



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

INGENIERÍA TÉCNICA TOPOGRÁFICA PROYECTO FINAL DE CARRERA

GEORRADAR APLICADO A LA ARQUEOLOGÍA: EL PALACIO DEL REAL DE VALENCIA

Proyectista: Raúl Broseta Gutiérrez

Directores: Amparo Núñez Andrés
Jordi Padín Devesa

Convocatoria: Junio 2010

RESUMEN

El presente trabajo se enmarca dentro los trabajos previos a las excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en el año 2009 del Palacio del Real de Valencia. En él se usa la técnica geofísica no intrusiva del georradar para la búsqueda de restos arqueológicos.

El trabajo consta de tres bloques bien diferenciados:

En el primer bloque se tratan a fondo las cuestiones teóricas de la técnica del radar de subsuelo (georradar). Se introduce el concepto, así como su historia, y se profundiza en aspectos teóricos de ondas electromagnéticas. También se analizan métodos de adquisición de datos asociados a la técnica, se expone el procesado de datos y su análisis posterior. Por último se detalla el instrumental utilizado.

En el segundo bloque se detalla la historia del palacio, desde su construcción en el siglo X hasta su demolición en el año 1802. También se detallan toda la serie de hallazgos posteriores de mayor relevancia, que son clave para entender la actuación realizada de la que este estudio forma parte. Por último se analiza brevemente la variable social inherente en este tipo de trabajos arqueológicos.

Para finalizar, en el bloque tercero se detalla todo el trabajo realizado en la toma de datos tanto del georradar como de carácter topográfico. Se profundiza en el procesado y análisis de los radargramas obtenidos y se elabora una conclusión derivada del resultado del análisis de todos los elementos anteriormente mencionados.

INDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| BLOQUE I: FUNDAMENTOS DEL GEORRADAR | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1.1. Introducción a los métodos de prospección geofísica | 11 |
| 1.2. Introducción al georradar | 13 |
| 1.3. Historia | 14 |
| 1.4. Aplicaciones | 14 |
| 2. FUNDAMENTO TEÓRICO | 16 |
| 2.1. Teoría de propagación en campos electromagnéticos | 17 |
| 2.2. Parámetros electromagnéticos característicos del medio | 18 |
| 2.2.1. Conductividad eléctrica σ | |
| 2.2.2. Permitividad Dieléctrica ϵ | |
| 2.2.3. Permeabilidad magnética μ | |
| 2.3. Propagación | 22 |
| 2.4. Velocidad de propagación | 24 |
| 2.5. Longitud de onda | 25 |
| 2.6. Profundidad nominal de penetración (<i>Skin Depth</i>) | 25 |
| 2.7. Impedancia de un medio | 26 |
| 3. REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS | 27 |
| 3.1. Ley de reflexión. | 28 |
| 3.2. Ley de la refracción o ley de Snell-Descartes | 28 |
| 3.3. Ecuaciones onda | 29 |
| 3.4. Coeficientes de Fresnel | 30 |
| 3.5. Detección de discontinuidades | 32 |

| | |
|---|----|
| 4. FENOMENOS DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS | 33 |
| • Noise | |
| • Difusión (Spreading) | |
| • Dispersión (Scattering) | |
| • Absorción | |
| • Atenuación | |
| • Interferencias | |
| • Resolución | |
| • Resolución vertical | |
| • Resolución horizontal | |
| | |
| 5. MÉTODOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS | 40 |
| 5.1. Reflexión | 40 |
| 5.1.1. Puntual | |
| 5.1.2. Perfiles | |
| 5.1.3. Malla tridimensional | |
| 5.2. Medición de velocidad del medio | 42 |
| 5.2.1. Punto medio común (CMP) | |
| 5.2.2. Reflexión y refracción de gran ángulo (WARR) | |
| 5.3. Sondeos | 45 |
| 5.3.1. Sondeo <i>Crosshole</i> | |
| 5.3.2. <i>Surface to borehole surveys</i> | |
| | |
| 6. PROCESAMIENTO | 47 |
| 6.1. Ajuste del cero (<i>Offset</i>) | 47 |
| 6.2. Ajuste de la escala horizontal | 48 |
| 6.3. Filtrado | 48 |
| • Filtros horizontales | |
| • Filtros verticales | |
| • Filtros paso bajo (<i>Low pass filter</i>) | |
| • Filtros paso alto (<i>High pass filter</i>) | |
| • Filtros pasa banda (<i>Band pass filter</i>) | |
| • Filtros de respuesta infinita (IIR) | |
| • Filtros de respuesta finita (FIR) | |

| | |
|--|----|
| 6.4. Transformada Hilbert | 51 |
| 6.5. Ganancias | 52 |
| 6.6. Migración | 53 |
| 6.7. Deconvolución | 55 |
| 6.8. Determinación de la velocidad del radar | 55 |
| | |
| 7. INSTRUMENTACIÓN | 58 |
| 7.1. Unidad central | 58 |
| • Unidad central SIR-3000 | |
| 7.2. Antena | 62 |
| 7.2.1. Parámetros fundamentales de la antena | |
| • Densidad de potencia radiada | |
| • Directividad | |
| • Ganancia | |
| • Ecuación de transmisión | |
| • Diagramas de radiación | |
| 7.2.2. Tipos de antenas | |
| • Antenas de apertura y reflectores | |
| • Agrupaciones de antenas | |
| • Antenas alámbricas | |
| 7.3. Elementos auxiliares | 68 |
| • Odómetro | |
| • Carro | |
| • Baterías | |
| • Cables | |
| • Material topográfico | |
| • Material de marcado | |
| • Software | |

BLOQUE II: HISTORIA DEL PALACIO DEL REAL DE VALENCIA

| | |
|---|----|
| 8. HISTORIA DEL PALACIO DEL REAL: DEL s. X AL s. XIX | 71 |
| 8.1 Introducción | 71 |
| 8.2 La fase islámica | 72 |
| 8.3 La Reconquista y el Reino de Valencia | 74 |
| 8.4 De los Decretos de Nueva Planta a 1810 | 79 |
| | |
| 9. HISTORIA DEL PALACIO DEL REAL: DE 1810 A LA ACTUALIDAD | 81 |
| 9.1 Introducción | 81 |
| 9.2 Las excavaciones de finales de la década de los 80 | 83 |
| 9.3 Los planos de Manuel Cavallero | 86 |
| 9.4 Las excavaciones arqueológicas de 2009 | 89 |
| | |
| 10. LA VARIABLE SOCIAL | 90 |
| 10.1 Introducción | 90 |
| 10.2 El factor medioambiental | 91 |

BLOQUE III: METODOLOGÍA DE ACTUACIÓN Y RESULTADOS

| | |
|--|-----|
| 11. INTRODUCCIÓN. RESUMEN DE LA ACTUACIÓN | 93 |
| 12. METODOLOGÍA DE ACTUACIÓN | 96 |
| 12.1 Obtención de registros de campo | 96 |
| 12.2 Obtención del levantamiento topográfico | 101 |
| 12.3 Procesado de los radargramas | 102 |
| 12.4 Resultados obtenidos | 104 |
| 13. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 130 |
| CONCLUSIÓN | 133 |

BIBLIOGRAFÍA**AGRADECIMIENTOS****ANEJOS**

ANEJO 1: Cálculos de la radiación topográfica

ANEJO 2: Radargramas de la malla AAD

ANEJO 3: Radargramas de la malla AAE

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es la búsqueda no intrusiva de restos arqueológicos pertenecientes al Palacio del Real de Valencia, situados en el jardín de Viveros. Forma parte de un conjunto de actuaciones, de varios ámbitos profesionales, que desembocarán en la exposición al público de los restos hallados para recuperar la memoria de la edificación. En concreto, es el primero de los trabajos en campo realizados en el lugar, ya que debe verificar la posición probable de la fachada sur del palacio, para que posteriormente se empiecen los trabajos propios de arqueología optimizando los recursos.

Para la búsqueda de los restos se ha utilizado la técnica geofísica del georradar o GPR, técnica muy utilizada últimamente para este tipo de trabajos, debido a su nivel de respuesta y su facilidad de toma de datos en zonas llanas y libres de obstáculos.

Los radargramas obtenidos en la toma de datos serán filtrados y analizados con la intención de encontrar las zonas de mayor probabilidad donde puedan encontrarse los cimientos del Palacio del Real. Se dispone de un plano planta de 1802 del palacio que está debidamente georreferenciado, gracias a las excavaciones arqueológicas de 1986 que se llevaron a cabo en otra parte del palacio (fachada oriental del Real *nou* y occidental del Real *vell*). Para acoplar los resultados gráficos del análisis GPR con el plano topográfico de la zona de estudio, se realiza un levantamiento topográfico de las zonas estudiadas, que se acoplará al plano de la zona mediante una transformación Helmert.

Así pues, una vez encontradas las respuestas de los elementos lineales del subsuelo habrá que dirimir si éstas se tratan de simples canalizaciones de servicios o de los cimientos de la fachada del palacio, tomando como referencia su ubicación y su tamaño.

Los resultados serán enviados a los arqueólogos para que con la información aportada procedan a las actuaciones oportunas.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción a las técnicas de prospección geofísica

Etimológicamente hablando, la geofísica es una disciplina científica que se encarga del estudio de las propiedades físicas de la Tierra. Ésta puede dividirse en dos partes: La Geofísica Teórica, que se encarga del estudio de la gravedad, el magnetismo, la electricidad y conductividad eléctrica, y la sismología terrestres; y la Geofísica Aplicada, que consiste en la aplicación de los conocimientos derivados de la Geofísica Teórica.

La Geofísica Aplicada, cuyo objetivo es hacer uso de los conceptos físicos en el estudio de la parte superficial de la corteza terrestre, constituye una herramienta poderosa para la exploración del subsuelo en la búsqueda y estudio de yacimientos de materiales de interés antrópico: petróleo, aguas subterráneas, minerales, carbón, yacimientos arqueológicos, etc.

Los métodos geofísicos pueden clasificarse en métodos pasivos (asociados con un campo natural), y métodos activos (asociados con un campo artificial). El campo excitador (activo o pasivo), será modificado por las propiedades físicas del medio. Si se miden en algunos puntos los valores de este campo, entonces se tendrá una idea sobre las variaciones de las propiedades físicas del suelo. La representación de estas variaciones debidamente georreferenciadas y su posterior interpretación permite hacer inferencias sobre la ausencia o presencia de diversos materiales o estructuras en el subsuelo.

Algunos de los métodos de prospección geofísica más utilizados son:

Métodos pasivos:

- **Gravimetría:** Consiste en medir la intensidad de la fuerza gravitatoria de la Tierra, llevando a cabo estudios de cambios de densidad en el subsuelo. Esta técnica detecta la presencia de grandes masas mineralizadas, oquedades, etc.
- **Magnetometría:** Estos estudios se basan en medir variaciones en el campo magnético de la Tierra a fin de detectar minerales que alteran el campo magnético. Por ejemplo la magnetita.

- Radiometría: Consiste en efectuar mediciones de las radiaciones que se emiten desde el interior de la Tierra. Resulta apropiada para detectar la presencia de minerales radioactivos como el "radio" o el "uranio".

Métodos activos:

- Sismológicos (sísmica de reflexión): Consisten en producir artificialmente ondas sísmicas con una explosión pequeña o el impacto sobre la superficie de un objeto de gran peso. Los datos de las ondas sísmicas, que recorren el medio objeto del estudio, se registran en un sismógrafo y son posteriormente analizados. Estos estudios detectan muy bien la presencia de hidrocarburos.
- Sondeos eléctricos: Este método consiste en aplicar corriente eléctrica al suelo mediante electrodos en sucesivas mediciones a través de aperturas (aumento progresivo de distancia entre electrodos en cada medición perteneciente a un perfil). El método desemboca en la medida de la resistividad eléctrica aparente del medio y su consiguiente análisis.
- Georradar: Consiste en el análisis de las reflexiones de las ondas electromagnéticas, emitidas por la antena georradar, que se producen cuando hay variaciones en la constante dieléctrica.

Todos los métodos mencionados tienen la propiedad de ser métodos no intrusivos (no destructivos), lo que desde un punto de vista ambiental es una gran ventaja respecto de otro tipo de prospecciones del subsuelo.

En la arqueología, el método más utilizado de prospección geofísica es el georradar. Así pues, será el método empleado en el presente estudio.

1.2 Introducción del georradar

Georradar también conocido como radar del subsuelo, o por su nombre en inglés *ground-probing radar* (GPR), es una técnica de alta resolución de prospección geofísica. El método es similar al de sísmica de reflexión de pequeño ángulo, diferenciándose ambas en el rango de frecuencias utilizadas. El georradar emplea ondas electromagnéticas de frecuencias entre 100 y 1 GHz, mientras que las de sísmica son del orden 10Hz-1000Hz. Por otro lado, en sísmica la propagación de las ondas es función de las propiedades mecánicas de los materiales mientras que en la prospección con georradar es función de las propiedades electromagnéticas del medio.

La técnica georradar se ha ido desarrollando y empleando desde los años cincuenta en investigaciones superficiales de alta resolución del subsuelo o de ciertos medios en geología, ingeniería, minería y glaciología. Es un sistema electromagnético para la detección y localización de elementos, formaciones y anomalías en el subsuelo, objetos o construcciones.

El georradar se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración y en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio. La propagación de estos pulsos se puede definir teóricamente a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas.

Cada medio posee unas características electromagnéticas propias: permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad eléctrica. Para realizar la medición se generan pulsos electromagnéticos por medio de la antena emisora/receptora con una frecuencia característica. La onda electromagnética se va propagando por el medio, hasta que alcanza una zona u objeto cuyas propiedades electromagnéticas son diferentes respecto a las adyacentes. Parte de la energía electromagnética de la onda sigue transmitiéndose y parte se refleja hacia la superficie.

La onda electromagnética reflejada se recibe a través de la antena receptora y se registra en la unidad central para su posterior tratamiento e interpretación. Las mediciones se realizan desplazando las antenas del georradar en vehículos, plataformas o manualmente. Es una técnica no destructiva que tiene una gran resolución, por lo que en arqueología ha sido de gran utilidad.

1.3 Historia

El término RADAR fue creado por la armada de EE.UU. en 1941 y sale de las primeras letras de "radio detección and ranging" (detección y telemetría por ondas de radio). La teoría de las antenas surge a partir de los desarrollos matemáticos de James C. Maxwell, en 1854, corroborados por los experimentos de Heinrich R. Hertz, en 1887. En 1935, el físico británico Robert Watson-Watt desarrolló el primer sistema práctico de radar. En 1960, John C. Cook retomó la utilización del radar, e hizo una propuesta de utilización del mismo en la detección de reflexiones en el subsuelo y aparece publicado en su artículo "*Proposed monocyple-pulse, VHF radar for airborne ice and snow measurements*".

A partir de los años 60 y 70 se empieza a producir un gran desarrollo del georradar. En un principio los estudios se centran en estudios geológicos y de glaciales, posteriormente se van desarrollando los estudios en ingeniería civil, arqueología y patrimonio histórico. Brewster y Annen (1994) fueron de los primeros en visualizar resultados del georradar en tres dimensiones.

Lógicamente con la aparición de casas comerciales que fabricaban georradares se extendió su uso. En 1972, Rex Morey y Art Drake empezaron a vender georradares para la compañía *Geophysical Survey Systems Inc (GSSI)*. Otras empresas que actualmente fabrican equipos de georradar son *Sensors & Software Inc, Penetraradar, US Radar, 3d-Radar AS* o *MALÅ GeoScience*.

El georradar es el protagonista de multitud de conferencias y artículos, e incluso se ha creado la Asociación Europea de Georradar (*The European GPR Association*). En resumen, el uso del georradar está cada vez más extendido y muestra de ello son las siguientes aplicaciones en las que actualmente se utiliza el georradar.

1.4. Aplicaciones

Arqueológicas

- Localización de construcciones antiguas, cimientos y vestigios relacionados.
- Análisis global de yacimientos.

Forenses

- Bienes enterrados como armas, tumbas clandestinas.

Geológicas

- Realizar mapas de estructuras geológicas.
- Geomorfología.
- Indicio de fracturas y análisis de linealidades.
- Localización de oquedades y estructuras cársticas.
- Estudio de fallas.
- Estudios de minería y minerales.
- Riesgos geológicos.
- Recursos de agua subterránea.
- Investigación de la estructura sedimentaria y del suelo.
- Estudios batimétricos.

Arquitectónicas

- Inspección de fachadas.
- Localización humedades o zonas afectadas por grietas.

Medioambientales

- Detección de contaminantes.
- Exploración de acuíferos, de la profundidad de la superficie del agua subterránea y del nivel freático.
- Análisis de emplazamientos.
- Valoración de riesgo de situación de vertederos.
- Medida grosor capa nieve o hielo.
- Trazado vertederos enterrados.
- Localización de bidones enterrados

Localización de tuberías, cables, fundamentos y pozos

2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia y longitud de onda. Las diferentes señales electromagnéticas existentes se clasifican según su frecuencia en el llamado espectro electromagnético.

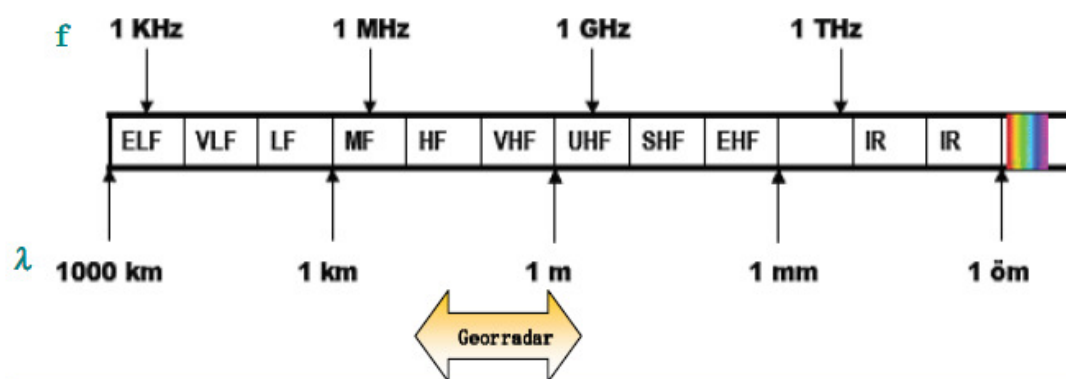


Fig. 1, Espectro de ondas electromagnéticas

| Banda | Denominación | frec. min. | frec. máx. | λ máx. | λ min. |
|-------|--------------------------|------------|------------|----------------|----------------|
| ELF | Extremely Low Frequency | - | 3 kHz | - | 100 km |
| VLF | Very Low Frequency | 3 kHz | 30kHz | 100 km | 10 km |
| LF | Low Frequency | 30 kHz | 300 kHz | 10 km | 1 km |
| MF | Medium Frequency | 300 kHz | 3 MHz | 1 km | 100 m |
| HF | High Frequency | 3 MHz | 30 MHz | 100 m | 10 m |
| VHF | Very High Frequency | 30 MHz | 300 MHz | 10 m | 1 m |
| UHF | Ultra High Frequency | 300 MHz | 3 GHz | 1 m | 10 cm |
| SHF | Super High Frequency | 3 GHz | 30 GHz | 10 cm | 1 cm |
| EHF | Extremely High Frequency | 30 GHz | 300 GHz | 1 cm | 1 mm |

Fig. 2, Banda de frecuencias y longitudes de onda

Los georradares emplean frecuencias entre la HF y UHF.

2.1. Teoría de propagación en campos electromagnéticos

Un campo electromagnético se describe por cuatro vectores de campo según la teoría de Maxwell. Expresadas mediante sus ecuaciones:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

Donde,

E es la intensidad del campo eléctrico (V/m).

B es la densidad del flujo magnético (Wb/m² o Tesla).

H es la intensidad del campo magnético (A/m).

J es la densidad de corriente (A/m²).

D es el vector de desplazamiento eléctrico (C/m²).

ρ es la densidad de carga libre (C/m³).

Estas ecuaciones relacionan la variación con el tiempo de las magnitudes de campo en un punto cualquiera del espacio. Para medios homogéneos e isotrópicos las ecuaciones de Maxwell se complementan con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\vec{J} &= \sigma \cdot \vec{E} \\ \vec{D} &= \varepsilon \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H}\end{aligned}$$

Donde las dos últimas relaciones corresponden a las ecuaciones constitutivas de un medio dieléctrico y de un medio magnético respectivamente, mientras que la primera es la conocida ley de Ohm puntual. σ es la conductividad eléctrica (Siemens/m), ϵ es la permitividad dieléctrica (F/m) y μ es la permeabilidad magnética (H/m). Estos parámetros definen al medio al paso de una onda electromagnética.

En apartados sucesivos explicaremos el significado de los mismos. De este modo, y con los dos grupos de ecuaciones, las ecuaciones de Maxwell, considerado al medio exento de cargas, resultan:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \\ \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} &= 0\end{aligned}$$

2.2. Parámetros electromagnéticos característicos del medio

Las propiedades eléctricas y magnéticas de rocas y suelos definen la velocidad de propagación de las ondas del radar y sus amplitudes. En la mayoría de las ocasiones las propiedades eléctricas son más importantes que las magnéticas.

En las frecuencias que trabaja el georradar las propiedades eléctricas están mayoritariamente controladas por la densidad del medio, sus propiedades químicas, estado físico, distribución (porosidad) y contenido de agua.

2.2.1. Conductividad eléctrica σ

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad que tiene un material para conducir la corriente eléctrica.

Según la ley de Ohm expresa la respuesta de las cargas libres de un medio en presencia de un campo eléctrico externo. Es una proporción entre la densidad de corriente del material y la intensidad del campo eléctrico externo. Recordemos la ley de Ohm,

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

En función de la conductividad se clasifican los materiales en:

- Materiales conductores, valores de conductividad superiores a 10^5 S/m
- Materiales semiconductores, valores de conductividad entre 10^5 S/m y 10^8 S/m
- Materiales aislantes, valores de conductividad superiores a 10^8 S/m

La conductividad de un medio es la inversa de la resistividad. $\sigma = \frac{1}{\rho}$

La resistividad se mide en Ohmios·metro (Wm o ohms·m). A la palabra ohms se le dio la vuelta para definir la unidad de la conductividad y formar mhos. Aunque actualmente las unidades S.I de la conductividad eléctrica son Siemens/m (equivalentes a mhos/m).

En la siguiente tabla aparecen reflejados algunos valores de conductividad,

| Material | σ (S/m) |
|--------------------|----------------------------------|
| Aire | 0 |
| Agua dulce | 10^{-4} - 10^{-2} |
| Agua salada | 4 |
| Arenisca seca | 10^{-8} - 10^{-6} |
| Arenisca húmeda | 10^{-2} |
| Arenas secas | 10^{-4} - 10^{-3} |
| Arenas saturadas | 10^{-3} - 10^{-2} |
| Arcillas secas | 10^{-4} - 10^{-3} |
| Arcillas saturadas | 10^{-3} - 1 |
| Cobre | 10^8 |
| Hormigón | 10^{-3} - 10^{-2} |

Fig. 3, Valores de conductividad según materiales.

Se puede apreciar en la tabla la gran variación de la conductividad de un mismo material en función de si contiene agua o no. La conductividad de un suelo depende fundamentalmente del contenido de humedad y del contenido de sales disueltas en dicha humedad. También depende de otros factores tales como la temperatura, debido a que ésta al favorecer la ionización y aumentar la movilidad iónica de los líquidos, da lugar a un incremento de la conductividad con la temperatura. En materiales porosos la conductividad es muy variable siempre que haya humedad ya que los poros llenos de aire no conducen la corriente eléctrica.

En resumen la conductividad de un medio no cambia únicamente por diferentes tipos de material, sino que influyen las condiciones de porosidad, temperatura, humedad, entre otros.

2.2.2. Permitividad dieléctrica ϵ

También se denomina constante dieléctrica, debido a que en un medio con las mismas características es constante. Es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado (\mathbf{E}) y el vector de desplazamiento eléctrico (\mathbf{D}).

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$$

ϵ es la permitividad dieléctrica absoluta. Sus unidades en el sistema métrico internacional son F/m.

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

ϵ_r es una constante adimensional que expresa la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. En el vacío tiene valor 1.

ϵ_0 es la permitividad dieléctrica en el vacío tiene un valor de $10^{-9} / (36\pi)$ [F/m].

La permitividad dieléctrica se expresa con una parte real y otra imaginaria, esto lo veremos en el apartado de la atenuación.

| Material | ϵ (F/m) |
|--------------------|------------------------------------|
| Aire | 1 |
| Agua dulce | 81 |
| Agua salada | 81 |
| Arenisca seca | 6 |
| Arenisca húmeda | 8 |
| Arenas secas | 2-3 |
| Arenas saturadas | 20-30 |
| Arcillas secas | 2-3 |
| Arcillas saturadas | 8-12 |
| Cobre | 1 |
| Hormigón | 6-9 |

Fig. 4, Valores de permitividad dieléctrica según material.

2.2.3. Permeabilidad magnética μ

Se denomina permeabilidad magnética a la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través suyo los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la intensidad de campo magnético existente, **H**, y la inducción magnética, **B**, que aparece en el interior de dicho material.

La magnitud así definida, el grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético, se denomina permeabilidad absoluta.

$$\mu = B / H$$

Sus unidades en el S.I son Henri/metro, [H/m]

La permeabilidad del vacío, conocida también como constante magnética se representa mediante el símbolo μ_0 y tiene un valor de $4\pi / 10^{-7}$ [H/m].

Para comparar entre sí los materiales, se define la permeabilidad magnética absoluta (μ) como el producto entre la permeabilidad magnética relativa (μ_r) y la permeabilidad magnética de vacío (μ_0):

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

La mayoría de los materiales con que nos podemos encontrar no contienen elementos ferromagnéticos, por lo que la permeabilidad magnética se aproxima a 1.

2.3. Propagación

A partir de las ecuaciones de Maxwell, si consideramos una onda electromagnética de una sola frecuencia, linealmente polarizada que se propaga en la dirección del eje z se obtienen las ecuaciones:

$$E_x(z,t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)}$$

$$H_y(z,t) = H_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z - \theta)}$$

El campo eléctrico tiene su amplitud en el eje x mientras que el campo magnético tiene su amplitud en el eje y, y la onda se propaga en la dirección del eje z.

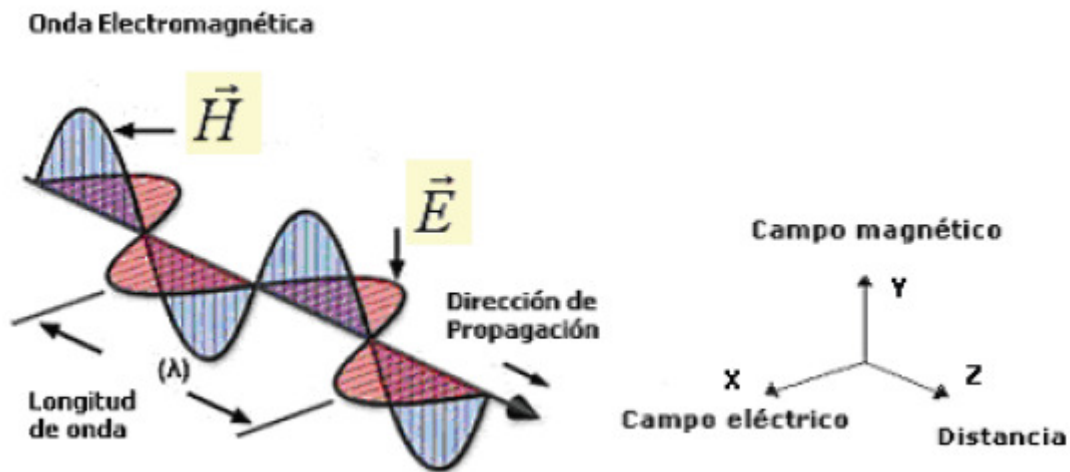


Fig. 5, Representación de una onda electromagnética en sus tres ejes.

Las propiedades del medio (σ , ϵ y μ) y la frecuencia angular ω ($\omega=2\pi f$) pueden ser agrupadas en un término k^2 expresado según:

$$k^2 = -i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon) = \mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma$$

La expresión $i\omega\mu\sigma$ está relacionada con las corrientes de conducción, mientras que $\mu\epsilon\omega^2$ está relacionada con las corrientes de desplazamiento.

El término k se llama parámetro de propagación. En función de la frecuencia, k se puede simplificar según:

- A bajas frecuencias ($f < 10^5$ Hz) las corrientes de corriente dominan sobre las de desplazamiento.

$$k^2 = -i\omega\mu\sigma$$

- A altas frecuencias, del orden de los 10 MHz o superior, las corrientes de desplazamiento dominan sobre las de corriente en medios de baja conductividad ($\sigma < 1$ mS/m). En este caso:

$$k^2 = \mu\epsilon\omega^2$$

Así en un sistema de alta frecuencia y baja conductividad, la propagación de las ondas electromagnéticas depende principalmente de la permitividad dieléctrica del medio. Este es el caso del georradar.

Es habitual definir el factor k en función de sus componentes real e imaginaria.

$$k = \alpha + i\beta$$

Factor de atenuación:

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

Constante de fase:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}$$

Este parámetro es una medida del desfase espacial expresado en radianes por unidad de longitud. Los valores de α y β sirven para calcular otros parámetros que veremos en apartados posteriores.

2.4. Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de la onda es un parámetro fundamental en la prospección con georradar ya que, si la conocemos y medimos el tiempo que tarda la onda desde que es emitida hasta que regresa podemos calcular las profundidades de reflexión.

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)}}$$

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \text{ y } \mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

En el vacío se cumple $\sigma = 0$, $\epsilon_r = 1$ y $\mu_r = 1$

Sustituyendo en la ecuación anterior obtenemos que la velocidad de propagación de la luz en el vacío es,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Por último, combinando las dos ecuaciones anteriores obtenemos la siguiente ecuación de velocidad de propagación:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)}}$$

2.5 Longitud de onda

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)}} \quad \lambda = \frac{c}{f \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)}}$$

La longitud de onda al atravesar un determinado material disminuye cuando disminuye la velocidad de propagación. La relación que guardan es de:

$$\lambda = \frac{v_r}{f} = \frac{2\pi}{\beta}$$

| Material | ϵ_r | V propagación (cm/ns) | λ (cm) | |
|----------|--------------|-----------------------|----------------|---------|
| | | | 100 MHz | 400 MHz |
| Aire | 1 | 30 | 300 | 75 |
| Hormigón | 9 | 10 | 100 | 25 |

Fig. 6, Relación de longitudes de onda según frecuencias y materiales

2.6. Profundidad nominal de penetración (*Skin Depth*)

Se define como la profundidad, δ , a la cual la amplitud del campo ha disminuido hasta $1/e$, lo que equivale a un 37% de su valor inicial. Teniendo en cuenta que el campo \mathbf{E} se atenúa con el factor $e^{-\alpha z}$ la profundidad nominal de penetración equivale a $1/\alpha$.

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \left(\frac{2}{\mu_0 \rho \omega} \right)^{1/2}$$

Dado que $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ y $\omega = 2\pi f$, la profundidad nominal de penetración es aproximadamente igual a,

$$\delta \cong 503.3 \left(\frac{\rho}{f} \right)^{1/2}$$

| f (Hz) | ρ 0.01 σ 10^2 | ρ 1 σ 1 | ρ 10^2 σ 0.01 | ρ 10^4 σ 10^{-4} |
|-----------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 50.33 | 503.3 | 5033 | 50330 |
| 10 | 15.92 | 159.2 | 1592 | 15920 |
| 10^2 | 5.033 | 50.33 | 5033 | 50330 |
| 10^3 | 1.59 | 15.9 | 159 | 1590 |
| 10^4 | 0.50 | 5 | 50 | 500 |
| 10^5 | 0.16 | 1.6 | 16 | 160 |
| 10^6 | 0.05 | 0.5 | 5 | 50 |
| 10^7 | 0.016 | 0.16 | 1.6 | 16 |
| 10^8 | 0.005 | 0.05 | 0.5 | 5 |
| 4×10^8 | 0.0025 | 0.025 | 0.25 | 2.5 |

Fig. 7, Ejemplo.

En los materiales de baja pérdida $\left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \ll 1\right)$, que son los dieléctricos, el factor de atenuación (α) y la profundidad nominal de penetración (δ) se pueden simplificar según:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \left(\frac{2}{\sigma}\right) \cdot \left(\frac{\epsilon}{\mu_0}\right)^{1/2}$$

2.7. Impedancia de un medio

La relación entre el módulo del campo eléctrico y el módulo campo magnético es la impedancia característica del medio, medida en ohmios. Esta última ecuación establece que, para una onda electromagnética plana existe una relación determinada entre las intensidades de los campos eléctrico y magnético. Esta relación se la denomina *impedancia característica* o *impedancia intrínseca del medio*.

$$\eta = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} \quad \eta = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_R}{\epsilon_0 \epsilon_R}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

La impedancia intrínseca del espacio libre es:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$$

Para el caso de un dieléctrico perfecto, la impedancia resulta ser:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = 377 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} [\Omega]$$

3. REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Al alcanzar la energía electromagnética una discontinuidad parte de la energía es reflejada y parte es transmitida. Las ondas incidente y reflejada se propagan en el mismo medio. Existe otra onda, denominada transmitida o refractada, que ingresa al nuevo medio, transportando así energía en este medio. Esta onda transmitida en el nuevo medio, puede ser considerada ahora como onda incidente en tal medio, si en su camino de propagación encuentra, a su vez, una discontinuidad. La relación entre las ondas incidentes, reflejadas y transmitidas depende tanto de las propiedades electromagnéticas del medio como de los ángulos de incidencia.

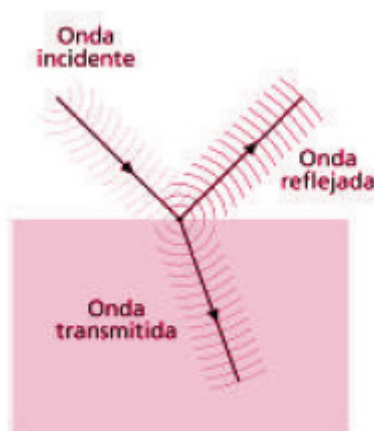


Fig. 8, Reflexión sobre una superficie dieléctrica perfecta

3.1. Ley de reflexión.

Como partida se supone una onda plana incidente con un cierto ángulo θ respecto de la normal a la superficie límite entre medios. Entonces, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, sobre la superficie límite, es decir: $\theta = \theta'$

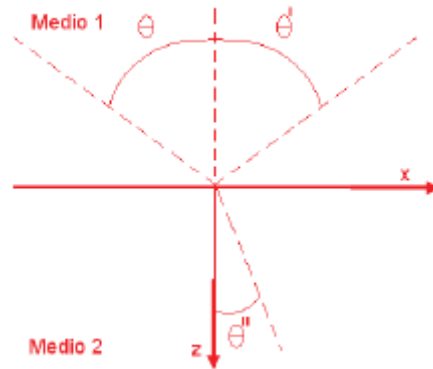


Fig. 9, Ejemplo de notación angular.

