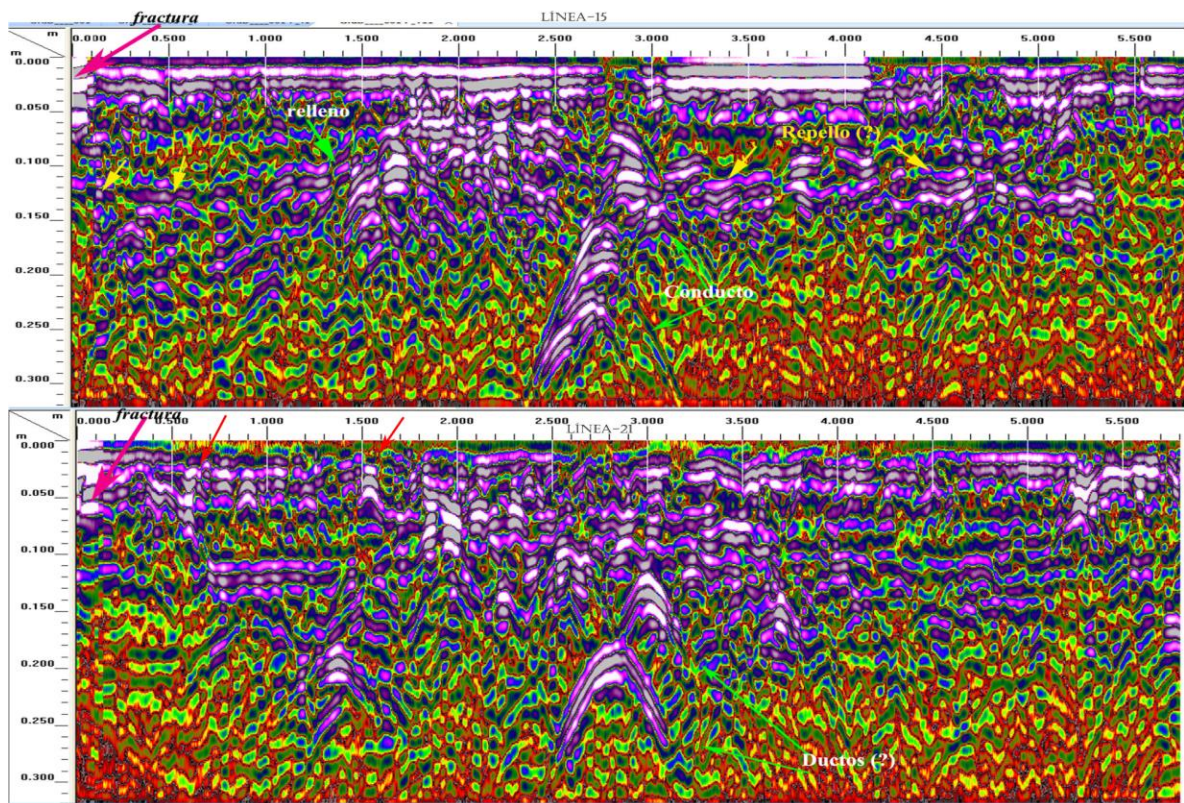


Figura n° 3 - Superficie I, Líneas n° 15 y 21 a 1.40 m y 2.0 m del origen. Las reflexiones en forma de hipérbolas corresponden a materiales incluidos en el muro entre 10 y 15 cm de profundidad. Las fracturas más sobresalientes se encuentran representadas por las reflexiones múltiples en la parte superior izquierda señaladas por las flechas en color rojo.

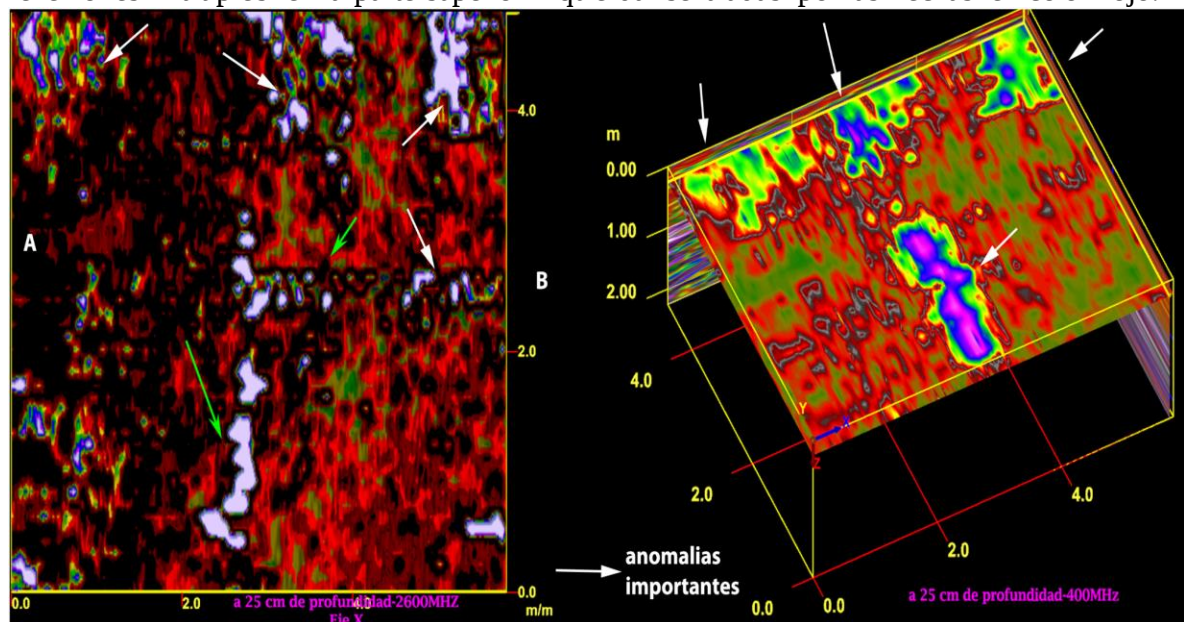


Figura n° 4 - Superficie-I, modelos en 3-D a 25 cm de profundidad, en (A) con la frecuencia de 2600 MHz y en (B) con la antena de 400MHz. Obsérvese la simetría de los rasgos señalados por las flechas.

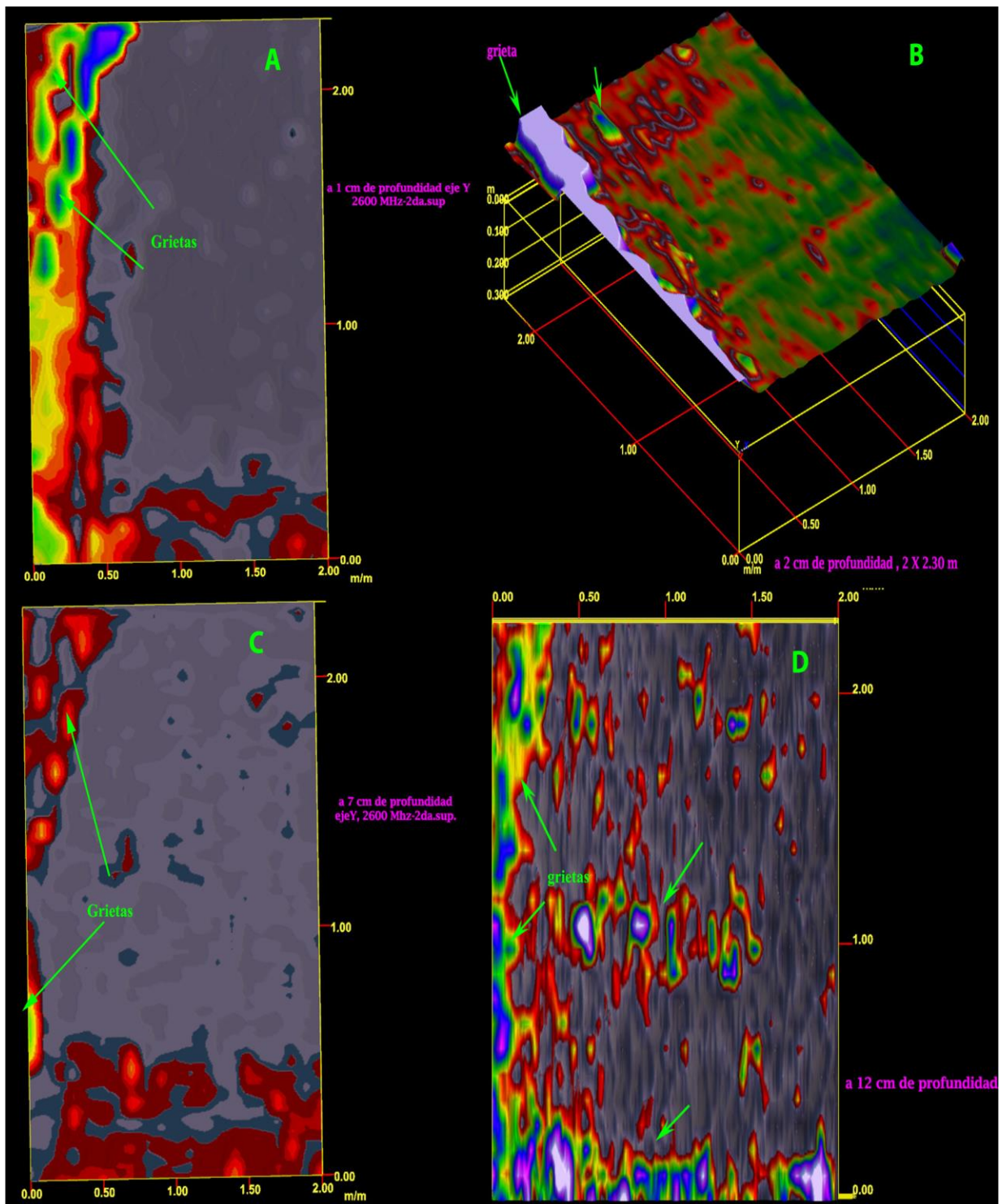


Figura n°5 - Superficie II mostrando grietas o fisuras representadas en las figuras por los colores claros y brillantes como el blanco, amarillo, rojo y azul, en (A) a 1 cm de profundidad, en (B) a 2 cm, en (C) a 7 cm y en (D) a 12 cm. La disminución de la intensidad de las reflexiones varía con la profundidad.

c) En la Superficie III de 3.20 m de ancho por 4.8 m de largo (ver Fig. nº 2), a 19 cm de profundidad y con la frecuencia de 2600MHz resaltan algunas estructuras internas del muro (ver Fig. nº 6), incluso sobresalen dos zonas que por su distribución y simetría, pueden corresponder a antiguos nichos tapiados.

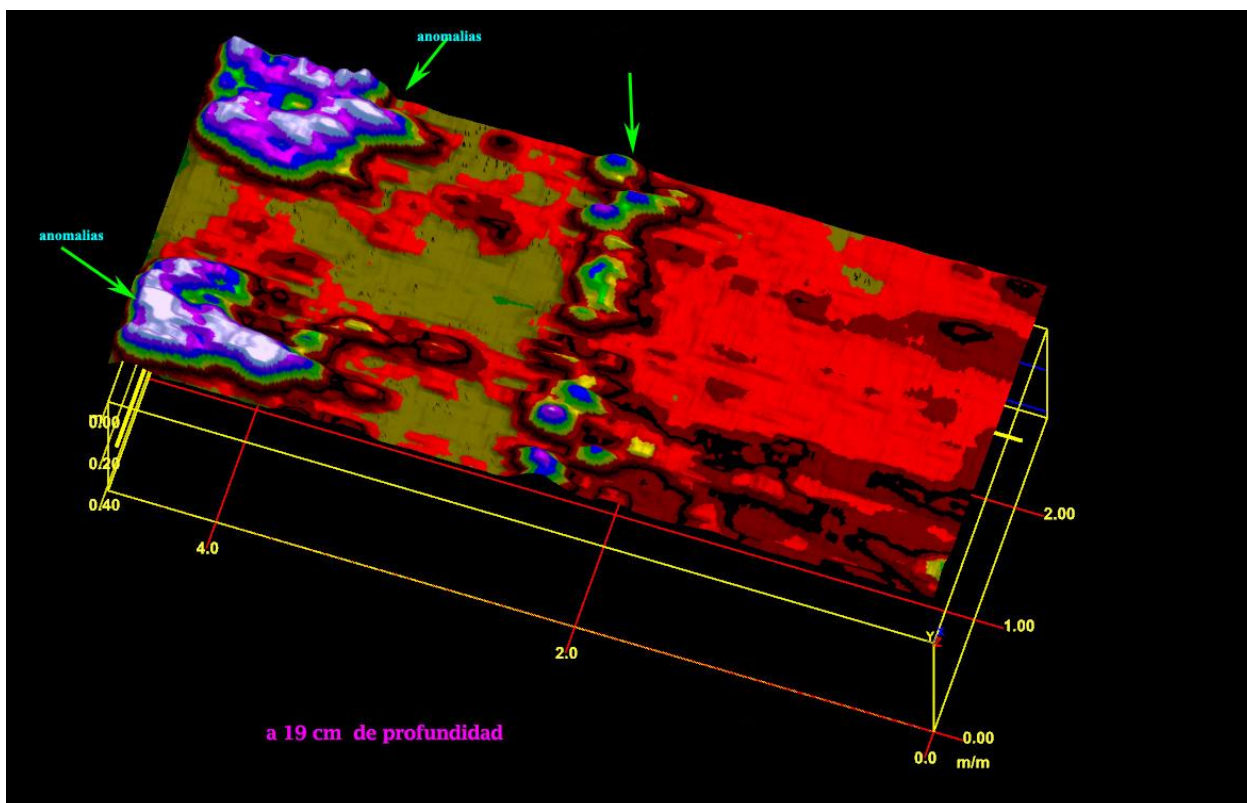


Figura nº 6 - Superficie número III en 3-D a 19 cm de profundidad. Obsérvese la simetría de los reflectores en la parte superior y la línea refractiva que corta la superficie.

d).- Finalmente la Superficie IV (ver Fig. nº 2) de 4.80 m por 3.10 m, presenta varios arreglos de anomalías entre 20 y 30 cm (ver Fig. nº7 A y B), que pueden corresponder a un nicho tapiado y una estructura constructiva de la pared del antiguo templo.

