

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

E.T.S.I Geodésica, Cartográfica y Topográfica



GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

## PROYECTO DE FIN DE GRADO

*Estudio del subsuelo mediante técnicas de prospección  
geofísica.*

Autor: Artiom Plamadeala

Tutor: Dr. Jorge Padín Devesa

Valencia, Septiembre de 2016



***A mi familia por su apoyo incondicional y  
por sus sacrificios en todos estos años.***

***A mi tutor Dr. Jorge Padín por la ayuda científica  
y técnica en la elaboración de este trabajo.***

***Por todo ello, GRACIAS.***



# Índice

1. Introducción.....	3
1.1 Situación .....	3
1.2 Emplazamiento .....	5
2. Memoria.....	9
2.1 Descripción general del proyecto. ....	9
2.2 Antecedentes.....	9
2.3 Objetivos.....	11
2.4 Técnicas de prospección geofísica .....	12
2.5 Fundamentos físicos.....	14
2.5.1 Ondas electromagnéticas.....	14
2.5.2 Propiedades del medio de propagación .....	17
2.5.3 Propiedades de las ondas electromagnéticas .....	22
2.6 Georradar.....	27
2.6.1 Descripción.....	27
2.6.2 Aplicaciones .....	29
3. Instrumentación y software empleado .....	33
3.1 Equipos.....	33
3.1.1 Antena 400 MHz .....	34
3.1.2 Unidad Central.....	36
3.1.3 Accesorios .....	37
3.2 Programa informático Radan 7 .....	37
4. Toma de datos .....	41
4.1 Zona 1.....	42
4.2 Zona 2.....	43
5. Procesado de los datos.....	47
5.1 Zona 1.....	47
5.1.1 Fichero de cabecera .....	47
5.1.2 Corrección TIME ZERO .....	48
5.1.3 BACKGROUND REMOVAL.....	50
5.1.4 MIGRACIÓN.....	52
5.1.5 Ajuste de la ganancia.....	54
5.1.6 Profundidad máxima .....	57
5.2 Zona 2.....	58

5.2.1	Fichero de cabecera .....	58
5.2.2	Corrección TIME ZERO .....	59
5.2.3	BACKGROUND REMOVAL .....	60
5.2.4	MIGRACIÓN.....	61
5.2.5	Ajuste de la ganancia .....	62
5.2.6	Profundidad máxima .....	63
6.	Análisis de los resultados obtenidos.....	67
6.1	Zona 1.....	67
6.2	Zona 2.....	70
7.	Conclusiones .....	75
8.	Anexos.....	79
9.	Bibliografía.....	128