3.2. Ley de la refracción o ley de Snell-Descartes

En el diagrama izquierdo se muestra una onda que viaja por el medio 1 encuentra una discontinuidad y es transmitida al medio 2. Al penetrar el frente plano AB, que viaja con rapidez v_1 , en el medio 2, su rapidez cambia a v_2 . Por tanto mientras B recorre la distancia BC, A recorre una distancia AD por el segundo medio. Esta distancia AD será menor si $v_2 < v_1$ o mayor cuando $v_2 > v_1$ que la distancia BC recorrida en el primer medio en el mismo tiempo.

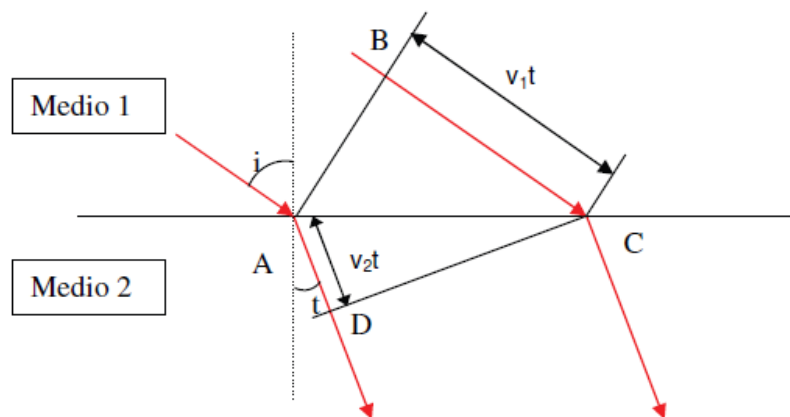


Fig. 10, Ejemplificación de la relación espacio-temporal de una onda que atraviesa dos medios.

De la figura se deduce que BC es igual a $v_1 t$, $AD = v_2$

$$\text{sen } i = \frac{BC}{AC} \quad \text{sen } t = \frac{AD}{AC}$$

$$v_2 \text{ sen } i = v_1 \text{ sen } t$$

Cada medio viene caracterizado por su índice de refracción, n , que es una relación entre la rapidez de la luz en el vacío y la rapidez de la luz en dicho medio, $n = c/v$. Por ello, el índice de refracción para el vacío o espacio libre es igual a la unidad.

$$v_2 \text{ sen } i = v_1 \text{ sen } r$$

3.3. Polarización

En función de cómo esté polarizada una onda, cada campo tendrá una dirección. A continuación veremos dos casos: polarización normal y paralela. Se pretende mostrar la reflexión y transmisión de la energía electromagnética incidente en un contacto horizontal de dos medios. En cada figura se ejemplifica la ubicación de los vectores de campo eléctrico y magnético, respecto de la superficie límite y del plano de incidencia. Los campos eléctrico y magnético de las ondas incidente, reflejada y transmitida, deben ser perpendiculares a sus direcciones de propagación, por propiedad inherente a las ondas planas. Además cada figura indica los sentidos de propagación de cada campo.

Polarización con campo eléctrico normal al plano de incidencia.

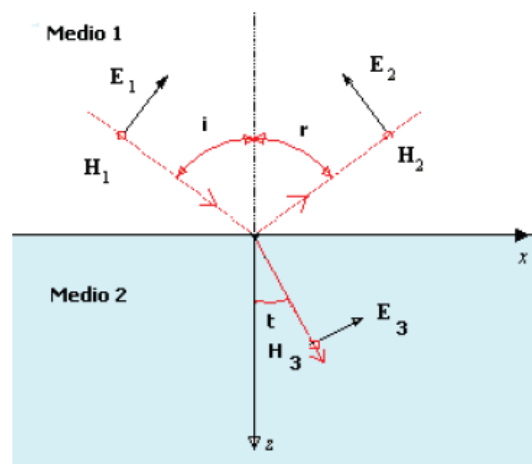


Fig. 11, *Reflexión y refracción sobre una superficie conductora perfecta, con campo eléctrico normal al plano de incidencia.*

En el esquema *i* se corresponde con el ángulo de incidencia, *r* con el de reflexión y *t* con el de transmisión o refracción.

Polarización con campo eléctrico paralelo al plano de incidencia.

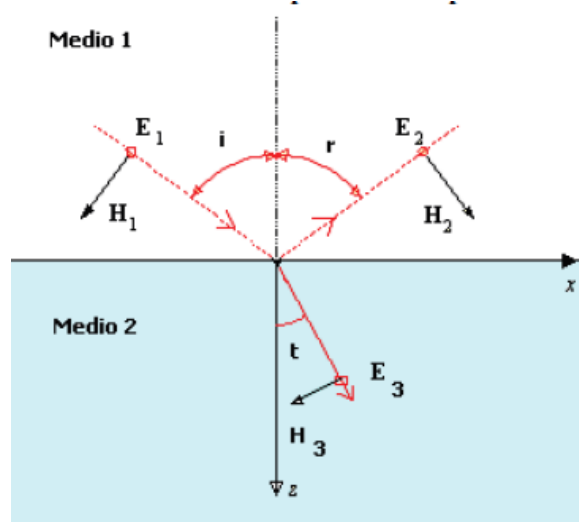


Fig. 12, Reflexión y refracción sobre una superficie conductora perfecta, con campo eléctrico paralelo al plano de incidencia.

3.4. Coeficientes de Fresnel

Con las expresiones de impedancia que antes hemos visto, se pueden calcular los coeficientes de Fresnel: de reflexión y de transmisión. El coeficiente de reflexión relaciona bien la intensidad o la amplitud de una onda reflejada respecto a la onda incidente, mientras que el coeficiente de transmisión relaciona la intensidad incidente y transmitida. Las ecuaciones de Fresnel parten de la suposición de que ambos medios son no magnéticos.

- Intensidad

- Coeficiente de reflexión
$$r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \cos t - \eta_1 \cos i}{\eta_1 \cos i + \eta_2 \cos t}$$

- Coeficiente de transmisión
$$t = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2\eta_2 \cos i}{\eta_1 \cos i + \eta_2 \cos t}$$

La intensidad de una onda electromagnética, es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico asociado a la onda.

- Amplitud

- Coeficiente de reflexión $R = \frac{(E_r)^2}{(E_i)^2} = \frac{A_r}{A_i}$

$$R = \frac{(\eta_2 \cos t - \eta_1 \cos i)^2}{(\eta_1 \cos i + \eta_2 \cos t)^2}$$

- Coeficiente de transmisión $T = \frac{(E_t)^2}{(E_i)^2} = \frac{A_t}{A_i}$

$$T = \frac{4\eta_1\eta_2 \cos i \cos t}{(\eta_1 \cos i + \eta_2 \cos t)^2}$$

Estando relacionados ambos grupos de ecuaciones por:

$$R=r^2 \quad \text{y} \quad T = t^2 \frac{\eta_1 \cos t}{\eta_2 \cos i}$$

En el caso del georradar se puede considerar que la incidencia es normal, $i=t=0$ entonces las fórmulas se simplifican según:

$$r = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2} \quad t = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2}$$

$$R = \left(\frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \right)^2 \quad T = 1 - R = \frac{4\eta_1\eta_2}{(\eta_1 + \eta_2)^2}$$

Valores de r elevados implican que se observará más fácilmente la onda reflejada pero disminuye la penetración y las reflexiones posteriores tendrán una amplitud de onda menor.

3.5. Detección de discontinuidades

Para que el georradar sea capaz de detectar el contacto entre dos capas o algún objeto enterrado se debe cumplir una serie de condicionantes:

- La potencia emitida por la antena del radar debe ser suficiente como para que la señal alcance el reflector y su reflexión realice el camino de vuelta hacia la superficie.
- El medio de propagación debe ser suficientemente resistivo como para evitar la total atenuación de la señal antes de completar su trayecto.
- El tamaño del reflector debe ser comparable con la longitud de onda de la señal emitida.
- El contraste entre las propiedades electromagnéticas del medio de propagación y el segundo medio debe ser suficiente como para que se produzca una reflexión apreciable en la antena receptora.

Estos factores no suelen plantear problemas en el caso de investigaciones arqueológicas. La superficialidad de los restos (en muchas ocasiones a profundidades inferiores a 2-3 metros) contrarresta la limitada potencia de los equipos portátiles de georradar, favoreciendo la utilización de antenas de mayor frecuencia, con la mejora en la resolución del equipo.

Una vez alcanzada la profundidad necesaria, el problema viene por el contraste entre suelos (material de depósito situado sobre los restos) y rocas (agrupación de bolos y piedras que constituyen los restos en sí), cuyos parámetros electromagnéticos se diferencien lo suficiente como para garantizar una reflexión detectable en la superficie del terreno.

4. FÉNOMENOS DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS

Los sistemas de georradar deben reducir diferentes fuentes de señales no deseadas para definir claramente los elementos que nos interesan. El origen de estas señales no deseadas es tanto interno como externo. *Signal-to-noise ratio* es la capacidad del sistema de reducir estas señales no deseadas.

• Ruido (Noise)

El ruido típicamente aparece como variaciones aleatorias en la señal recibida. Cuanta menor potencia tiene la señal que nos interesa, más difícil es distinguirla del ruido.

• Difusión (Spreading)

Se dice que el georradar emite ondas en una determinada frecuencia, pero en realidad emite una serie de ondas que sumadas componen la frecuencia dominante. Las características de la señal en el medio como la velocidad o longitud de onda dependen de la frecuencia y por tanto, cada onda tendrá un comportamiento diferente. Esto es lo que se conoce como dispersión.

• Dispersión (Scattering)

El término de *Scattering* se refiere a la dispersión irregular y difusa de la energía causada por la falta de homogeneidad del medio por el que está viajando la energía. Por tanto los fenómenos de reflexión y difracción también entrarían en este grupo. No obstante el término suele emplearse para obstáculos menores que la longitud de onda (λ), mientras que la difracción se produce cuando la onda incide sobre un elemento único como bordes o esquinas. En resumen la dispersión se produce cuando la onda encuentra una discontinuidad en las propiedades eléctricas o magnéticas del material, siendo estas discontinuidades del orden de la longitud de onda en el medio o inferior. Este fenómeno se manifiesta más en las antenas que empleas frecuencias mayores ya que la longitud de onda es en consecuencia más pequeña.

• Absorción

Se ocasiona cuando parte de la energía electromagnética se convierte en calor. Se produce por la polarización de las partículas. En general la permitividad dieléctrica y la conductividad eléctrica se expresan como números complejos que describen las características microscópicas de los materiales.

$$\begin{aligned}\sigma(\omega) &= \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) \\ \varepsilon(\omega) &= \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)\end{aligned}$$

Donde $\sigma'(\omega)$ representa la conductividad óhmica, $\sigma''(\omega)$ es la conductividad compleja que determina la amplitud de la corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo y considera el retardo en la respuesta de conducción que presenta el material en presencia de un campo eléctrico variable en el tiempo. Por otro lado, $\varepsilon'(\omega)$ produce una corriente en fase respecto al campo eléctrico externo mientras que $\varepsilon''(\omega)$ representa las pérdidas de energía debido a un retardo en la polarización.

La conductividad eléctrica y la permitividad dieléctrica están relacionadas entre sí. Por un lado, la parte real la permitividad dieléctrica y la imaginaria de la conductividad generan una corriente que varía en fase con el campo eléctrico aplicado. Mientras que por otro lado, la parte imaginaria de la constante dieléctrica y la real de la conductividad generan una corriente desfasada respecto al campo eléctrico.

En el rango de frecuencias que trabaja el georradar se produce el efecto de polarización orientacional de moléculas polares. Consiste en la orientación de la molécula de forma que su carga positiva se desplaza respecto a la negativa en la dirección del campo eléctrico aplicado. El término de moléculas polares hace referencia a que se produce en moléculas que ya presentan cierta orientación en presencia de un campo. Depende fuertemente de la temperatura del sistema.

Según la ecuación de Debye se puede obtener una descomposición en parte real e imaginaria.

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{Parte real} \qquad \varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{Parte imaginaria}$$

Donde ζ es el tiempo de relajación, que es función de la temperatura y de la viscosidad del sistema. ϵ_{∞} es el valor extremo de la permitividad a muy alta frecuencia, y ϵ_s es el valor extremo a baja frecuencia. En general los materiales del subsuelo no tienen mucha capacidad de polarización, sin embargo el agua sí que tiene esa capacidad y por ello los medios con mayor contenido de humedad tienen mayores pérdidas.

• Atenuación

La atenuación es la causa fundamental de pérdidas de energía en medios materiales. Este parámetro es función de las características electromagnéticas del medio. Si se considera que E_0 es la intensidad del campo eléctrico radiado, E_x es la intensidad a una distancia x del origen de la radiación entonces, en el caso de no considerar otras pérdidas, se puede obtener el valor de la atenuación con el dividiendo ambas intensidades.

$$\frac{E_x}{E_0} = e^{-\alpha x}$$

Ya se vio en apartados anteriores que la atenuación se puede obtener con la siguiente fórmula:

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

Otra forma de calcular la atenuación es utilizando el factor de pérdidas. Se define el factor de pérdidas como el cociente entre la conductividad entre el producto de la frecuencia angular por la constante dieléctrica.

$$P = \frac{\sigma}{\omega \epsilon} = \operatorname{tg} D$$

Siendo D el ángulo del desfase, P el factor de pérdidas, σ la conductividad efectiva, ϵ la permitividad dieléctrica efectiva, $\omega = 2\pi f$.

Finalmente la expresión de la atenuación incluyendo el factor de pérdidas queda como:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \left[\left(\frac{\mu_r \epsilon_r}{2} \right) \left\{ (1 + P^2)^{1/2} - 1 \right\} \right]^{1/2}$$

A continuación incluimos como ejemplo algunos valores de atenuación, cuyas unidades son dB/m.

| Material | α (dB/m) | Material | α (dB/m) |
|----------------|--------------------|--------------|-----------------|
| Aire | 0 | Arena húmeda | 0.03-0.3 |
| Agua dulce | 0.1 | Caliza | 0.4-1 |
| Agua destilada | 2×10^{-3} | Arcilla | 1-100 |
| Hielo | 0.01 | Dolomías | 6.8-8 |
| Granito | 0.01-1 | Esquistos | 1-100 |
| Arena seca | 0.01 | Limos | 1-100 |

Fig. 13, Valores de atenuación según materiales.

• Interferencias

Los móviles son una fuente importante de ruido. Como muestra de ello la siguiente imagen perteneciente a un estudio de *Olhoeft* al respecto.

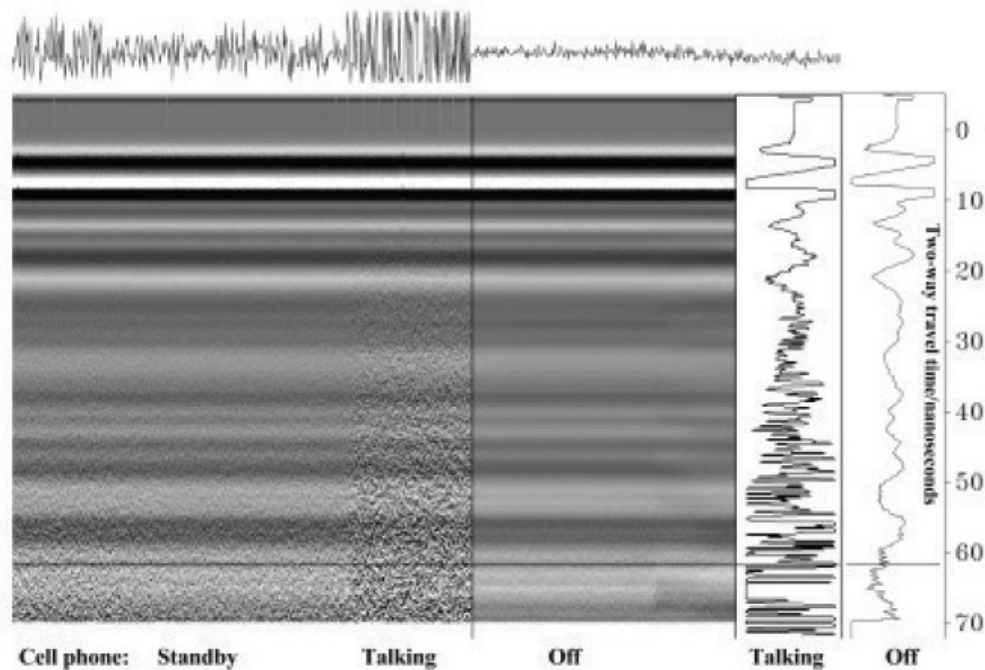


Fig. 14, Ruido causado por el uso del móvil.

Esta figura muestra el efecto de un teléfono móvil sobre una antena de 500 MHz situada sobre el suelo de hormigón de un edificio. De izquierda a derecha se dan tres situaciones diferentes: móvil encendido pero sin uso, hablando y en la parte más a la derecha el móvil está apagado. Las líneas negras indican la locación de las trazas verticales y horizontales que aparecen en los márgenes. El móvil no es interferido por la cercanía de la antena, pero si al contrario como muestra el radargrama. Este efecto puede suponer una dificultad añadida en zonas electromagnéticamente saturadas como la cercanía de una antena de telefonía.

• Resolución

La resolución de una antena es la capacidad para distinguir elementos independientes, ya sea en el tiempo o en tamaño horizontal. En otras palabras, se puede hablar de resolución vertical u horizontal que a continuación explicaremos.

• Resolución vertical

Se define como la capacidad de una antena para distinguir dos señales cercanas en el tiempo. Este parámetro depende de la frecuencia de emisión y de la duración del pulso. Cuando la duración del pulso disminuye, Δt , el ancho de banda, Δf , aumenta. Los sistemas de georradar están diseñados para conseguir anchos de banda que tengan una frecuencia próxima a la central. Cumpliéndose esto, la duración del pulso y el ancho de banda son inversamente proporcionales.

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f} \quad \Delta t \text{ duración del pulso, } \Delta f \text{ ancho de banda.}$$

Una definición de resolución viene propuesta por el espesor mínimo que es capaz de distinguir para la capa intermedia siendo el conjunto de tres capas, como se muestra en la siguiente figura:

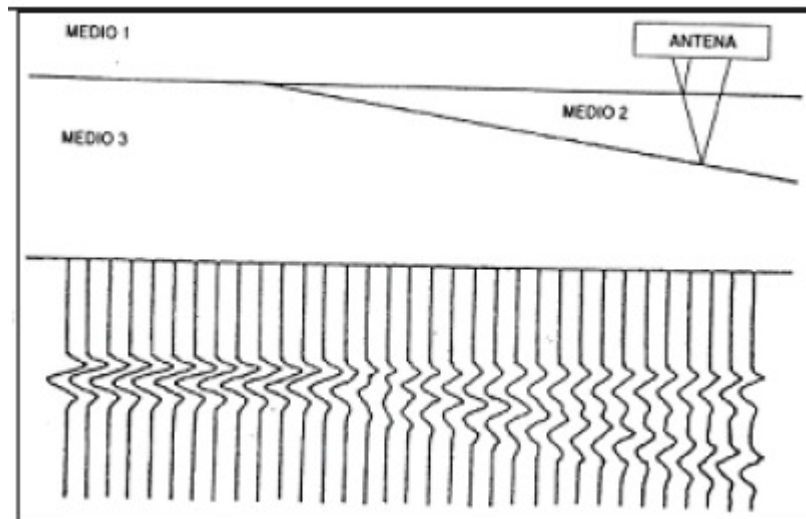


Fig. 15, En la parte superior se observa el esquema de los tres medios, mientras que en la inferior el registro obtenido en esas circunstancias.

La distancia entre los dos reflectores no es constante. A partir de cierta distancia se puede distinguir el uno del otro.

Para que el georradar pueda distinguir completamente la capa intermedia, se debe cumplir que la señal que ha incidido en la superficie que separa los medios 2 y 3 previamente se haya reflejado en su totalidad en la separación de los medios 1 y 2. La resolución vertical con esta consideración se expresa como:

$$r_v = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

Donde v es la velocidad de propagación de las ondas en el medio, y Δt la duración del pulso.

Cuando la distancia vertical (temporal) sea igual o mayor que el valor obtenido para r_v se detectan como reflectores separados.

En ciertas circunstancias es posible distinguir señales superpuestas. Esto sucede cuando la amplitud de la segunda reflexión sea mucho mayor que la primera, por ejemplo cuando el medio 3 sea un elemento metálico. Otro caso es cuando se conozca el impulso emitido y si la superposición se produce tras el primer cuarto de ciclo de la primera señal reflejada. El proceso consiste en estimar la amplitud de la señal reflejada, eliminar del registro total y así mediante un proceso de filtrado se conoce el instante de llegada de la segunda reflexión y por tanto el espesor de la capa intermedia.

De la ecuación anterior se observa que la resolución mejorará con la disminución de la duración del pulso. Como ya hemos indicado anteriormente la duración del pulso y la frecuencia son inversamente proporcionales. Por tanto, la resolución mejorará al aumentar la frecuencia, pero así también aumentará la atenuación. Por lo que hay que conseguir un equilibrio entre la profundidad de penetración y la resolución.

• Resolución horizontal

La resolución horizontal se define como la capacidad de una antena para detectar y resolver un reflector y su geometría. Depende de la velocidad de desplazamiento de la antena, número de pulsos emitidos por segundo, geometría del haz y de la profundidad del reflector.

Un criterio para calcular la resolución horizontal es considerar que un elemento de dimensiones finitas queda totalmente definido cuando el número de trazas que lo alcanzan es suficiente. Para determinar el número de trazas, nt , se propone la siguiente fórmula:

$$nt = (tr / s) \cdot \frac{2z}{v_a}$$

Donde nt es el número de trazas que alcanzan al reflector, z es la distancia entre la antena y el reflector, v_a es la velocidad de desplazamiento de la antena, tr/s es el número de trazas por segundo que se registran. Por pruebas de diferentes autores se establece que se puede resolver un objeto cuando inciden sobre él más de 20 trazas.

5. MÉTODOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los métodos de toma de datos se pueden clasificar en tres grupos: reflexión, medición de la velocidad del medio y sondeos.

5.1. Reflexión

Estos métodos se basan en la emisión durante un corto periodo de tiempo, posteriormente ésta viaja por el subsuelo hasta que encuentra discontinuidades y la energía es reflejada llegando de nuevo a la antena.

• Puntual

Esta manera de adquisición de datos se utiliza cuando no es posible el desplazamiento de las antenas, o es difícil el desplazamiento uniforme de las mismas, como puede ser el caso de zonas con gran pendiente u obstáculos. La toma de datos se realiza situando la antena en un punto de la zona de estudio. En dicho punto se transmite y recibe la energía electromagnética. Así en la vertical de dicho punto obtenemos un escáner del subsuelo. Si se trabaja con antena biestática (una antena emisora y otra receptora), se sitúan ambas a cierta distancia del punto a medir. De esta manera se recoge información de la zona central en la que produce la reflexión.

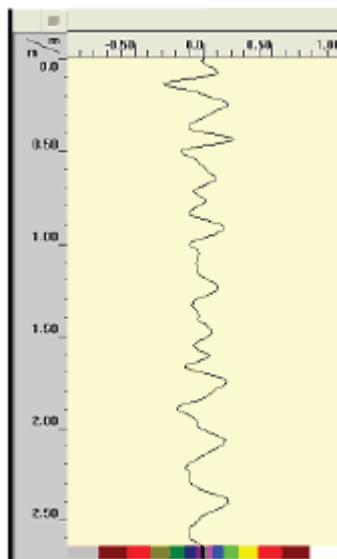


Fig. 16, Registro puntual.

• Perfiles

Para la toma de datos se desplaza la antena sobre la línea que queremos medir. En el caso de emplear una antena biestática hay que mantener la separación entre la antena emisora y receptora. Algunos equipos de georradar permiten que se acople un GPS y así referenciar el trabajo. La adquisición de datos en realidad es de tipo puntual pero dado que el georradar emite pulsos de corta duración, la información de la que disponemos se considere como continua. Pero para que se cumpla esta continuidad es importante que la toma de datos se realice con una velocidad constante o lo que es todavía más práctico, utilizar un odómetro. Se pueden tomar perfiles instalando la antena en un vehículo, adquiriendo así una gran velocidad de toma de datos.

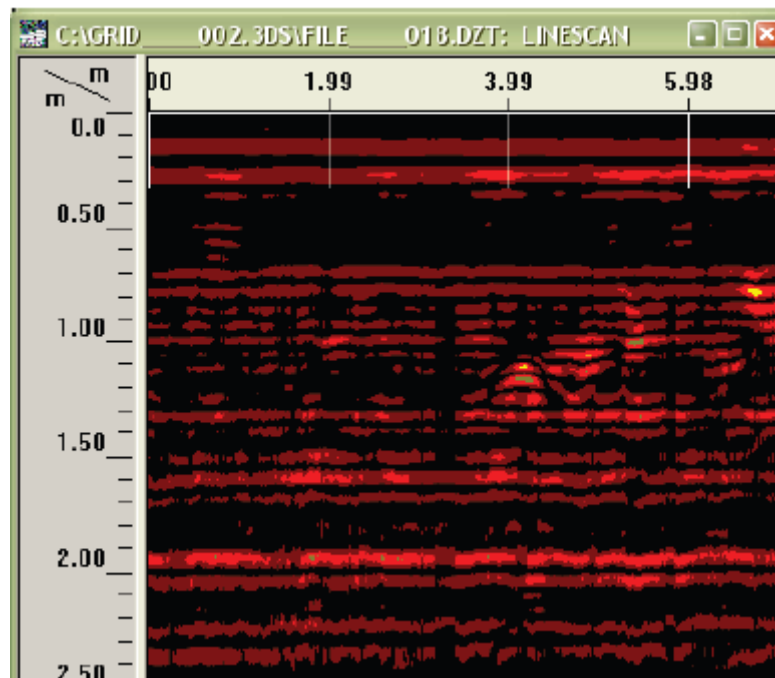


Fig. 17, Resultado de un perfil; radargrama.

• Malla tridimensional

En este método se recogen los perfiles referenciándolos entre sí para posteriormente unirlos y formar una imagen tridimensional. La malla debe cumplir ciertas características para obtener una medición satisfactoria. La primera es que se debe cruzar los elementos que buscamos con al menos tres perfiles. Dado que con tres perfiles se distingue entre un elemento lineal o puntual. Otra consideración, es que es preferible cruzar los elementos que nos interesen que pasar con el georradar sobre ellos ya que de esa forma la identificación será más sencilla.

A la hora de tomar los datos es más sencillo si se dispone de una malla para seguir el orden de los diferentes perfiles. Este método ofrece una gran versatilidad dado que si los resultados 3D no son claros se puede estudiar cada perfil por separado. La principal ventaja de este método es que facilita la interpretación. Por ello es apropiado para zonas complejas como por ejemplo en la ciudad donde están enterradas gran cantidad de tuberías y cables. Y el caso que nos ocupa, es muy interesante emplearlo en arqueología porque en muchos casos no se dispone de una información clara de lo que podemos encontrarnos en el subsuelo y con esta técnica se facilita el reconocimiento de estructuras.

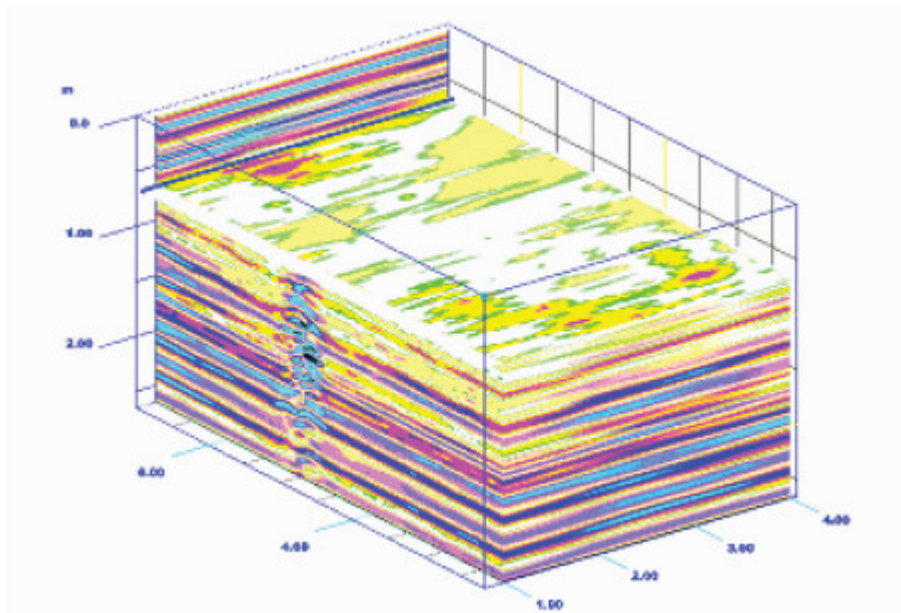


Fig. 4, Resultado de una vista tridimensional; MTS.

5.2. Medición de la velocidad del medio.

Los métodos de punto medio común (CMP) y Reflexión y refracción de gran ángulo (WARR) se emplean con antenas biestáticas, una antena emisora y otra receptora. Ambos son empleados para obtener un cálculo de la velocidad de la señal radar en función de la profundidad. Para ello varían el espaciado entre antenas en una localización fija y miden el tiempo de viaje de la señal.

• Punto medio común (CMP)

El nombre proviene del inglés *Common Mid Point CMP* (Punto Medio Común), también conocido como *Common depth point CDP* (Punto de profundidad común) o *Common Reflection Point CRP* (Punto de reflexión común).

Es un método utilizado para medir la velocidad y en consecuencia profundidades. Las antenas emisoras y receptoras son desplazadas a partir de un punto central. Si únicamente tenemos un reflector en el subsuelo obtenemos en la representación espacio-tiempo la gráfica de una hipérbola. El desplazamiento de ambas antenas respecto al punto central es el mismo y se mide dicho desplazamiento. A su vez se mide el tiempo que emplea la onda desde que es emitida hasta que regresa tras ser reflejada.

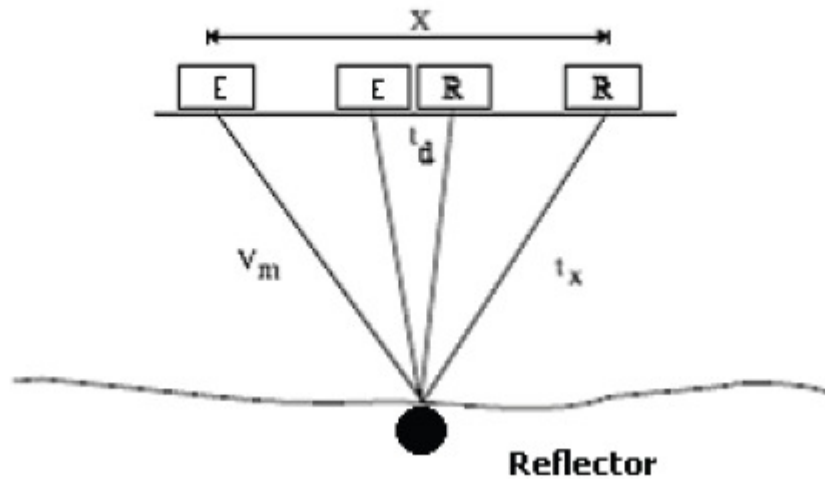


Fig. 4, Ejemplo de medición de velocidad.

La velocidad del medio es calculada por la fórmula:

$$V_m = \frac{x}{\sqrt{t_x^2 - t_d^2}}$$

Donde x , es la distancia entre la antena emisora y receptora, t_d es el tiempo de ida y vuelta inicial y t_x el tiempo de viaje de la onda cuando emisor y receptor están separados.

• Reflexión y refracción de gran ángulo (WARR)

El nombre proviene del inglés *Wide-angle radar reflection and refraction (WARR)*. Este método es similar al anterior, pero en vez de desplazar las dos antenas se deja fija una de ellas.

Los registros obtenidos mediante esta técnica contienen diferentes eventos:

- Onda aérea, se propaga directamente de una antena a otra por el aire.
- Onda directa, se propaga por el medio superior.
- Ondas reflejadas, se producirá una por cada contraste electromagnético brusco.
- Ondas críticamente refractadas, se producirá una por cada discontinuidad electromagnética cuando la velocidad de propagación sea mayor en el medio inferior que en el inferior.

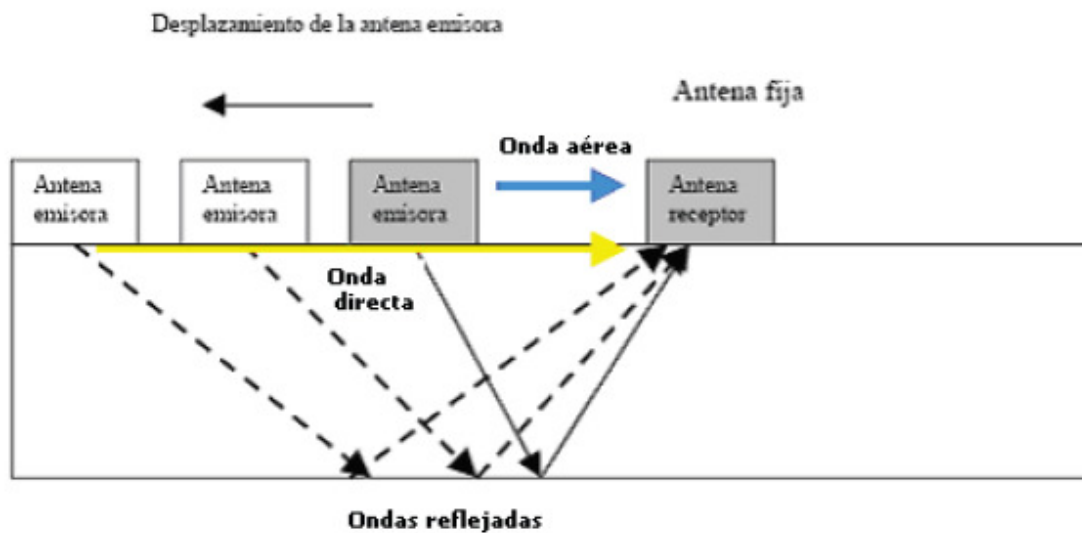


Fig. 18, Esquema método WARR

Los datos con esta técnica son procesados de forma similar a la sísmica de reflexión. Este método tiene la ventaja respecto al de CMP que solo es necesario mover una de las antenas. Sin embargo el método WARR produce un mayor error cuando la superficie de reflexión tiene cierta pendiente como se muestra en la siguiente figura. Esto es debido al cambio de profundidad del reflector durante la medición.