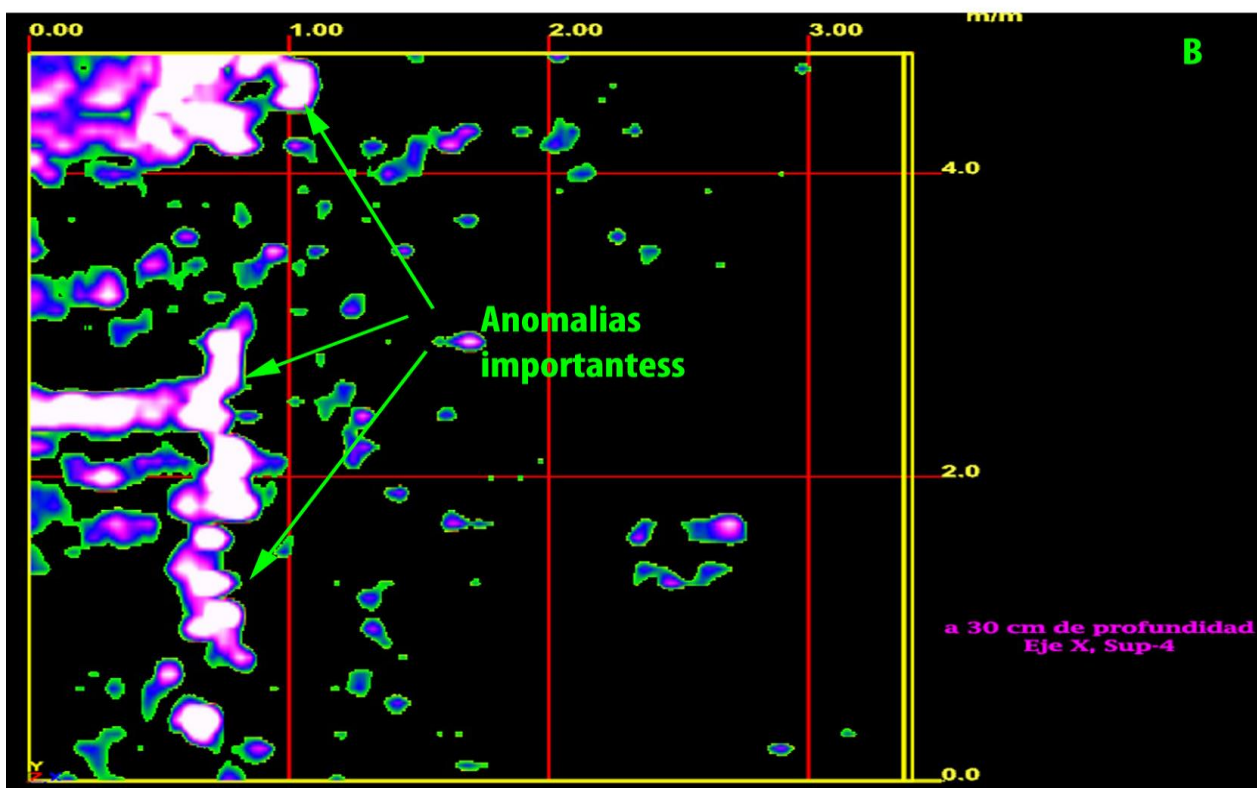
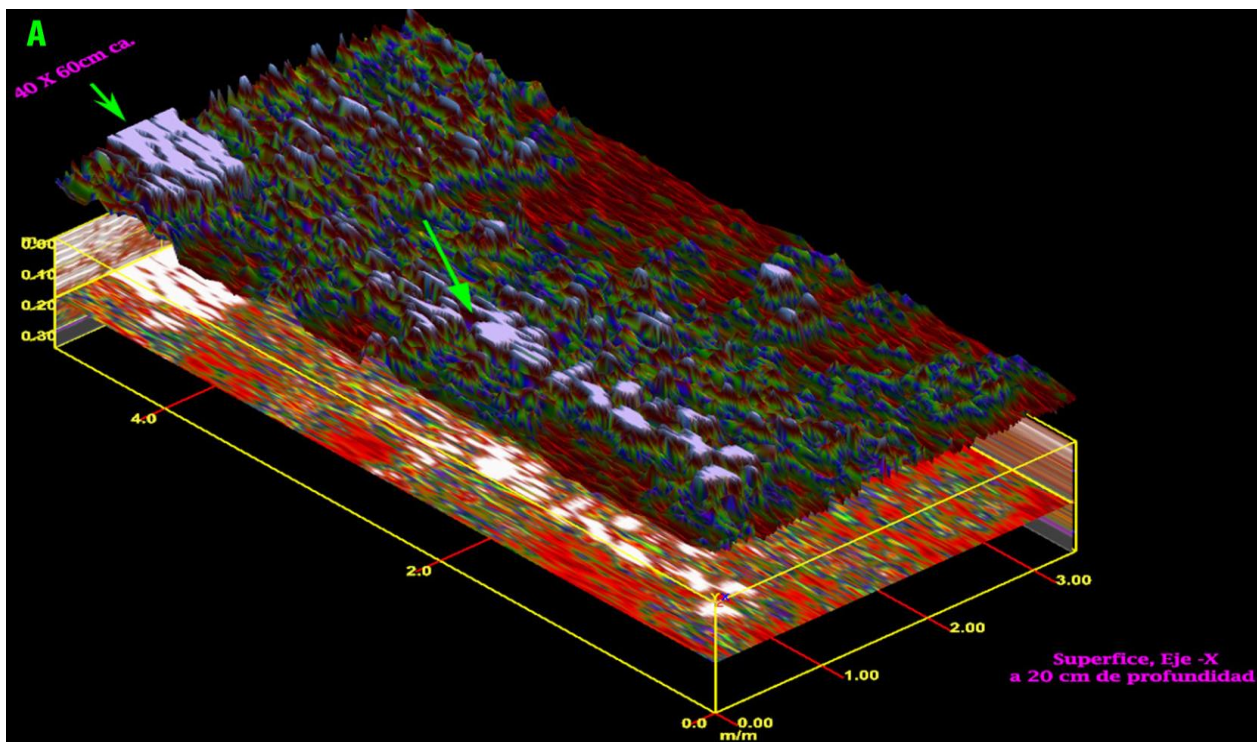


Figura nº7 - En (A), modelo en 3-D a 20 cm de profundidad y en (B), corte en planta a 30 cm. Las flechas en color verde señalan las anomalías más importantes. Obsérvese la simetría en los rasgos, probablemente se trata de elementos constructivos arquitectónicos más antiguos que el mural.

Conclusiones.

1.- Con base en los resultados de la superficie nº II y de acuerdo a los objetivos propuestos, podemos asegurar que la grieta no es profunda y que no hay necesidad de una intervención drástica para corregirla, no tiene más de 15 centímetros de profundidad y no está involucrado el muro principal (véase Fig. nº 5).

2.- El muro de soporte del mural no está constituido por un solo elemento ni tampoco por un solo tipo de material, prueba de esto son los radargramas obtenidos con la frecuencia de 2600MHz de la superficie I, y que corresponden a las líneas 15 y 21 (ver Fig. nº 3) registradas sobre el eje de las X's de abajo hacia arriba y de sur a norte. Esta información es muy importante porque justificaría la distribución de la humedad y/o de las fracturas que puedan formarse en los lugares en donde se encuentran estas anomalías. Es también importante señalar que desde el punto de vista estructural, la actividad sísmica en su momento podría causar mayores daños en las zonas antes tapiadas.

3.- Las hipérbolas observadas en la figura nº 3 pueden haberse originado por conductos antiguos fabricados con materiales no metálicos, probablemente cerámicos.

4.- La distribución de las anomalías y la geometría que presentan sugieren que se trata de antiguos nichos tapiados durante la preparación del muro que sirve de lienzo a la pintura mural.

II.- Determinar los arreglos texturales y estructurales del interior del muro testero de la Iglesia del Siglo XVI de Santa María, Huiramangaro, Mich., previa intervención estructural de restauración, utilizando georadar con altas frecuencias (1500 MHz).

El muro está construido de acuerdo al trabajo de Tesis Doctoral de la Dra. Laura Lelo de Larrea López, por “piedra irregular rejuntada con lodo conteniendo un núcleo central también de lodo compactado con piedras más pequeñas con un espesor entre los 1.35 a 1.50 metros de ancho”, igualmente menciona que “su recubrimiento o revoque se compuso de una mezcla de lodo y cal, y en su origen seguramente la capa externa consistió en una lechada de cal como pintura final”. Igualmente el muro testero de acuerdo a comentarios del Dr. Roberto Sánchez del Centro INAH, Mich., está constituido por adobes de 30 cm por lado con un probable relleno intermedio de piedra y lodo.

Actualmente el muro presenta desplome y agrietamiento, por lo que su restauración es inminente dada la importancia histórica del mismo, por ello el conocimiento textural y estructural de su interior es necesario para programar los trabajos que se requieran para darle estabilidad nuevamente. Para ello, los trabajos de prospección geofísica tuvieron como objetivos principales:

1) explorar el subsuelo de los alrededores de la iglesia con georadar utilizando antenas de baja frecuencia y tomografía de resistividad eléctrica, para identificar probables fallas geológicas que pudieran estar relacionadas con los daños estructurales que presenta y,

2) sondear el muro utilizando la antena de alta frecuencia de 1500 MHz, como una primera aproximación para conocer hasta 60 cm de profundidad el arreglo de las grietas, las texturas y las estructuras de los materiales de construcción para entender el porque del desplome que presenta. Para esto, el muro se subdividió en 4 superficies a las que hemos denominado Superficie 01 de 2.20 m de ancho X 5.60 m de largo; Superficie 02, de 2.10 m X 5.50 m; Superficie 03 de 1.70 m X 5.20 m; y Superficie 04, de 1.80 m X 5.20 m de largo (ver Fig. nº 8).

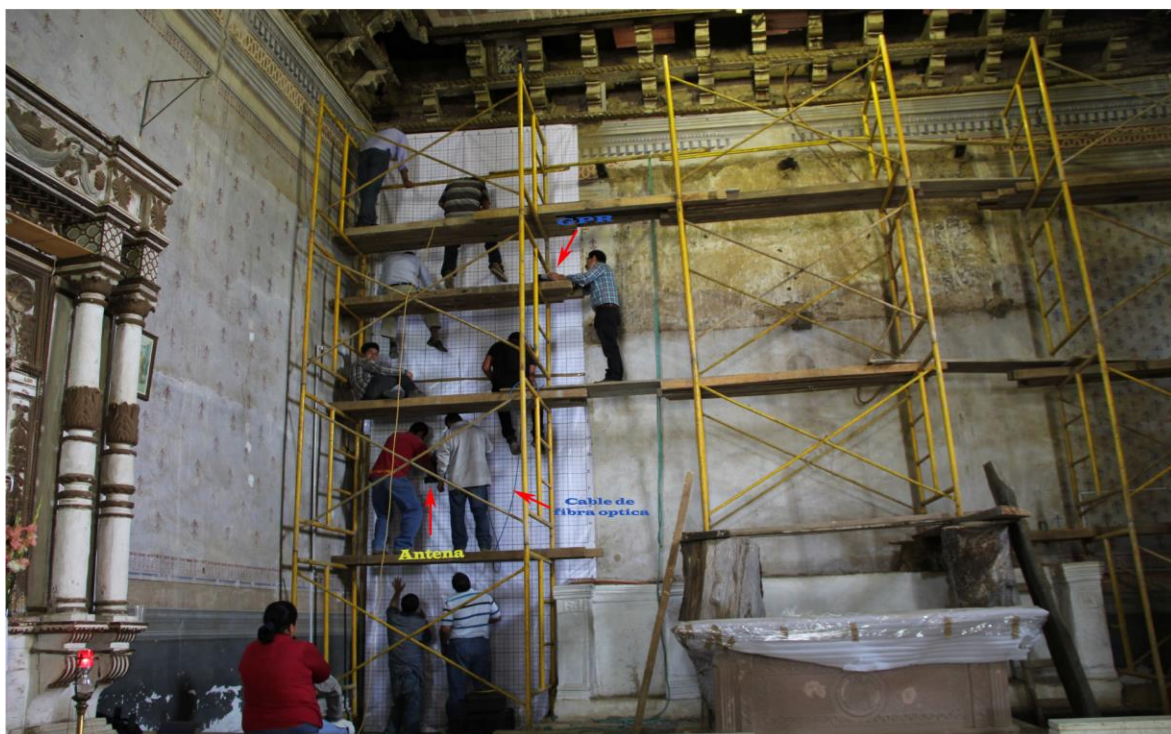


Figura nº 8 - Aspecto general del muro testero y ejemplo de sondeos sobre una de las superficies sondeadas con una cuadrícula de control.

Dada la extensión del trabajo y por motivos de espacio, nos limitaremos únicamente a describir el inciso 2 con los resultados más sobresalientes de la prospección con georadar sobre el muro testero a 5 cm, 15 cm, 30 cm y 50 cm de profundidad.

A 5 cm (ver Fig. nº 9), en la Superficie 01 se observan dos zonas reflectoras: la primera atraviesa la superficie de arriba hacia abajo y corresponde a la grieta observable superficialmente y la segunda, cerca de la cota N+3.07 en la base. En la Superficie 02, se observan una zona horizontal muy reflectora en la base y una línea vertical arriba, que corresponde a la fractura visible superficialmente, mientras que en las Superficies 03 y 04, las anomalías se sitúan de manera transversal en la parte superior.

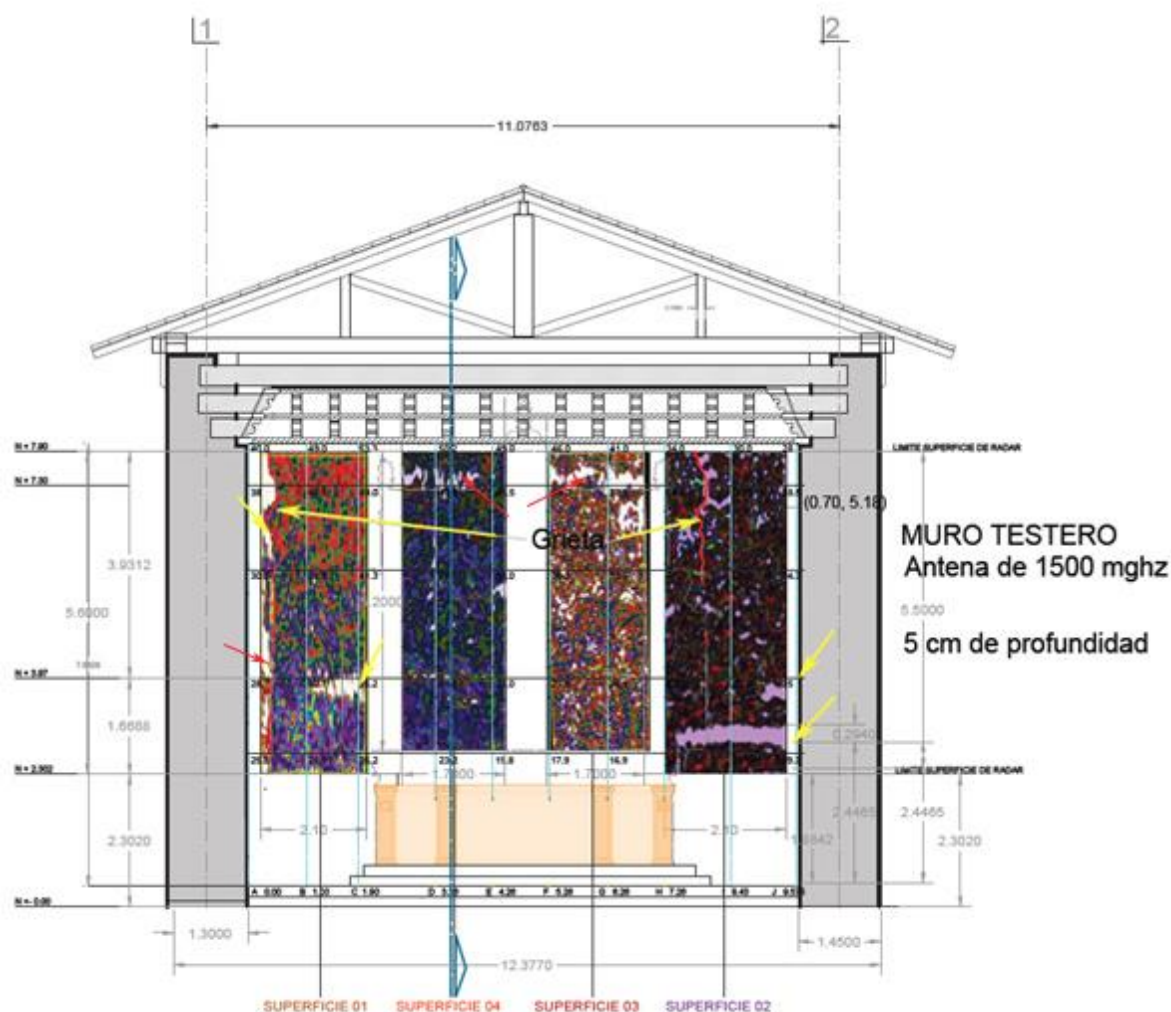


Figura nº 9 - Muro testero con imágenes procesadas en 3-D (planta) de cada una de las superficies señaladas al pie de la figura a 5 cm de profundidad. Las flechas en color

amarillo y rojo señalan las anomalías principales y en las superficies 01 y 02, las fracturas observables en superficie.