## Índice de imágenes

<i>Imagen 1. Situación de la Plaza de las Fuentes</i> .....	4
<i>Imagen 2. Plaza de las Fuentes</i> .....	4
<i>Imagen 3. Las zonas 1 y 2 dentro de la Plaza de las Fuentes</i> .....	5
<i>Imagen 4. Antigua Torre. Vista exterior</i> .....	9
<i>Imagen 5. Antigua Torre. Vista interior</i> .....	10
<i>Imagen 6. Área de la muralla</i> .....	10
<i>Imagen 7. Área de la muralla</i> .....	11
<i>Imagen 8. Espectro electromagnético</i> .....	15
<i>Imagen 9. Abreviaturas de las distintas zonas del espectro electromagnético</i> .....	15
<i>Imagen 10. Propagación del campo electromagnético</i> .....	22
<i>Imagen 11. Las dos leyes de reflexión</i> .....	25
<i>Imagen 12. Fenómeno de refracción</i> .....	26
<i>Imagen 13. Georradar TerraSEARch SIR System-3000</i> .....	33
<i>Imagen 14. Antena 400 MHz. Modelo 5103</i> .....	35
<i>Imagen 15. Unidad central del georradar</i> .....	36
<i>Imagen 16. Programa informático RADAN 7</i> .....	37
<i>Imagen 17. Emplazamiento de las zonas de trabajo 1 y 2</i> .....	41
<i>Imagen 18. Malla. Zona 1</i> .....	42
<i>Imagen 19. Malla. Zona 2</i> .....	43
<i>Imagen 20. Fichero de cabecera. Zona 1</i> .....	47
<i>Imagen 21. Corrección TIME ZERO antes de aplicar. Zona 1</i> .....	48
<i>Imagen 22. Gráfico corrección TIME ZERO antes de aplicar. Zona 1</i> .....	49
<i>Imagen 23. Resultado corrección TIME ZERO. Zona 1</i> .....	49
<i>Imagen 24. Gráfico del resultado de la corrección TIME ZERO. Zona 1</i> .....	50
<i>Imagen 25. Radargrama antes de aplicar el</i> .....	51
<i>Imagen 26. Radargrama después de aplicar el</i> .....	51
<i>Imagen 27. Funcionamiento del georradar</i> .....	52
<i>Imagen 28. Radargrama L021 ante de aplicar la Migración. Zona 1</i> .....	53
<i>Imagen 29. Radargrama L021 después de aplicar la Migración. Zona 1</i> .....	54
<i>Imagen 30. Ajuste de la Ganancia. Los parametros a ajustar. Zona 1</i> .....	55
<i>Imagen 31. Radargrama resultado del ajuste de la ganancia. Zona 1</i> .....	56
<i>Imagen 32. Línea que define la profundidad máxima efectiva.</i> .....	57
<i>Imagen 33. Fichero de cabecera. Zona 2</i> .....	58
<i>Imagen 34. Antes de aplicar TIME ZERO. Zona 2</i> .....	59
<i>Imagen 35. Radargrama después de aplicar TIME ZERO. Zona 2</i> .....	59
<i>Imagen 36. Radargramas antes y después de aplicar el filtro BACKGROUND REMOVAL. Zona 2</i> .....	60
<i>Imagen 37. Radargrama antes de aplicar la Migración. Zona 2</i> .....	61
<i>Imagen 38. Radargrama resultado de la aplicación de la Migración. Zona 2</i> .....	61
<i>Imagen 39. Ajuste de la ganancia. Radargrama antes de aplicar el ajuste. Zona 2</i> .....	62
<i>Imagen 40. Ajuste de la ganancia. Radargrama resultado del ajuste. Zona 2</i> .....	62
<i>Imagen 41. Línea de profundidad máxima efectiva. Zona 2</i> .....	63

<i>Imagen 42. Vista 3D de la zona 1 .....</i>	<i>67</i>
<i>Imagen 43. Vista 3D con contrornos de la zona 1 .....</i>	<i>68</i>
<i>Imagen 44. Punto final de la tubería. Zona 1 .....</i>	<i>68</i>
<i>Imagen 45. Zona 1 de trabajo. Alcantarilla .....</i>	<i>69</i>
<i>Imagen 46. Vista 3D de la zona 2 .....</i>	<i>70</i>
<i>Imagen 47. Vista 3D con contornos de la zona 2 .....</i>	<i>70</i>

## Índice de tablas

<i>Tabla 1. Valores de conductividad eléctrica de algunos materiales .....</i>	19
<i>Tabla 2. Valores de permitividad dieléctrica de algunos materiales .....</i>	20
<i>Tabla 3. Características de la antena 400MHz. Modelo 5103 .....</i>	35



# **Introducción**



## 1. Introducción

El siguiente documento representa el Trabajo Final de Grado, que según la normativa de la Universidad Politécnica de Valencia es requisito imprescindible para obtener el Título de Graduado en Ingeniería Geomática y Topografía. El Trabajo ha sido realizado por el alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica Cartográfica y Topográfica D. Artiom Plamadeala siguiendo las directrices marcadas por el tutor D. Jorge Padín Devesa.

### 1.1 Situación

Las dos zonas estudiadas se encuentran en la Plaza de las Fuentes del Municipio Torrent de la Provincia de Valencia, España.

La plaza tiene tres accesos

- a. Acceso sur desde la Calle Masanasa.
- b. Acceso este desde la Calle Santo Domingo.
- c. Acceso oeste desde la Calle San Antonio Abat.



**Imagen 1. Situación de la Plaza de las Fuentes**



**Imagen 2. Plaza de las Fuentes**

## 1.2 Emplazamiento

En la siguiente imagen están representadas las dos zonas de trabajo.



*Imagen 3. Las zonas 1 y 2 dentro de la Plaza de las Fuentes*



# **Memoria**



## 2. Memoria

### 2.1 Descripción general del proyecto.

El presente trabajo consiste en la realización de una prospección geofísica en la Plaza de las Fuentes en el municipio Torrente. Se pretende buscar restos arqueológicos de la antigua muralla. Se requiere una técnica no invasiva, y por lo tanto se ha empleado el georradar.