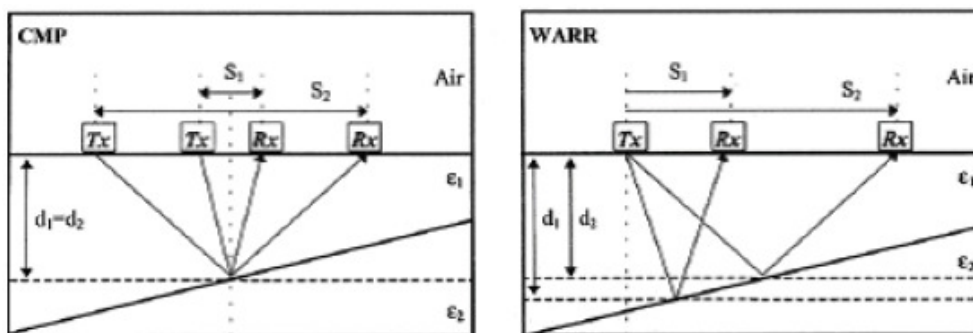


Fig. 19, Error comparativo entre método CMP y método WARR.

Por ello este método se aplica en medios donde las superficies reflectoras son aproximadamente planas y paralelas a la superficie.

5.3. Sondeos

En los sondeos es posible utilizar antenas monoestática, biestáticas o unas antenas especiales denominadas *borehole* (perforación). La posición de cada antena y la distancia que las separa son conocidas en cada momento y así es posible conocer la velocidad de propagación. En los análisis, el plano entre las dos perforaciones es dividido en un número de celdas y se mide el tiempo de propagación de la onda entre el emisor y el receptor.

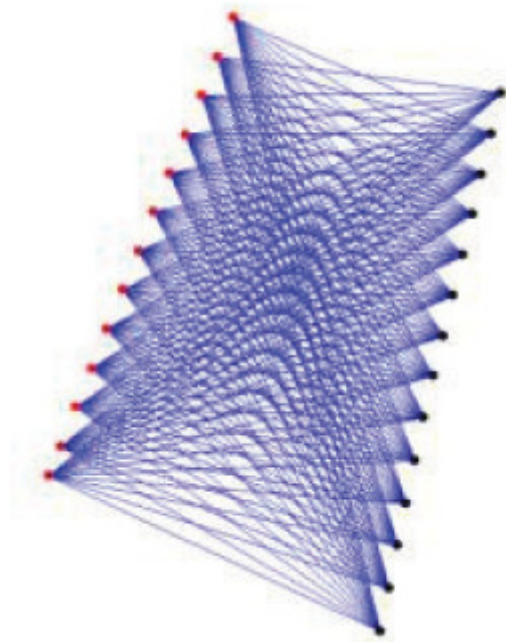


Fig. 20, Ejemplo de las diferentes mediciones que se realizan en un sondeo de 13 movimientos de antena.

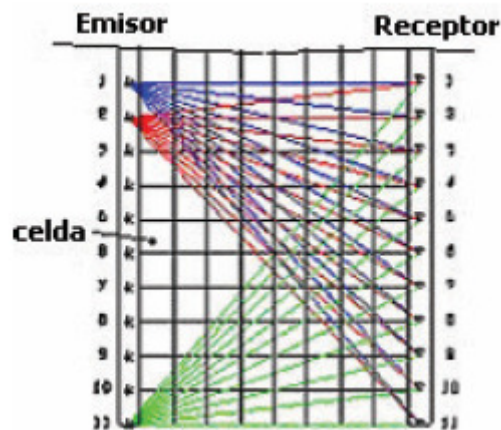


Fig. 21, División del plano en celdas

Existen diversos métodos de sondeo con georradar, a modo de ejemplo vamos a explicar brevemente dos de ellos.

• Sondeo Crosshole

Las dos antenas radar tipo sonda están situados en pozos o perforaciones separados. Una de las sondas, la emisora se deja fija mientras que la receptora se mueve y es llamada sonda escáner. Cuando un escaneado se completa, se mueve la sonda fija y se repite el proceso hasta que el transmisor recorre todo el pozo.

• Surface to borehole surveys

En este método se emplea un georradar estándar junto a un radar tipo sonda. El transmisor se sitúa en diferentes posiciones sobre la superficie mientras que la sonda se desplaza en la perforación.

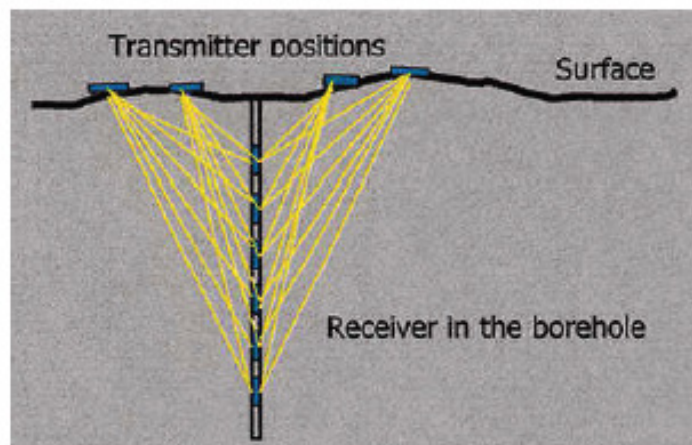


Fig. 22, Ejemplificación del método "surface to borehole surveys".

6. PROCESAMIENTO DE DATOS

En función de lo que se esté buscando y de la calidad de los registros será preciso un mayor o menor procesado de los datos. A veces los propios datos en bruto pueden servir y no es necesario un procedo de los mismos. Si los datos que se obtienen no son claros por la cantidad de ruido que contienen será necesario un mayor procesamiento.

La mayoría de las técnicas de procesado que se aplican al georradar han sido desarrolladas para otros usos como acústica o sísmica. También se aplican métodos que provienen del radar convencional con la diferencia que con el georradar los elementos que nos interesan están estáticos respecto al ruido, mientras que con el radar estos elementos están en movimiento.

A continuación daremos una breve explicación de las diferentes técnicas de procesado.

6.1 Ajuste del cero (*Offset*)

Se puede definir como el retardo de tiempo desde que es emitida la señal hasta que entra en contacto con la superficie del suelo. La corrección consiste en sincronizar el contacto de la señal en el subsuelo con el comienzo del conteo del tiempo. Este ajuste debe realizarse antes de la aplicación cualquier tipo de filtro o interpretación de datos. El sistema GSSI permite corregirlo tanto en campo como en post-proceso.

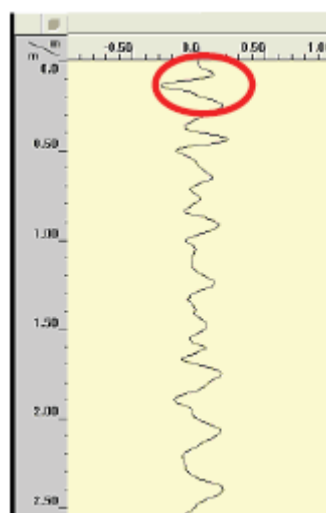


Fig. 23, Traza vista en modo osciloscopio.

En el osciloscopio se aparece remarcada la primera reflexión que se corresponde al contacto aire-suelo. En ocasiones el alto contraste entre la conductividad del aire y del suelo puede crear ondas directas y aéreas que enmascaren reflexiones importantes que son bastante someras.

6.2 Ajuste de la escala horizontal

Es una normalización de la escala horizontal para conseguir eliminar los efectos de la dificultad de desplazar la antena a una velocidad constante. Para ello es importante tomar medias intermedias de distancias y así conseguir una buena representación de la escala horizontal. Cuando se utiliza un odómetro en la medición este paso no es necesario ya que la escala se ajusta automáticamente.

6.3 Filtrado

El filtrado se aplica para eliminar ruido, siendo importante procurar no perder información. Se pueden dar diferentes clasificaciones de filtros. Hay varios tipos de filtros así como distintas clasificaciones para estos filtros.

Según a que parte del registro se aplique encontramos:

Filtros horizontales

Es un procesado digital de la señal que se aplica horizontalmente a las diferentes trazas del registro. El objetivo es eliminar el ruido de fondo de las señales. Este ruido puede estar localizado a lo largo de todo el registro o en un número limitado de trazas. Si aparece a lo largo de todo el registro puede estar debido a reverberaciones de la propia antena o a un elemento externo como la persona que transporta la antena. Los filtros se pueden aplicar a una zona concreta del registro. Se puede seleccionar las trazas a filtrar y así mismo la parte de la traza a filtrar.

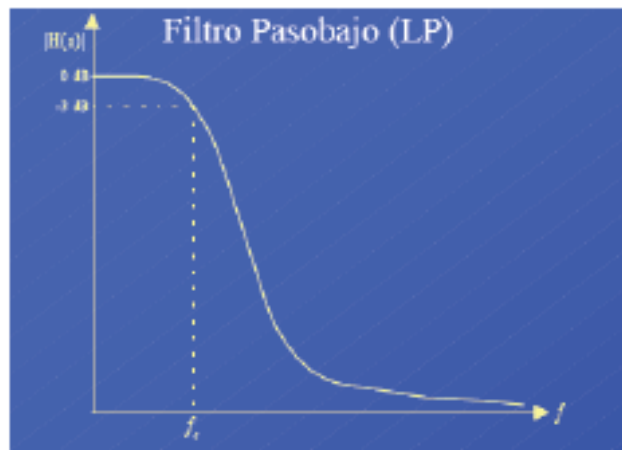
Filtros verticales

Estos filtros se aplican en la dirección vertical o lo que es lo mismo del tiempo. Con este filtro tipo de filtro se atenúa la señal en cada traza. Para seleccionar la frecuencia de corte se aplicada la transformada de Fourier y así se obtiene un registro de frecuencias. A continuación se analizan las frecuencias que introducen ruido en el registro y se filtran.

De acuerdo con la parte del espectro que dejan pasar y que atenúan hay:

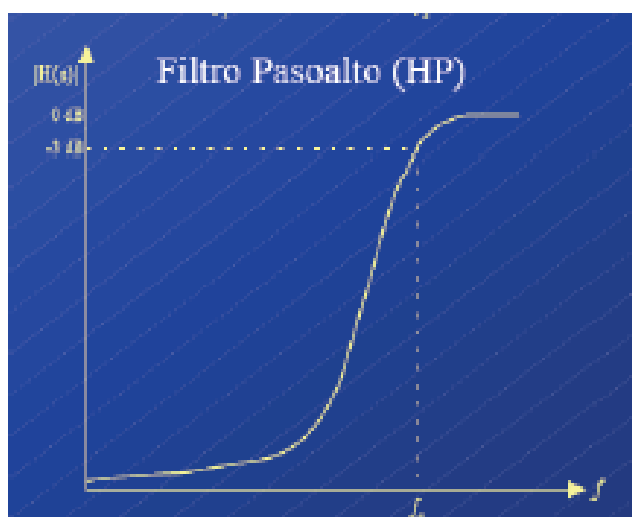
Filtros pasoalto (*High pass filter*)

Es un tipo de filtro en cuya respuesta en frecuencia se atenúan las componentes de baja frecuencia pero no las de alta frecuencia, éstas incluso pueden amplificarse.



Filtros pasobajo (*Low pass filter*)

Con este tipo de filtro se atenúan las frecuencias por debajo de cierta frecuencia límite denominado frecuencia de corte, mientras que las de alta frecuencia se mantienen.



Filtros pasabanda (Band pass filter).

En este tipo de filtro se deja pasar un determinado rango de frecuencias de una señal y se atenúa el paso del resto.

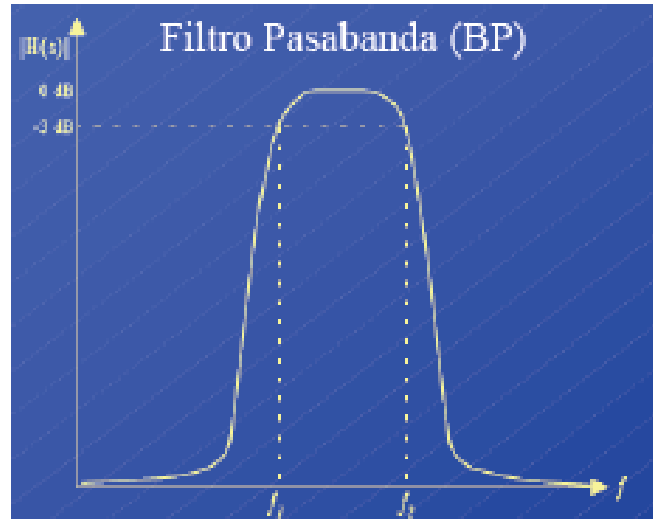


Fig. 26, Esquema de filtro de pasabanda.

Y por último de acuerdo con el tipo de respuesta ante entrada unitaria, se puede aplicar dos tipos de filtros:

Filtros de respuesta infinita (IIR)

El nombre proviene del inglés *Infinite Impulse Response (IIR)*. La respuesta al impulso es normalmente de duración infinita, de ahí su nombre. Los filtros IIR producen en general distorsión de fase, es decir la fase no es lineal con la frecuencia.

Filtros de respuesta finita (FIR)

El nombre proviene del inglés *Finite Impulse Response (FIR)*. La respuesta es de duración finita ya que si la entrada se mantiene en cero durante n periodos consecutivos, la salida será también cero. Los filtros FIR son de fase lineal. Los filtros FIR tienen la gran ventaja de que pueden diseñarse para ser de fase lineal. Por contra también tienen la desventaja de necesitar operadores más largos respecto a los filtros IIR para cumplir las mismas características. Esto se traduce en que sean más lentos. Este tipo de filtros se basan en hacer el promediado de una cierta zona del registro. Podemos elegir la forma

de esta zona, por ejemplo el programa Radan ofrece la posibilidad que estas zonas sean un triángulo o un cuadrado.

6.4 Transformada Hilbert

La transformada Hilbert es una función de procesado que determina la amplitud de los registros, fase y frecuencia instantánea de la señal recibida. La transformación Hilbert cambia la señal del georradar típicamente representada en función del tiempo en su magnitud de fase o de frecuencia. La fase puede ser en ocasiones más sensible a cambios en el subsuelo que la información geométrica, siendo más fácilmente interpretable como por ejemplo la detección de contaminantes. Expresa la relación entre la magnitud y fase de la señal o entre su parte real e imaginaria. Permite reconstruir la fase de la señal a partir de su amplitud y viceversa. La visualización de la amplitud es útil para ver la energía reflejada de un objeto o cambio de medio. Por su lado, la frecuencia instantánea indica como la tierra está filtrando la señal del georradar.

En conclusión la transformada Hilbert se utiliza para visualizar cambios sutiles en la tierra, es otra manera de ver los datos que nos puede ayudar en la interpretación. El programa Radan pide los siguientes parámetros para realizar la transformada:

- Traza inicio
- Traza final
- Transformar a... (se puede elegir entre magnitud, fase o frecuencia)
- Escala de frecuencias (en ciclos/traza)

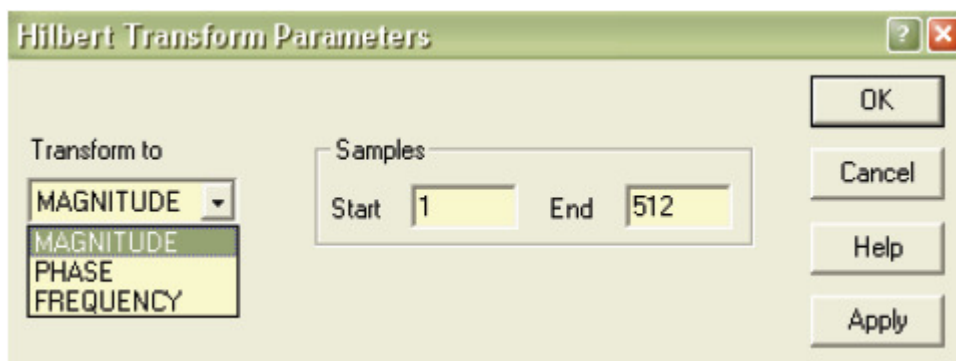


Fig. 27, Ejemplo de transformada de Hilbert en Radan.

6.5 Ganancias

Son necesarias para compensar las variaciones de amplitud en las señales. Las primeras señales que llegan tienen mayor amplitud que las posteriores porque su recorrido ha sido menor. La disminución de la amplitud de la señal está relacionada con la dispersión y la atenuación. Se pueden aplicar diversas ganancias en función del tiempo para un mejor equilibrio de la señal.

Una función importante de las ganancias es evitar el efecto “*clipping*”. Éste sucede cuando la amplitud de una reflexión es mayor del máximo valor que se puede registrar. Entonces, el sistema no toma en consideración el verdadero valor de la reflexión y lo que hace es registrar el valor máximo que puede. Se reconoce porque en el osciloscopio se ve que la señal se sale de la escala.

Es importante ajustar la ganancia para todo el entorno, ya que si se realiza en un solo punto se corre el riesgo que se produzca el efecto “*clipping*” unos metros más adelante. Para ello se puede realizar un perfil de prueba y mover la antena por la zona de estudio para ver que las ganancias estén bien ajustadas para todos los puntos.

Existen diferentes métodos para aplicar ganancias. Uno de ellos consiste en multiplicar cada valor de la traza por un factor en función de la profundidad de la señal.

$$t'_i = a \cdot z_i \cdot t_i$$

Donde,

t'_i = Amplitud de la traza después de aplicar la ganancia.

a = Factor de ganancia.

z_i = Profundidad de cada punto de la traza.

t_i = Amplitud original de la traza.

Sin embargo éste modelo tiende a dar resultados menos realistas, por ello se suele emplear un modelo de ajuste exponencial para corregir las pérdidas. Según la siguiente fórmula:

$$t'_i = t_i \cdot e^{az_i}$$

6.6 Migración

La migración es un procedimiento para transformar los registros del georradar a datos con las heterogeneidades del subsuelo localizadas en su posición correcta. También se utiliza para colapsar las hipérbolas de las reflexiones.

Cuando un objeto se encuentra delante del georradar la señal tarda más tiempo en volver a la antena que cuando el objeto enterrado está sobre su vertical, según se aleja el georradar este tiempo de viaje vuelve a aumentar. Este efecto causa que en la imagen se dibuje una hipérbola. El esquema de este suceso se muestra en la siguiente imagen:

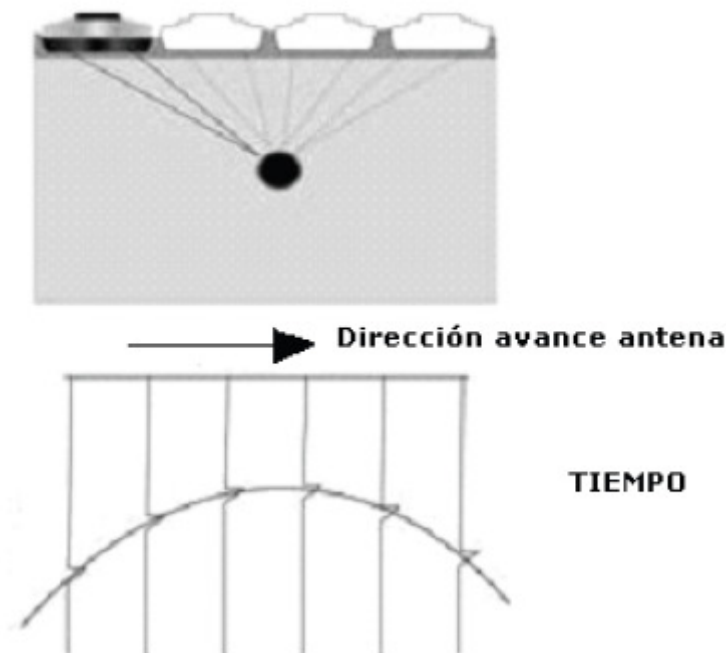


Fig. 28, Esquema de desplazamiento de antena e imagen que se forma, suponiendo que el medio es homogéneo y con un elemento extraño enterrado.

La hipérbola en realidad puede representar objetos como tuberías, cables o muros siempre que se pase sobre ellos transversalmente. Si la antena emitiera el haz de una forma vertical no encontraríamos este efecto, pero al emitir de una forma cónica aparecen las características hipérbolas. El programa Radan trabaja con dos métodos de migración diferentes: suma hiperbólica y Kirchhoff.

Suma hipérbolica. Trabaja sumando a lo largo de la hipérbola y poniendo el resultado promedio en el ápice de la hipérbola. El mismo proceso se repite en cada hipérbola

Kirchhoff es un método de migración que utiliza las ecuaciones de la hipérbola. La operación consiste en sumar las amplitudes de los registros de la hipérbola y situar el resultado en el vértice de la misma. A su vez se tienen en cuenta otros factores como la fase. Este método es más preciso que el anterior y así mismo es más lento.

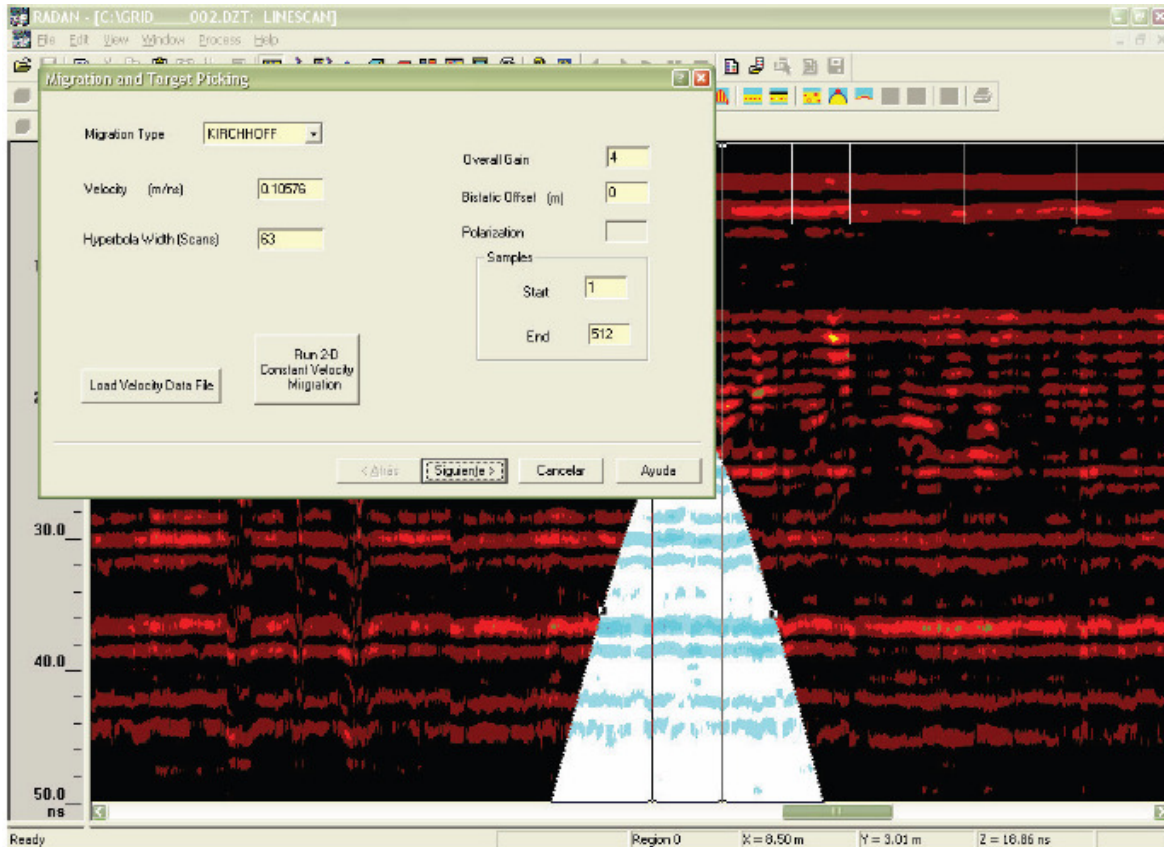


Fig. 29, Vista de la ventana migración del programa Radan.

Los dos métodos requieren que la amplitud (número de trazas involucradas) y la velocidad relativa sean especificadas. Se puede elegir una velocidad constante o variable (indicado para cuando el medio no es homogéneo). Si la velocidad que introducimos es correcta las hipérbolas colapsarán en un punto. Cuando hemos introducido una velocidad demasiado alta, sobremigrado, las hipérbolas aparecerán invertidas y si por el contrario la velocidad es demasiado baja, las hipérbolas aparecerán suavizadas pero sin colapsar. Por esto es probable que haya que hacer varias pruebas para conseguir una migración correcta. Una vez que se tiene el registro migrado es difícil de interpretar ya que las hipérbolas, que suelen indicar la presencia de un objeto puntual, han desaparecido.

La migración tiene su mayor utilidad cuando hay muchas hipérbolas que incluso se superponen ocultando otros elementos.

6.7 Deconvolución

Esta técnica fue desarrollada por primera vez para la sísmica. Es un proceso para invertir los efectos de la convolución de los datos registrados. Se utiliza para procesar tanto señales como imágenes. El objetivo es encontrar una solución de una ecuación de convolución de la forma $f * g = h$. Donde h es la señal registrada. f es la señal que se quiere recuperar pero que antes había sido convolucionada con otra señal g . En el caso del georradar esto se refiere a que la señal que registramos no es verdaderamente como la que emitimos debido a que la Tierra actúa como un filtro, quitando la información de las altas frecuencias de los datos. Por tanto lo que hace es restaurar la forma de la onda antes de dicho filtrado. Es un método diseñado para atenuar las respuestas múltiples para así mejorar el reconocimiento y resolución de las reflexiones.

Se emplea cuando ha múltiples reflexiones superpuestas, lo que hace es limpiar el registro y dejar únicamente las reflexiones primarias. El programa Radan lo que hace es lo que se llama una deconvolución predictiva. Tiene como objetivo la eliminación de efectos múltiples, que se pueden eliminar cuando se conoce el tiempo de llegada de las reflexiones primarias que provienen de los elementos reflectores.

Los parámetros que hay que seleccionar longitud del operador (tamaño del filtrado utilizado expresado en número de trazas), predicción del retardo, preblanqueo (ruido blanco que se añade). Así mismo se puede aplicar una ganancia debido a que la deconvolución atenúa los datos. Por último se indica la traza inicial y final.

6.8 Determinación de la velocidad del radar

Para transformar los radargramas de tiempo (ns) en distancias y así determinar la profundidad se tiene que calcular la velocidad de las ondas al atravesar los diferentes estratos.

- A partir del valor de la permitividad

Para medios homogéneos e isotrópicos, la velocidad de propagación se puede calcular de:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Y la profundidad del reflector será:

$$z = v \cdot \frac{t}{2}$$

Siendo t el tiempo que tarda la onda desde que es emitida hasta que regresa.

Si el medio por el que viaja la onda no es homogéneo, habría que calcular la velocidad de propagación para cada medio. El valor de la permitividad se puede conseguir a partir de diferentes tablas que han obtenido dichos datos de ensayos experimentales. En la página siguiente incluimos una tabla resumen de características de diferentes materiales, entre esas características está la permitividad.

- Hipérbola

Se puede obtener la velocidad a partir de la gráfica de una hipérbola a partir de la siguiente ecuación, donde el punto 0 es el ápice de la hipérbola. Lo que hay que hacer es medir sobre una gráfica la profundidad (en tiempo) y la distancia sobre el eje (x).

$$v = 2 \sqrt{\frac{x_{n-1}^2 - x_0^2}{t_{n-1}^2 - t_0^2}}$$

Y una vez que se tiene la velocidad, la profundidad del reflector será:

$$z = v \cdot \frac{t_0}{2}$$

- A partir de una medida directa

Si se dispone de una perforación, se introduce un objeto que actúe como reflector. Entonces se mide la profundidad de dicho reflector y a partir de ahí se calibra la velocidad de propagación. También se puede calibrar si se conoce la profundidad de un objeto enterrado que refleje la señal.

- A partir de punto medio común (CMP) o Reflexión y refracción de gran ángulo (WARR)

Se obtiene derivando la velocidad de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{2}{v} \sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + h^2}$$

Ecuación de una hipérbola centrada en el punto medio entre las dos antenas. Donde v es la velocidad de la onda en el medio, t es el tiempo de propagación, h la profundidad a la que se encuentra el reflector y x es la distancia horizontal entre el emisor y el receptor.

| Material | ϵ_r | σ (S/m) | Velocidad (mm/ns) |
|----------------|--------------|---------------------|-------------------|
| Aire | 1 | 0 | 300 |
| Agua dulce | 81 | $10^{-4} - 10^{-2}$ | 33 |
| Agua salada | 81 | 4 | 33 |
| Hielo | 3-4 | $10^{-6} - 10^{-4}$ | 160 |
| Granito seco | 5-6 | 10^{-8} | 123-134 |
| Granito húmedo | 7-8 | 10^{-3} | 106-113 |
| Arena seca | 2-3 | $10^{-4} - 10^{-3}$ | 120-170 |
| Arena húmeda | 20-30 | $10^{-3} - 10^{-2}$ | 55-60 |
| Arcilla húmeda | 8-15 | $10^{-1} - 1$ | 86-110 |
| Arcilla seca | 2-3 | $10^{-4} - 10^{-3}$ | 173 |
| Dolomías | 6.8-8 | | 106-115 |
| Esquistos | 7 | | 113 |
| Limo | 5-30 | | 70 |
| Hormigón | 5-8 | $10^{-3} - 10^{-2}$ | 55-120 |
| PVC | 3 | - | 173 |
| Asfalto | 3-8 | $10^{-3} - 10^{-4}$ | 134-173 |

Fig. 30, Características de diferentes materiales.

7. INSTRUMENTACIÓN

El equipo empleado ha sido de la empresa *Geophysical Survey Systems Inc (GSSI)*. El modelo es *TerraSIRch SIR System-3000*. Como curiosidad SIR es el acrónimo de Subsurface Interface Radar. En la siguiente imagen se ven los diferentes componentes del georradar que a continuación explicaremos.

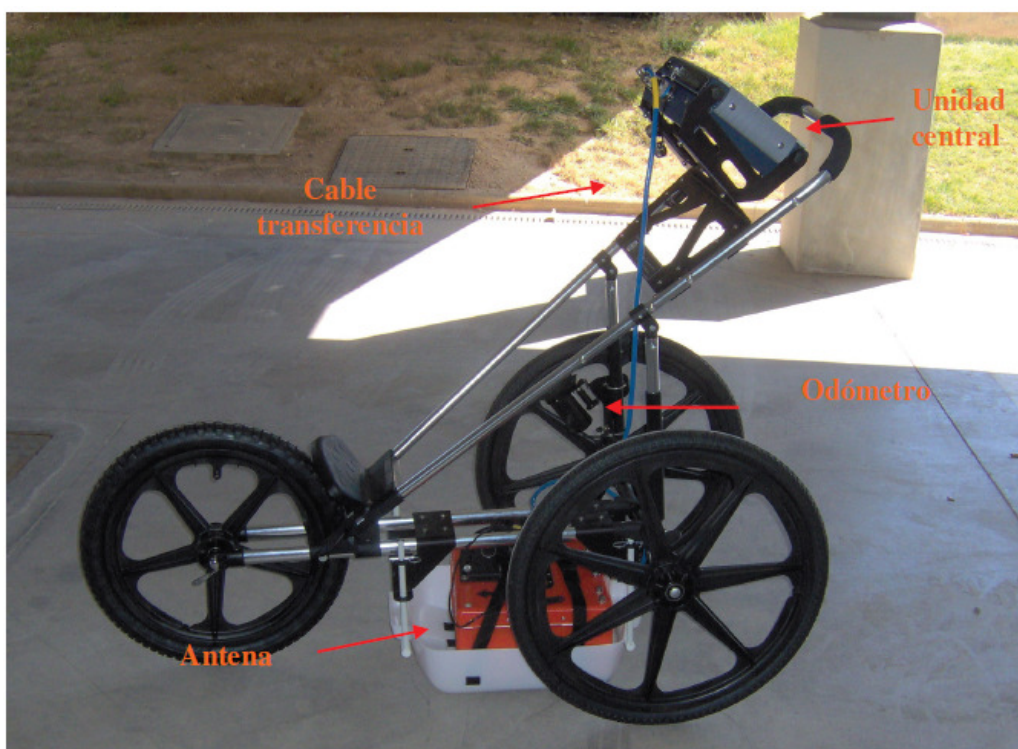


Fig. 31, Georradar SIR-3000 con sus diferentes componentes.

7.1. Unidad central

Su función es coordinar y controlar y los sistemas electrónicos de la antena y de los demás accesorios.

En algunos modelos la unidad central consiste en un ordenador portátil al que se le carga un programa de control de las antenas y procesado de la señal. El modelo SIR-3000 en concreto, lleva un procesador incorporado que además de registrar la señal, permite el cambio de las tablas de color, aplicación de filtros, ajuste del offset, ganancias y cambiar la constante dieléctrica.

Los filtros que se pueden aplicar in-situ son:

- Verticales: Pasa-bajo, Pasa-alto, IIR y FIR

- Horizontales: Superposición de trazas (*Stacking*) y eliminación del ruido de fondo (*Background Removal*).



Fig. 32, Unidad central SIR-3000.

Además hay que definir una serie de parámetros que definen un radargrama que explicamos a continuación.

Rango (*Range*)

Se define como la longitud temporal que reconoce el sistema. Está medido en tiempos dobles de propagación. Las reflexiones que superan dicho rango no se registran. Puesto que es una medida temporal sus unidades son nanosegundos (ns). El georradar SIR-3000 permite establecer un valor para el rango entre 5 y 8000 ns.

Puntos por traza (*Samples per Scan*)

Se define como los puntos utilizados para representar cada traza. Un punto en el sistema del georradar está definido por el tiempo y la amplitud de la reflexión. El modelo de georradar que hemos utilizado permite elegir entre valores de 128, 256, 512, 1024 2048, 4096 o 8192 puntos por traza. Para obtener un representación óptima de la traza, cuando aumentemos el rango también debemos aumentar el número de puntos por traza. Un valor demasiado bajo de puntos por traza puede producir que la traza no contenga

suficiente información y se dibuje una curva no suavizada y a su vez puede hacer que se pierda información. Por otro lado valores altos producirán ficheros más grandes y por lo tanto se necesitará más memoria para guardarlos y más tiempo para procesarlo.

Velocidad de transmisión (*T_Rate*) y velocidad de registro (*Rate*)

El georradar SIR-3000 permite transmitir a 100 KHz lo que equivale a 100.000 pulsos por segundo. La velocidad de registro es el número de trazas que el sistema registrará por segundo. Los radares no pueden registrar cada traza que se emite debido a la alta velocidad de propagación. Lo que se hace es reconstruir una traza a partir de varias trazas emitidas. El valor de la velocidad de registro debe seleccionarse en función de la resolución horizontal que estemos buscando. A su vez, si la antena se desplaza con un vehículo la velocidad de registro debe ser lógicamente mayor que si ésta se desplaza andando. Usualmente si se está empleando un odómetro se debe poner un valor alto para este parámetro.

Trazas/unidad de longitud

Este parámetro se utiliza si se está trabajando con un odómetro. Con un espaciado pequeño se consigue mayor resolución y con ello archivos más grandes.