A 15 cm de profundidad, los rasgos principales son la aparición de una zona con múltiples reflexiones a N+3.97 (ver Fig. nº 10) y una zona horizontal bien definida a N+7.30 en la Superficie 04 y las grietas o fracturas en las superficies 01 y 02 siguen siendo visibles en las imágenes en 3-D.

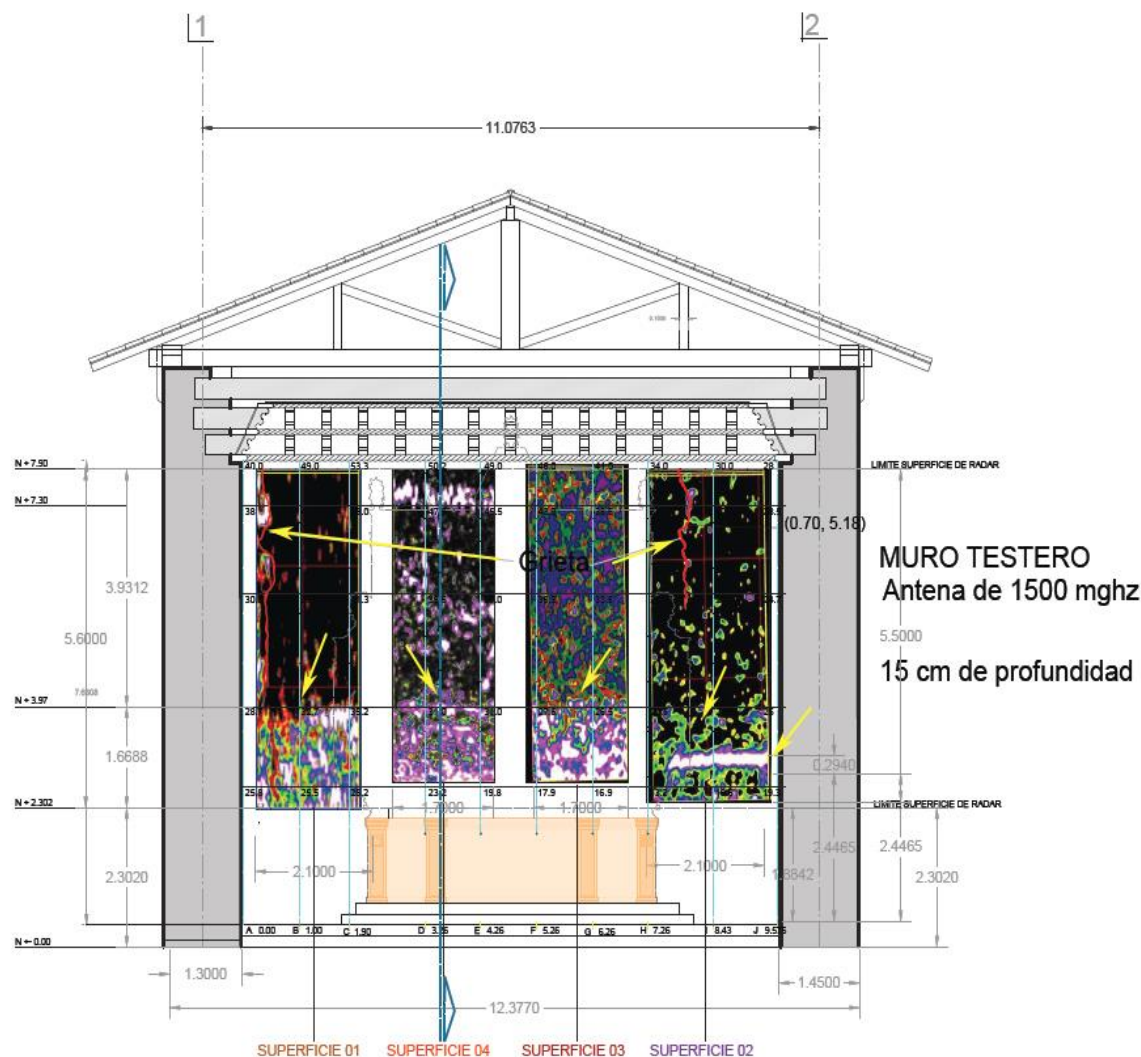


Figura nº10 - A 15 cm de profundidad se observan las grietas o fracturas y se hacen visibles una zona de N+2.302 a N+3.97 con múltiples difracciones señaladas por las flechas, así como la zona horizontal en la Superficie-02 en color blanco encima de la cota N +2.302.

A 30 cm de profundidad la anomalía horizontal detectada desde los primeros 5 cm en la superficie 02 entre las cotas N+2.302 y N+3.97 desaparece (ver Fig. nº11), mientras que la fractura permanece.

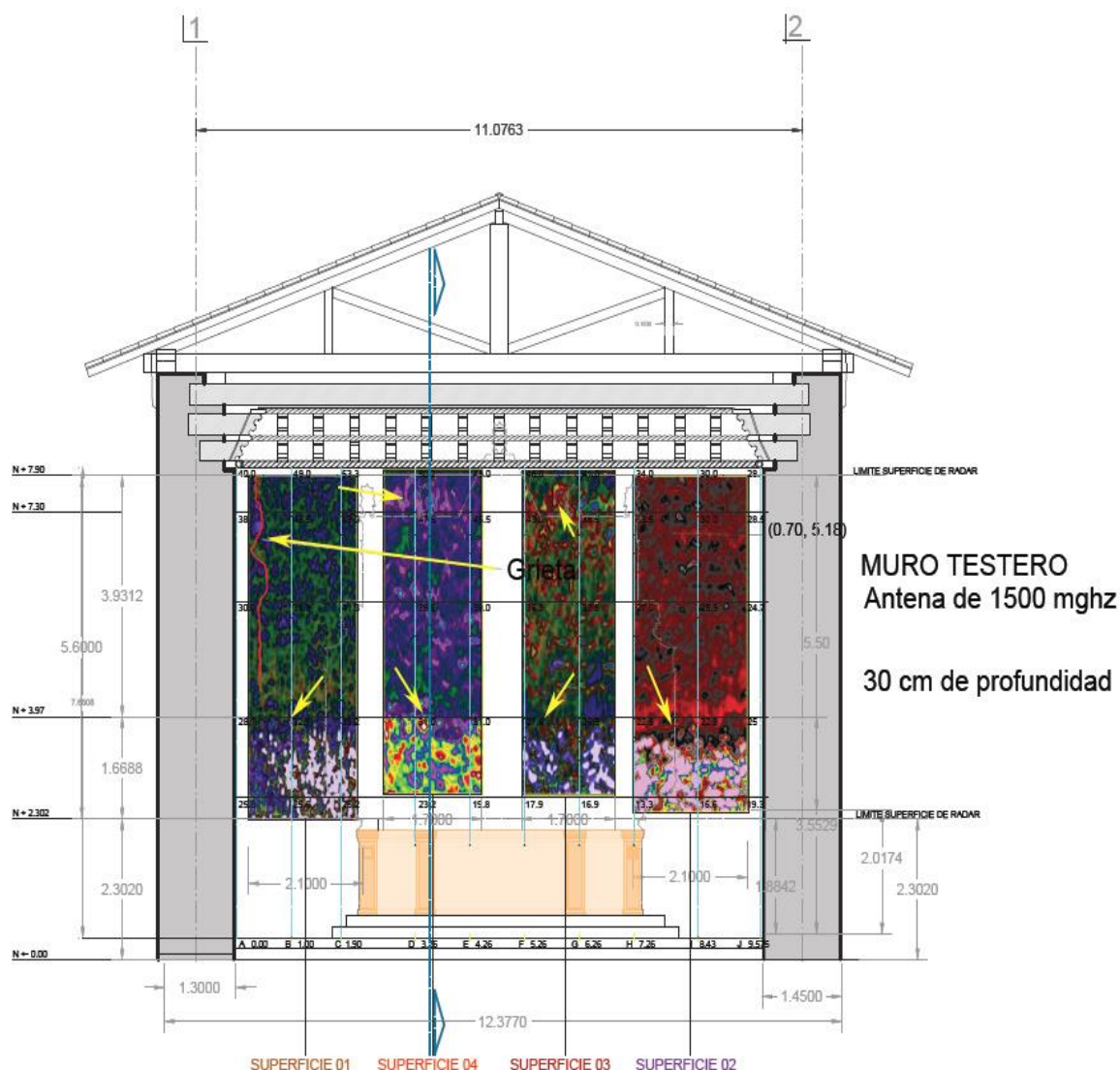


Figura nº 11 - A 30 cm de profundidad, las flechas señalan las anomalías principales.

A 50 cm, los materiales son semejantes a los descritos para 30 cm de profundidad, aunque las superficies 03 y 04 muestran en sus partes medias, reflexiones con arreglos geométricos semejantes a adobes (ver Fig. nº 12).

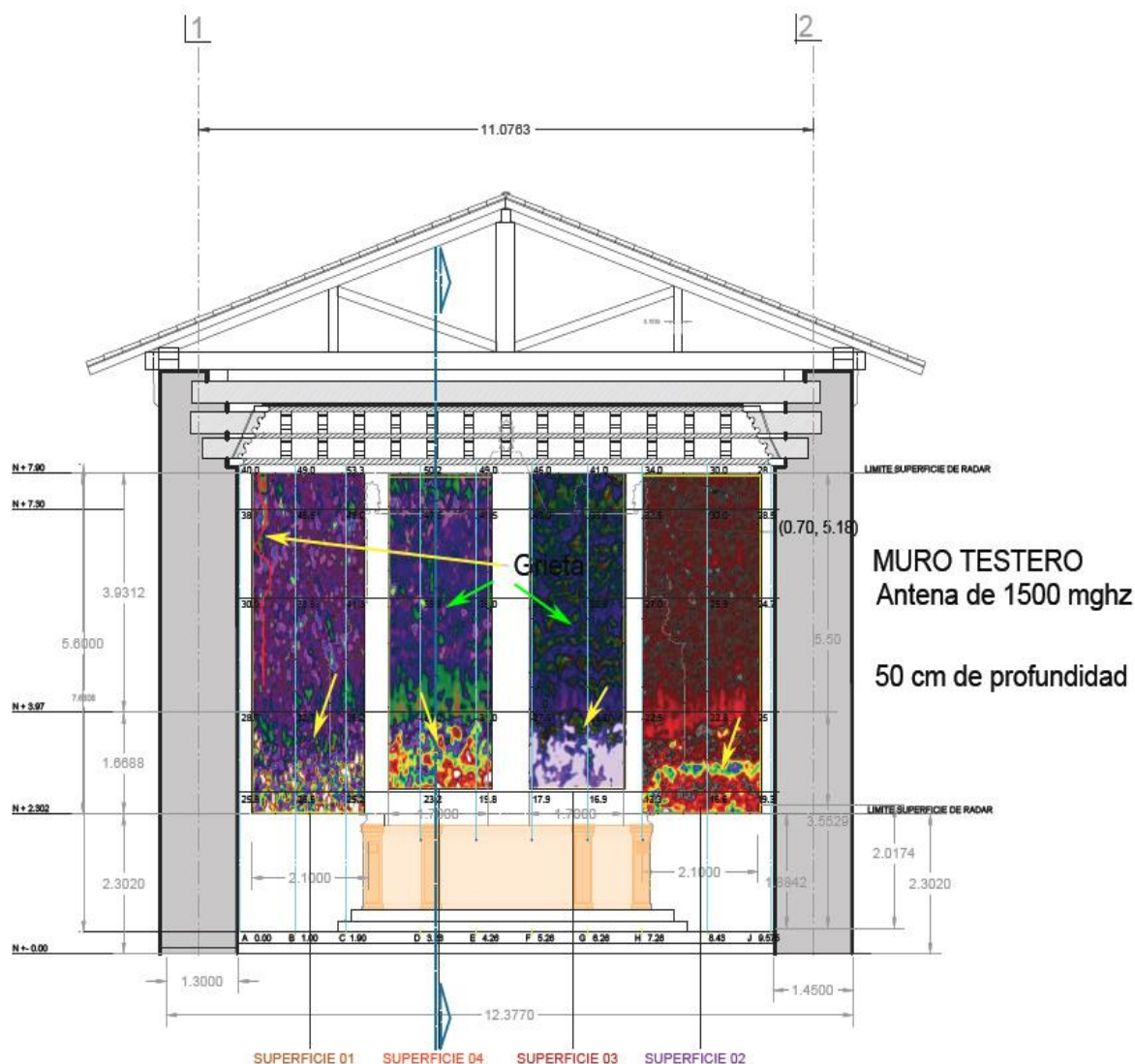


Figura nº 12 - Imágenes en planta del modelo en 3-D para 50 cm de profundidad. Obsérvese estructuras horizontales entre N+3.07 y N +7.30 en las superficies 03 y 04.

Conclusiones.-

- 1.- La grieta o fractura visible superficialmente en la denominada Superficie 02 desaparece entre 15 y 20 cm, lo cual indica que se trata de un rasgo del acabado o aplanado y no tiene incidencia en la estructura del muro.
- 2.- La parte inferior de la pared debajo de la cota N + 3.97 de las superficies sondeadas y probablemente hasta el piso del muro presenta una zona con múltiples difracciones hasta una profundidad de 60 cm, sin embargo su altura disminuye en relación inversa (ver Fig.

nº 13) lo cual sugiere que la base de “piedra y lodo” podría tener una forma aproximada de un trapecio, es decir una base más ancha que la cima a partir de la cual se inicia la pared con el adobe como material constructivo.

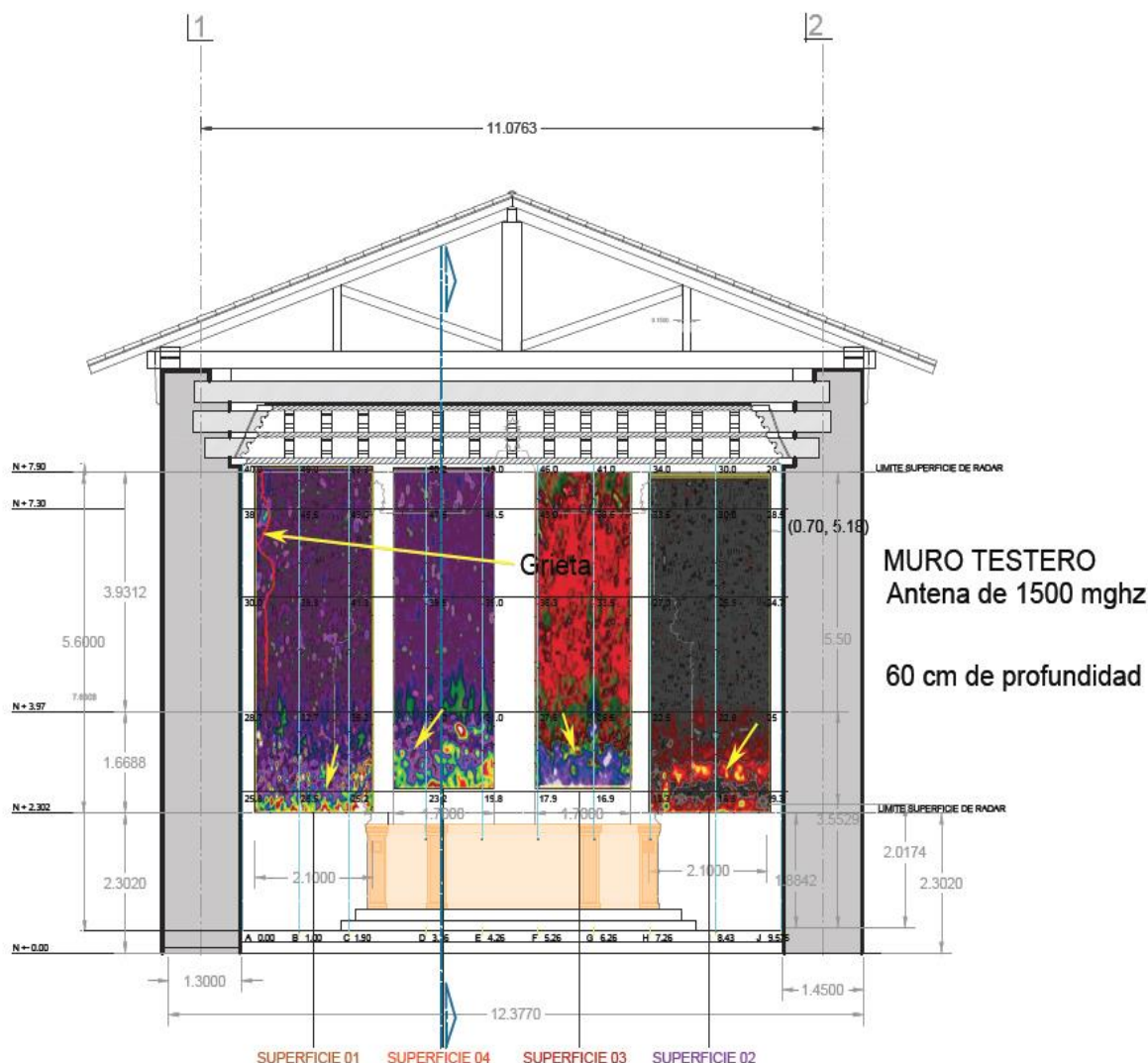


Figura nº 13 - A 60 cm de profundidad, aparentemente el relleno cambia de composición y la zona de difracciones de la base se reduce drásticamente. Las flechas en color amarillo muestran las zonas con anomalías las más importantes.

3.- El muro testero está construido en su base, hasta la mitad aproximadamente, por materiales de tipo “piedra y lodo” y por adobe en la parte superior.

4.- De acuerdo con lo anterior, el tipo de materiales y su arreglo estructural determinan el desplome del muro; por ejemplo, si observamos el corte longitudinal (ver Fig. nº 14) el

desplome se efectúa precisamente en donde de acuerdo a nuestros resultados existe un cambio textural del muro a $N + 3.97$, lo mismo sucede a $N + 7.30$ donde se manifiesta al menos en los primeros 20 cm una zona anómala horizontal.

5.- Finalmente nuestras inferencias a partir de la interpretación de los datos electromagnéticos coinciden con los resultados de las diferentes calas que se realizaron, lo cual corrobora lo aquí expuesto (ver Fig. nº 15).

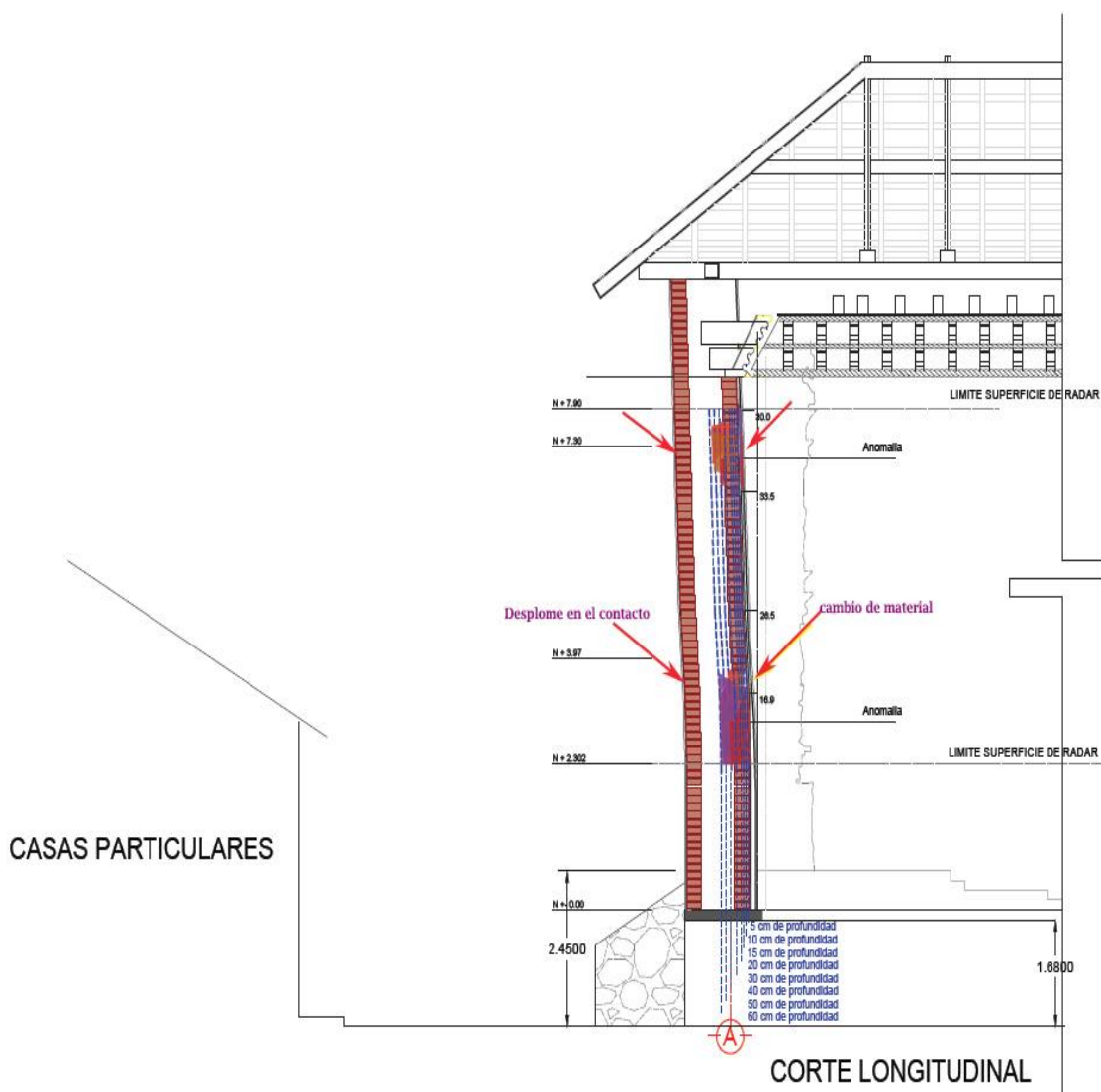


Figura nº 14 - Corte longitudinal del muro testero. Obsérvese que el desplome se inicia exactamente en la cota $N + 3.97$ y se nota un cambio más en $N + 7.30$ señalados por las flechas color rojo; estos corresponden al lugar donde se identificaron varias anomalías señaladas en las figuras nº 9 y 10 a 5 cm y 15 cm de profundidad respectivamente.

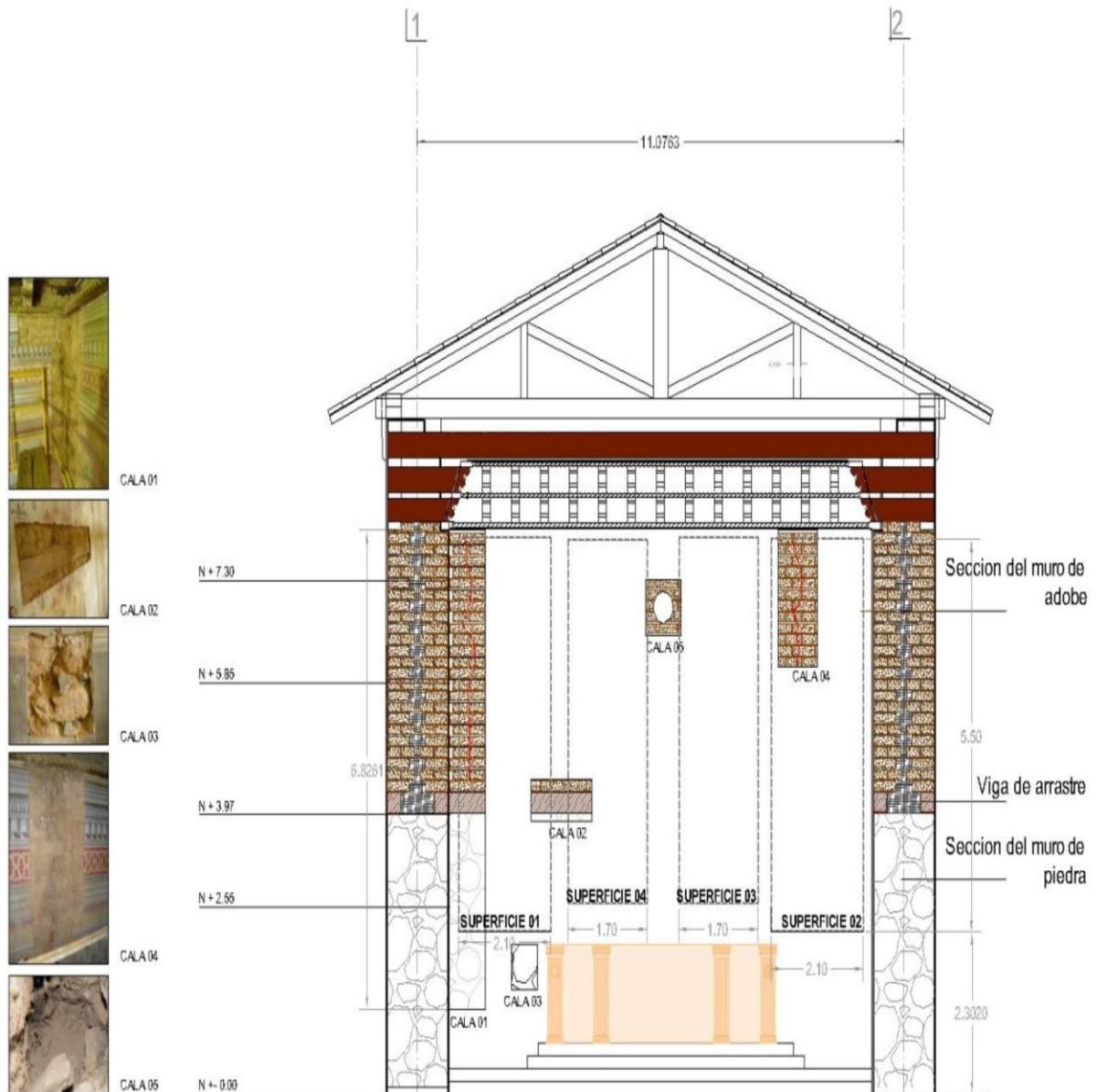


Figura n° 15 - Diferentes calas y su posición espacial con relación a los resultados obtenidos. Obsérvese por ejemplo la cala n° 3: corresponde a la zona con abundantes difracciones provocadas por los tamaños y forma de los componentes sedimentarios. También en la cala 02, la denominada “viga de arrastre” se evidencia entre los 5 y 15 cm de profundidad (ver Figs. N° 9 y 10).

III.- Prospección geofísica para identificar rasgos texturales y/o estructurales en el subsuelo para entender el desplome que presenta el Edificio XVI del Sitio Arqueológico de Tulum, Quintana Roo.

De manera general, los sitios arqueológicos localizados en zonas húmedas y/o sísmicas, se encuentran dañados en sus estructuras ya sea por el intemperismo natural y/o por los movimientos telúricos, por lo que deben ser estudiados de manera pluridisciplinaria incluyendo además de los de ingeniería estructural, los métodos geológicos y geofísicos para proponer medidas de conservación adecuadas.

En el intemperismo natural, el agua de lluvia juega un papel importante en la alteración de estructuras constituidas particularmente por rocas carbonatadas y cementadas con cal y mortero. En estos procesos, el agua participa activamente en la disolución de las juntas constructivas a través de la reacción del dióxido de carbono de la atmósfera (CO_2) con el agua de lluvia (H_2O), produciendo una solución ácida (H_2CO_3 : ácido carbónico) que al entrar en contacto con carbonatos de calcio (CaCO_3), producen bicarbonatos solubles ($\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$); el mismo fenómeno ocurre, pero en una escala de tiempo mayor, con las estructuras geológicas del subsuelo, siendo más evidente en zonas sísmicas y/o en zonas de fallas geológicas, como es el caso del sitio arqueológico de Tulum.

Estos dos fenómenos combinados pueden provocar el deterioro de las estructuras como sucede en el Edificio XVI, en donde se observan fracturas y hundimientos diferenciales e incluso infiltraciones, por lo que es importante identificar por medio de métodos geofísicos no invasivos ni destructivos: oquedades, fallas, fracturas o cualquier elemento que pueda ser él o los causantes del desplome y/o de la degradación del mismo y con base en estos resultados, realizar la intervención del subsuelo con técnicas arqueológicas para conocer las estructuras y/o materiales o fenómenos naturales causantes de la inestabilidad del edificio.

Los sondeos electromagnéticos se realizaron con un georadar con antenas de bajas frecuencias 100, 200 y 400 MHz en los alrededores del edificio, al interior del mismo - a través de los pasillos - y al centro, para determinar las causas del deterioro estructural por medio de la identificación de anomalías en el subsuelo relacionadas con las fracturas y/u oquedades responsables del desplome que presenta (ver Fig. nº 16).