Otra de las funciones de la unidad central es permitir la visualización de los registros. Esto es importante para hacer una estimación de que sitios son más interesantes para situar los perfiles y para realizar los diferentes ajustes como ganancias, corrección del cero etc.



Fig. 33, Vista del programa. La primera zona marcada es una visualización de amplitudes, la segunda zona remarcada es el osciloscopio (la línea roja indica las ganancias).

Los datos pueden visualizarse en modo *Linescan* u osciloscopio. La vista *Linescans* se produce situando diferentes las trazas adyacentes próximas entre sí y asignándoles un patrón de colores en función de su amplitud. Mientras que en el modo osciloscopio es utilizado para ver la forma de una onda electromagnética.

Para facilitar la elección de los parámetros se pueden cargar ajustes predefinidos y posteriormente modificarlo para nuestras necesidades particulares. En el caso de emplear la antena de 400 MHz los parámetros son los siguientes:

Antena 400 MHz (Model 5103)

Rango (*Range*): 50 ns

Puntos por traza (*Samples per Scan*): 512

Resolución: 16 bits

Número de puntos de ganancia: 5

Filtro Vertical pasa-alto (*High Pass Filter*): 100 MHz

Filtro Vertical pasa-bajo (*Low Pass Filter*): 800 MHz

Velocidad de registro (*Scans per second*): 64

Velocidad de transmisión (*T. Rate*): 100 KHz

Unidad central SIR-3000

Según el fabricante las características de la unidad central SIR-3000 son:

Almacenamiento de datos. Memoria interna Compact Flash de 1 gigabyte

Memorias compact flash externas

Número de canales. 1

Procesador. 32-bit Intel StrongArm RISC, 206 MHz

Pantalla. TFT de 8.4 pulgadas, resolución 800 x 600 y 64K colores

Entradas y salidas.

Antena

Energía corriente continua.

Ethernet I/O

Puerto Serie I/O (RS232). Sirve para conectar un GPS.

Memoria Compact Flash

USB maestro

USB esclavo

Dimensiones 31.5 cm × 22 cm × 10.5 cm

Peso 4.1kg (con la batería incluida)

Temperatura. Recomienda que se utilice entre -10°C y 40°C

Tasa de transferencia 100KHz

7.2. Antenas

Se encargan de generar los impulsos que son enviados al interior del terreno, y a su vez reciben la energía una vez que ha sido reflejada en las discontinuidades del subsuelo. La antena utilizada para este trabajo ha sido el modelo 5103 de la casa GSSI de frecuencia 400 MHz.

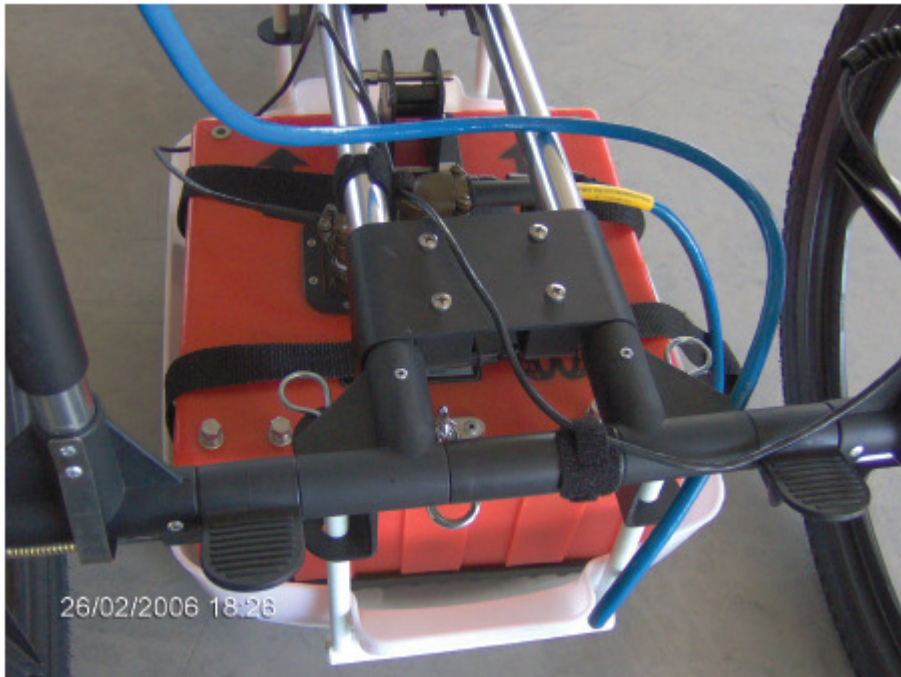


Fig. 34, Antena monoestática apantallada.

7.2.1. Parámetros fundamentales de la antena

Una antena viene definida por sus parámetros fundamentales. Las antenas se estudian principalmente en telecomunicaciones, pero al ser la antena la parte fundamental de un radar del subsuelo explicaremos brevemente los parámetros: densidad de potencia radiada, directividad, ganancia, ecuación de transmisión y los diagramas de radiación.

• Densidad de potencia radiada

La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección. Las unidades son vatios por metro cuadrado. Se puede calcular a partir de las dos componentes del campo eléctrico como,

$$\bar{P}(\theta, \phi) = \frac{E_{\theta}^2 + E_{\phi}^2}{\eta}$$

Siendo η es la impedancia del medio que ya definimos anteriormente.

La potencia total radiada se obtiene como la integral de la densidad de potencia en una esfera que encierre a la antena.

$$W_r = \iint \bar{P}(\theta, \phi) \cdot d\bar{s}$$

• Directividad

También suele llamarse direccionalidad. Se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia, y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, a igualdad de potencia total radiada.

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\left(\frac{W_r}{4\pi \cdot r^2} \right)}$$

Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación

$$D(\theta, \phi) = \frac{P_{MAX.}}{\left(\frac{W_r}{4\pi \cdot r^2} \right)}$$

La directividad de la antena en cualquier dirección se puede obtener a partir del diagrama de radiación y el valor de la directividad en la dirección de máxima radiación. Para antenas directivas, con un solo lóbulo principal y lóbulos secundarios de menor importancia, se puede obtener una directividad aproximada considerando que se produce radiación uniforme en el ángulo sólido definido a partir de los anchos de haz a situados a 3dB en los dos planos principales del diagrama de radiación.

• Ganancia

La ganancia de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena. Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la ganancia se refiere a la dirección de máxima radiación.

$$G = \frac{\left(\frac{P_{\max}}{\Omega} \right)}{\left(\frac{P_{\text{total}}}{4\pi} \right)}$$

Ω es la unidad del ángulo sólido.

En el caso de antenas que presenten cierta direccionalidad la ganancia queda como:

$$G_d = \frac{\left(\frac{P_{\max \text{ entregada}}}{\Omega} \right)}{\left(\frac{P_{\text{total}}}{4\pi} \right)}$$

G_d es la ganancia de una antena direccional.

En la definición de directividad se habla de potencia radiada por la antena, mientras que en la definición de ganancia se habla de potencia entregada a la antena. La diferencia entre ambas potencias es la potencia disipada por la antena, debida a pérdidas óhmicas.

La eficiencia se puede definir como la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma. La eficiencia es un número comprendido entre 0 y 1. La relación entre la ganancia y la directividad se denomina eficiencia de la antena, y permite estudiar las pérdidas de potencia en su interior.

$$G(\theta, \phi) = D(\theta, \phi)\eta$$

Si una antena no tuviera pérdidas óhmicas, la directividad y la ganancia serían iguales. Pero en realidad la ganancia es menor que la directividad a consecuencia de pérdidas producidas en el interior de la antena.

• Ecuación de transmisión

La ecuación de transmisión permite obtener un balance de potencias entre la potencia radiada por una antena emisora y la recibida por una antena receptora. Si las antenas transmisora y receptora están orientadas en la dirección de los máximos de los diagramas de radiación, la expresión de la densidad de potencia es:

$$W_r = \frac{W_t}{4\pi r^2} DA_{ef}$$

Donde A_{ef} es el área efectiva de la antena, D la directividad, W la potencia de la antena transmisora o receptora según indique el subíndice.

La relación entre el área efectiva y la directividad de cualquier antena, es:

$$A_{ef} = D \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

La ecuación de transmisión queda finalmente como

$$\frac{W_r}{W_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2 D_t D_r$$

Esta expresión indica la pérdida de potencia que ha habido desde que ha sido radiada la energía por la antena transmisora hasta que ha sido recibida por una segunda antena receptora.

• Diagramas de radiación

El diagrama de radiación de una antena se define como la representación gráfica de las características de radiación en función de la dirección angular. Habitualmente se utiliza habitualmente un sistema de coordenadas esférico. Las tres variables de un sistema esférico son (r , θ , Φ). Aunque En muchas ocasiones es suficiente considerar un corte del diagrama tridimensional, representando el diagrama de radiación en dos dimensiones.

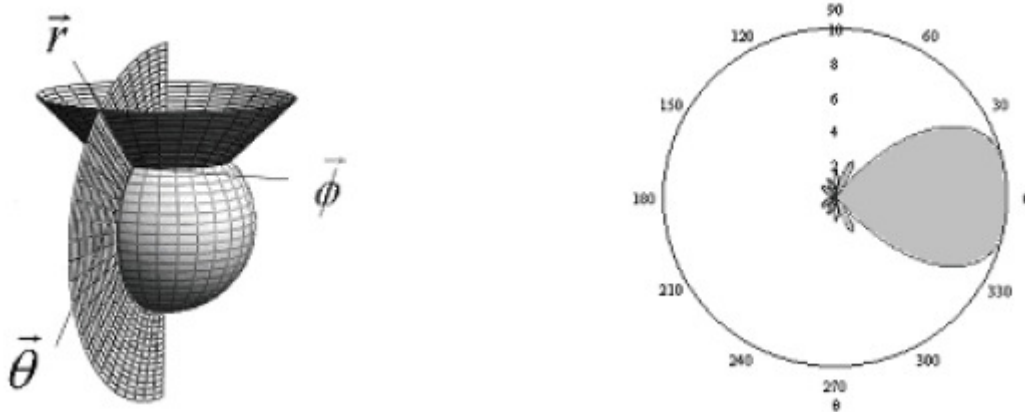


Fig. 4. Sistema de coordenadas esférico (izquierda). Corte bidimensional (derecha).

Estos diagramas indican en qué dirección del espacio la antena es más sensible, así como el área efectiva que podrá ser detectada por la energía radiada por la antena. Se denomina haz principal o lóbulo principal la zona en la que la radiación es máxima, las zonas de alrededor se denominan lóbulos secundarios porque presentan una amplitud de radiación menor.

El modelo de radiación de una antena cambia en función de las propiedades electromagnéticas de los medios en contacto. Si aumenta la permitividad dieléctrica efectiva de un medio, la direccionalidad también aumenta. En consecuencia, la anchura del lóbulo es menor y se propaga más energía en la dirección deseada.

7.2.2. Tipos de Antenas

Se puede hacer una clasificación de las antenas en isotrópicas y direccionales. Las isotrópicas son aquellas que radian la energía en todas las direcciones del espacio por igual. Las antenas direccionales tienen una dirección privilegiada.

Otra clasificación puede venir dada por su arquitectura:

- **Antenas de apertura y reflectores**

En este caso la onda radiada se genera gracias a una disposición de campos que se excitan mediante guías de ondas. Se emplea en telecomunicaciones, principalmente con un reflector parabólico.

- **Agrupaciones de antenas**

Con diversas antenas y de cualquier se hacen diferentes combinaciones. Se utilizan cuando no se puede conseguir un tipo de radiación con una única antena.

- **Antenas alámbricas**

Construidas mediante hilos conductores que generan las corrientes que dan lugar a los campos radiados. La disposición y geometría de los hilos es diversa, pero las de georradar suelen tener disposición de espira que trabajan como dipolos.

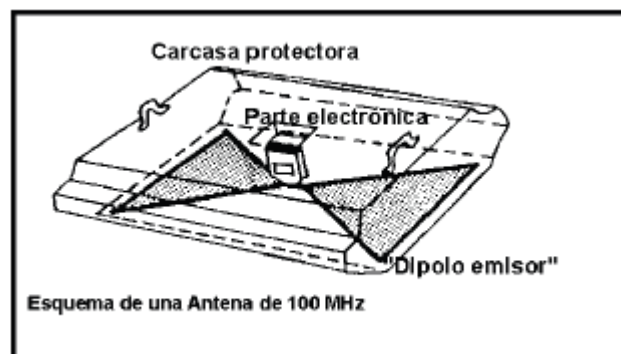


Fig. 35, Imagen de Hänninen et al. 1992

Las antenas formadas por dipolos de media onda, aquellos en que la distancia máxima entre puntos del dipolo es aproximadamente igual a la mitad de la longitud de onda de la frecuencia resonante, radian un campo electromagnético máximo en la dirección perpendicular al dipolo y nulo a lo largo de su eje, por lo que habitualmente constituyen un buen modelo para antenas de georradar.

Los dipolos emisor y receptor pueden localizarse en una misma antena (antenas monoestáticas) o en dos antenas separadas (antenas biestáticas). Los dipolos utilizados como generadores y receptores del campo deben estar orientados en paralelo entre sí porque así el circuito receptor detecta las reflexiones que tengan la misma dirección de polarización que el impulso emitido.

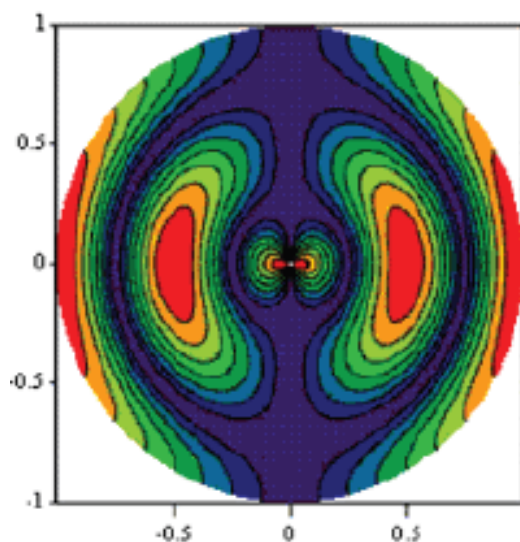


Fig. 36, Campo radiado por un dipolo.

7.3. Elementos Auxiliares

Odómetro

(Del griego *óδός*, camino y metro, medir. Que mide el camino). Es un dispositivo que indica la distancia recorrida. Se conectan a las antenas. Como la propia definición indica, sirven para determinar la posición de los diferentes puntos de los perfiles.



Fig. 37, Imagen del odómetro.

Carro

Para el transporte de la antena y unidad central. Existen muchos modelos en función del tipo de antena que se esté empleando. El carro de la fotografía ha sido fabricado por la propia empresa que proporciona el georradar (GSSI).



Fig. 38, Imagen del carro.

8. HISTORIA DEL PALACIO DEL REAL: DEL s. X AL s. XIX

8.1 Introducción

El Palacio del Real fue uno de los edificios emblemáticos de la ciudad de Valencia, especialmente durante la época medieval y moderna en la cual bajo la Corona de Aragón se erigió el Reino de Valencia. Tras su destrucción en 1810 cayó lentamente en el olvido de la sociedad valenciana, hasta que a finales del siglo pasado el hallazgo arqueológico de parte de sus restos a través de unas obras rutinarias en la calle General Elio lo pusieron de nuevo en el foco de la actualidad social, arqueológica e investigadora. Posteriormente, en el año 2004, se descubrieron en un archivo francés los planos pormenorizados del palacio llevados a cabo por el ingeniero militar Manuel Cavallero pocos años antes de su destrucción, concretamente en 1802. Este nuevo documento avivó las investigaciones e inversiones sobre el Palacio del Real siendo objeto de reconstrucciones virtuales, libros específicos y excavaciones arqueológicas.



Fig. 39, Reconstrucción virtual del palacio vista desde el puente del Real

El Palacio del Real fue residencia de los reyes durante largas temporadas en época medieval, y de los virreyes y capitanes generales de forma casi permanente en época

moderna, aunque su nombre no se debe exactamente a esta circunstancia ya que su nombre proviene del árabe "rahal" (casa de campo) o del castellanizado "Reial". De ahí la gran importancia de este edificio que también gozaba de una arquitectura de gran valor, unas dimensiones muy notables y unos jardines dignos de admiración. Además fue símbolo de un sistema de gobierno autónomo durante un largo periodo de tiempo; el Reino de Valencia. Para ilustrar la grandeza del palacio y el sentimiento que desprendía a gran parte de la sociedad valenciana, basta citar al magnífico escritor valenciano Teodoro Llorente, que en su libro *Valencia y sus monumentos* de 1889, empezó su escrito sobre el Palacio del Real diciendo:

“¿Qué fue de ti, Palacio del real? ¿Qué te hiciste, noble mansión de los monarcas valencianos, centro oficial y monumento simbólico de nuestro antiguo y glorioso reino? De tu soberbia fábrica no ha quedado piedra sobre piedra: desapareció todo, hasta los escombros esparcidos por la destructora piqueta de los hombres, como desaparecieron también, al golpe de la piqueta de los siglos, las instituciones que representabas, la autonomía ilustre de aquel reino, del que fuiste cabeza, hoy enteramente fundido en la uniformada nación española. No fueron manos extrañas las que derribaron tus muros suntuosos, no caíste al embate del enemigo, sino sacrificado por tus propios hijos.”

8.2 La fase islámica

El Palacio del Real tiene sus raíces en la época musulmana. En la Reconquista, llevada a cabo en el siglo XIII, fue muy habitual situar catedrales, capillas, palacios y edificios gubernamentales sobre mezquitas y posesiones de los monarcas árabes. Generalmente, estas edificaciones eran parcial o totalmente destruidas y sobre ellas se construía la nueva edificación. Se utilizaba para la nueva construcción aquellos elementos arquitectónicos o decorativos que se consideraban de mayor valor como capiteles o azulejos de las construcciones moriscas. Incluso, se transportaban, a grandes distancias para la época, partes de los edificios musulmanes a nuevas construcciones cristianas.

Este hábito tiene dos razones principales de ser. En primer lugar, los gobernantes musulmanes habían elegido los lugares más seguros o privilegiados de la zona para ubicar sus edificaciones más importantes y representativas. Por otro lado, tenía gran

valor simbólico la destrucción de todo aquello que fuera baluarte de la cultura musulmana para suplantarla por aquello que era base de la nueva cultura cristiana a reimplantar.

Es el Palacio del Real sin duda una ejemplificación clara de lo anteriormente expuesto. Su origen se sitúa en el emplazamiento de una antigua almunia o casa de recreo que perteneció a los monarcas árabes de la ciudad. Ésta se situaba al otro lado del río, extramuros a la ciudad (condición determinante a lo largo de su historia), y comunicado con la misma por medio del puente del Real sobre el río Guadalaviar. Gozaba de una extensión enorme, que le venía facilitada por su situación fuera del caserío, estaba rodeado de extensos jardines, su arquitectura estuvo íntimamente ligada a los huertos y al agua, a las acequias, que transcurrían en torno a él.

Aunque no se conoce con exactitud el año de su construcción, las catas arqueológicas de 1986 dieron cuenta del hallazgo de varios restos fragmentarios de basas y capiteles califales, cuya datación se situaba a mediados del siglo X (reinado de Abd al Aziz), por su semejanza con algunas de Madinat al Zahra, y que posiblemente se pueden considerar ya como material reutilizado en la época de construcción de la almunia del rey Ceit-Abu-Ceit, presumiblemente de cronología posterior. Pero el análisis de los planos, la información documental y el conocimiento que existen, parecen indicar que este primer edificio, no era excesivamente monumental. Posiblemente no se mantuvieron apenas restos de su arquitectura en las sucesivas construcciones que le siguieron, alejando su modelo de otros edificios pertenecientes a los reinos de taifas, como la Aljafería, que conservó mucho más de su fisonomía original.



Fig. 40, Base de columna califal del palacio hallada en 1986.

8.3 La Reconquista y el Reino de Valencia.

En la Reconquista, Jaume I conquista Valencia en el año 1238, y es en la crónica de esta conquista donde aparece una de las primeras referencias bibliográficas del palacio. En dicha crónica se puede leer:

“... que nostra era Valencia, ... que metesen nostra senyera en aquella torra que ara es del temple. E ells dixeren quells pleya e nos fom en la rambla, entre el Real e la torra ...”

Se puede observar una clara referencia a la ubicación del monarca al situarse en la rambla del río Guadalaviar, entre la torre (de Serrano, una de las dos entradas a la ciudad) y el Real.

Cuando Jaume I conquistó la ciudad de Valencia renunció a ocupar el alcázar de los reyes musulmanes, aunque en torno a él se situarían los centros de poder de la nueva ciudad cristiana como el palacio episcopal, la catedral y la primera sede del gobierno municipal, y escogió como lugar de residencia temporal la almunia o quinta de recreo que los mismos reyes de taifa habían levantado al otro lado del río y fuera del recinto amurallado. Fue una decisión consecuente con la opción tomada en otras ciudades musulmanas reconquistadas como Lleida, Zaragoza o Tortosa. En todos los casos se adaptó una residencia separada del núcleo urbano como palacio de los reyes cristianos. En el caso de Valencia, con razones simbólicas ya que el edificio había sido escenario de las negociaciones que condujeron a la rendición musulmana en 1238.

La historia del Palacio del Real desde entonces es una continua remodelación del mismo, siendo las más importantes las llevadas a cabo por Pedro IV el Ceremonioso y Alfonso V el Magnánimo.

Fue el propio Jaume I quién al poco de dicha conquista ordenó la primera reforma del palacio dotándolo en el año 1239 de capilla y capellanía, las obras realizadas durante su mandato fueron obras menores de adecuación a las nuevas circunstancias, manteniendo

la estructura principal de la construcción. El Palacio del Real se consolidaría en época de Pedro IV (1336-1387), quien en el mismo año de su subida al trono en 1336 visita Valencia. Desde 1340 se documentan la compra de columnas con sus basas y capiteles de flores de lis procedentes de Girona y mármoles del Rosellón y la Cerdaña para la realización de la portada de la capilla. Pero esta etapa, quedaría truncada por las guerras con Castilla, cuando en el asedio a la ciudad de 1363, el palacio fue incendiado por las tropas castellanas. La reconstrucción no fue inmediata y tras la negativa de la ciudad en 1369 a contribuir a las obras, se procedería finalmente, con cargo a las arcas reales, a consolidarlo como una gran residencia para los monarcas durante sus estancias en la ciudad de Valencia.

Será a fines del siglo XIV, pero sobre todo en la primera mitad del siglo XV, cuando adquiera su configuración medieval definitiva. El propio rey Pedro IV, iniciaría nuevas obras en diversos lugares del palacio. La actividad constructiva se hace muy intensa en estos años con la construcción de arcos, bóvedas, muros de piedra, porches y miradores. Posiblemente sería en esta época cuando se concluyó la parte principal del palacio denominada Real nou.

En 1406 se construyó un nuevo portal de piedra para la capilla alta de Santa Catalina, cuyas puertas de mármol habían sido arrancadas por el rey castellano Pedro I y trasladadas al alcázar de Sevilla. Otra capilla, más antigua, dedicada a los santos Juanes, se situaba en la planta baja del palacio, pasando a ser capilla secundaria; aunque también existieron oratorios privados en algunos de los dormitorios. A la vez que se gestaba esta arquitectura, se iban realizando también las obras de consolidación en los jardines y huertos, y comenzaba el acondicionamiento de espacios para albergar una de las más destacadas colecciones zoológicas que tanto interesaron al Ceremonioso. Hay constancia temprana de la presencia de leones en el Real desde 1352, posiblemente procedentes de la Aljafería donde estaban desde mucho tiempo antes. Todos estos elementos se asentarían con el tiempo en las siguientes épocas, en las que se continuaron ampliando las jaulas de animales e incrementando la colección con otras especies.

La época que se abre con el reinado de Alfonso el Magnánimo (1416-1458) es una de las más brillantes para el Real de Valencia. Monarca decidido a consolidar el edificio como

residencia real, contó para ello con el elenco de los mejores artistas valencianos para llevar a cabo sus propuestas, algunas de las cuales pudo seguir de cerca coincidiendo con sus años de residencia en Valencia. Favoreció con creces el Real por delante de otras residencias de la Corona de Aragón. Pero en Valencia, transcurrió la mayor parte de su estancia en la península en los años intermedios entre sus campañas italianas, entre 1424-1432. Siendo crucial para la definitiva puesta a punto del Real valenciano, el hecho de que su esposa la reina María de Castilla fijara su corte y residiera como inquilina permanente en él.

La primera fase de obras que abarcó entre 1421 y 1425 fue la reforma de los apartamentos de la reina cercanos a la capilla de Santa Catalina. A partir de 1421, Miguel Navarro será quien construya las nayas o corredor de arcadas delante de la capilla alta del palacio, uno de los pocos restos conservados de fisonomía claramente medieval que se observa en el perfil de los planos. En esta época, y al igual que ocurría en otros palacios de la Corona de Aragón, como el de Barcelona, los aposentos del rey y de la reina, se encontraban separados en las denominadas “casas” o “apartaments”, en este caso, el de la reina era el situado en la zona inmediata a la capilla, en torno al denominado patio pequeño, y fue el que se reformó con mayor intensidad, ya que la esposa del rey Magnánimo, María de Castilla, prácticamente vivió durante toda su vida en el Real, hasta 1458 fecha de su fallecimiento. Los inventarios de la reina nos permiten imaginar un palacio suntuosamente decorado, con abundantes colecciones de tapices, los conocidos como “draps de raç”, pinturas en la capilla y el oratorio privado y ricos objetos litúrgicos, entre otros bienes. Esta galería de 6 arquillos con su perfil apuntado es perfectamente apreciable en el perfil cortado que aparece en los planos de 1802, porque el patio pequeño o patio de la capilla de Santa Catalina, nunca llegó a perder su fisonomía medieval, y conservó la escalera adosada en uno de sus lados y la naya hasta su demolición. Los arquillos restantes que se situaban en el otro lado del patio, se distinguen también en el plano de planta.

A partir de 1423 se acometió otra importante obra, que afectó al denominado Real vell, o parte más antigua del palacio, la situada hacia el este, que iba a adoptar una estructura de cuatro torres angulares y patio central abierto. Esta obra en 1432, cuando el rey marcha definitivamente a Italia, aún no había concluido. Tanto empeño puso el rey en esta obra, que la siguió incluso desde Italia. Las obras se completarían en el curso de los siguientes años, con la realización de una gran sala entre dos de las torres.

Posteriormente se renovaría la gran escalera del patio, que en ese año se encontraba casi arruinada. Coetáneamente se reformarían partes del palacio, como la conexión entre esta parte antigua con la parte más grande del palacio, la del oeste, que supuso la realización de otra torre sobre la llamada sala de los ángeles, habitación que usualmente ocupaba el rey. En el patio grande también destaca uno de los pocos elementos que mantuvo su fisonomía medieval con el paso de los siglos como es la torre de la escalera de caracol sustentada por una gran trompa.



Fig. 41, Vista de la cara norte del palacio en época medieval.

En la segunda mitad del siglo XV, las obras realizadas son menores y se pueden considerar más de reparación y de acondicionamiento que sustanciales. Las reformas se sucedieron, y es de reseñar porque casi coincide con la entrada del nuevo siglo, la importante actuación emprendida en 1501 en la sala contigua a la principal del palacio, a la que se accedía por la escalera principal, que se cubriría por el novedoso sistema de vigas y bovedillas de yeso, decoradas “a la romana”, siendo éste uno de los más tempranos de la ciudad de Valencia.

A fines del siglo XV se realiza la escalera de ladrillo del patio de las cuatro torres y se hicieron diversas obras de consolidación y acondicionamiento en el Real que contribuyeron a fraguar la imagen medieval del edificio, una imagen que posteriormente

se vería alterada con las reformas posteriores, emprendidas especialmente desde mediados del siglo XVI.

En 1540 se procede a dar un nuevo impulso a las reformas en el Real, convertido ya en residencia de los virreyes valencianos. Fernando de Aragón, duque de Calabria, fue uno de los que más decididamente apostó por la reparación del palacio, acondicionando sus aposentos, tanto para él como para sus sucesivas esposas. Durante esa década se destaca la construcción de una gran sala y las reformas de cubiertas, dependencias de servicio, caballerizas y demás estancias. A pesar de estas reformas, la impresión que seguía causando el Real era la de un palacio medieval, como hace notar Lalaing quien señalaba:

“... El alojamiento es muy antiguo, pero el jardín es bellissimo...”

En años sucesivos, las intervenciones más destacadas en el palacio vendrán determinadas por las visitas regias, que en algunos casos fueron excepcionalmente relevantes. Pasaron por el Real Fernando el Católico e Isabel II, Carlos V o Felipe II, pero es de destacar la visita de Felipe III que se aposentó en el palacio durante casi 3 meses para celebrar su boda con Margarita de Austria en 1599. En aquel tiempo se reconstruyó la alcoba, la capilla del palacio fue totalmente reparada y repicada, se añadieron vidrieras decoradas con las armas reales y se renovó la escalera principal, marcando una etapa de prosperidad y puesta a punto del Palacio del Real. Tras el acontecimiento los virreyes y sus familias siguieron manteniendo sus edificaciones con mayor o menor interés.



Fig. 42, Vista del palacio antes de la construcción de la Galería Nueva.

En la década de 1630 se construyó la denominada Galería Nueva en frente del palacio, cuyos balcones sustentados por arcadas, cerraron el espacio desigual que existía entre dos de las torres que sobresalían en la fachada que miraba a la ciudad (a las torres se les denominará la torre del rey y la reina por los arqueólogos actuales). La sucesión de arcos, sobre pilares, las ventanas rectangulares y uniformes, balcones, etc. contrastan con el aspecto desordenado de un palacio medieval que ofrece la construcción.



Fig. 43, Vista de la Torre de la Reina (izquierda) y la Torre del Rey (derecha). En medio, las arcadas de la Galería Nueva. Fachada sur del palacio.

Desde entonces hasta 1707, que se implantan los Decretos de Nueva Planta tras la guerra de la sucesión que cambiaron la organización territorial de los reinos hispánicos aboliendo el derecho público de los reinos de la Corona de Aragón, no se destacan más obras de interés. La figura de los virreyes es sustituida por los capitanes generales.

8.4 De los Decretos de Nueva Planta a 1810.

A partir de 1707 desaparece el reino de Valencia y el Palacio del Real hará sus últimas modificaciones motivadas por las visitas de los reyes. En 1714 se esperaba la llegada de la reina M^a Luisa de Saboya (que al final no pudo asistir) y por ello se convocó una junta

de expertos para reconocer el palacio y presentar la propuesta de obras más necesarias. Al final se realizó el repicado, enlucido y pintado de las fachadas exteriores, patios, puertas y ventanas. Hubo también obras significativas que cambiaron la fisionomía del palacio, como la construcción de la Torre del Reloj. El reloj había existido en el Real desde mediados del s. XV, pero estaba colocado en la parte trasera que daba hacia los jardines. Se lleva a cabo la elevación de las torres de la fachada para albergar la maquinaria del reloj y la realización de un capitel totalmente novedoso para la Valencia de aquella época, con estructura de madera y chapado de planchas de plomo.



Fig. 44, Vista frontal en la que en el centro se puede ver la Torre del Reloj. M. Cavallero (1802)

En 1719, vísperas de la visita de Felipe V, esta torre ya daba muestras de debilidad estructural, por lo que se determinó sustituir el plomo por tejas cerámica vidriada. Durante casi todo el siglo desde la visita de Felipe V hasta la guerra de la Independencia el palacio fue perdiendo interés por los reyes sucesivos y solo precisó tareas de reparación y mantenimiento hasta su demolición, aunque permaneció habitado por los capitanes generales.

Oficialmente su demolición se llevó a cabo en la Guerra de Independencia, el 12 de marzo de 1810. Fue una supuesta estrategia militar para no permitir un bastión desde donde se pudieran hacerse fuertes las tropas napoleónicas invasoras comandadas por el general Suchet, y bombardear la ciudad. Si bien de poco sirvió, pues atacaron por otro flanco y las tropas españolas terminaron entregando la ciudad sin luchar, a cambio de

poder marchar a Alicante, todo ello pese a que en el primer asedio, el 28 de junio de 1808, los valencianos derrotaron a los franceses dirigidos por Moncey en las Torres de Quart, que con multitud de bajas fueron obligados a retroceder a Madrid.

Algunas fuentes consideran discutible esa concepción táctica, y dicen lo contrario, que el Palacio podía ser un punto desde donde batir a los atacantes de la muralla. Para una parte de los investigadores pudo ser una forma de terminar con los vestigios que aun quedaban del antiguo régimen derrotado en Almansa. Además, de hacer desaparecer un edificio que tenía un coste de mantenimiento excesivamente elevado para el uso que en aquel tiempo tenía.

Fue una demolición lenta y perfectamente dirigida con el propósito de aprovechar y vender todos los materiales del derribo, entre marzo y noviembre de 1810. Las listas de los efectos vendidos son interminables, ladrillos, sillares, maderas de todas clases, pero también cristales, balcones, tejas, azulejos, puertas, ventanas, faroles, etc.

9. HISTORIA DEL PALACIO DEL REAL: DE 1810 HASTA LA ACTUALIDAD.

9.1 Introducción.

Pocos años después de su demolición, parece que hubo un intento de reconstruirlo. El general Elio, nombrado capitán general de Valencia por Fernando VII en 1813 al encontrarse ante los escombros del Palacio Real, derribado durante la Guerra de la Independencia, pensó en reedificarlo, pero ante los inconvenientes, seguramente políticos, que se le opusieron, ordenó reunir los restos del memorable y glorioso monumento, formando con ellos dos montículos inmediatos que rodeó de macizos sustentantes y plantó arboles y flores sobre ellos, que las gentes denominaron “les muntanyetes d’Elio”.

Precisamente en dicho lugar fue decapitado años más tarde este bravo general, y no por sus enemigos franceses, sino por sus propios compañeros de armas siguiendo órdenes del rey don Fernando VII en cuyo favor tanto luchó.

A partir de este lugar creado en honor al palacio por orden del general Elio nacerían los Jardines del Real en toda su amplia extensión y belleza. En 1868 la Junta Revolucionaria se apropió de los Jardines del Real y en 1874 la Corona renunció a la propiedad para ser gestionados por la Diputación de Valencia a partir de 1887. En 1903 fueron cedidos al Ayuntamiento de Valencia para destinarlos a viveros de árboles, y los jardines pasaron a ser conocidos como Los Viveros.

De los jardines destacan el paseo de las palmeras, con ejemplares centenarios, numerosas esculturas y fuentes monumentales, una espléndida rosalada, una casa para pájaros levantada en el siglo XIX, un estanque y un parque infantil, entre otras cosas.



Fig. 45, Vista aérea de los jardines de Viveros.