B

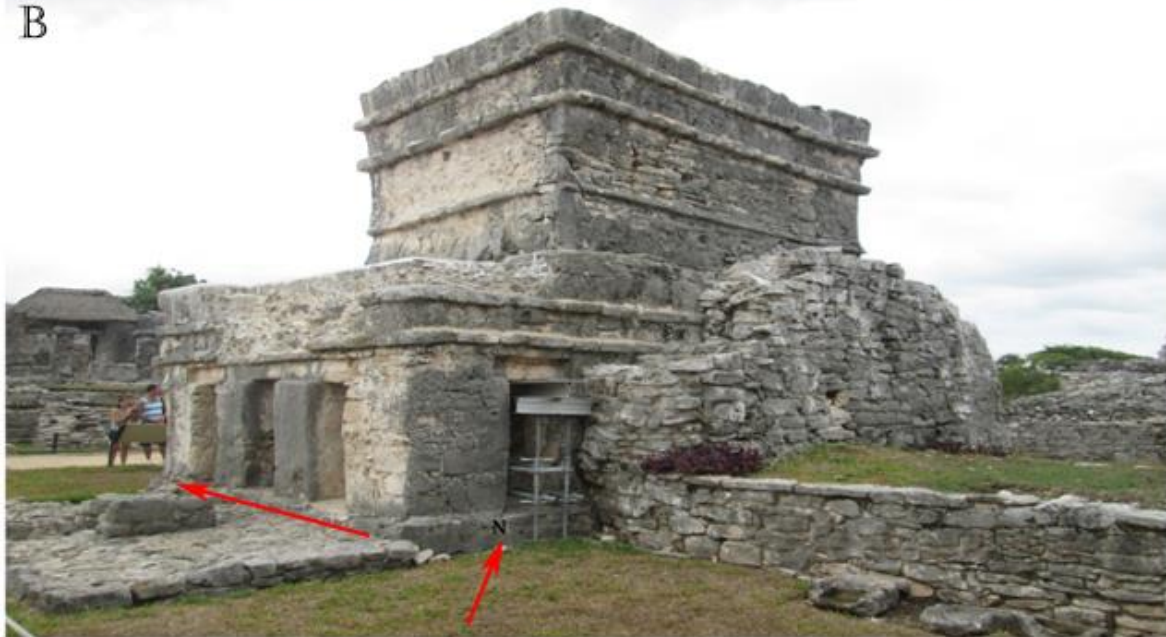


Figura nº 16 - Dos vistas del Edificio XVI del sitio arqueológico de Tulum. En (A), vista de norte a sur y en (B), de sur a norte.

Los resultados más sobresalientes son:

a).- En el lado norte-este del edificio (ver Fig. nº 17), se identificaron dos zonas anómalas que corresponden tal vez a vestigios de estructuras arquitectónicas o bien, a zonas de relleno provocado por fallas en el subsuelo (ver Fig. nº 18).



Figura nº 17 - Lado norte (NE) del Edificio XVI. Sondeos con la antena de 200 MHz.

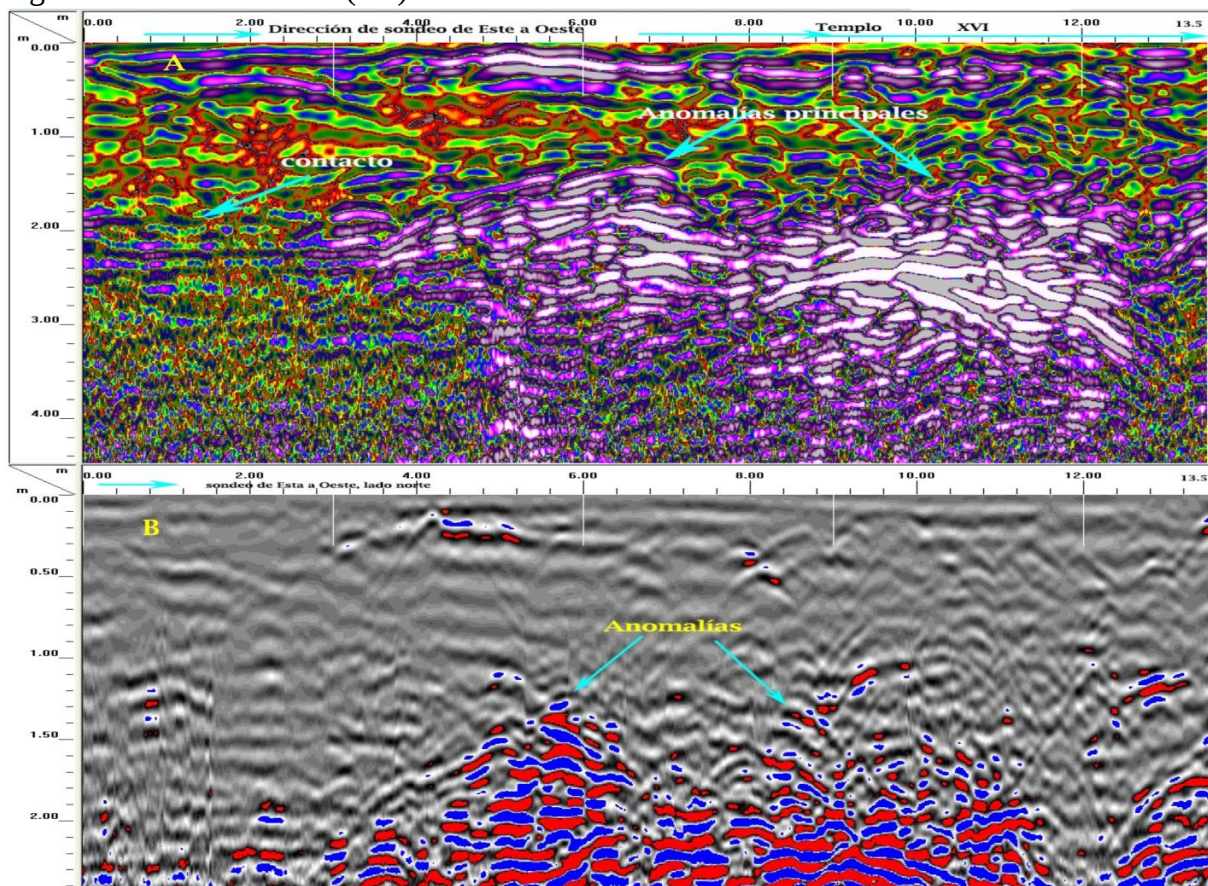


Figura nº 18 -Radargramas de la línea más próxima al muro norte del Edificio XVI. En (A) con la frecuencia 200MHz y en (B) con 400 MHz.

b.- En el lado oeste, frente al Edificio XVI (ver Fig. nº 19) se identificó una zona anómala que empieza a un metro más o menos de profundidad y se localiza en la parte media de la estructura (ver Fig. nº 20).



Figura nº19 - Frente al Templo o Edificio XVI, sondeo de sur a norte con la antena de 400MHz.

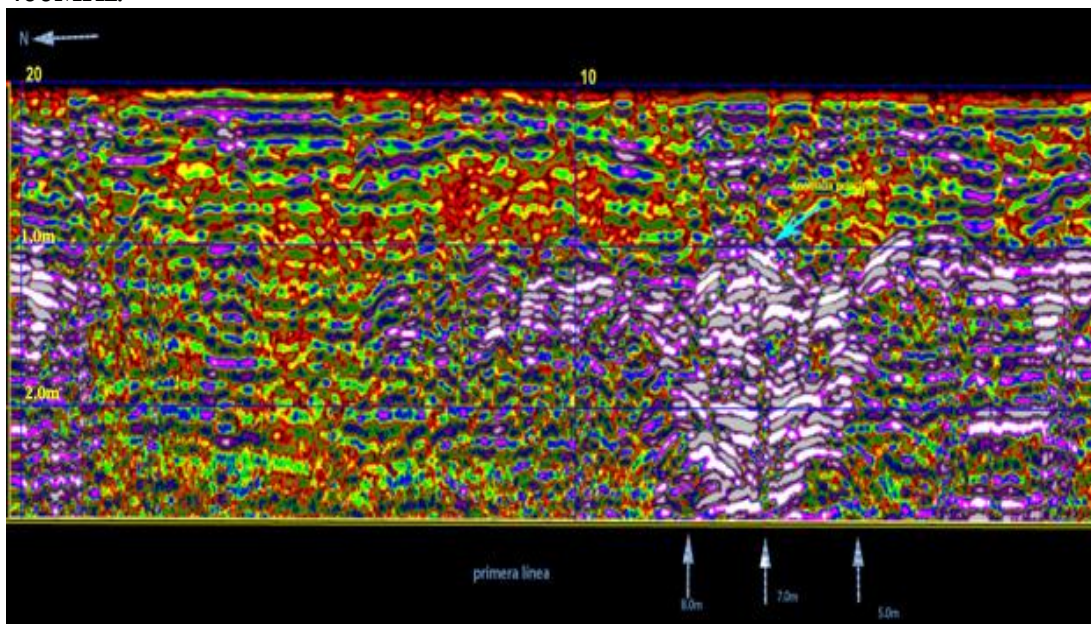


Figura nº 20 - Radargrama de frecuencia 400Mhz del frente del Edificio XVI.- La anomalía principal está centrada en medio del Templo y señalada en la figura por la flecha en color azul a 1.0 m de profundidad.

c.- En el pasillo interior oeste (ver Fig. nº 21), se delimitó una superficie de 30cm de ancho por 7.3 m de largo y con la frecuencia de 400MHz se detectó una zona anómala en el lado sur (ver Fig. nº 22), debida probablemente a un relleno u oquedad.

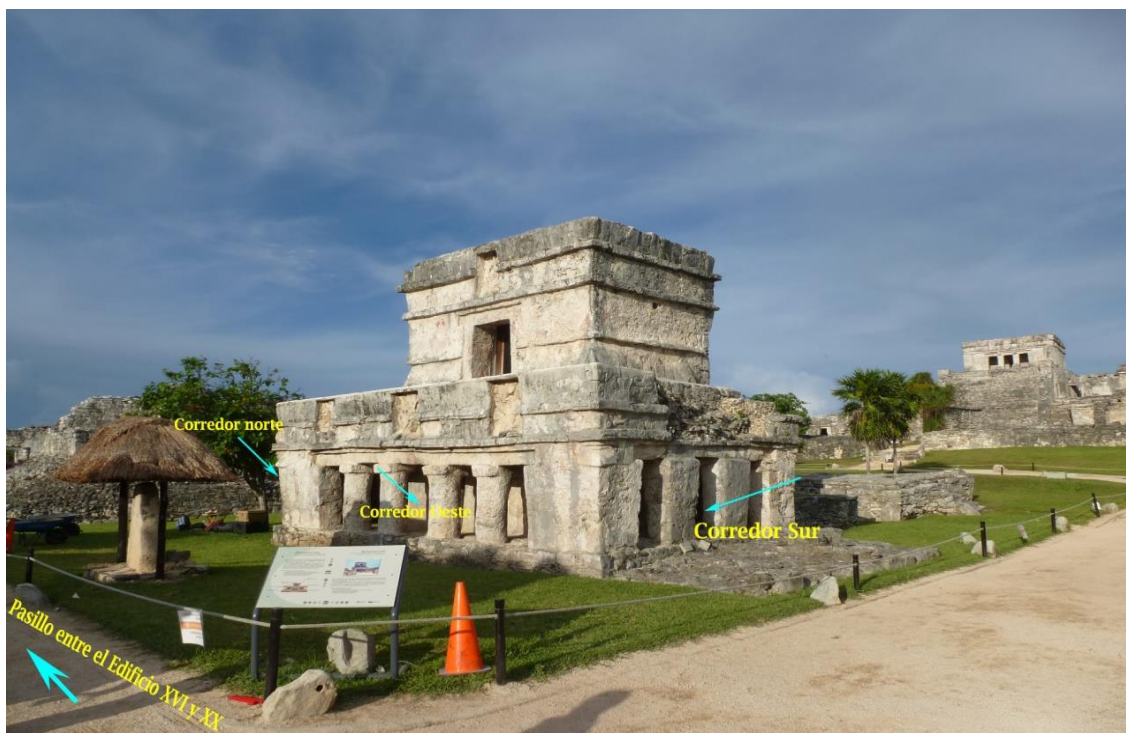


Figura nº 21 - Palacio XVI mostrando las superficies sondeadas al interior (pasillos.)

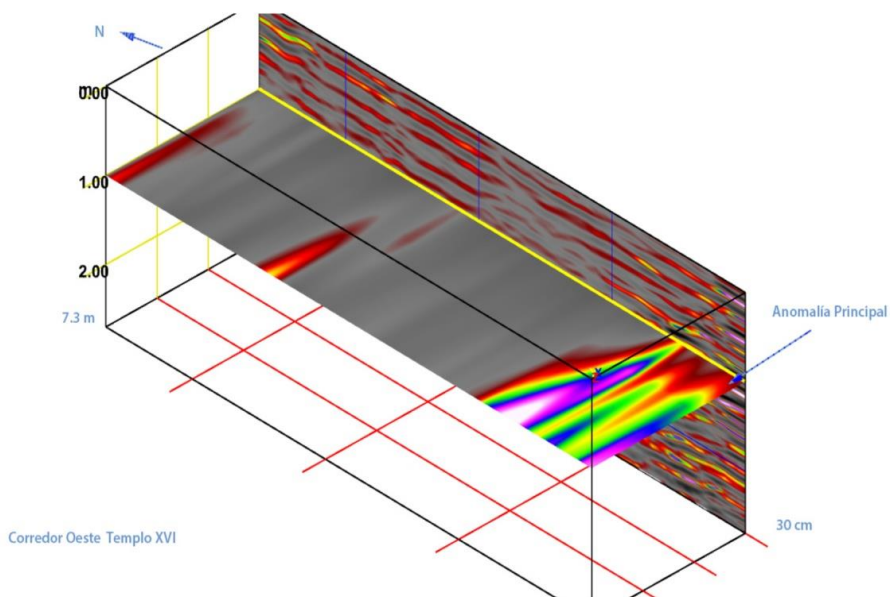


Figura nº 22 - Corredor oeste al frente del Edificio XVI, la zona más reflectora se encuentra en la parte sur indicada por la flecha.

d.- En el corredor o pasillo norte, sobre una superficie de 1.0 m de ancho por 3.50 m de largo y a una profundidad aproximada de 1.20 m, se determinaron cuatro anomalías en cada una de las esquinas (ver Fig. nº 23), que parecen corresponder a oquedades.