9.2 Las excavaciones de finales de la década de los 80.

Durante una obras realizadas en la calle General Elio, que linda al este con los jardines de Viveros, para la colocación de un colector en el año 1986 salieron a la luz los restos del por entonces poco conocido Palacio del Real. Se llevaron a cabo durante 3 años las excavaciones arqueológicas oportunas, abarcando grandes dimensiones, hasta que en 1989 se decidió por parte del ayuntamiento volver a tapar todos los restos descubiertos ya que se situaban debajo de lo que era y es una arteria principal para la circulación de vehículos en la ciudad de Valencia, ya que es el nexo de unión de las avenidas Blasco Ibañez y Primado Reig con el centro de Valencia.

Fue una decisión difícil y criticada, aunque se dejó la posibilidad de que en tiempos futuros pudiera volver a sacar a la luz los restos arqueológicos de gran valor hallados anteriormente. Aún así, se llevaron a dependencias municipales restos móviles como vasijas, cerámicas, azulejos, etc. A continuación se muestran diversas fotografías tomadas en aquella época con la intención de que el lector pueda hacerse una idea de la magnitud del hallazgo casual.

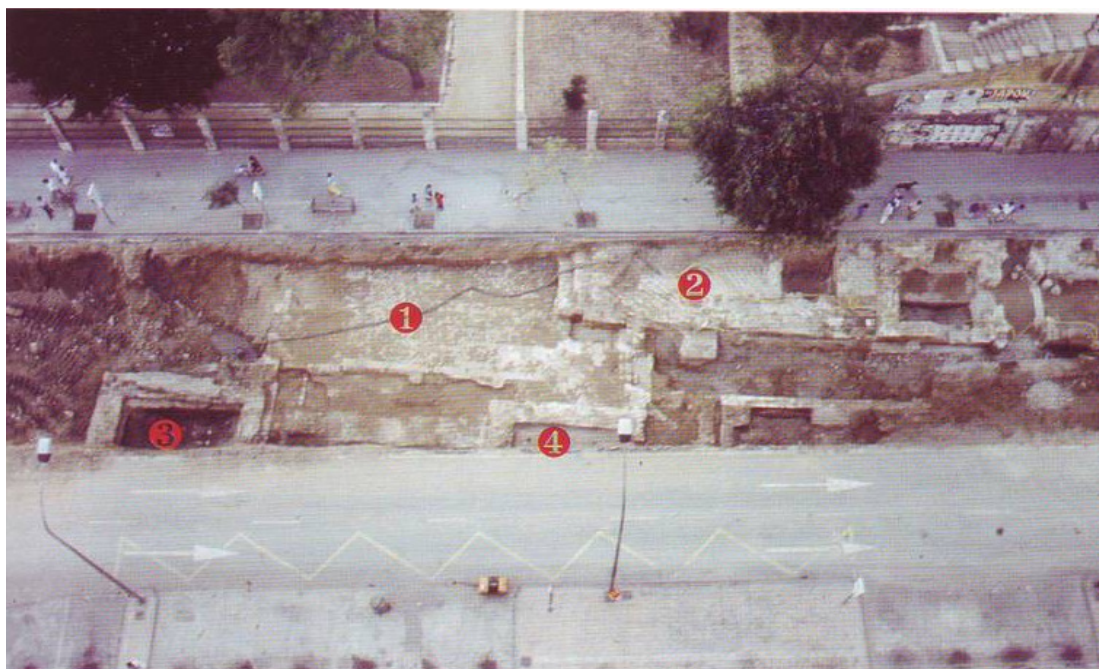


Fig. 46, (1) Pavimento cerámico de la fachada principal. (2) Cuarto de los criados de la torre principal del Real vell. (3) Torre del reloj. (4) Capilla antigua del Real nou.

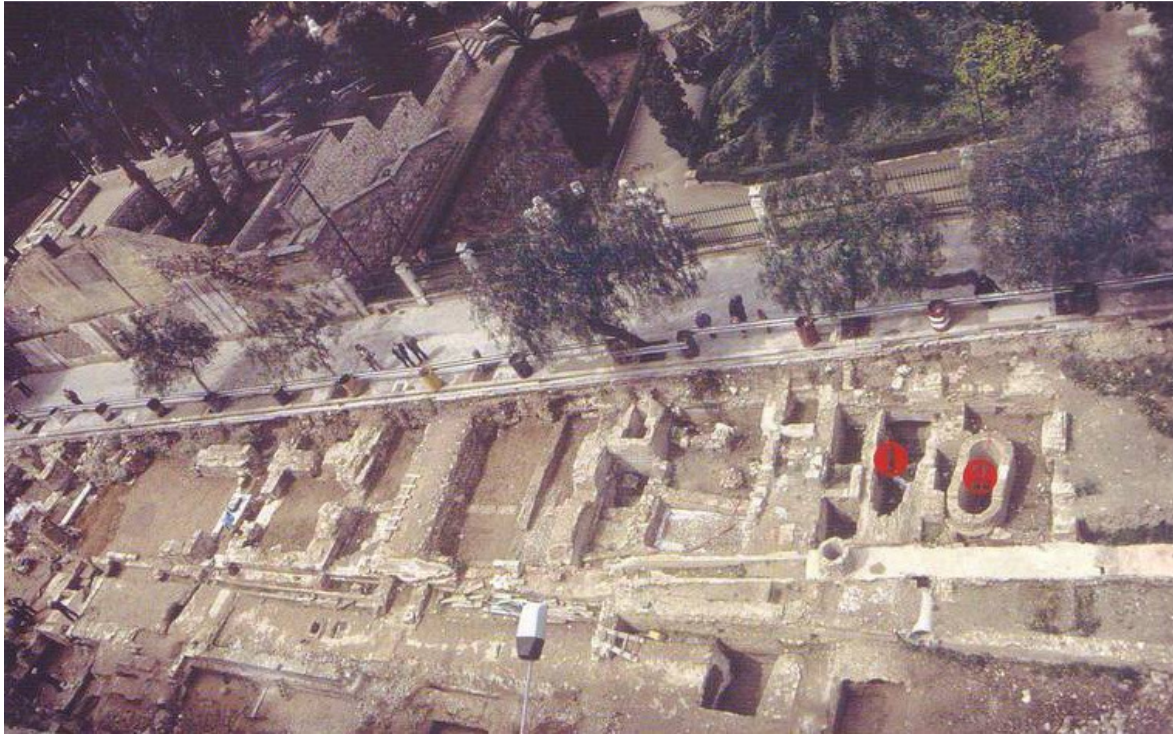


Fig. 47, Vista aérea de la excavaciones. (1) Acequia abovedada de Mestalla. (2) Pozo de la noria.

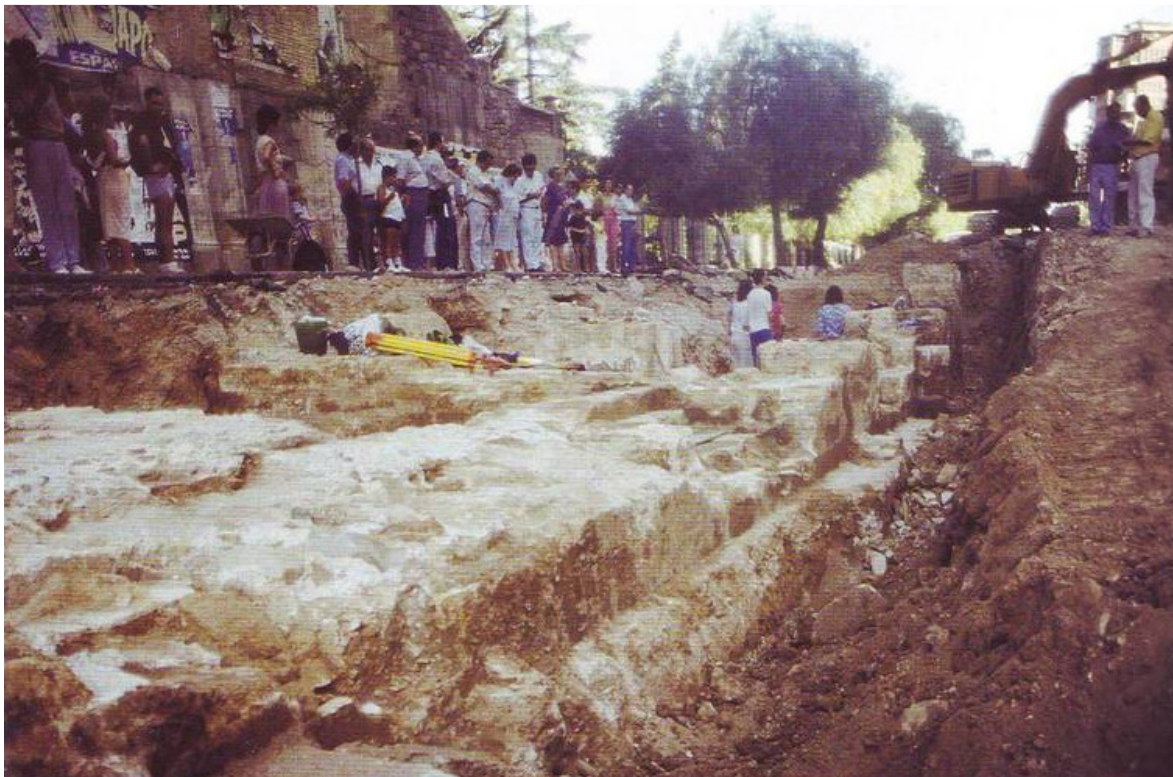


Fig. 48, Fachada oriental del palacio con escalera de piedra picada.

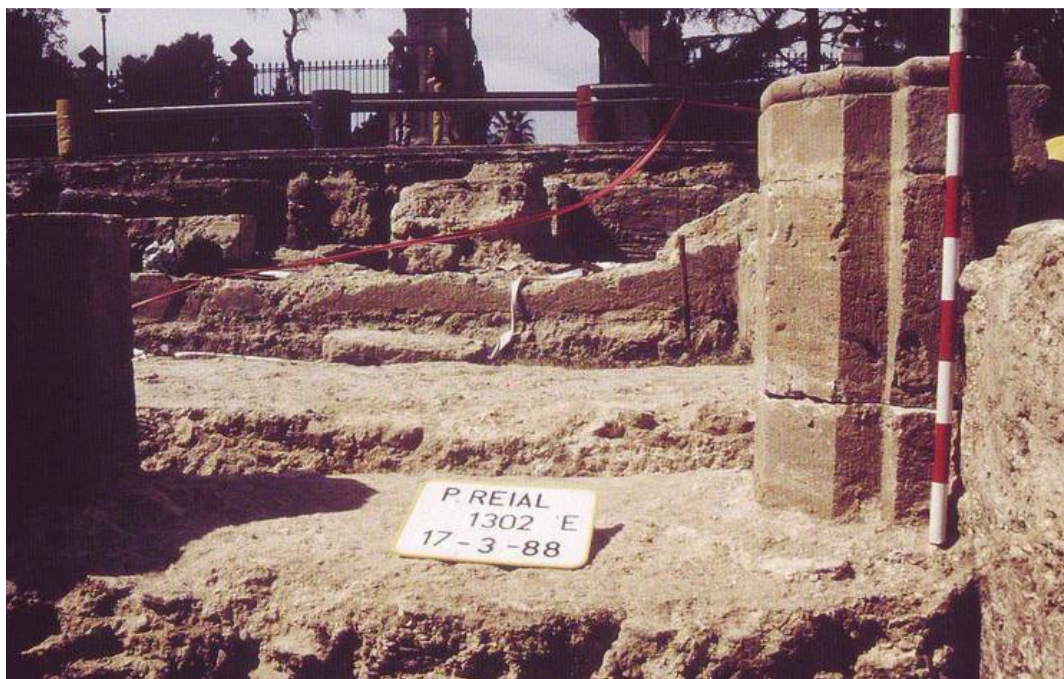


Fig. 49, Extremo NE del pasadizo de la fachada oriental del Real vell.



Fig. 50, Llave y capitel de estilo mudéjar.

9.3 Los planos de Manuel Cavallero.

Josep Vicent Boira, historiador valenciano, localizó en 2004 15 planos a escala del año 1802 del Palacio del Real realizados por el ingeniero militar Manuel Cavallero. El hallazgo proporcionó abundante información histórica sobre las fachadas y las dependencias del desaparecido edificio. Se trató de uno de los hallazgos históricos más importantes de los últimos años, dado el escaso nivel de detalle que entonces se tenía del palacio. Los planos tienen unas dimensiones considerables ya que miden 1,40 metros de largo por 0,5 metros de ancho. Se trata de más de 20 metros lineales de planos.

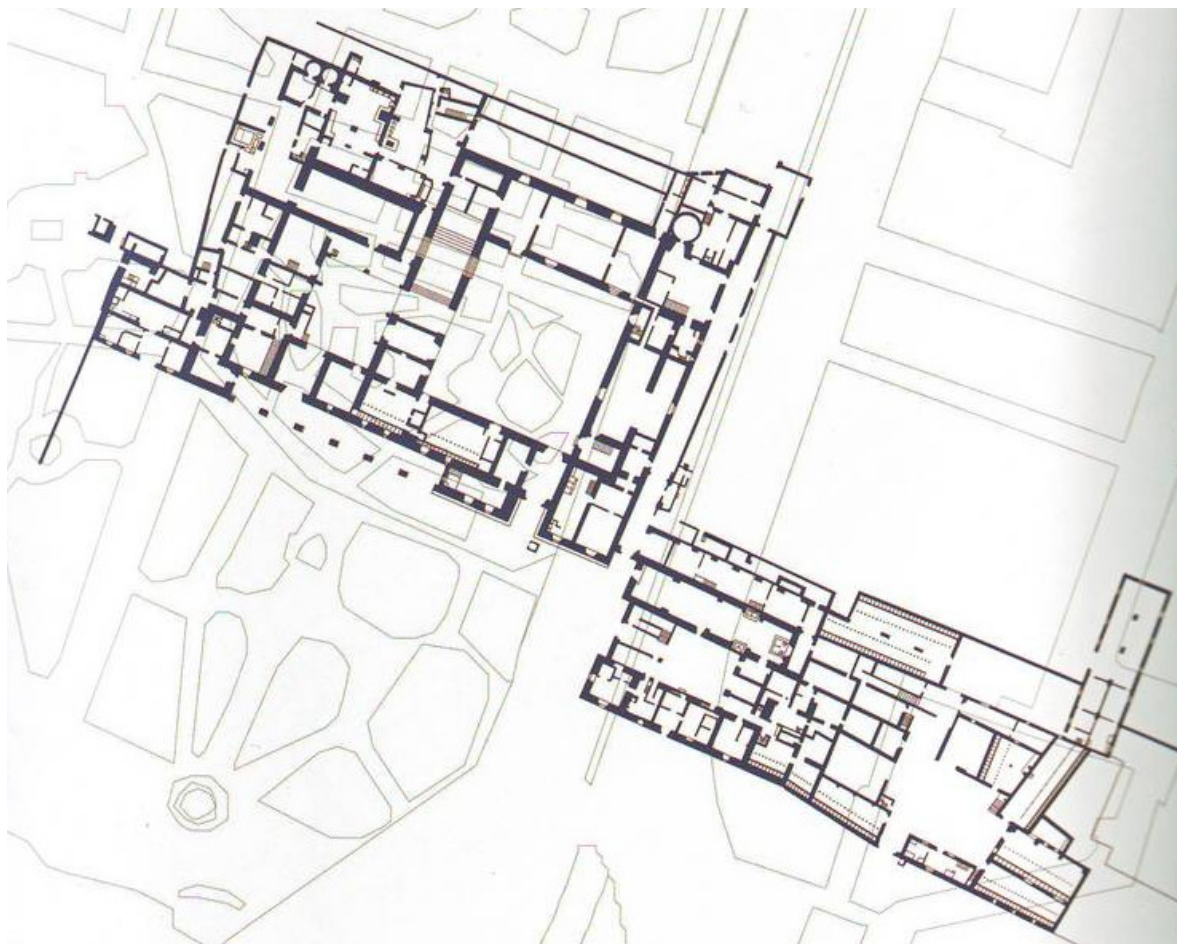


Fig. 51, Plano planta sobre la cartografía actual de fondo.

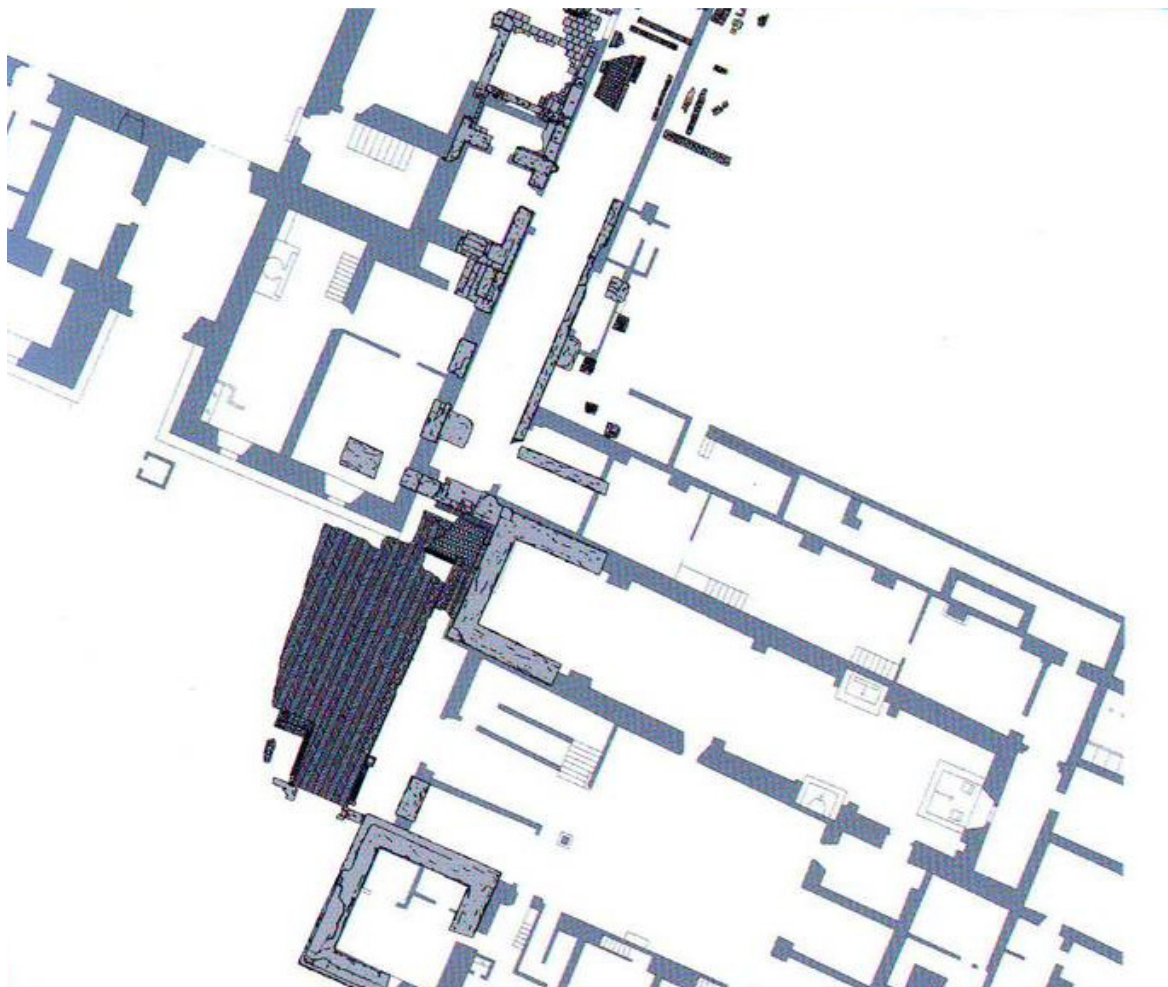


Fig. 52, Detalle del plano de planta sobre el que sitúa en negro los restos hallados en las excavaciones de la década de los 80.

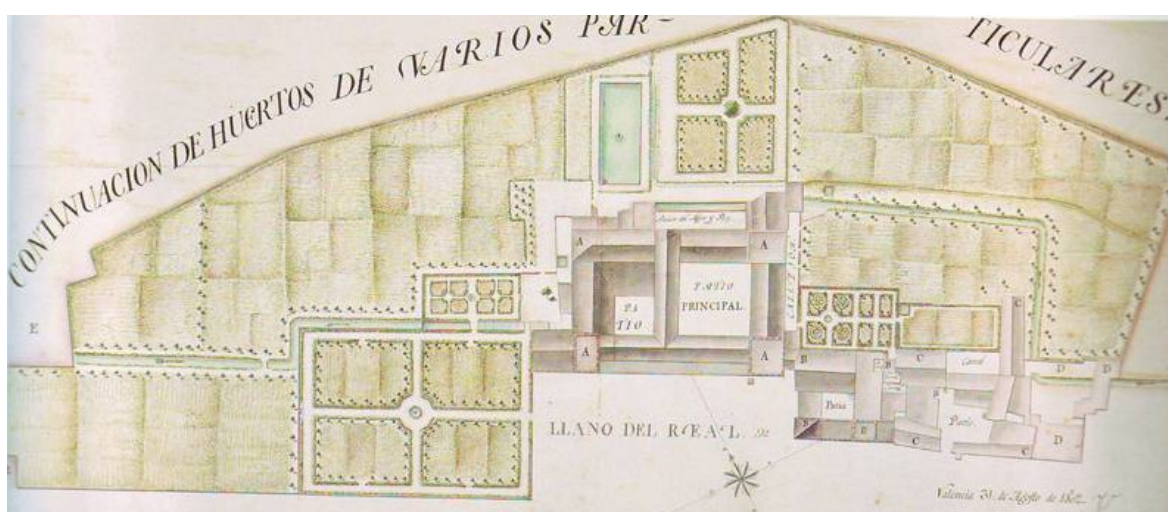


Fig. 53, Planta del real con sus jardines y huertos. Manuel Cavallero (1802)

Estos planos proporcionan detalle de las cuatro plantas -planta baja, entresuelo, planta noble y desvanes- del Palacio del Real, así como de las fachadas. A raíz de este descubrimiento se han llevado a cabo diversas iniciativas para recuperar la memoria de tan digno edificio. Entre ellas, la reconstrucción 3D del palacio, la edición de un libro específico por parte del ayuntamiento de Valencia o las excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en el año 2009 en el jardín de Viveros.



Fig. 54, Perfiles cortados del palacio. Manuel Cavallero (1802)

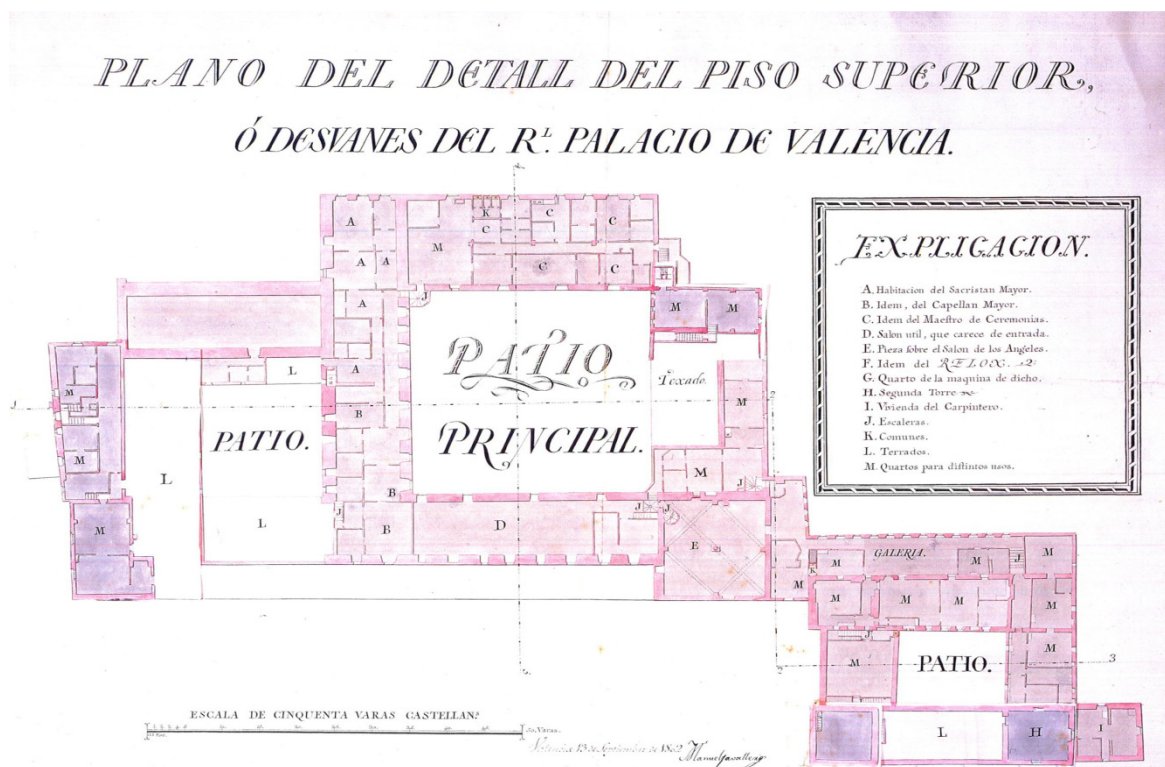


Fig. 55, Plano planta del piso superior. Manuel Cavallero (1802)

9.4. Las excavaciones arqueológicas de 2009.

El proyecto arqueológico, al que se han destinado 1,2 millones de euros del Fondo de Inversión Local (plan E), estuvo supervisado por el Servicio Municipal de Arqueología (que ya exploró otra zona de las ruinas del Real antes mencionadas hace dos décadas). En la intervención trabajaron 23 operarios de la empresa EMR (empresa adjudicataria del proyecto), un ingeniero en topografía y cuatro arqueólogos municipales.

Se han descubierto los restos de la torre oeste de la fachada principal, conocida como la Torre de la Reina, así como la Torre del Rey situada más al este, se ha recuperado pavimento de tierra batida y grava del siglo XIX y fragmentos de cerámica medieval probablemente de la época de la fundación del palacio cristiano. La cerámica se incorporará al inventario de fondos arqueológicos del palacio que se conserva, en parte, en el depósito del SIAM y, en parte, en los jardines del museo de San Pío V. Los técnicos también han sacado a la luz la entrada principal. La excavación ha permitido comprobar que el gran pórtico de entrada al palacio tenía más de cinco metros de luz (distancia entre los apoyos de un arco).

También es de destacar el descubrimiento de un foso medieval en la fachada principal que demuestra que en los principios de la época cristiana del palacio, éste era más una fortaleza defensiva que un palacio de recreo. Fue uno de los hallazgos más comentados puesto que fue uno de los más imprevistos. Otro de los hallazgos sorprendentes es el un escudo heráldico entre las ruinas que perteneció a los antiguos reyes de Aragón. Se trata de una pieza ornamental en la que se distingue la bandera y parte de las figuras que la flanquean.

La puesta en valor del Palacio Real comprende la excavación y exposición al público de lo hallado, la restauración de las piezas que se encuentren y la creación de un museo con todos los restos. A día de hoy cualquier persona ya puede visitar todo lo realizado en este trabajo y disfrutar de la oportunidad que le brinda la historia de conocer más en profundidad los restos de lo que algún día fue un símbolo de todos los valencianos.

10. LA VARIABLE SOCIAL

10.1 Introducción.

No hay que olvidar que la arqueología lleva implícita, como todas las disciplinas que cambian definitivamente o intervienen en aquello que se considera público, un variable social que dependiendo del caso acabará teniendo mayor o menor peso en las actuaciones a llevar a cabo, pudiendo cambiar total o parcialmente los planes iniciales de los profesionales del sector. En el caso de las excavaciones del Palacio del Real esta variable social es una variable muy a tener en cuenta.

En las excavaciones realizadas a finales de la década de los 80, la presión social fue muy fuerte, hasta el punto de tener que tomar la decisión de volver a enterrar todos los hallazgos realizados pese al gran valor de los mismos. Fueron 3 años en los que el debate estuvo a la orden del día y así se hacían eco los medios de comunicación locales.

No fue nada fácil tomar la decisión que se tomó, y siempre se dijo que no se descartaba una futura excavación del Palacio del Real, siendo una forma de contentar a aquellos que no estaban a favor del enterramiento de las ruinas.

De todos modos, como es costumbre, el paso del tiempo hizo caer de nuevo en el olvido de la ciudadanía todo lo ocurrido con anterioridad y de nuevo la memoria del Palacio del Real se veía abocada a los inmensos esfuerzos investigaciones de personas de diversos ámbitos de la ciencia como arqueólogos, historiadores o arquitectos.

Hasta que en 2004 se descubren los planos de Manuel Cavallero y el ayuntamiento empieza a fraguar lo que posteriormente sería una nueva excavación de las ruinas del palacio, esta vez dentro del jardín de Viveros, lo que como veremos levantó de nuevo suspicacias entre diversos sectores de la población.

10.2 El factor medioambiental.

Los jardines de Viveros o jardines del Real son muy valorados por los ciudadanos en tanto en cuanto son un lugar con un gran valor medioambiental. En concreto las zonas de catas arqueológicas de 600 m² que se han realizado implican la destrucción parcial de la muntanyeta d'Elio y arrancar más de una veintena de árboles de gran valor.

De hecho muchos de los árboles centenarios fueron propuestos, con anterioridad al proyecto, para formar parte de un plan de protección medioambiental. Además en un principio se insistió que tan solo serían 3 o 4 árboles los afectados, mientras que al final llegan a ser más de 20, entre ellos árboles centenarios de gran valor. Además existía previamente un proyecto sobre la recuperación de la memoria del Palacio del Real impulsado por el Forum UNESCO que no pretendía talar árboles o quitar parte de la muntanyeta d'Elio, sino que se encaminaba más a la realización de un museo y alguna pequeña cata arqueológica. Ante la presión social ejercida a través de diversos representantes públicos, se consiguió que una docena de estos árboles fueran trasladados y replantados en diversos lugares de la ciudad, o en el mismo jardín de Viveros.



Fig. 56, Árboles protegidos durante las excavaciones arqueológicas de 2009

11. INTRODUCCIÓN. RESUMEN DE LA ACTUACIÓN.

El presente estudio corresponde a la prospección geofísica no destructiva realizada mediante la técnica GPR en el mes de Mayo de 2009, en la zona de la *mntanyeta d'Elio*, en el Jardín de Viveros del Término Municipal de Valencia. La prospección efectuada se halla encuadrada en el Plan Español para el Estímulo de la Economía y el Empleo. El objeto de la actuación es la detección de posibles restos arqueológicos pertenecientes a la fachada sur del Palacio del Real de Valencia, entendiéndose éstos como un conjunto lo suficientemente importante para que puedan motivar una respuesta de suficiente entidad para que se interprete como tal. Cabe mencionar que el método GPR no siempre da una respuesta positiva ante la existencia de dichos restos arqueológicos, ya que son muchos los parámetros que condicionan el comportamiento de la señal electromagnética y su posterior análisis.

La aplicación de la técnica *GPR* como método de prospección no destructivo viene precedida por los estudios previos realizados en diferentes prospecciones arqueológicas, y el encaje de una planta del antiguo palacio, objeto del presente estudio, derivada del hallazgo en 2004 de los planos de Manuel Cavallero citados en capítulos anteriores.

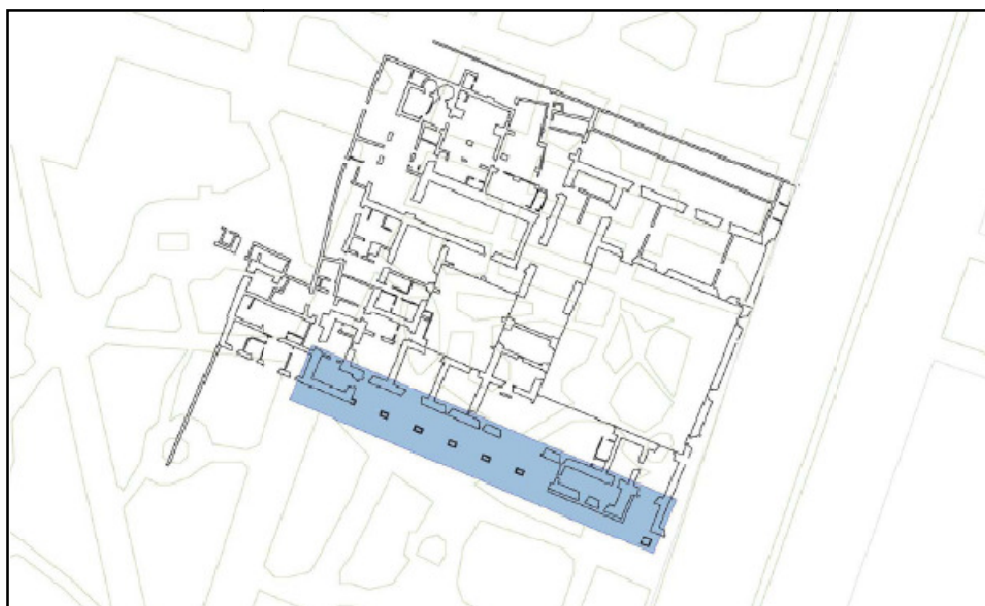


Fig. 57. Planta del Palacio del Real, zona Real nou. Fondo plano topográfico de la zona en la actualidad. En azul la zona delimitada de estudio.

El objeto del estudio es la localización de antiguas estructuras pertenecientes al Palacio del Real en las áreas de estudio, así como la delineación y dimensionamiento de cualquier otra estructura de interés.

Para la realización del estudio se opta por la realización tanto de Radargramas (Rd) como de Modelos Tridimensionales Subsuperficiales (MTS). La generación de dichos modelos tridimensionales del subsuelo facilita el análisis y la interpretación de los registros obtenidos en campo, aportando mayor objetividad en la elaboración de las conclusiones generadas del análisis de la prospección geofísica no destructiva, a partir de secciones GPR paralelas y perpendiculares entre sí (*mallas*).

En concreto se han realizado 4 MTS con un total de 209 m² prospectados, éstos se hallan localizados en diferentes áreas del jardín donde se prevé que se hallen los cimientos del Palacio del Real. Cada malla ha sido generada mediante perfiles longitudinales de 0,40 m de equidistancia.

Los restos arqueológicos que en un principio son susceptibles de dar respuesta según la zona de estudio y la historia conocida del palacio desarrollada en el bloque II del proyecto son:

- La Torre de la Reina: torre de la fachada principal del Real *nou* que está situada en la parte más occidental.
- Arcadas de la fachada principal, con 5 m de luz.
- Entrada principal al palacio.
- La Torre del Rey: torre de la fachada principal del Real *nou* que está situada en la parte más oriental.

En la figura siguiente se puede identificar cada elemento sobre el plano en planta del Palacio de Real.