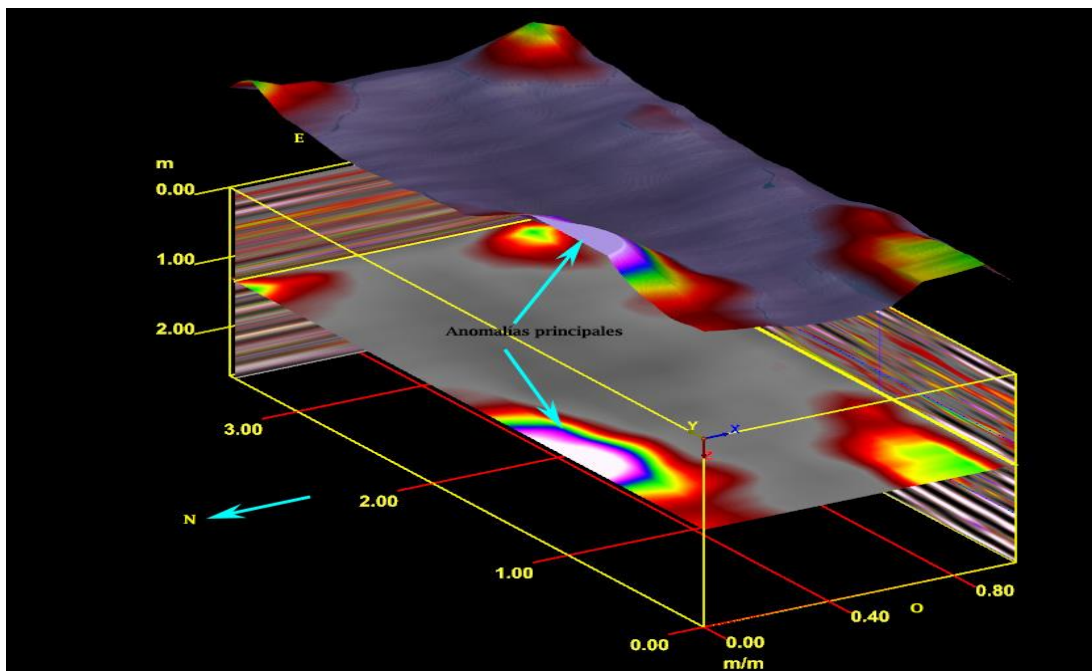


Figura nº 23 - Corredor norte del Templo XVI.- Obsérvese que en las 4 esquinas existen anomalías a ca. 1.20 m de profundidad.

e.- En el pasillo sur, la superficie sondeada fue de 1.0 m por 4.0 m de largo con la antena de 400MHz. Con base en los datos procesados y modelados, se determinó una zona anómala en el lado sur, provocada probablemente por un relleno (ver Fig. nº 24).

Igualmente, realizamos sondeos con georadar en el interior del espacio denominado “El Santuario” o altar, sobre una superficie de 1.3 m de ancho por 2.8 m de largo. Los resultados más sobresalientes indican dos zonas con anomalías a una profundidad aproximada de 1.20m (ver Fig. nº 25), provocadas por oquedades.

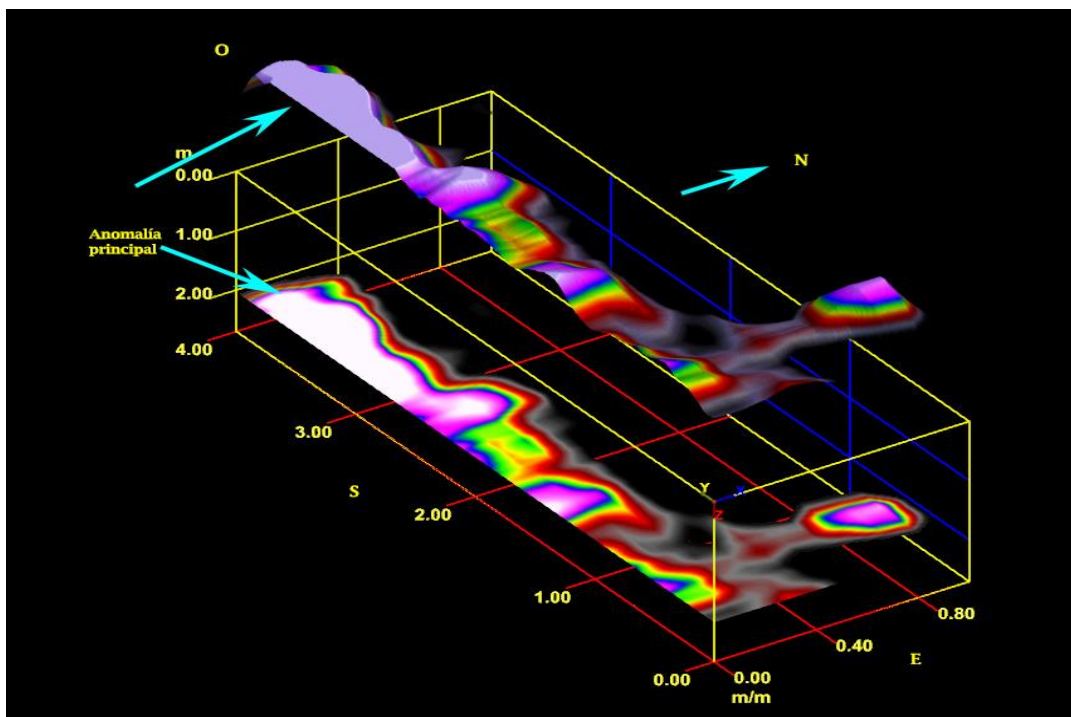


Figura nº 24 - Modelo en 3-D del pasillo sur en donde los colores claros indican zonas con muy alta porosidad, localizadas en el lado sur y señaladas por las flechas en color azul.

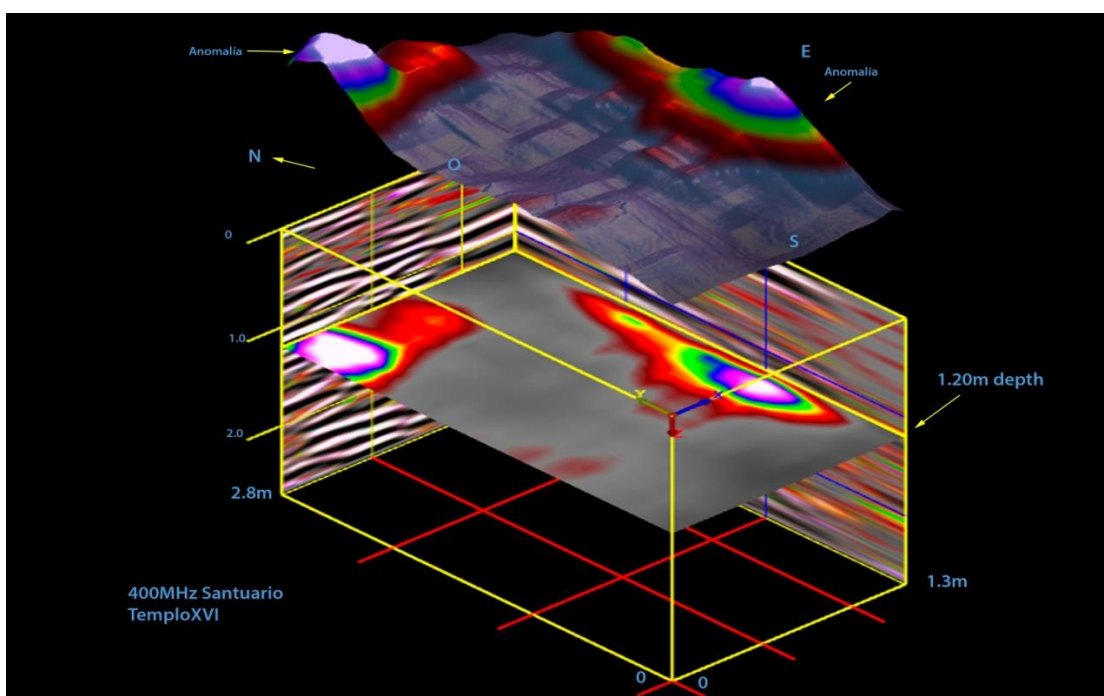


Figura nº 25 - Modelo en 3-D del Santuario: las flechas señalan las dos anomalías más importantes a profundidades inferiores a 1.20m.

Conclusiones

1).- De manera general, se presentan anomalías en la parte norte (ver Fig. nº 18) que parecen corresponder a rellenos depositados posiblemente cuando se efectuó la intervención del edificio en épocas anteriores.

También al frente y en medio de la entrada principal del templo (ver Figs. nº 19 y 20) se tiene una zona anómala causante probablemente del desplome del dintel. Igualmente, a 15 cm de profundidad, se identificó todo el sistema de cableado eléctrico (ver Fig. nº 26) y a mayor profundidad, se observan arreglos de reflexiones que pueden corresponder a estructuras antrópicas enterradas (ver Fig. nº 27), localizadas en medio y al frente de la entrada, al oeste del edificio y probablemente relacionadas con los problemas de desplome y agrietamiento.

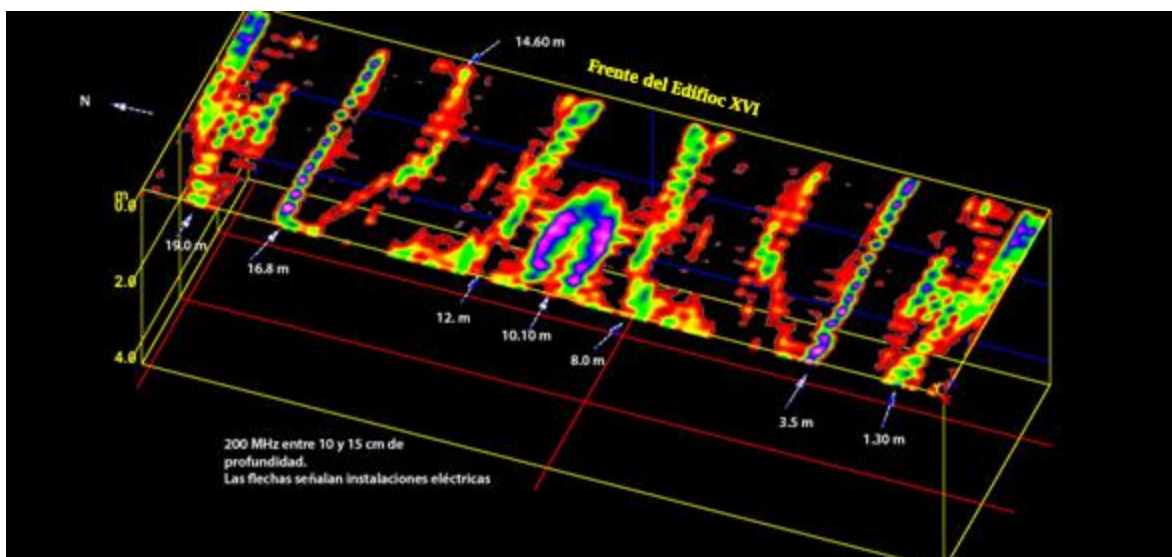


Figura nº 26 - Modelado en 3-D de la superficie enfrente del Edificio XVI entre 10 y 15 cm de profundidad.

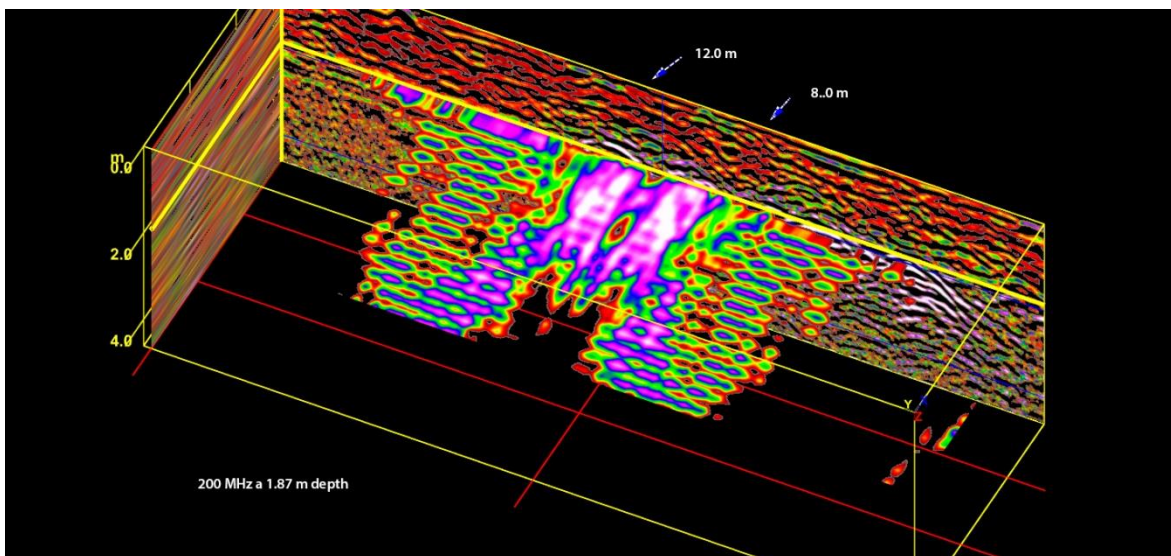


Figura n° 27 - Frente del Edificio XVI, los colores en magenta indican las zonas más reflectoras producidas por las diferencias entre materiales, se trata probablemente de una anomalía producida por estructuras de origen antrópico.

3).- Combinando resultados geológicos, geofísicos, estructurales y arqueológicos, estaríamos en condiciones de elaborar un dictamen del estado que guarda el Templo XVI.

4).- Como las prospecciones geofísicas se basan en métodos indirectos, para su comprobación se requiere de excavaciones como única manera de verificar los resultados.

IV.- Identificación de áreas afectadas por insectos xilófagos (carcomas), de una obra de óleo y temple sobre tabla del Maestro de Osma de la colección del Museo Nacional de San Carlos, por medio del georadar utilizando altas frecuencias (2600 MHz).

A petición de la Subdirección General del Patrimonio Artístico Inmueble, Centro Nacional de Conservación y Registro del Patrimonio Artístico Mueble, INBA se sondeó con georadar una obra pictórica (óleo y temple sobre madera) de 128.7 cm x 101.5 cm x 3.2 cm de largo, ancho y grueso respectivamente del Maestro de Osma del siglo XV (se desconoce la fecha exacta): “Santa Catalina y Santa Magdalena” (ver Fig. n° 28), en un avanzado estado de fragilidad por las innumerables galerías de insectos xilófagos, identificadas superficialmente con antelación en radiografías de R-X (ver Fig. n° 29).



Figura nº 28 - Obra del siglo XV del Maestro de Osma, “Santa Catalina y Santa Magdalena” de la colección del Museo de San Carlos, INBA-CNCA.