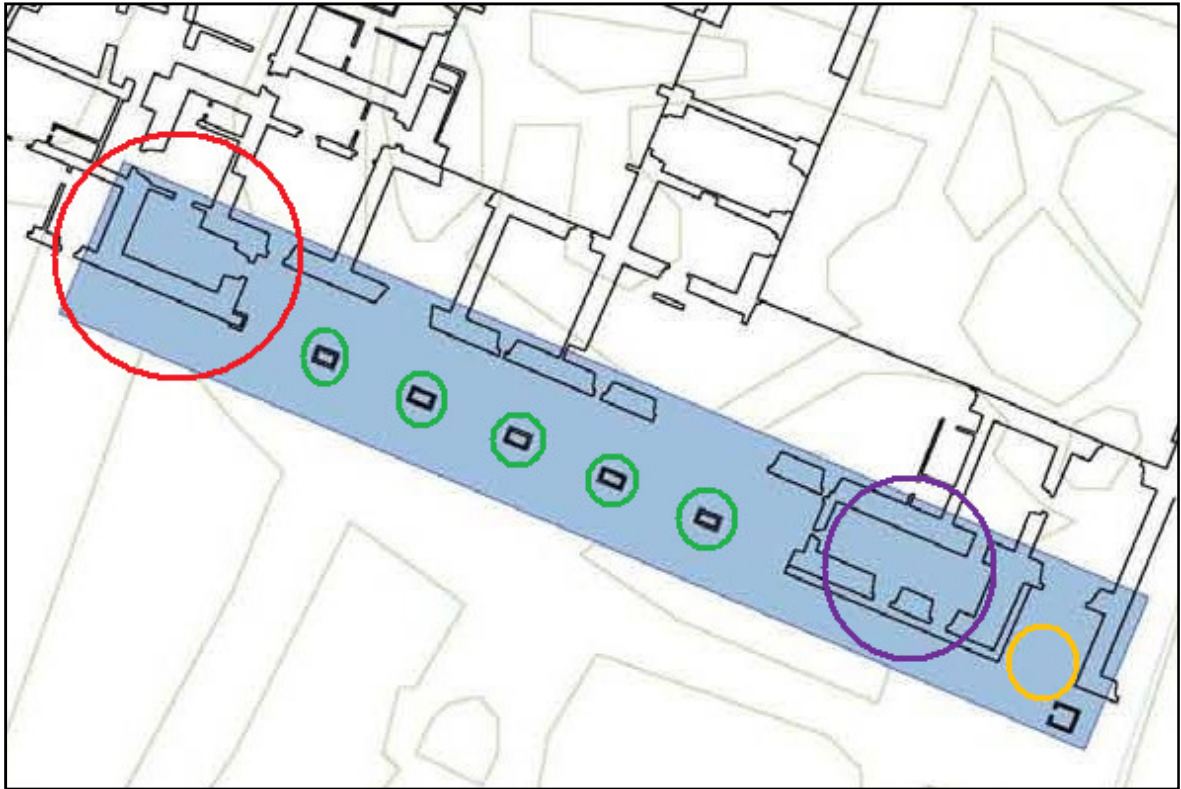


Fig. 58, En rojo la T. de la Reina, en verde las arcadas, en naranja la entrada principal y en morado la T. del Rey

La empresa adjudicataria del proyecto es EMR (Estudio Métodos de la Restauración), que será supervisada en todo momento por los arqueólogos municipales del ayuntamiento de Valencia. Así pues, el estudio presente se engloba en la colaboración del Departamento de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica de la Universidad Politécnica de Valencia en los análisis previos a las excavaciones, llevado a cabo por el profesor Doctor D. Jorge Padín Devesa. Es de destacar también que la realización de un estudio paralelo por medio de termografías a través de otro miembro del mismo departamento, el profesor Doctor D. José Luís Lerma García.

12. METODOLOGÍA DE ACTUACIÓN

12.1. Obtención de registros de campo

Para la realización del trabajo propuesto se divide la zona de actuación en 4 mallas regulares que se adaptan a la geometría del terreno considerado. El ancho y la longitud es variable para cada una de ellas, manteniendo una equidistancia entre perfiles longitudinales de cada malla de 0,4 metros. Las mallas son establecidas siguiendo criterios de máxima extensión, considerando los condicionantes geométricos de la propia malla y los propios impedimentos físicos para la correcta circulación del instrumento. Hay que decir que todo el ámbito de estudio con el georradar se realizó en caminos (llanos y compactos) del propio jardín de Viveros, evitando en todo momento el estudio de zonas topográficamente complejas, con fuertes pendientes, como la *muntyeta d'Elio*.

El *equipo GPR* empleado corresponde a una Unidad Central Sir-3000, antena de 400Mhz, más carro con odómetro para normalizar las distancias de las secciones y cable de transferencia de 1,5 m de la marca comercial *GSSI*.

No se ha realizado una calibración completa de todos los parámetros, ya que en la zona no se han podido localizar testigos enterrados para obtener un valor exacto de la constante dieléctrica del terreno, por lo que se utilizará un valor estimado de la constante dieléctrica. A los efectos, esto se traduce en que las profundidades en los radargramas serán estimadas, pero no le resta en ningún momento poder de detección (objetivo fundamental del estudio la detección de estructuras) a la técnica, el resto de parámetros han sido adecuadamente adaptados (ganancia, filtros, etc.) en toda la zona de actuación para poder obtener resultados óptimos y homogéneos en la posterior generación del *MTS*.

Se realizaron secciones GPR paralelas entre sí cada 0,4 m (*paso de antena*), en sentido longitudinal de avance, previa definición de un lado de los cuadriláteros replanteados como lado fijo y origen de cada malla propuesta. Para la materialización de las mallas en

el terreno se utilizaron métodos de topografía clásica con cinta métrica. Los puntos se materializaron en el terreno por medio de piquetas, estacas o clavos y se remarcaron con pintura amarilla para que fueran vistos con facilidad. A continuación se muestran algunas imágenes del proceso de obtención de los cuadriláteros.



Fig. 59, Material utilizado para la materialización de los cuadriláteros.



Fig.60, Puntos materializados mediante estacas delimitando una futura malla.

Una vez definidos los lados de la malla, una lienza guiará el paso del georradar para evitar posibles desviaciones al generar los perfiles. Para la correcta ubicación de la lienza, y por tanto del georradar, se utiliza la cinta métrica, como se puede ver en las siguientes figuras.



Fig. 61, Colocación de la lienza sobre un lado del cuadrilátero materializado por la cinta métrica



Fig. 62, Paso del georradar por el camino marcado por la lienza.

De esta metodología de toma de datos se obtienen las mallas siguientes:

MALLA **AAB**: 7 secciones GPR de 39 metros de longitud; paso de malla 0,4 m

MALLA **AAC**: 10 secciones GPR de 10 metros de longitud; paso de malla 0,4 m

MALLA **AAD**: 10 secciones GPR de 16 metros de longitud; paso de malla 0,4 m

MALLA **AAE** : 10 secciones GPR de 14 metros de longitud; paso de malla 0,4 m

Las mallas tienen una situación espacial tal y como se muestra a continuación.

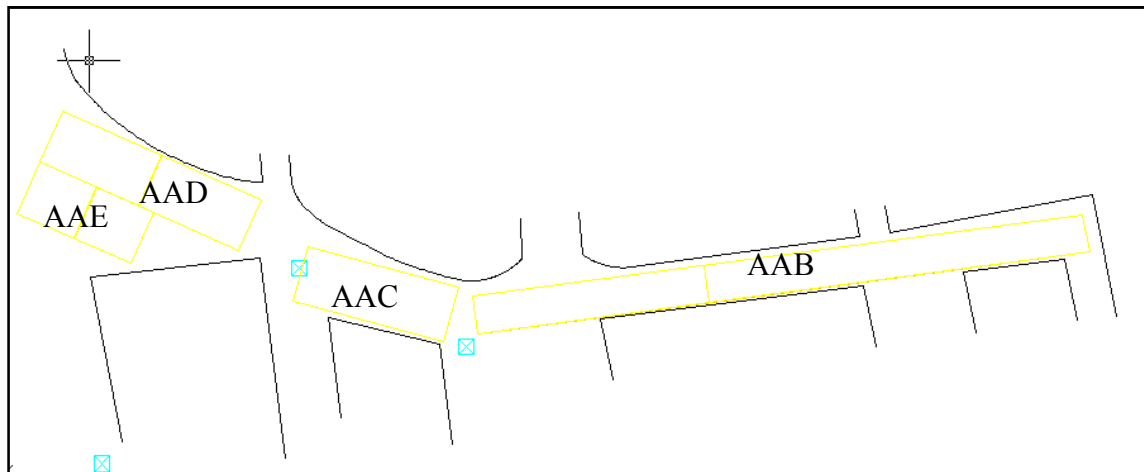


Fig.63. Planta de ubicación de los MTS codificado.

Tras el paso del georradar por las diferentes mallas, la información obtenida queda almacenada en diversos ficheros informáticos. Cada malla se engloba dentro de una carpeta de extensión .PRJ. Esto se debe a que previo a la medición, se instauran diversos condicionantes en la Unidad Central del georradar para facilitar el trabajo en gabinete. Dentro de cada carpeta se crea otra carpeta de extensión .3ds donde se almacenan varios archivos .dzt con la información de cada perfil obtenido, además de un fichero .b3d que relaciona la equidistancia y el orden de los perfiles para poder crear, mediante el software oportuno, las mallas tridimensionales por interpolación de los perfiles.

A continuación se muestra el Header de un fichero .dzt. Aunque no todos los parámetros son comunes en todos los ficheros, las diferencias, cuando existen, son tan pequeñas que se puede considerar el expuesto como representativo de la zona. Esta calibración, realizada mediante la Unidad Central GPR, se establece mediante una serie de parámetros que permiten modular la onda electromagnética recibida y obtener con precisión el registro obtenido. Estos parámetros son los que definen el número de canales utilizados, la unidad mínima de registro, la cantidad de pulsos electromagnéticos que se utilizan para formar la unidad mínima de registro, la memoria de almacenamiento de la unidad mínima de registro, unidad de normalización métrica, constante dieléctrica, filtros de ajuste de la señal recibida, calibración del aumento o disminución de la amplitud de onda recibida, posición altimétrica de la rasante del terreno y rango de tiempos para la emisión / recepción de la onda electromagnética.

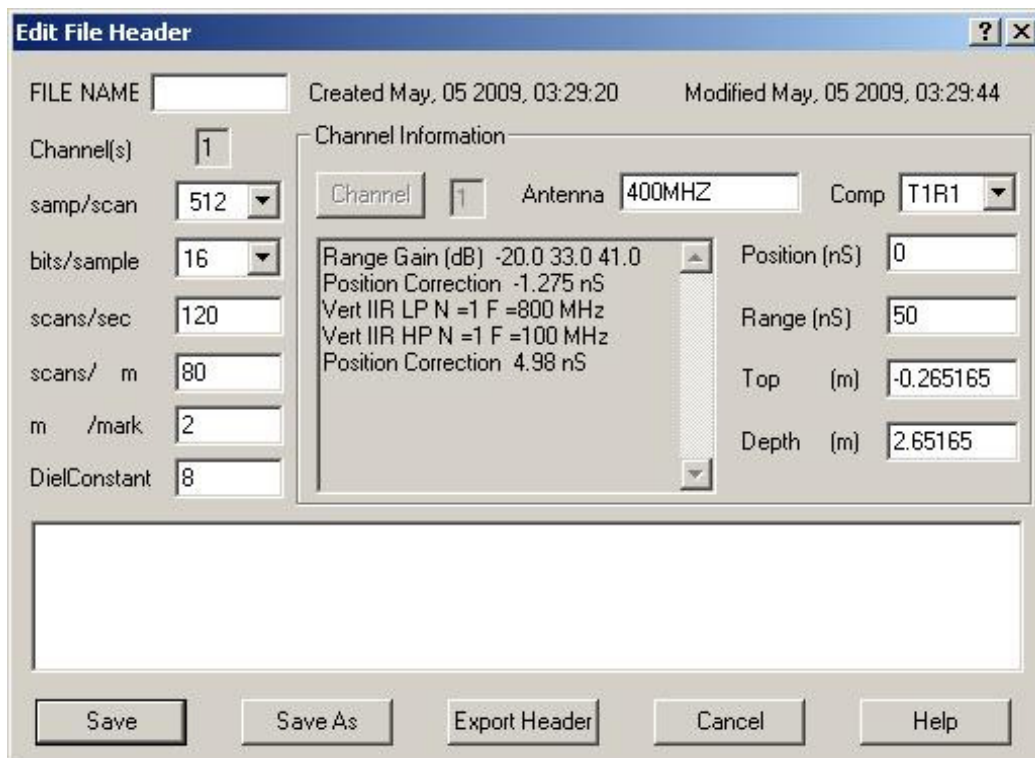


Fig.64.Header de fichero .dzt

Una vez tomados los datos en campo ya están listos para su posprocesado en gabinete, pero antes se realizará un levantamiento topográfico de las mallas.

12.2 Obtención del levantamiento topográfico

Para garantizar la precisión en la geometría y ubicación de las mallas se realizó el levantamiento de éstas mediante topografía clásica, así como de los elementos del terreno más representativos como muros, bordillos, trapas, etc. De esta forma es posible acoplar con precisión los elementos levantados, mediante una transformación Helmert, a cartografía preexistente o futura. También se asegura que las secciones de las mallas sean realmente paralelas y perpendiculares entre sí, ubicadas además en el mismo sistema de referencia planimétrico y altimétrico que el levantamiento topográfico de la zona de excavación.

El instrumental necesario para llevar a cabo el levantamiento consta únicamente de una estación total y un prisma. La estación utilizada es una Topcon GTS-236N, cuyas características técnicas son suficientes para el tipo de trabajo a realizar.

- Aumento 30 x
- Sensibilidad 20"
- Apreciación 5"/1"
- Precisión de 2mm + 2ppm



Fig.65, Topcon GTS-236N estacionada.

El punto de estación elegido es un punto marcado por nosotros mismos sobre un bordillo (superficie estable) cercano a las mallas, desde el cual son visibles todos los puntos a radiar así como una referencia clara lo suficientemente alejada como para obtener una precisión aceptable de orientación en futuros estacionamientos (si estos fueran necesarios).

De la radiación oportuna se obtienen 49 puntos que son posteriormente procesados e importados a un software DAO. Los datos de los cálculos realizados en gabinete se muestran en los anejos.

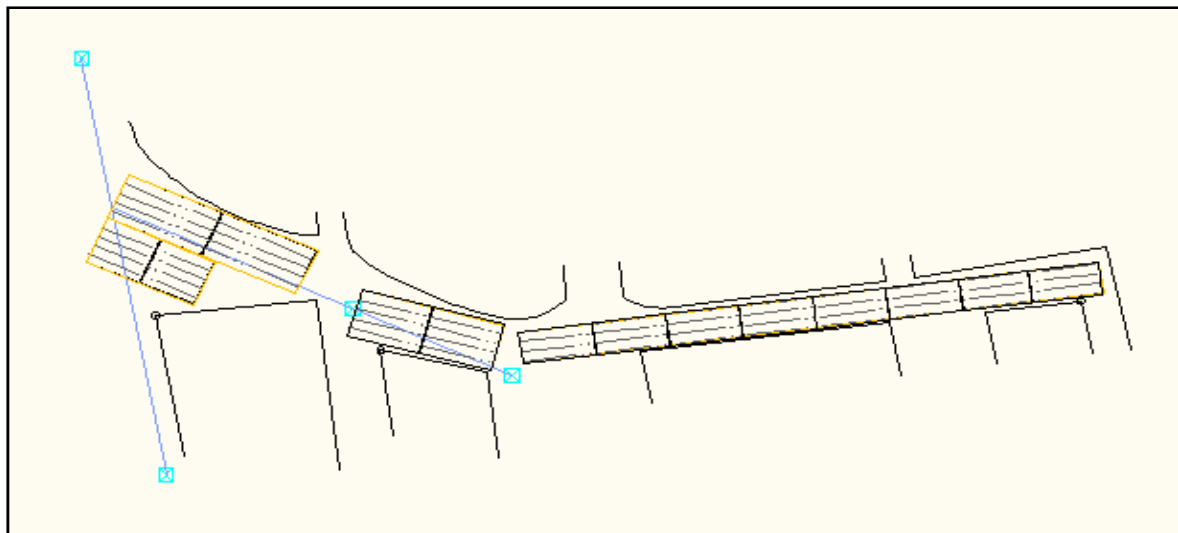


Fig. 66, Plano del levantamiento topográfico.

12.3. Procesado de los radargramas

La generación de MTS se realiza mediante procesos de laboratorio a partir de las diferentes secciones GPR obtenidas en campo. La aplicación informática empleada para este fin es RADAN 6.0 GSSI.

Los modelos tridimensionales creados ofrecen continuidad espacial en todas las mallas de secciones GPR realizadas, interpolando los valores de amplitud de las secciones contiguas. Se emplean para este cometido algoritmos con los que priorizar con qué valores de amplitud de onda recibida en las secciones GPR se debe interpolar, dando mayor peso a los valores de amplitud de onda cuando su unión en los diferentes radargramas genera una disposición geométrica lineal. Todo este proceso es realizado por el software.

Siendo así, resulta imprescindible el uso de una única calibración de la onda electromagnética recibida para la ejecución de la totalidad de la malla. El empleo de diferentes calibraciones implicaría variaciones en los valores de amplitud obtenidos provocando interpolaciones erróneas, y por tanto, resultados de menor calidad.

No se ha realizado la migración de todos los radargramas (solo en aquellos que se ha creído conveniente), proceso en el cual las hipérbolas envolventes de las estructuras quedan colapsadas en un vértices de respuesta. La razón de no realizar el migrado de forma generalizada es que dicho proceso atenúa aun más el contraste y no conviene realizarlo en terrenos con reflexiones poco contrastadas.

En los radargramas no se aprecia ruido (*distorsión de la señal recibida*) hasta una profundidad de 1.70 m. Dado que los elementos detectados se encuentran a una cota superior, se ha desestimado aumentar los filtros de frecuencia en post-proceso con el objeto de mantener la máxima información.

12.4. Resultados obtenidos

A continuación se representan gráficamente los resultados obtenidos por área según código:

MALLA AAB

MALLA **AAB** 07 secciones GPR de 39 metros de longitud; paso de malla 0,4 m

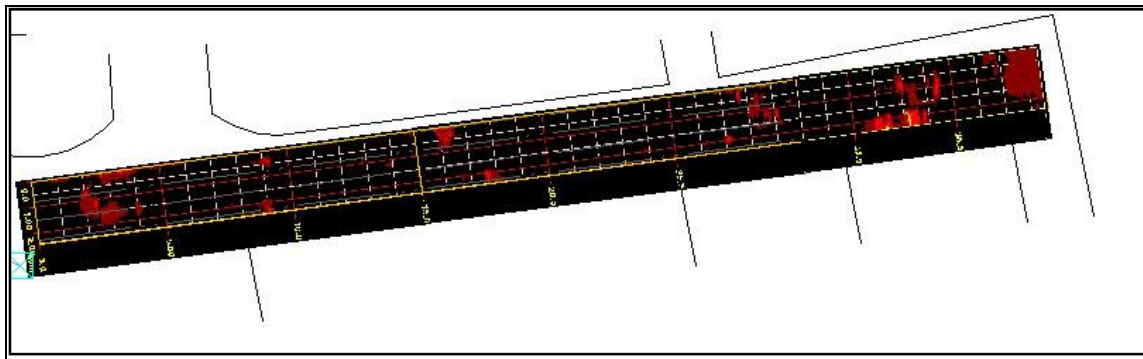


Fig.67, Vista Ortogonal del MTS de la malla AAA, en rojo zonas de alto contraste.

A efectos prácticos para una mejor representación se ha dividido la malla en tres tramos. El **Tramo 1** con 15 m de largo, al igual que el **Tramo 2**, quedando un tramo final de 9 m, el **Tramo 3**.

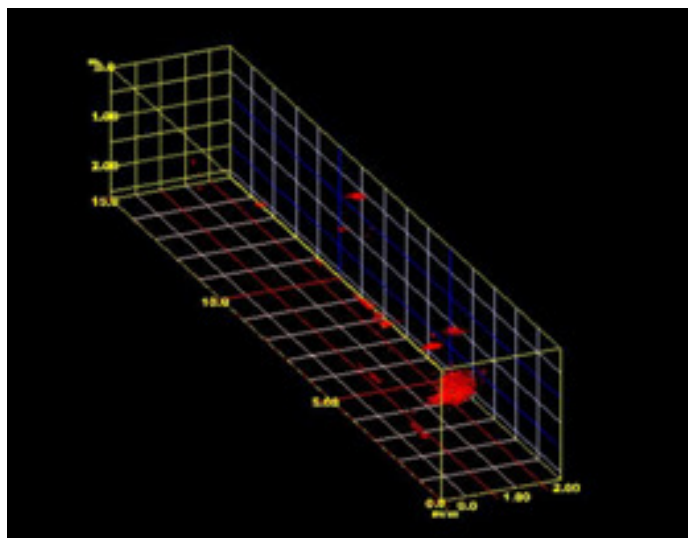


Fig. 68, Vista del MTS del Tramo 1, en rojo zonas de alto contraste.

En el **Tramo 1** no se observan zonas de reflexión que hagan sospechar la existencia de estructuras de entidad. Aunque sí que aparecen zonas con un comportamiento eléctrico diferenciado bastante puntuales que se corresponden con las zonas en rojo de la fig. 68.

Se observan reflexiones con envolvente pero el tamaño de estas y la no continuidad de las mismas en otros radargramas hace que a priori no las tomemos en consideración para el objeto del estudio, ya que se buscan estructuras grandes y continuas pertenecientes a la fachada sur del Palacio del Real.

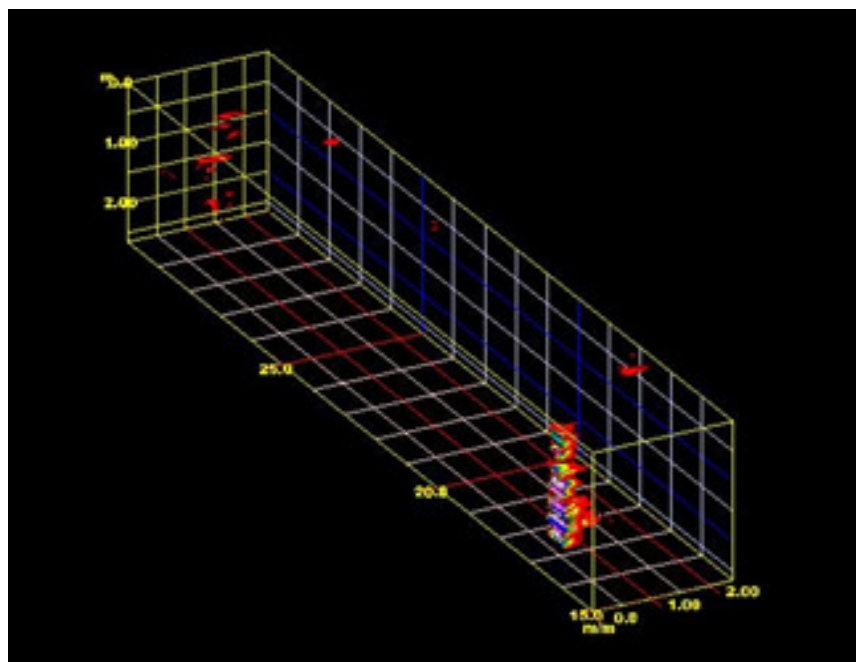


Fig. 69, Vista del MTS del Tramo 2, en rojo zonas de alto contraste.

En el **Tramo 2** tampoco no se observan zonas de reflexión de gran tamaño o con carácter lineal o continuo. Aunque sí es posible observar alguna reflexión con envolvente, pero su tamaño no indica que se trate de ningún elemento de interés de cara al objeto del estudio. Entre ellas, se observa una reflexión de alto contraste que probablemente vaya asociada a la existencia de un registro, como puede ser una trapa de luz, o similar. Este registro es el que aparece de forma clara en la vista del MTS de la zona que podemos ver en la fig. 69.

Se aprecia una zona de contraste que no se refleja en el MTS pero que se podría asociar al inicio de un estructura y detallaremos en observaciones.

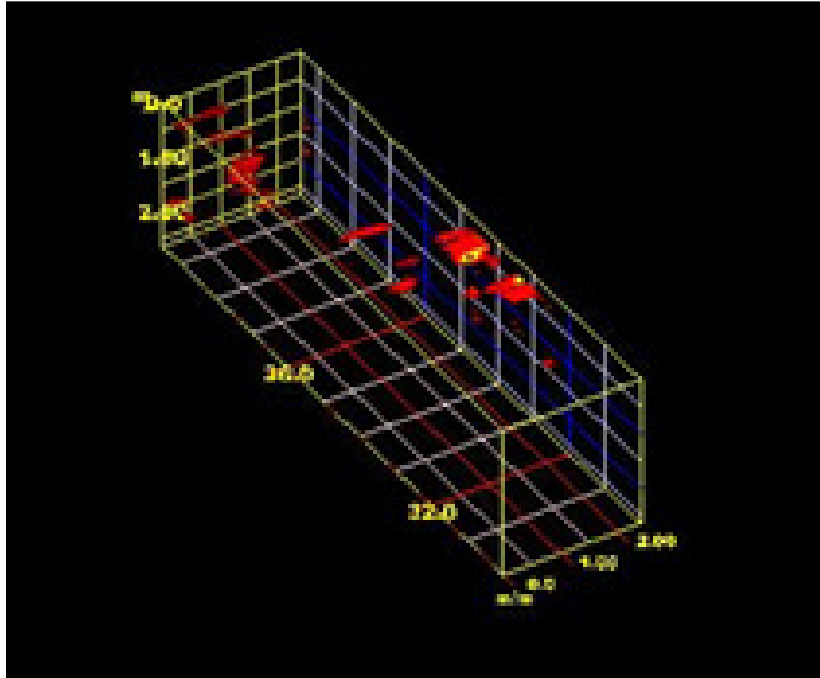


Fig. 70, Vista del MTS del Tramo 3, en rojo zonas de alto contraste.

En el **Tramo 3**, al igual que en los otros dos tramos de la misma malla no se observan zonas de reflexión que hagan sospechar la existencia de estructuras lineales de entidad. Por lo que podemos deducir que la malla AAB no es zona de gran interés a la hora de ejecutar las futuras excavaciones arqueológicas.

Se pueden ver dos zonas de reflexión de alto contraste que probablemente vaya asociada a la existencia de algún tipo elemento puntual enterrado.

En el tramo final se observa una zona con un patrón de reflexión muy heterogéneo, probablemente vaya asociado a la existencia de una zona con humedades y material más heterogéneo. Además en la misma zona se observa la parte de un bordillo más hundido que el resto del bordillo, lo que afianza esta teoría.

A continuación se mostrarán las secciones planas de la malla AAB:

Tramo 1 a diferentes profundidades:

0,25 m



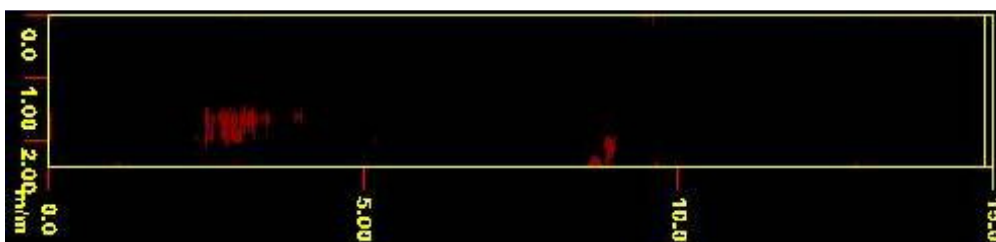
0,50 m



0,75 m



1,00 m



1,25 m



1,50 m

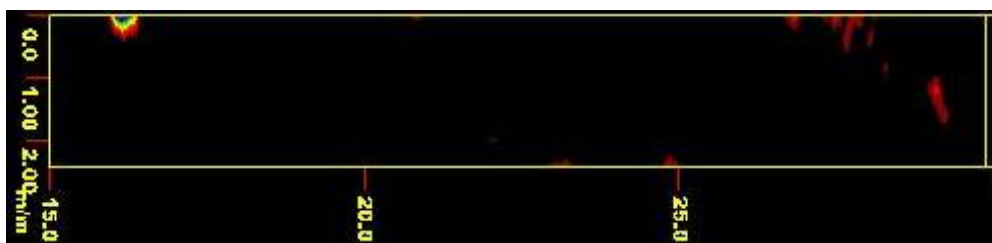


Secciones planas de la malla AAB, **Tramo 2** a diferentes profundidades:

0,25 m



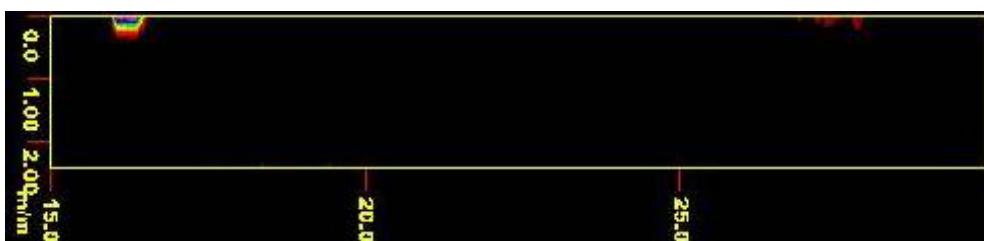
0,50 m



0,75 m



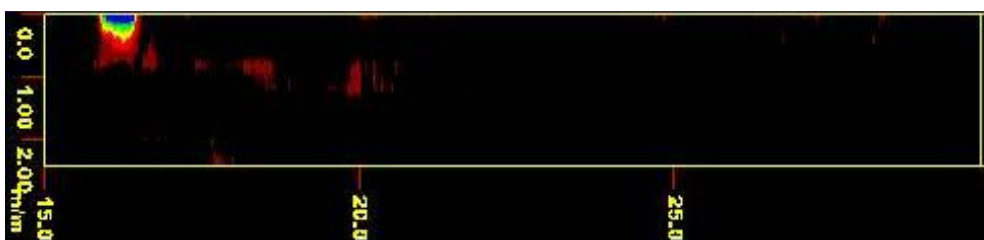
1,00 m



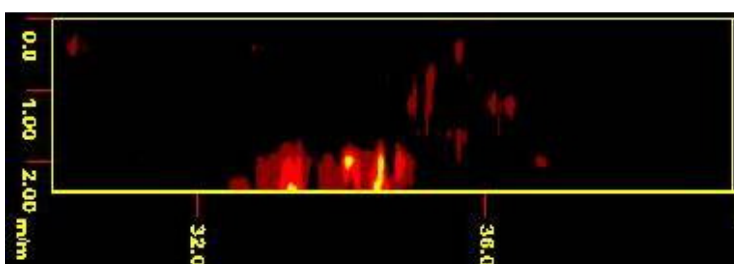
1,25 m



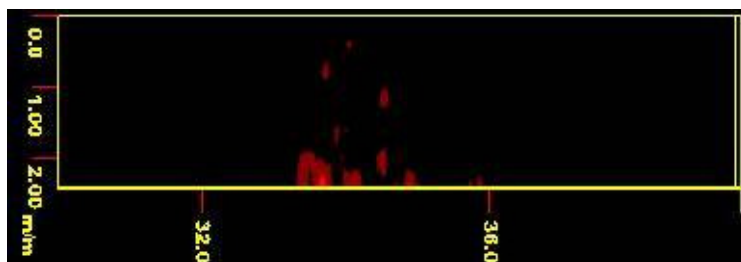
1,50 m

Secciones planas de la malla AAB, **Tramo 3** a diferentes profundidades:

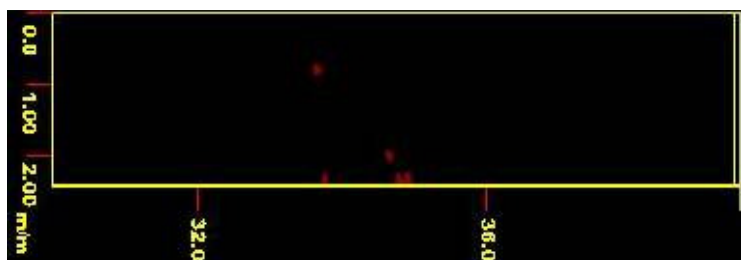
0,25 m



0,50 m



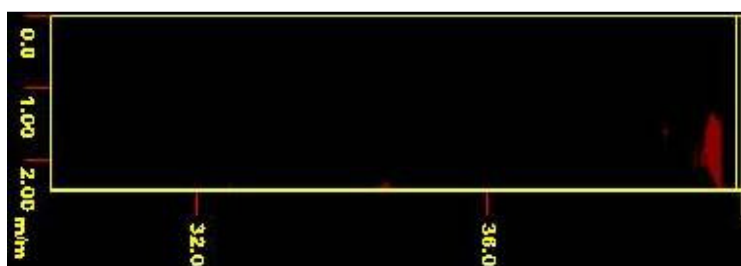
0,75 m



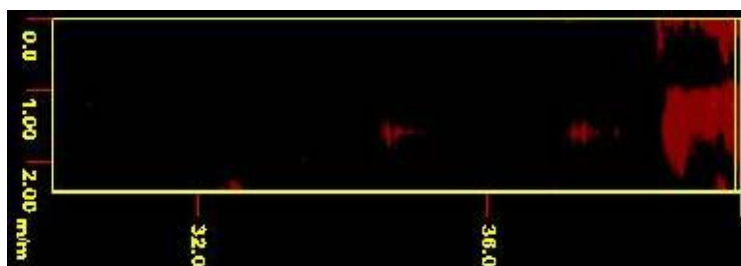
1,00 m



1,25 m



1,50 m



Observaciones:

El estudio detallado de los radargramas en la malla AAB nos revela en principio 3 zonas con un comportamiento eléctrico diferenciado que tendremos que tener en cuenta.

Zona 1

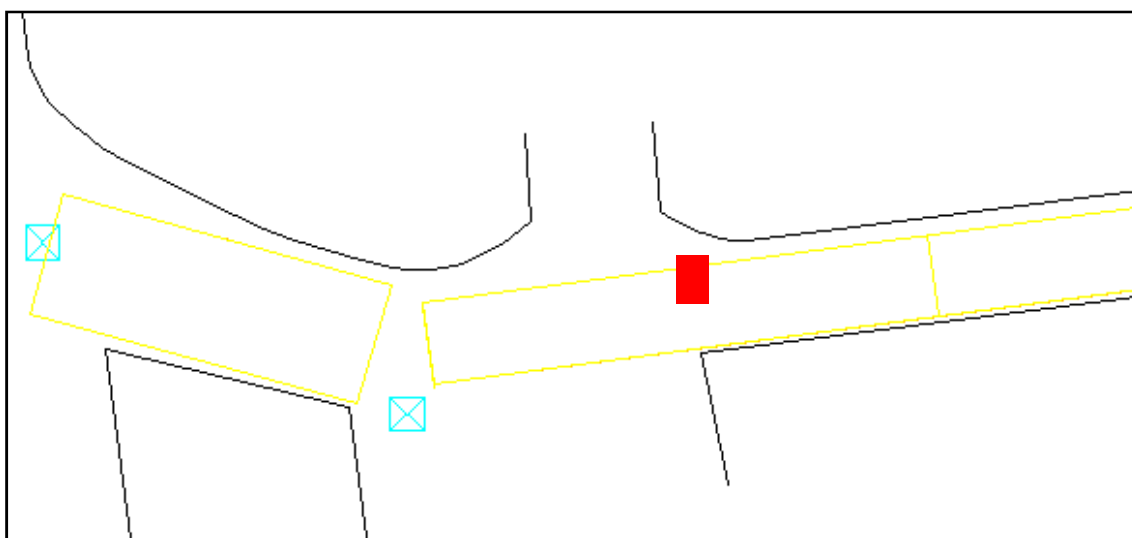


Fig. 71, Zona 1 en rojo, ubicada en tramo 1.