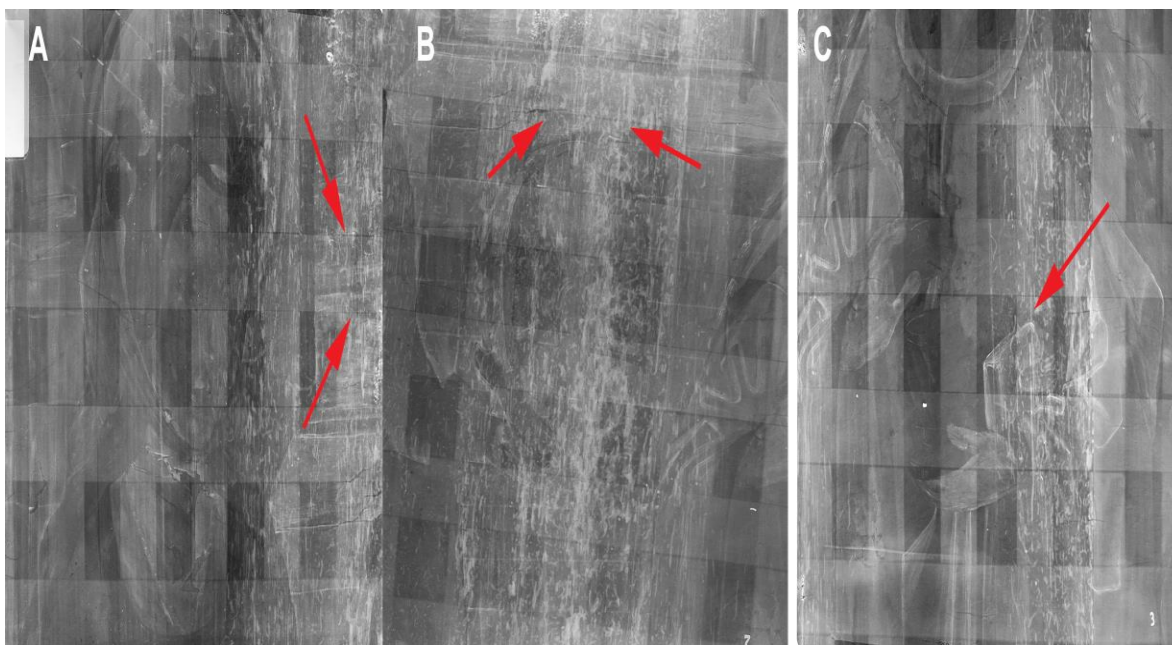


Figura nº 29 - Radiografías de una sección de la obra, de izquierda a derecha: A) rostro de Santa Catalina; B) rueda sostenida con la mano izquierda de Santa Catalina; y C), cuello y manos de Santa Magdalena. Las flechas en color rojo señalan las galerías de los insectos xilófagos.

Siendo ésta la primera vez que se utiliza el georadar en aplicaciones que tienen que ver con la determinación de la distribución de oquedades en maderas, la hipótesis inicial que guió nuestros trabajos fueron los contrastes en valores absolutos de las propiedades electromagnéticas (constantes dieléctricas relativas, resistividad eléctrica y permeabilidad magnética) del aire de las cavidades y de la madera y de acuerdo a esto, **se** infirió que en la interface se producen reflexiones que, una vez graficadas, podrían indicarnos la distribución de las oquedades ocasionadas por los insectos.

Así mismo, relacionando la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío con la frecuencia utilizada, determinamos un valor de aproximadamente 1.5 cm como la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de 2600 MHz; además, para eliminar la incertidumbre de que se pudieran presentar oquedades paralelas a la dirección de sondeo y no ser identificadas, se realizaron prospecciones sobre líneas a lo largo y a lo ancho de la obra (ver Fig. nº 30)

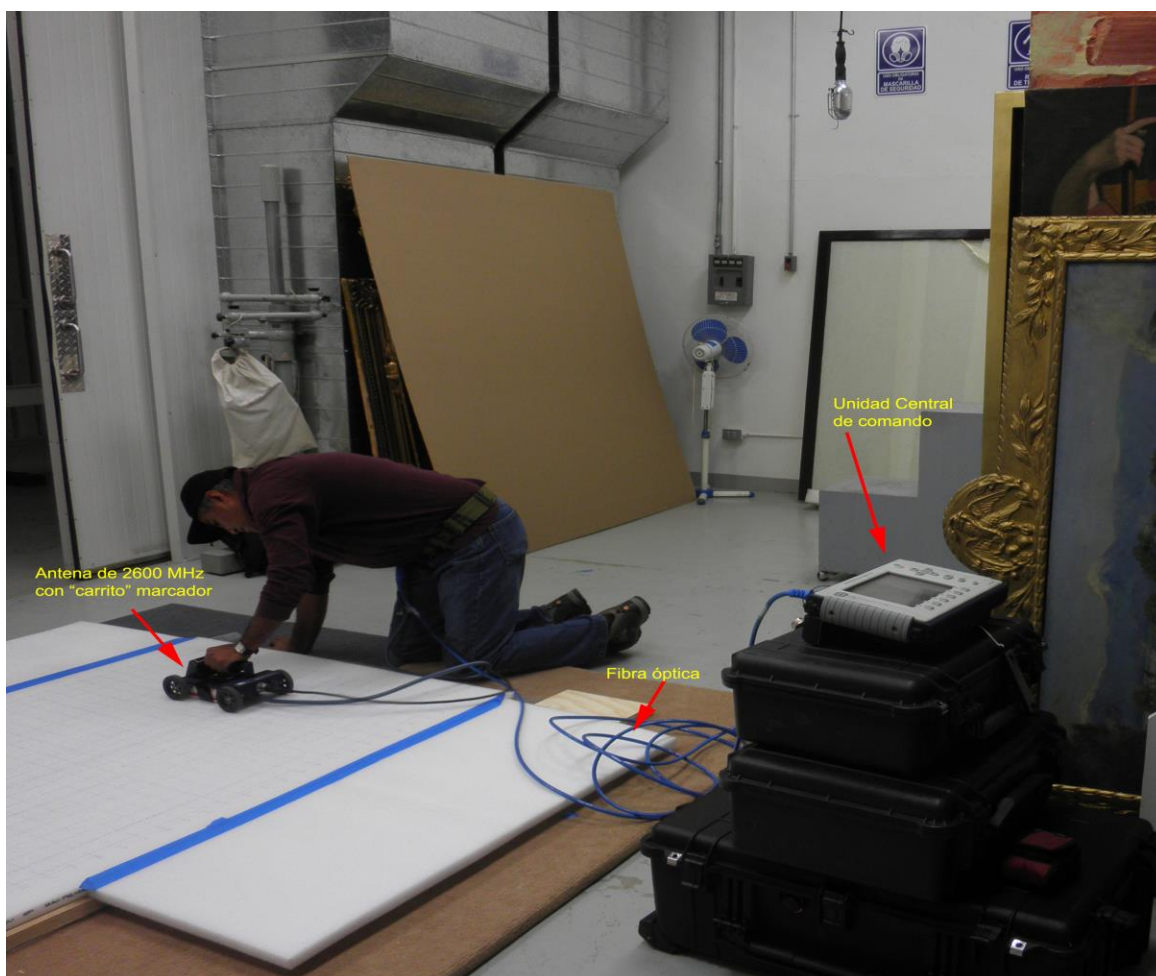


Figura nº 30 - Equipo utilizado: unidad de comando y vehículo transportador de la antena de 2600 MHz, sobre una cuadrícula.

La obra fue protegida con un marco de madera y una cubierta de material inerte, Ethafoam (polietileno) de 2.5 de espesor (ver Fig. nº 30) y para facilitar la interpretación de los resultados, señalamos en las figuras nº 31 y 32 el punto de origen de las coordenadas (x, y, z), en la misma posición que en las gráficas en 3-D reportadas.



Figura nº 31.- Obra del Maestro de Osma “Santa Catalina y Santa Magdalena”. El origen del sistema de coordenadas (x,y,z) se encuentra en el vértice inferior izquierdo.



Figura nº 32.- Parte posterior de la obra compuesta por 13 soportes a lo largo y 14 a lo ancho. Obsérvese en el vértice superior izquierda el origen de las coordenadas.

A 1 cm de profundidad, los sondeos realizados a lo ancho en el sentido de la Y's y graficados en 3-D, muestran innumerables reflexiones múltiples que en planta (eje z: ver Fig. nº 33), están representadas por los colores blanco y verde en los bordes, varias de las cuales podrían corresponder a los huecos provocados en parte por el contacto de las tablas del engatillado dispuestas en forma horizontal y en parte, por las galerías de los insectos.

A la misma profundidad pero con los registros tomados a lo largo de la obra, observamos que las oquedades o galerías tienen una mayor distribución (ver Fig. nº 33B).

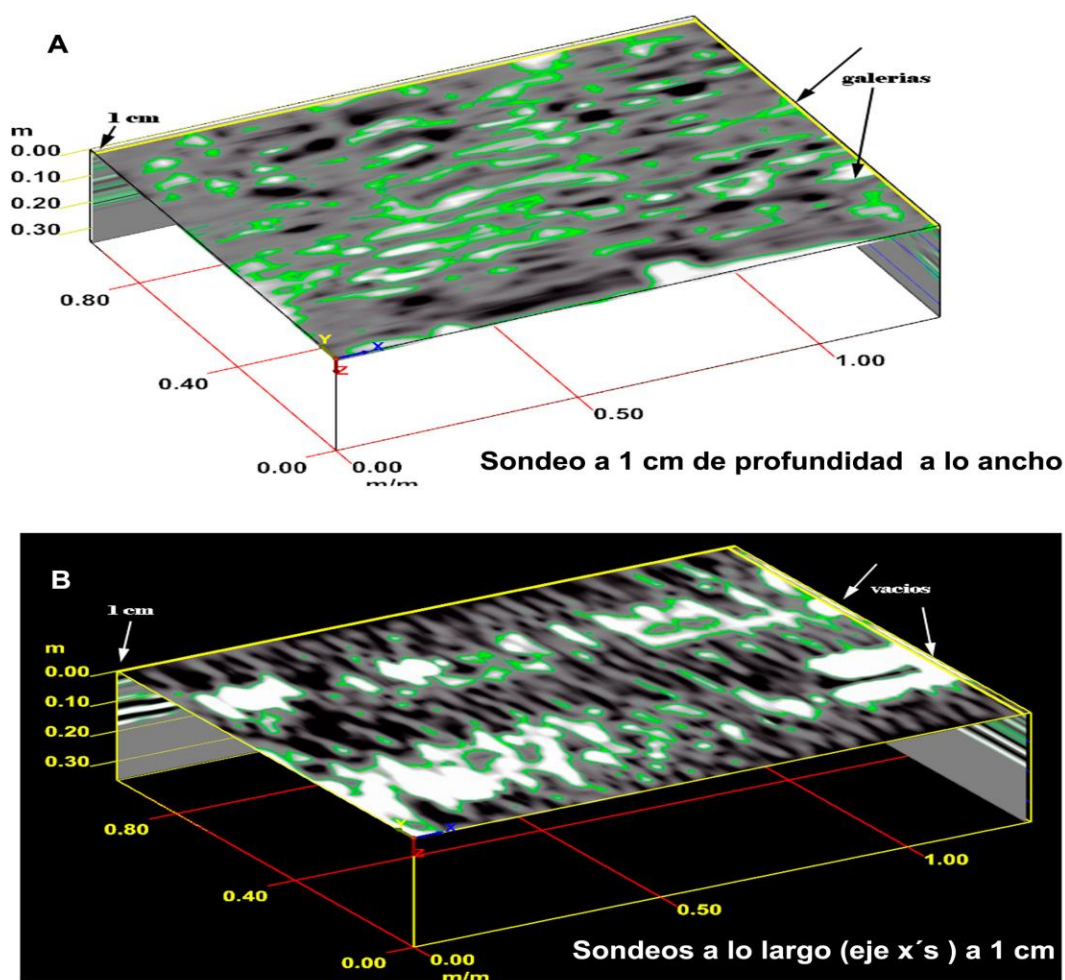


Figura nº 33.- En la figura (A), diagrama en 3-D en el sentido vertical (Y's) y en (B) en el sentido horizontal (X's). Obsérvese en A que las anomalías en colores blanco y verde son longitudinales y en B, adquieren una distribución mayor con una orientación horizontal preferencial.

Los resultados para 2 cm de profundidad en el sentido vertical (ancho), graficados en la figura nº 34^a, muestran oquedades o galerías con la misma orientación como la señalada en la figura nº 33A ; mientras que a lo largo, en la figura nº 34B, observamos una mayor distribución de las oquedades semejantes a las mostradas en la figura nº 33B, lo cual corrobora nuestras apreciaciones.

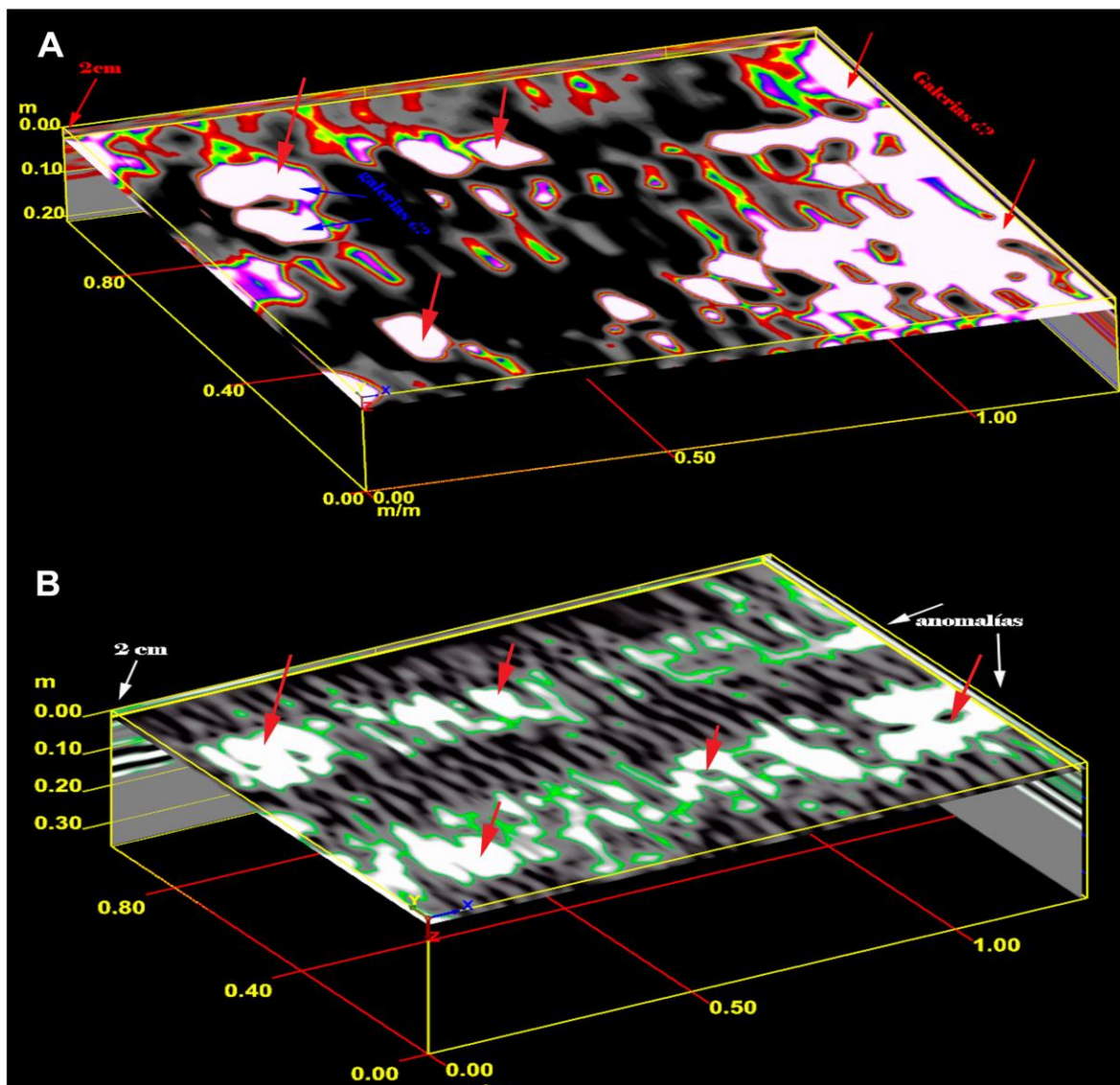


Figura nº 34 - Diagrama en 3-D de los datos de los sondeos en el sentido vertical en A y horizontal en B. Las flechas en color rojo señalan las reflexiones múltiples o amplitudes de onda positivas en blanco correspondientes a huecos provocados por los insectos.