Se observa en los perfiles 0,4, 0,8 y 1,2 como una zona de remoción o tierra removida, que se expresa en una alteración del patrón por ruptura en la secuencia de reflexión, y que se puede observar claramente en los radargramas como muestra la fig. 73.

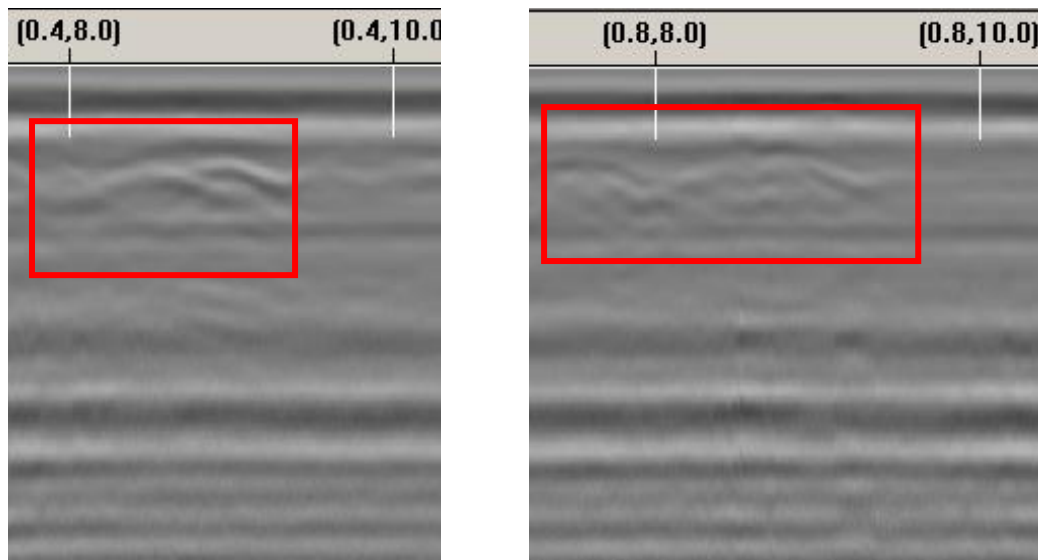


Fig. 72, En rojo zonas de remoción en tramo 1.

Zona 2

Se observa en los perfiles 0, 0,4, 0,8, 1,2 y 1,6 otra zona de alteración del subsuelo que indica un cambio del estado de la tierra respecto de la tierra adyacente (remoción). Esto se muestra en la figura 74, donde además se puede observar que es de mayor entidad que la mostrada en la figura 72.

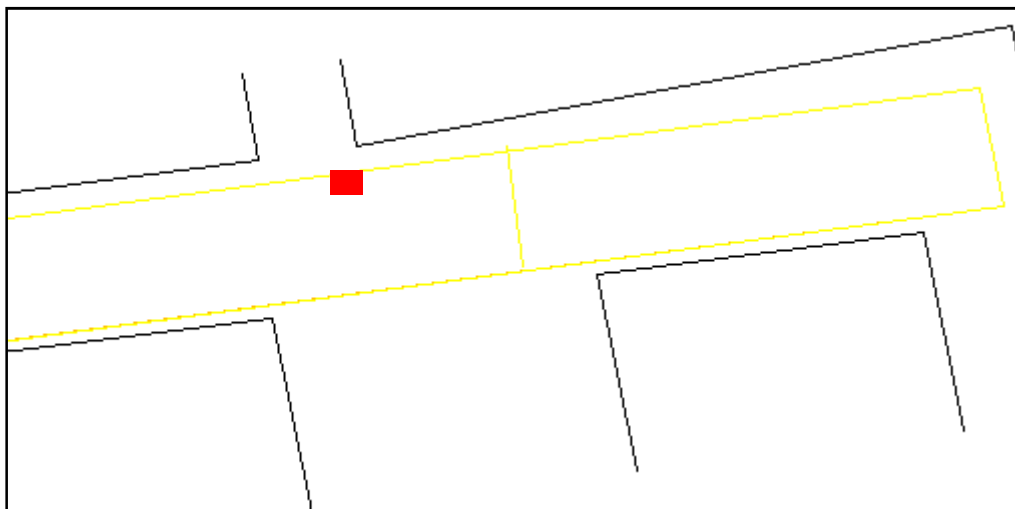


Fig. 73, Zona 2 en rojo, ubicada en tramo 2.

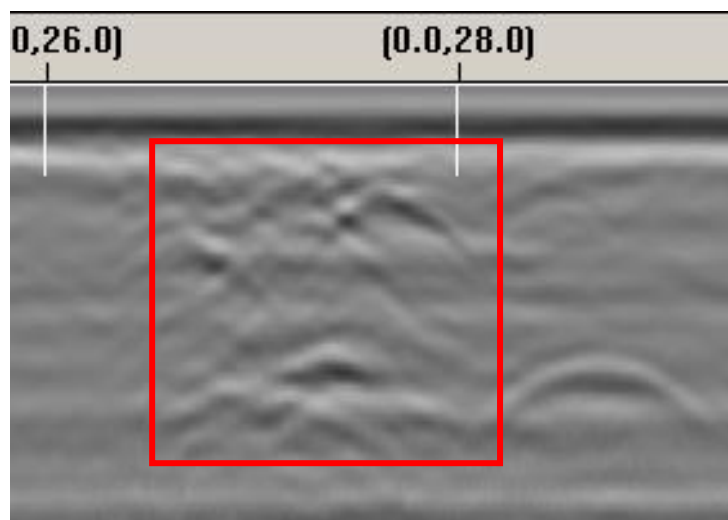


Fig. 74, Ejemplo de zona de remoción en perfil 0.

Zona 3

Se observa en los perfiles 1,2, 1,6, 2 y 2,4 dos zonas de remoción, con cambio de sustrato de coronación marcado. Se puede observar en la fig. 76.

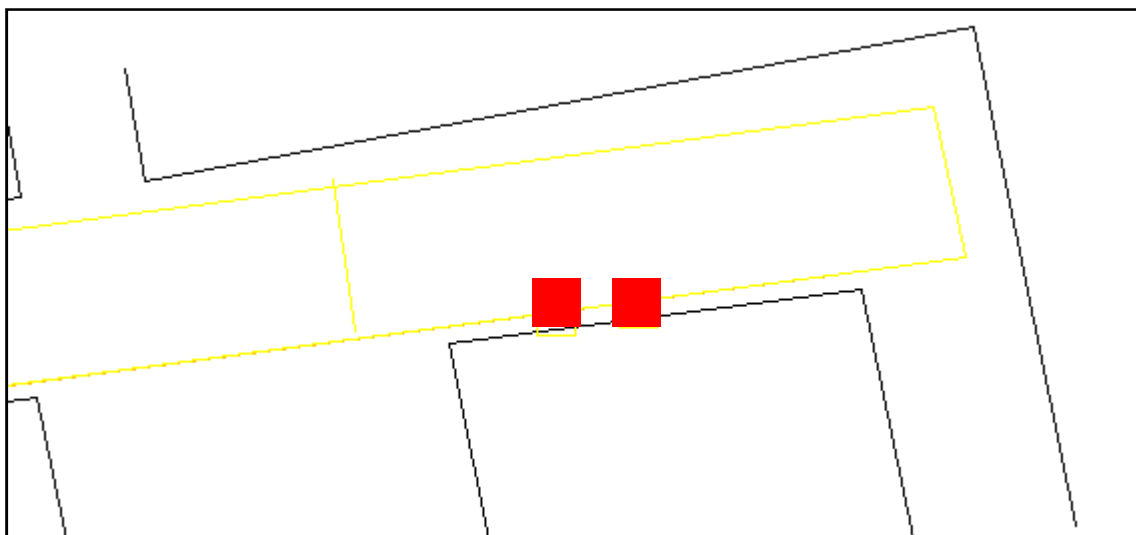


Fig. 75, Zona 3 en rojo, ubicada en tramo 3.

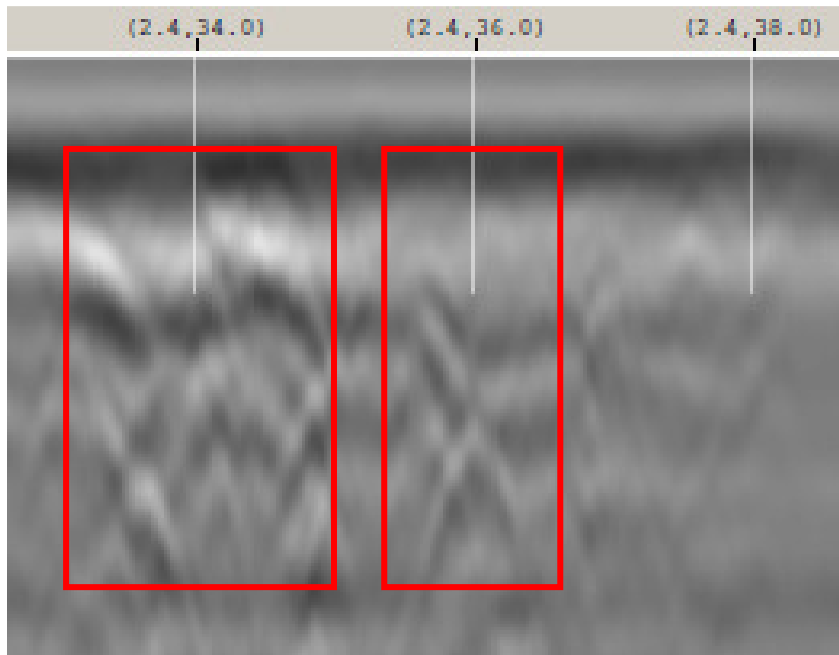


Fig. 76, En rojo zonas de remoción.

MALLA AAC

MALLA **AAC** de 10 secciones GPR de 10 metros de longitud; paso de malla 0,4 m, en la que se aprecian la existencia de diferentes estructuras a diferentes profundidades y de diferentes servicios y registros.

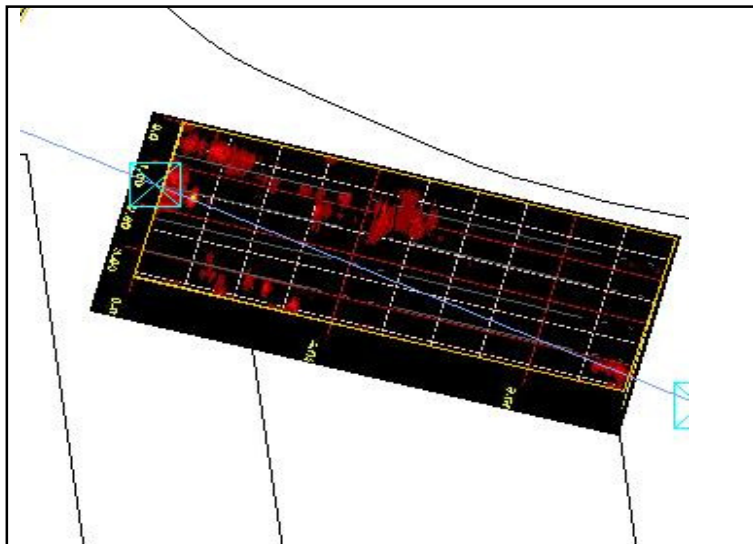


Fig. 77, Vista Ortogonal del MTS de la malla AAC, en rojo zonas de alto contraste.

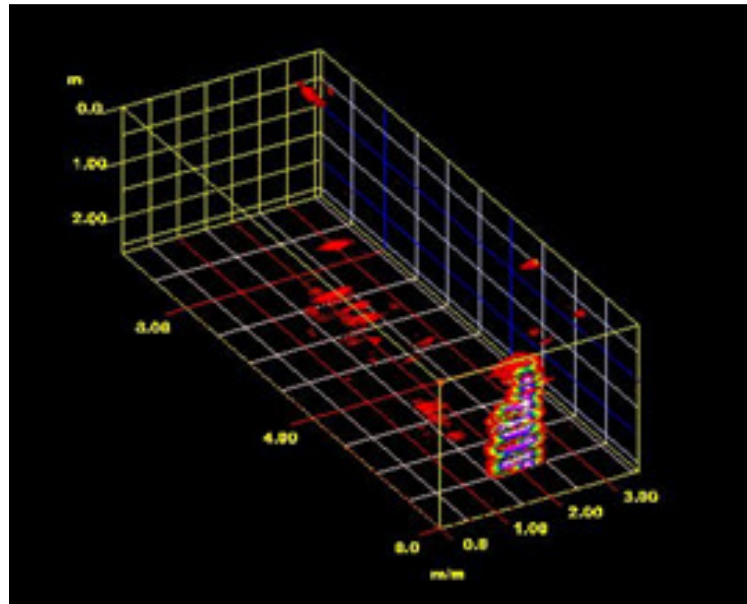
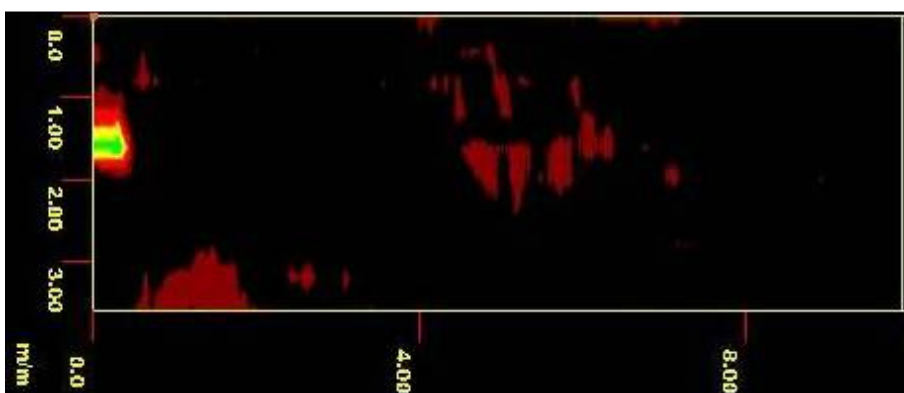


Fig. 78, Vista del MTS de la malla AAC, en rojo zonas de alto contraste.

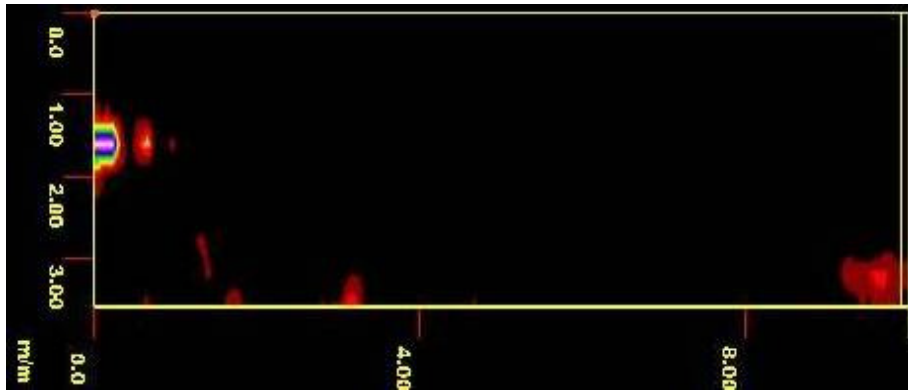
La malla **AAC** una zona de escasa respuesta de estructuras en sus radargramas. Es por tanto una zona que no tendrá excesivo valor a la hora de poder encontrar la fachada sur del palacio. Aunque se observan zonas con un comportamiento eléctrico diferenciado. Se puede ver claramente la existencia de un registro al principio de la malla correspondiente a una trapa de alumbrado.

Secciones planas de la malla **AAC** a diferentes profundidades:

0,25 m



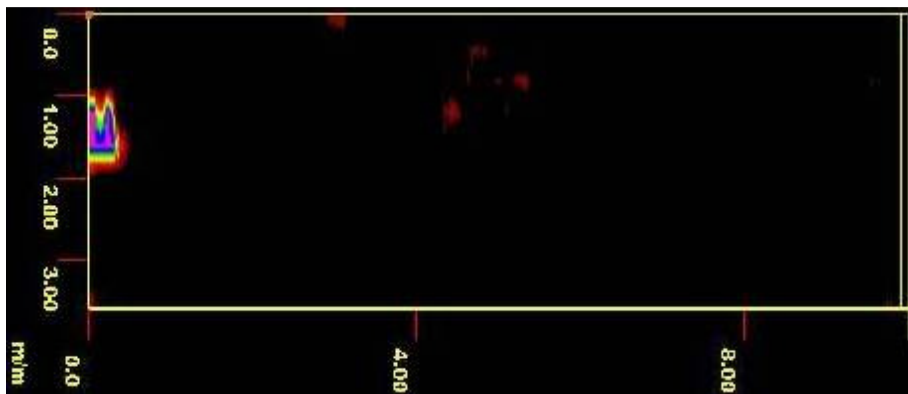
0,50 m



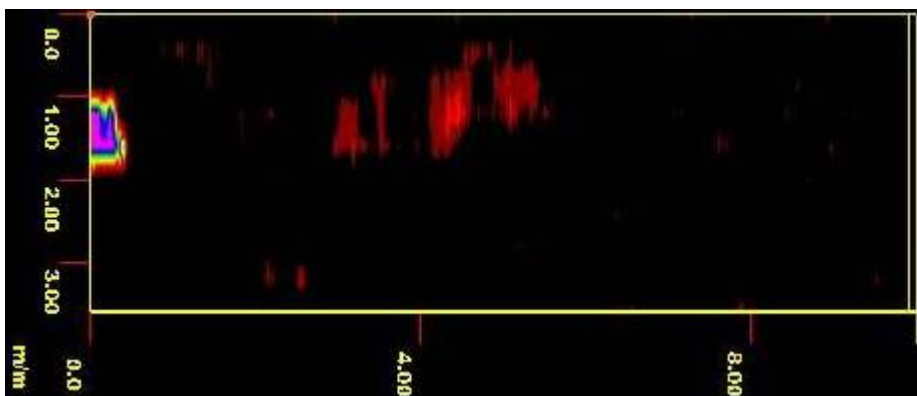
0,75 m



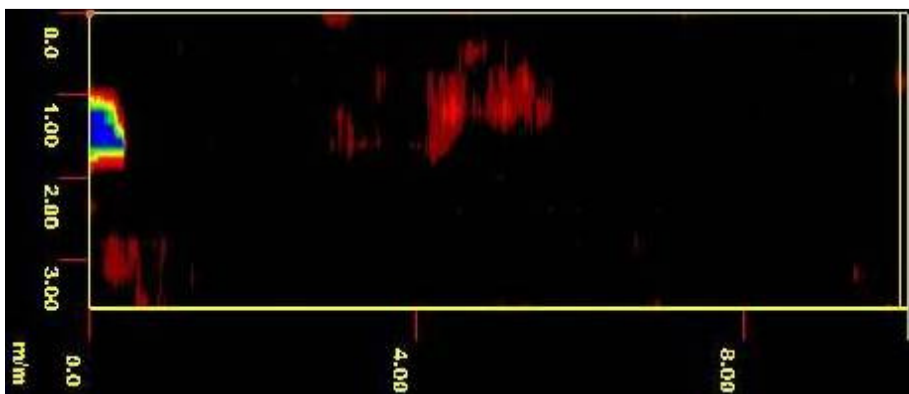
1,00 m



1,25 m



1,50 m



Observaciones:

Se observan reflexiones sin continuidad en el MTS de forma aislada, la más relevante viene marcada en la figura 79 y podría estar asociada a alguna estructura.

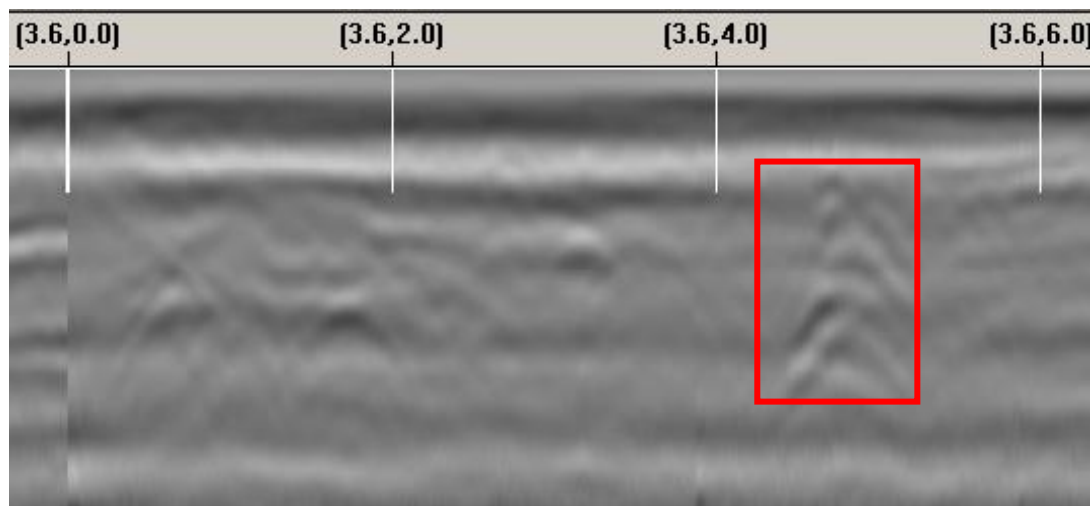


Fig. 79, Radargrama con diferentes reflexiones.

MALLA AAD

MALLA AAD 10 secciones GPR de 14 metros de longitud; paso de malla 0,4 m. En esta malla sí que se observan anomalías mucho más importantes de carácter lineal, que hay que tener muy en cuenta ya que siguen el patrón lógico que podría tener los cimientos de una fachada.

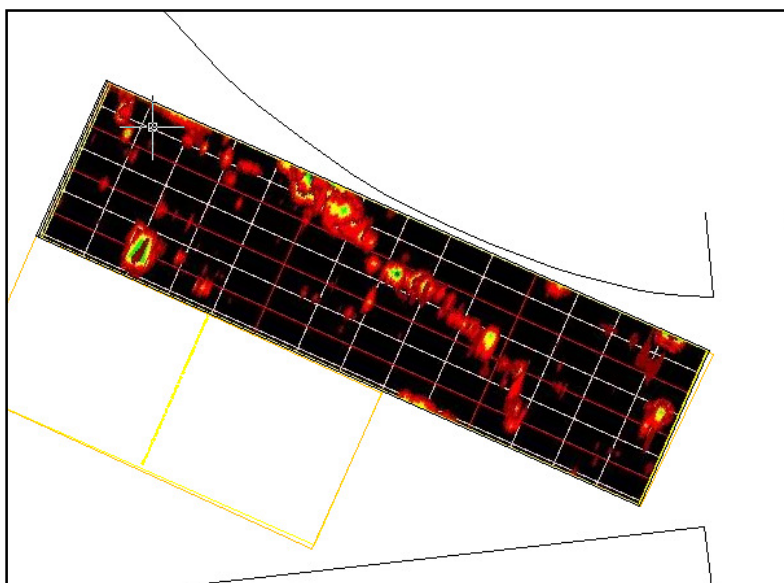


Fig. 80, Vista Ortogonal del MTS de la malla AAD, en rojo zonas de alto contraste.

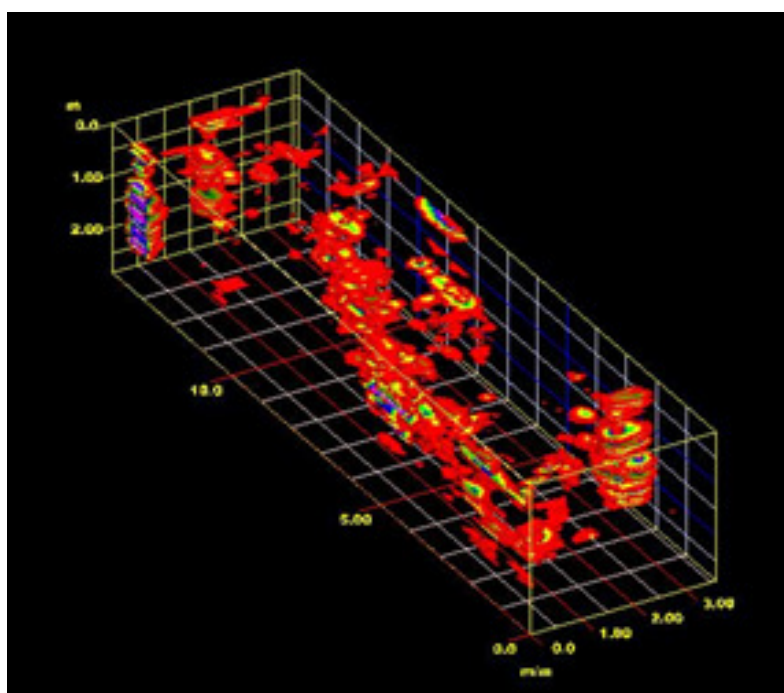
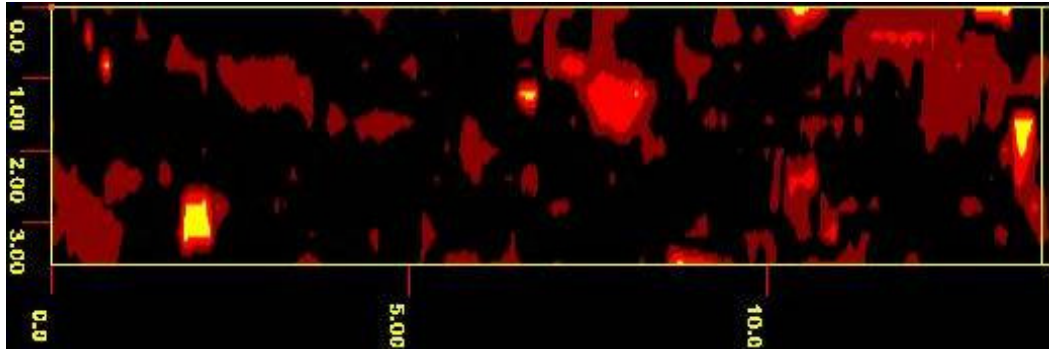


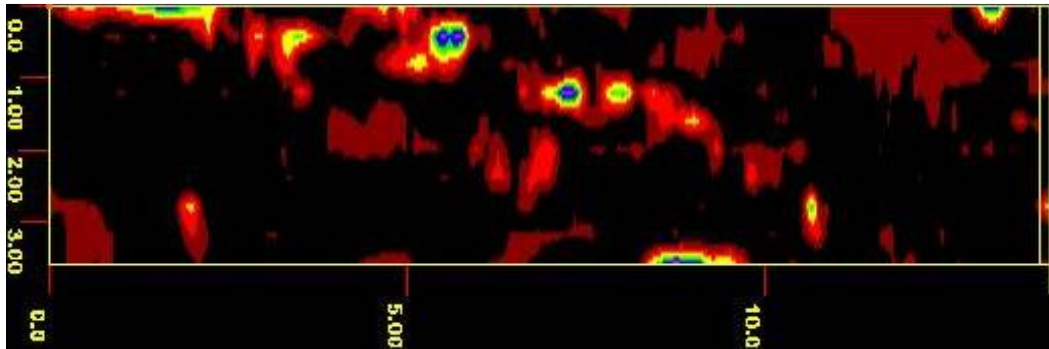
Fig. 81, Vista del MTS de la malla AAD, en rojo zonas de alto contraste.

Secciones planas de la malla **AAD** a diferentes profundidades:

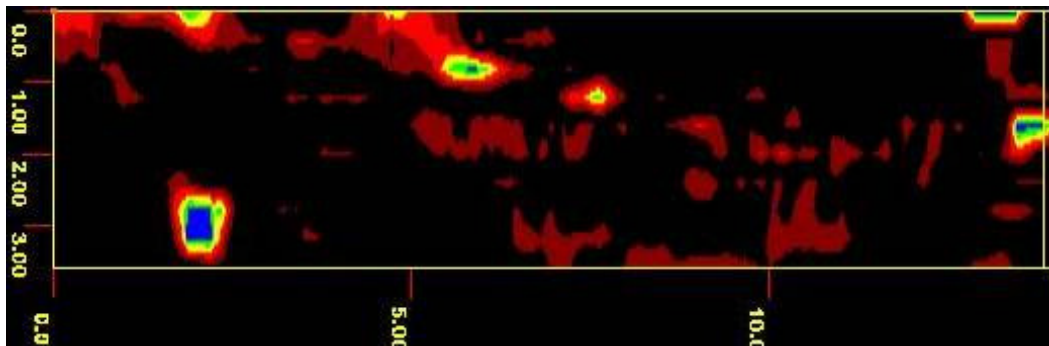
0,25 m



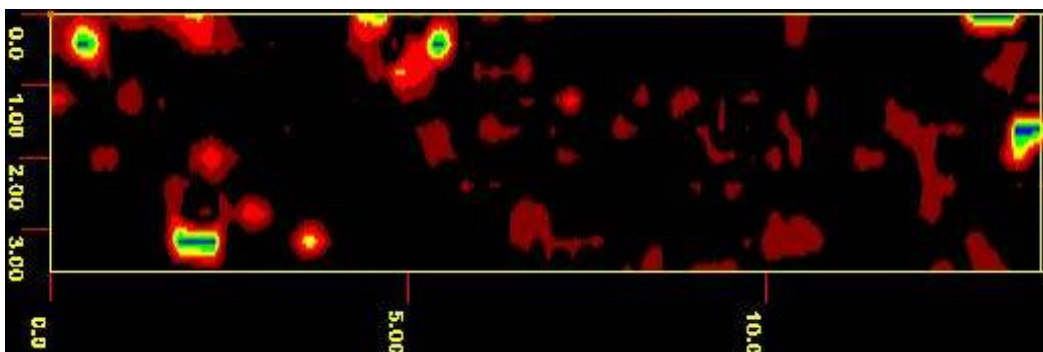
0,50 m



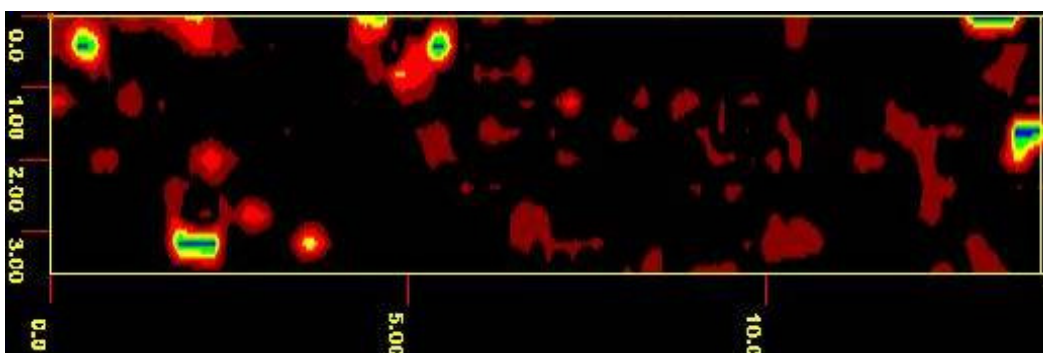
0,75 m



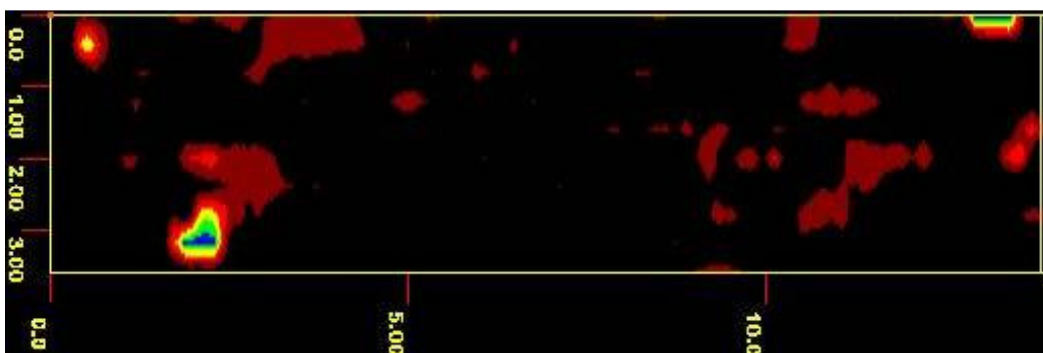
1,00 m



1,25 m



1,50 m



Observaciones:

Se observan diferentes estructuras y/o servicios, a priori la representación plana es un poco confusa porque su representación se hace de forma conjunta independientemente de la cota que tengan las diferentes estructuras.

Se observa un posible servicio enmarcado en azul en las fig.82 hasta la fig. 85. Luego se observa una estructura enmarcada en amarillo que presenta una correlación en las figuras 82 hasta la 86 y que aparece en torno a 50 cm de profundidad. Anexa a esta estructura transcurren junto a ellas diversas estructuras y/o servicios por su parte superior. En un principio, esta estructura es de suficiente entidad como para poder ser la fachada sur del palacio.

También es de destacar la existencia de un registro en al final del primer perfil, que corresponde a la una trapa de alumbrado, se enmarca en verde en la figura 82, pero se distingue mejor en la figura 81 o en las secciones planas anteriormente mostradas.

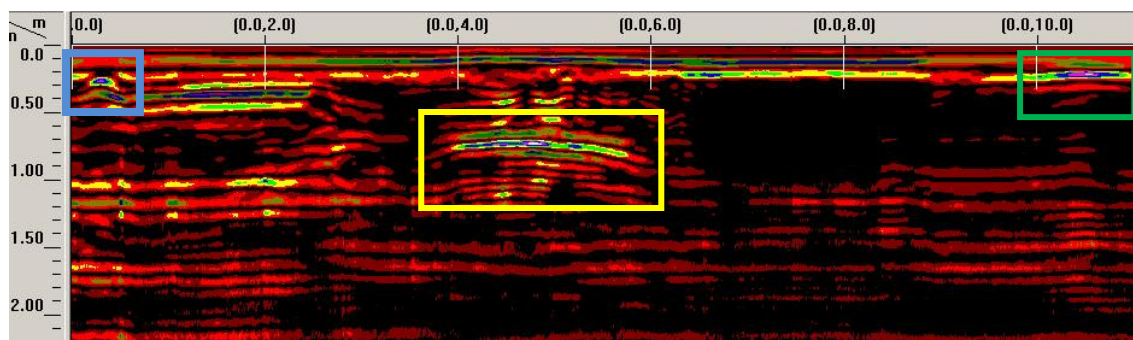


Fig. 82, Radargrama perfil 0,0.