A 3 cm de profundidad (ver Figs. nº 35A y B), se observa el mismo patrón que en los casos precedentes, es decir, oquedades o galerías entre Santa Catalina y Santa Magdalena tanto en la parte superior a la altura de la “ventana” como en la parte inferior, entre las dos “Santas”.

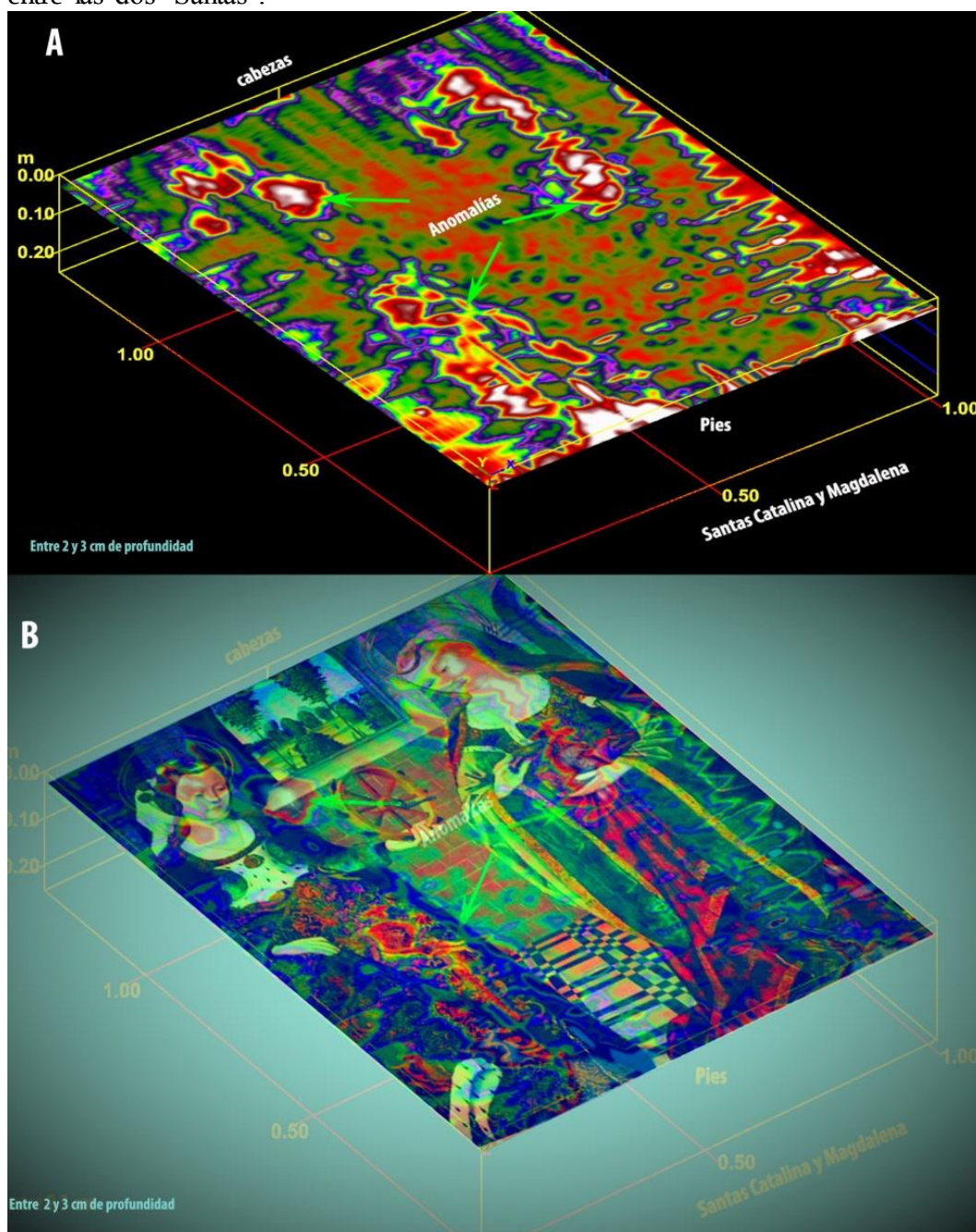


Figura nº 35.- En (A) los resultados en 3-D de los datos procesados en el sentido vertical y en (B), los mismos pero graficados sobre la obra.

Entre 3 y 4 cm de profundidad, teóricamente estamos en la zona de contacto entre la tabla y la estructura denominada en “engatillado” y en esta observamos todavía la distribución de las oquedades (ver Figs. nº 36 A y B).

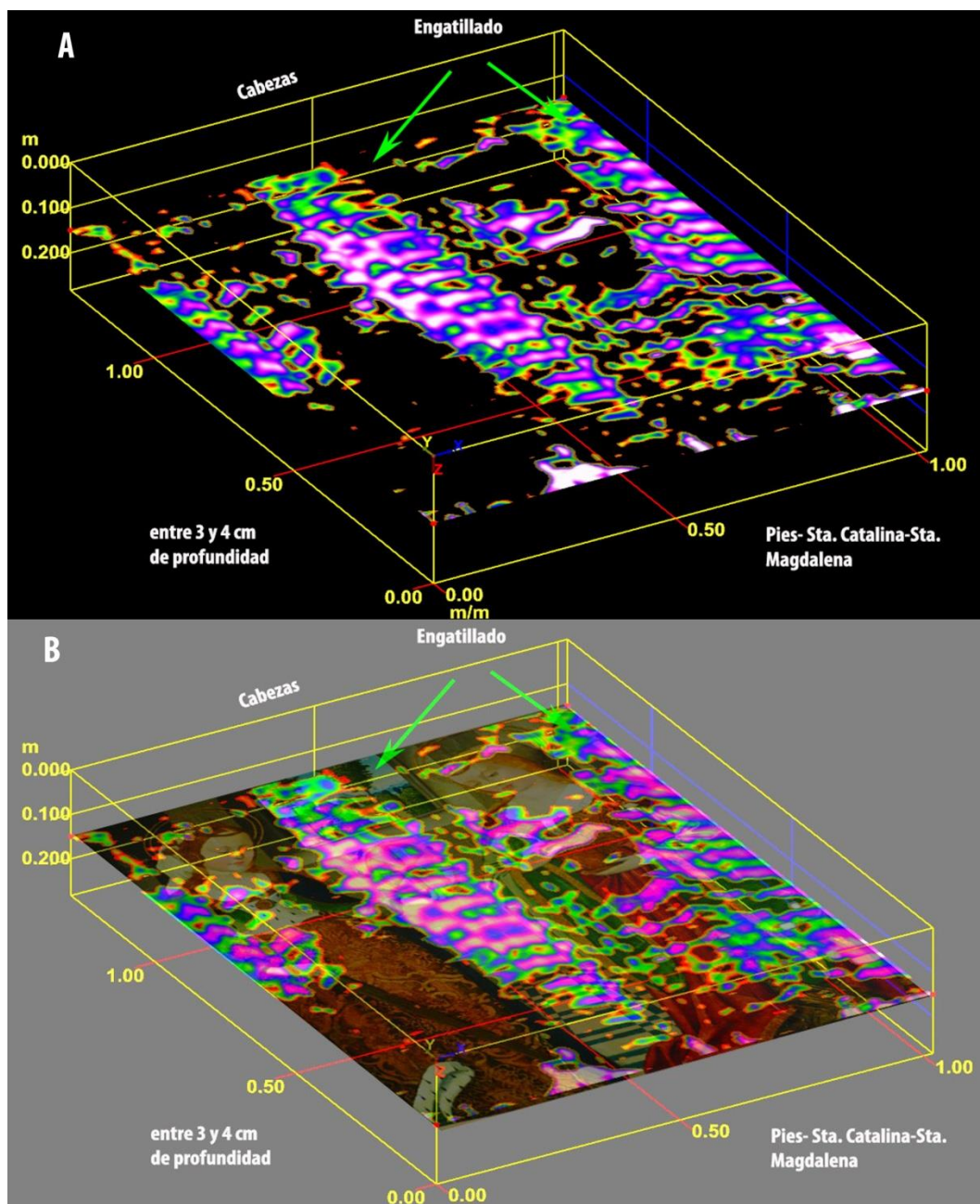


Figura nº36 - En (A), se observan las reflexiones provocadas por el aire entre la tabla y el engatillado entre 3 y 4 cm de profundidad y en (B), la distribución de las oquedades con relación a la pintura.

Conclusiones

1).- En este estudio se demuestra que la aplicación del georadar utilizando altas frecuencias en los trabajos de restauración de pintura sobre madera alterada es factible y abre una nueva línea de investigación de gran importancia en la conservación del patrimonio cultural, por tratarse de una técnica no invasiva ni destructiva. El método podría también ser aplicado en la restauración de retablos de madera y en general en los trabajos que tengan que ver con espesores relativamente pequeños, mientras existan contrastes dieléctricos entre sus componentes.

2).- Con los avances tecnológicos tanto en material como en programación, el Laboratorio de Geofísica del INAH está en posibilidad de llevar a cabo modelos en 3-D, que permiten precisar con el máximo detalle las zonas afectadas en este caso por insectos xilófagos.

CONCLUSION

Como se puede apreciar a través de estos casos, los métodos geofísicos no-invasivos ni destructivos son, en la actualidad, una herramienta incontornable para el estudio del patrimonio cultural. Si bien es cierto que no existe un método único, la combinación de éstos permite responder a las expectativas y normas establecidas por la UNESCO y el ICOMOS para la investigación, restauración y conservación de dicho patrimonio. En ese sentido, el INAH que ha sido una institución pionera en este campo en América Latina muestra a través del Laboratorio de Geofísica una vez más que está a la vanguardia.

Agradecimientos

A la Dra. Laura Elena Lelo de Larrea López por la valiosa información que nos proporcionó sobre la historia arquitectónica y de restauración de la Iglesia de Huiramangaro, Mich., y a la Arq. Paulina Ávila por su apoyo gráfico con las figuras arquitectónicas del muro testero, ambas del Centro INAH, Michoacán.

Referencias citadas.

- Annan, A.P. 2003. GPR for infrastructure imaging, in :Proceedings of the international symposium (NDT-CE2003) of non-destructive testing in civil engineering. Proceeding, BB85-CD;2003:12.
- Barilaro, D., Branca, C., Gresta, S., Imposa, S., Leone, A., Majolino, D., 2007. Ground penetrating radar (G.P.R.) surveys applied to the research of crypts in San Sebastiano's church in Catania (Sicily). *J. Cult. Herit* 8, 73-76.
- Bevan, B. W., 1991.-The search for graves. *Geophysics* 56, 1310-1319.
- Blanco, M.R., Garcia, F.G., Abad, I.R., Sala, R.M., Benlloch, J., 2008. Short Report Ground-Penetrating Radar Survey for Subfloor Mapping and Analysis of Structural Damage in the Sagrado Corazon de Jesus Church, Spain. *Arch. Prosp* 15, 285-292.
- Carcione, J. M., 1996. Ground radar simulation for archaeological applications. *Geophys Prospect*, p. 871-88.
- Conyers, L.B., and Goodman, D., 1997. *Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*, AltaMira Press, Walnut Creek, London and New Delhi, 203pp.
- Chianese, D., D'Emilio, M., Di Salvia, S. Lapenna, V., Ragosta, M. and Rizzo, E., 2004. Magnetic mapping, ground penetrating radar surveys and magnetic susceptibility measurements for the study of the archaeological site of Serra di Vaglio (southern Italy). *J. Archaeological Sci.* 3: 633-643.
- Davis, J.L., Annan, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geoph. Prosp* 37, 531-551.
- Goodman D., 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59(2):224-32.
- Gracia, V.G., Canas, J.A., Pujades, L.G., Clapes, J., Caselles, O., Garcia, F., Osorio, R., 2000. GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain). *J. Appl. Geoph* 43, 167-174.
- Imai, T., Sakayama, T., and Kanemori, T. (1987).- Use of ground penetrating and resistivity surveys for archaeological investigations. *Geophysics* 52, 137-150.
- Leckebusch, J., 2000. Two- and three-dimensional Ground-penetrating radar surveys across a medieval choir: a case study in archaeology. *Arch. Prosp* 7, 189-200.
- Leucci, G., 2002. Ground-penetrating radar survey to map the location of buried structures under two churches. *Arch. Prosp* 9, 217-228.
- Orlando, L., 2007. Georadar and magnetic data for the planning of an archaeological excavation (case study in central Italy), *Archaeological Prospection* 14: 1-13.
- Orlando L., and Soldovieri, F., 2008. Two different approaches for georadar data processing: a case study in archaeological prospecting, *J. Appl. Geophysics*, 64:1-13.
- Pérez-Gracia V., Canas, J.A., Pujades, L.G., Clapés, J., Caselles O., García, F., and Osorio, R., 2000. Survey to confirm the location of ancient structures under the Valencia Cathedral (Spain). *Appl. Geophys.* 43: 167-74.
- Pérez-Gracia, V., García, F., Pujades L.G., González-Drigo, R., and Di Capua, D., 2008. GPR Survey to study the restoration of a Roman monument. *J. Cult. Heritage*, 89-96.

- Perez-Gracia, V., Caselles, J.O., Clapes, J., Osorio, R., Martinez, G., Canas, J.A., 2009. Integrated near-surface geophysical survey of the Cathedral of Mallorca. *J. Arch. Sci.* 36, 1289-1299.
- Pieraccini, M., Mecatti, D., Luzzi, G., Seracini, M., Pinelli, G. and Atzeni, C., 2005. Non-contact intrawall penetrating radar for heritage survey: the search of the 'Battle of Anghiari' by Leonardo da Vinci. *NDT & E Int.*, 38:151–157.
- Piro, S., Goodman, D., Nishimura, Y., 2003. The study and characterization of Emperor Traiano's villa (Altopiani di Arcinazzo, Roma) using high resolution integrated geophysical surveys, *Archaeological Prospection* 10: 1–25.
- Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F. I. and Novo, A., 2011. GPR evaluation of the Roman masonry archbridge of Lugo (Spain). *NDT & E Int.*, 44(8):12.
- Sternberg, B.K., and McGill, J. W. (1995).- Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 33, 209-225.
- Tohge, M., Karube, F., Kobayashi, M., Tanaka, A., and Ishii, K. (1998).- The use of ground penetration radar to map an ancient village buried by volcanic eruptions. *Journal of Applied Geophysics* 40, 49-58.
- Vaughan, C.J., (1986).- Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics* 51, 595-604.
- Weinstein-Evron, M., Beck, A. and Ezeresky, M., 2003. Geophysical investigations in the service of Mount Carmel (Israel) prehistoric research. *J. Archaeological Sci.* 30:1331–1341.