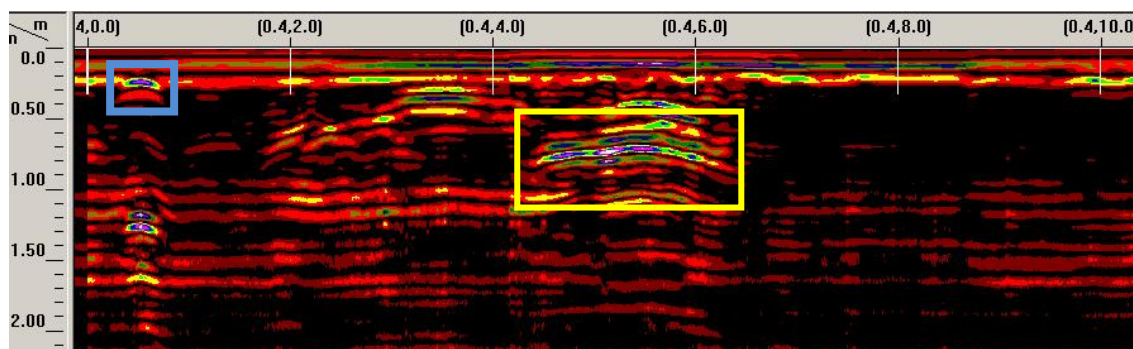


Fig. 83, Radargrama perfil 0,4.

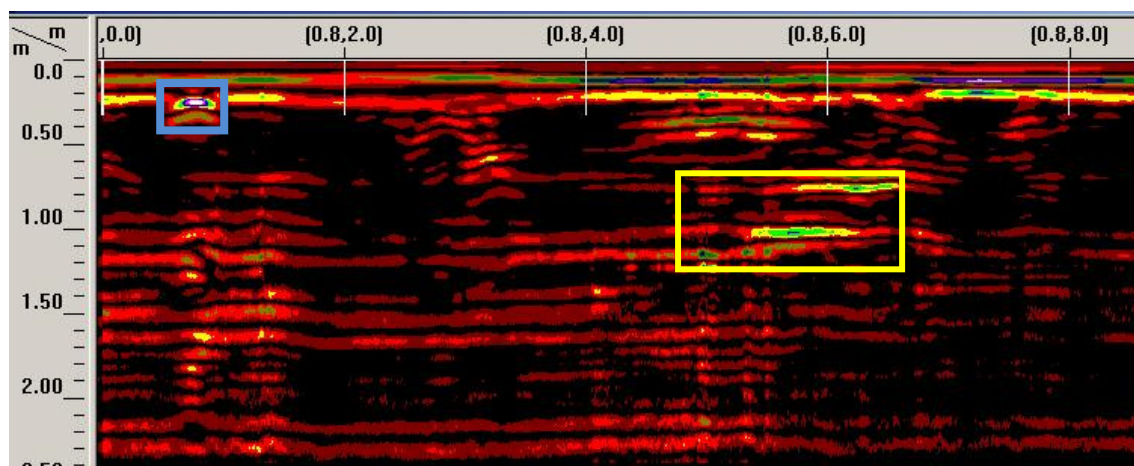


Fig. 84, Radargrama perfil 0,8.

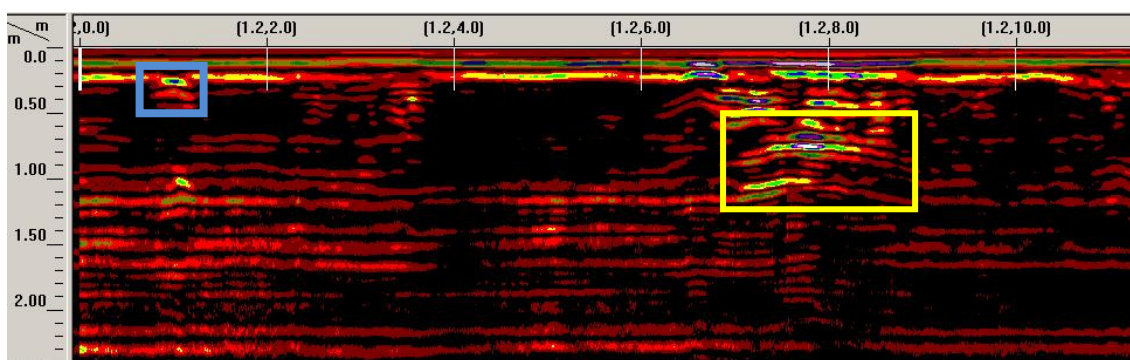


Fig.85, Radargrama perfil 1,2.

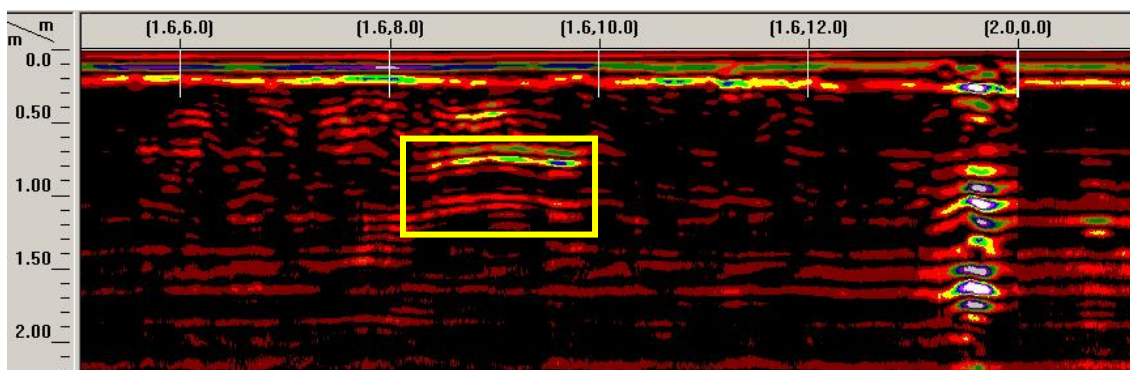


Fig. 86, Radargrama perfil 1,6.

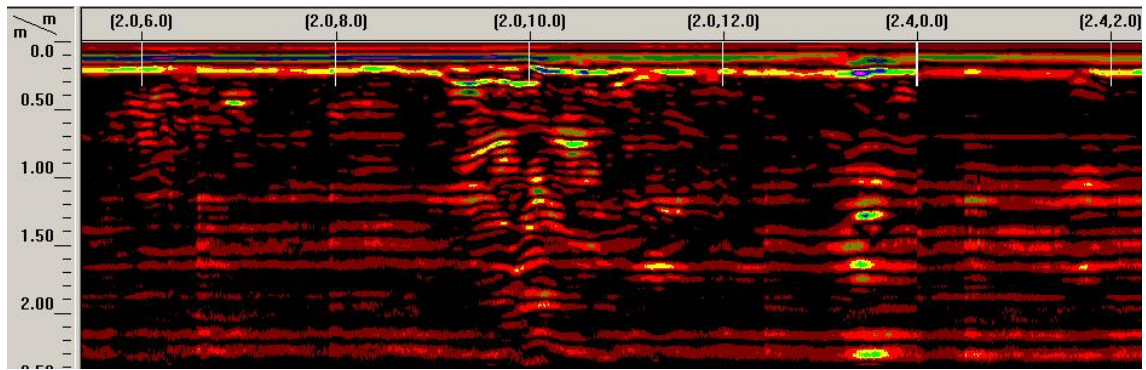


Fig. 87, Radargrama perfil 2,0.

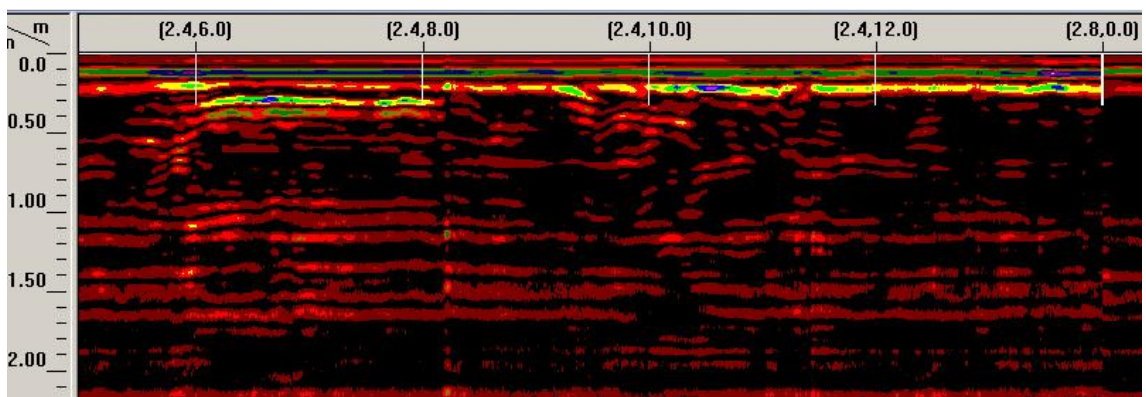


Fig. 88, Radargrama perfil 2,4.

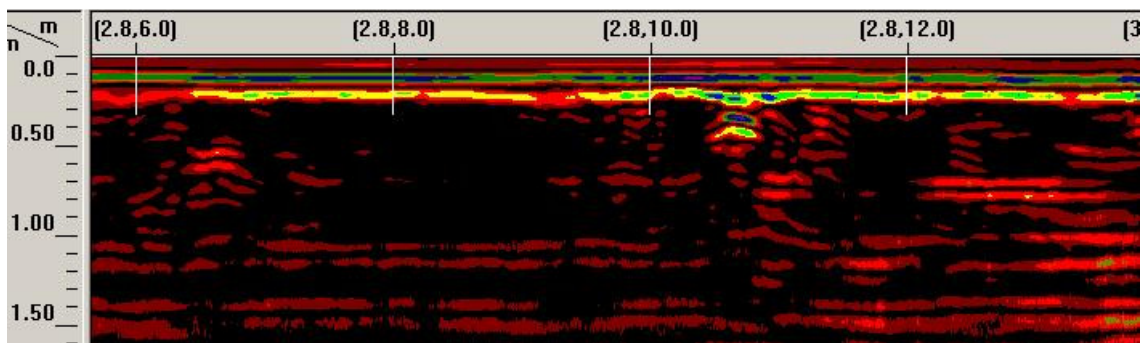


Fig. 89, Radargrama perfil 2,8.

MALLA AAE

MALLA AAE 10 secciones GPR de metros de longitud; paso de malla 0,4 m. De nuevo nos encontramos con una malla de gran valor por la cantidad de registros presentes y la continuidad de los mismos.

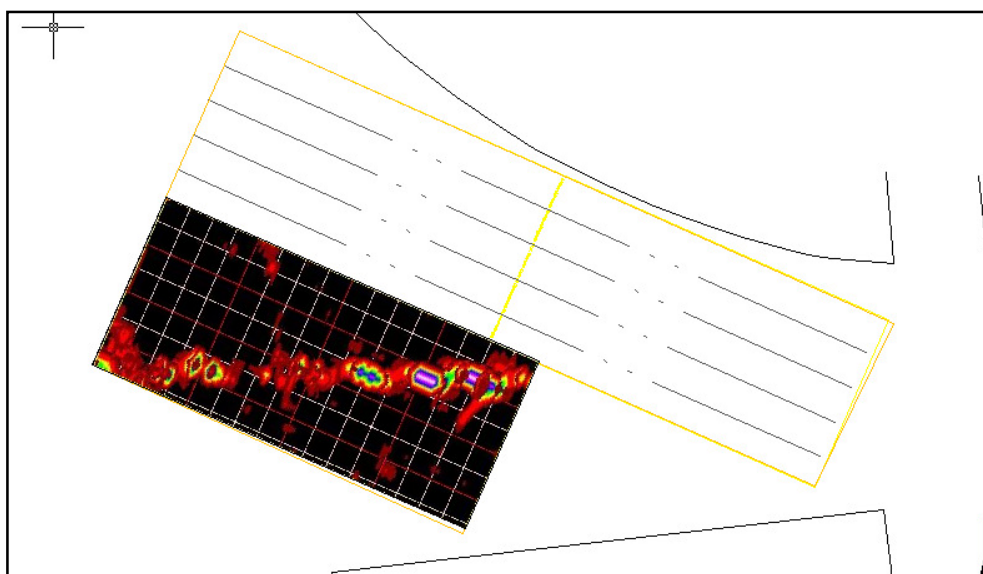


Fig. 90, Vista Ortogonal del MTS de la malla AAE, en rojo zonas de alto contraste.

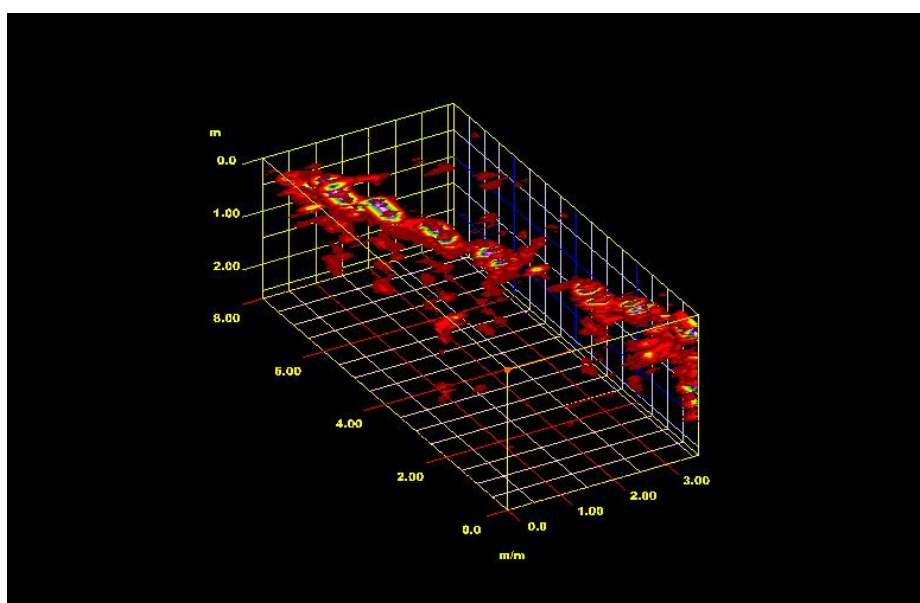
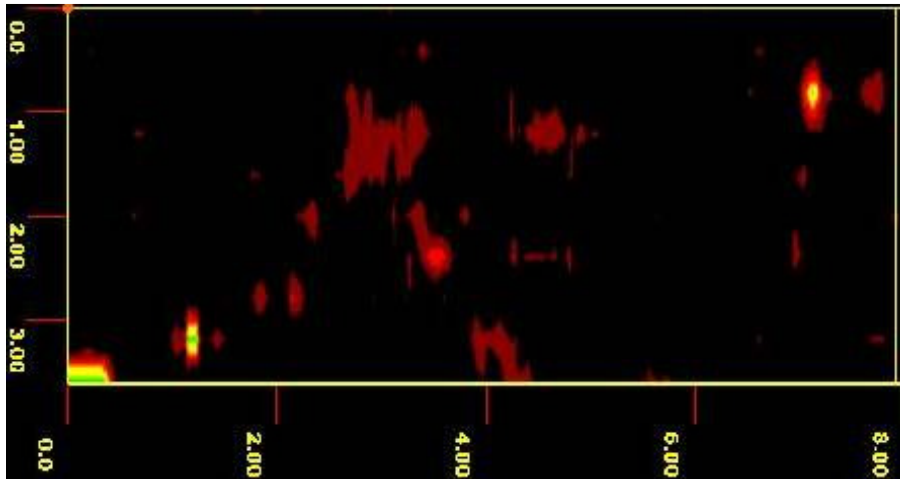


Fig. 91, Vista del MTS de la malla AAE, en rojo zonas de alto contraste.

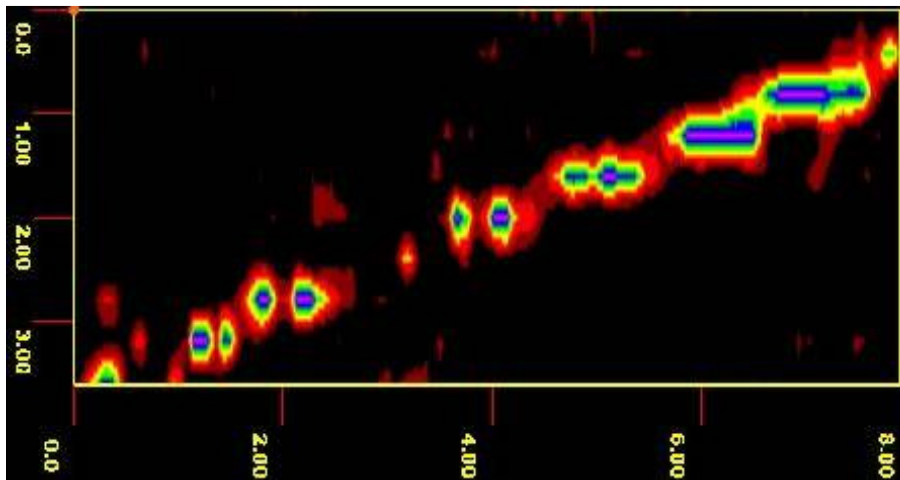
Se aprecian la existencia de diferentes estructuras a diferentes profundidades y de diferentes servicios y registros.

Secciones planas de la malla **AAE** a diferentes profundidades:

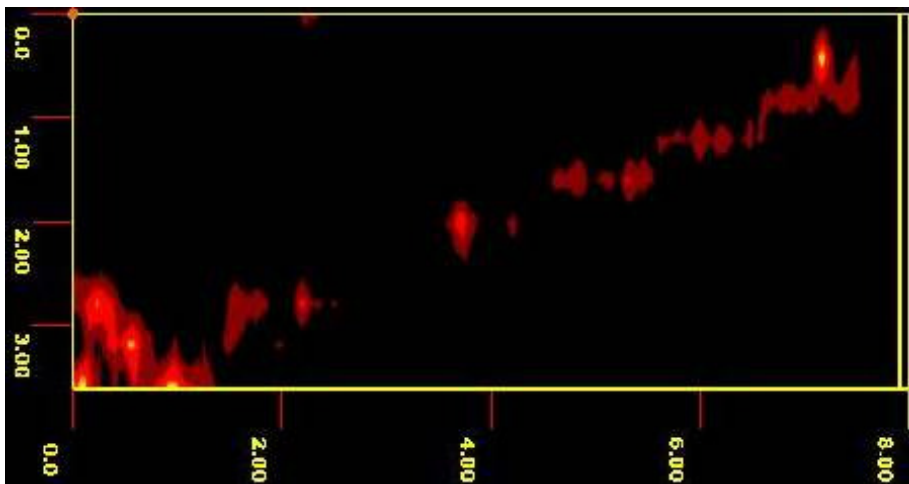
0,25 m



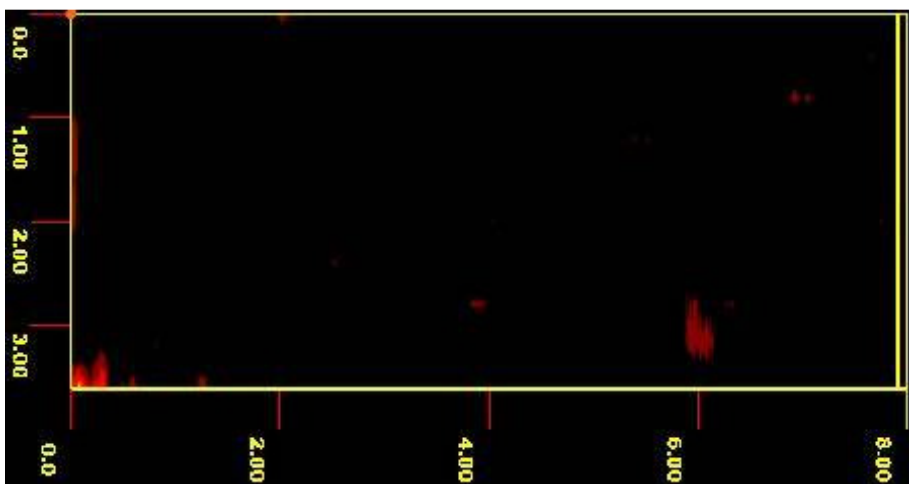
0,50 m



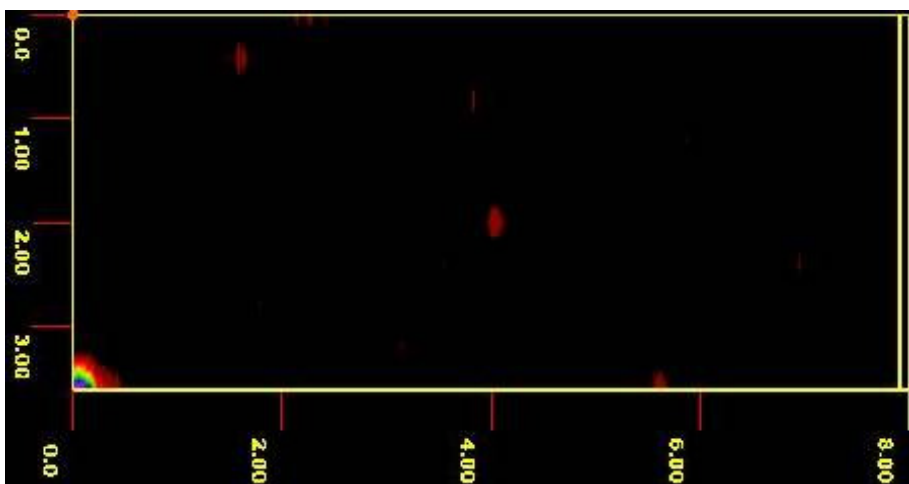
0,75 m



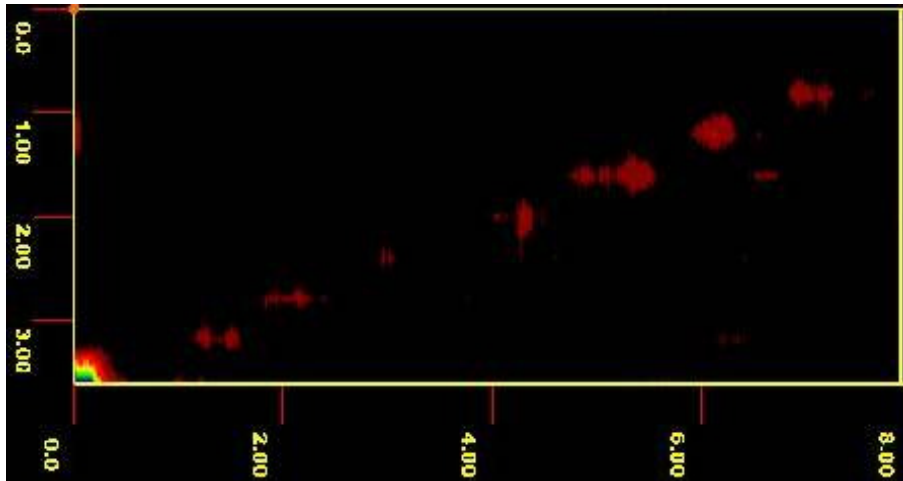
1,00 m



1,25 m



1,50 m



Observaciones:

Se pueden ver diferentes estructuras y/o servicios con carácter lineal. En esta malla por el contrario de la AAD, la planta del MTS no presta a confusión debido a que la mayoría de los registros se presentan a una profundidad cercana a los 50 cm, como se puede ver claramente en la secciones de planta a diversas profundidades mostradas.

Se observa una estructura de entidad, enmarcada en amarillo, que presenta una correlación a lo largo de los perfiles, esta estructura tiene su primera detección en el perfil 0,8 (fig.92) hasta el perfil 2,8 (fig.93).

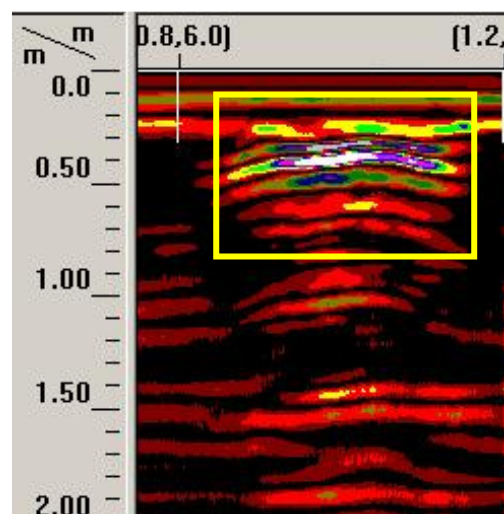


Fig. 92, Radargrama perfil 0,8.

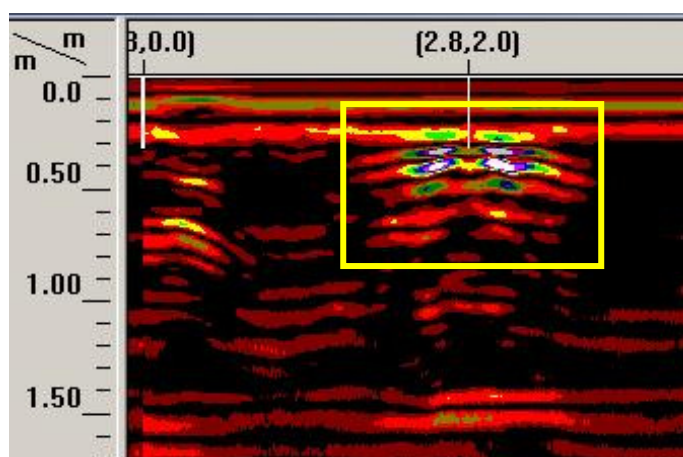


Fig. 93, Radargrama perfil 2,8.

Como se puede ver a lo largo del capítulo las mallas AAD y AAE, que deben corresponder con la parte de la Torre de la Reina y parte de la Nueva Galería del palacio, son las que únicas que presentan respuestas de carácter lineal y de gran entidad, por lo que serán las únicas que entrarán en el análisis posterior de los resultados. Los radargramas de estas mallas se presentan en los anejos del trabajo.

13. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De todas las mallas realizadas, es evidente que las de mayor interés, a la vista de las respuestas obtenidas en los radargramas, son las mallas denominadas AAD y AAE. Estas mallas corresponden, según los planos de Manuel Cavallero georeferenciados tras los hallazgos de 1986, a la Torre de la Reina y a las arcadas de la Galería Nueva de la fachada sur del Palacio del Real.

Si nos centramos en los MTS generados de esas dos mallas, podemos observar que los elementos con carácter lineal que se observan no corresponden en absoluto con la posición y orientación de la teóricas ruinas del palacio que se deberían encontrar bajo esa zona de estudio, como se puede ver en la figura 94. Así pues, es muy probable que las respuestas obtenidas en el georradar en esa zona se correspondan con conductos y canalizaciones de servicios tanto de alumbrado como de aguas.

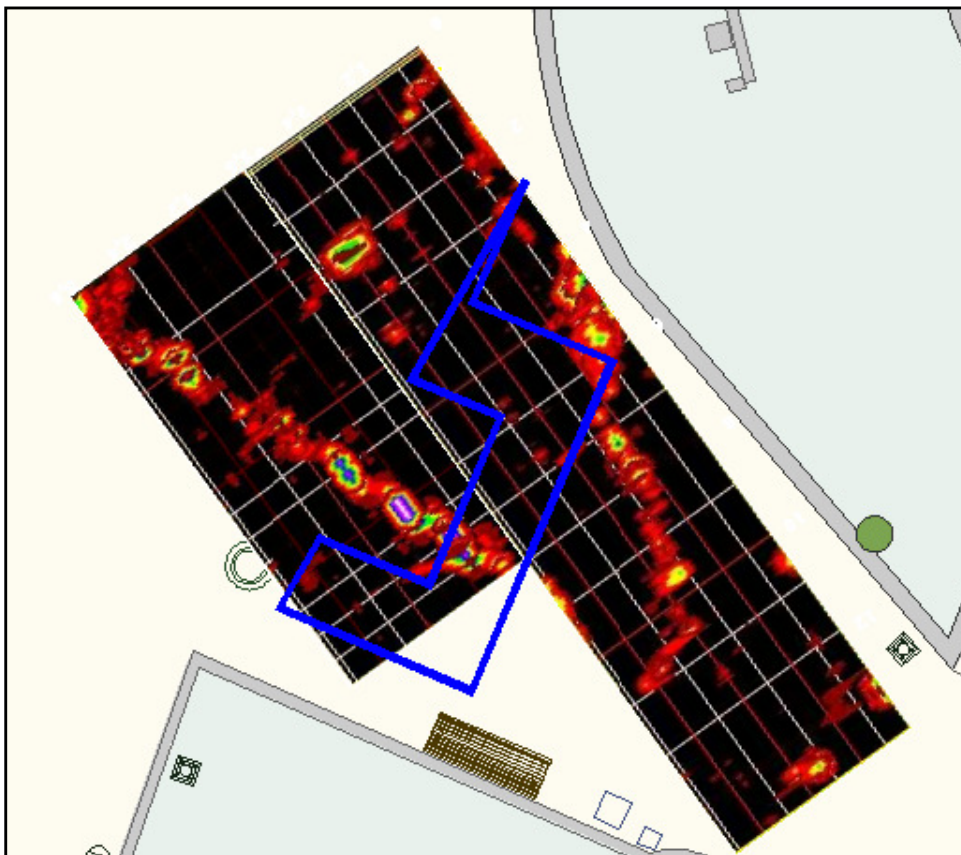


Fig. 94, Planta de los MTS de las mallas AAD y AAE. En azul la Torre de la Reina.

¿Entonces, no existen ruinas del palacio bajo esa zona? Seguramente la respuesta sea que sí que existen esas ruinas, que además seguro que deben ser de gran entidad. La no aparición de forma clara de respuestas en los radargramas de las ruinas del Palacio de Real se puede deber a múltiples factores, ya que como se indica al inicio del presente bloque el método GPR no siempre da una respuesta positiva ante la existencia de restos arqueológicos, ya que son muchos los parámetros que condicionan el comportamiento de la señal electromagnética y su posterior análisis. En concreto, son probablemente dos los parámetros que mayor peso tienen en este aspecto.

En primer lugar la permitividad dieléctrica (ϵ) de los restos arqueológicos debe ser muy similar a la del terreno bajo el que están enterrados. La justificación de este indicio se basa en que el material entre el que se encuentran los restos es el mismo que el de los propios restos, ya que como se ha dicho, en la demolición del palacio los restos se agruparon en torno a los cimientos. En concreto la muralla está compuesta por gravas cimentadas y el suelo por gravas con un alto nivel de compactación.

El otro factor a tener en cuenta es la profundidad de los restos, que al estar poco profundos, son susceptibles de no quedar bien reflejados en los radargramas, ya que los elementos muy superficiales pueden no dar respuestas claras.

CONCLUSIÓN

La realización del trabajo ha servido para introducirse de lleno en el fundamento teórico del georradar y tener una mayor capacidad de análisis de los datos obtenidos por este método de prospección geofísica. También ha servido para aprender a investigar y conocer la historia de uno de los edificios derruidos más importantes de mi localidad.

La falta de resultados positivos a la hora de encontrar los restos del palacio no supone ningún contratiempo real, ya que entra dentro de la propia definición de la técnica este tipo de acontecimientos. De hecho creo que ha sido mucho más positivo encontrarse con dificultades a la hora de analizar los resultados, puesto que ello ha derivado en un mayor tiempo de análisis de los radargramas y por ende una mayor asimilación de los elementos de interés a la hora de analizar los mismos. Hecho que puede ser de gran utilidad en trabajos posteriores.

Se podría haber llevado alguna iniciativa a la hora de la toma de datos para intentar mejorar la precisión y resolución de los MTS generados. Por ejemplo se podrían haber tomado datos de perfiles transversales en las mallas, o haber contrastado los datos de la antena de 400 MHz usada con los aportados por antenas de diferentes frecuencias. Ya que la escasa profundidad de los restos ha supuesto un problema, en caso de utilizar otra antena quizá fuera conveniente el uso de una de mayor frecuencia. De todos modos, dadas las condiciones electromagnéticas de los restos y el material circundante a ellos, es probable que ninguna mejora propuesta en la toma de datos hubiera sido de gran ayuda.

Por último, se podría haber llevado un estudio pormenorizado de cada radargrama para analizar y localizar las pequeñas variaciones introducidas por la existencia de los restos arqueológicos, una vez ubicados con precisión debido a que ya han sido realizadas las excavaciones arqueológicas; tema que queda lejos del objetivo del presente estudio. Así pues, se anima a aquel que disponga del tiempo y las ganas suficientes para que lo lleve a cabo y profundice en la investigación de la influencia de estructuras enterradas cuyas propiedades electromagnéticas son muy similares a las del subsuelo circundante.

BIBLIOGRAFÍA

Boira, J.V., Algarra, V. (2006). El Palacio de Real de Valencia: los planos de Manuel Cavallero (1802). Ajuntament de Valencia.

Daniels, David J. (2004). Ground penetrating radar. IEE Radar, Sonar and Navigation series 15. London.

Llorente Olivares, Teodoro (1980). Valencia: sus monumentos y artes. Su naturaleza e historia. Albatros, Valencia.

Lorenzo Cimadevilla, Enrique (1996). Prospección geofísica de Alta Resolución mediante Geo-Radar, Aplicaciones a obras civiles. CEDEX, Ministerio de Fomento. Madrid.

Pérez García, M^a de la Vega (2001). Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Tesis doctoral UPC, 2001.

Piquer Casas, J.C. (2007). Los modelos digitales en la arquitectura : desarrollo del proyecto e investigación patrimonial. Palacio Real de Valencia, (1239-1810): análisis y reconstrucción virtual sobre la planta de Vicente Gascó de 1761. Tesis doctoral UPV, 2007.

User's Manual TerraSIRch SIR System-3000. Publicado por Geophysical Survey Systems, Inc. 2003.

User's Manual RADAN 6.5. Publicado por Geophysical Survey Systems, Inc. 2003.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a la profesora Doctora D^a. M^a Amparo Núñez Andrés su comprensión y ayuda en mi corta estancia en la EPSEB, y su empeño y determinación a la hora de llevar a cabo el proyecto.

También quisiera agradecer especialmente al profesor Doctor D. Jordi Padín Devesa todo su apoyo y comprensión en tiempos difíciles, y su dedicación absoluta e inestimable ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Y en definitiva, agradecer a todo el personal docente e investigador que con su esfuerzo construye cada día una Universidad mejor; que si bien son la inmensa mayoría, por desgracia, no son todos.