### 2.2 Antecedentes

En este apartado se van a exponer los antecedentes que han motivado a la realización de la prospección.

Hace unos años en la Plaza Mayor de Torrente se decidió empezar una investigación arqueológica motivo para la cual ha servido la existencia de una torre antigua:



*Imagen 4. Antigua Torre. Vista exterior*



**Imagen 5. Antigua Torre. Vista interior**

Tras los trabajos arqueológicos que se han llevado a cabo en la Plaza Mayor se han descubierto restos de una muralla. Actualmente la investigación está paralizada por falta de presupuesto.

En las siguientes imágenes se muestra el área donde se encontraron restos de muros:



**Imagen 6. Área de la muralla**



*Imagen 7. Área de la muralla*

Según las previsiones de los técnicos del Ayuntamiento de Torrent uno de los muros de la muralla puede estar debajo de la calle Santo Domingo. Dado que la Plaza de los Fuentes está muy próxima a la Calle Santo Domingo se ha decidido hacer la prospección en dicha plaza.

### **2.3 Objetivos**

Tal y como se ha comentado anteriormente existe probabilidad de que en la zona estudiada existan restos de una muralla antigua. El objetivo principal de este trabajo es hacer un estudio del subsuelo con el fin de buscar restos arqueológicos de la antigua ciudad. Pero hay una serie de objetivos secundarios que se han de cumplir para poder llevar a cabo dicho estudio. Estructurando todos los objetivos:

- ✓ Buscar restos arqueológicos de la antigua muralla.
- ✓ Conocer los fundamentos físicos en los que se basa la tecnología del georradar.
- ✓ Conocer las técnicas de toma de datos con georradar.
- ✓ Emplear los conocimientos adquiridos para una correcta interpretación de los resultados.

## **2.4 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.

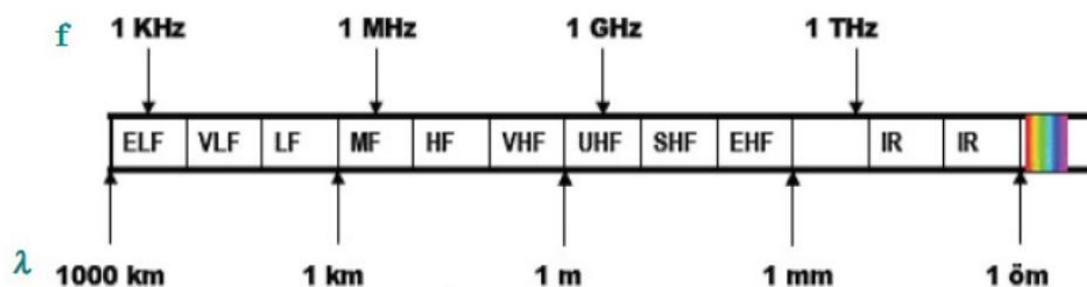
- ✓ Sondeos eléctricos: Este método consiste en aplicar corriente eléctrica al suelo mediante electrodos en sucesivas mediciones a través de aperturas (aumento progresivo de distancia entre electrodos en cada medición perteneciente a un perfil). El método desemboca en la medida de la resistividad eléctrica 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.

## 2.5 Fundamentos físicos

Este apartado está dedicado a la explicación de los fundamentos físicos en los que se basa la tecnología empleada en el georradar.

### 2.5.1 Ondas electromagnéticas

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.



*Imagen 8. Espectro electromagnético*

Abreviatura	Significado	Frecuencias	Longitud de onda	Designación
ELF	Extra-low freq.	0.3 a 3 KHz.	1000 a 100 Km	Megamétricas
VLF	Very-low freq.	3 a 30 KHz	100 Km a 10 Km	Miriamétricas
LF	Low frequency	30 a 300 KHz	10 Km a 1 Km	Kilométricas
MF	Medium freq.	300 a 3000 KHz	1000 m a 100m	Hectométricas
HF	High frequency	3 a 30 MHz	100 m a 10 m	Decamétricas
VHF	Very-high freq.	30 a 300 MHz	10 m a 1 m	Métricas
UHF	Ultra-high freq.	300 a 3000 MHz	1 m a 10 cm	Decimétricas
SHF	Super-high freq.	3 a 30 GHz	10 cm a 1 cm	Centimétricas
EHF	Extra-high freq.	30 a 300 GHz	10 mm a 1 mm	Milimétricas

*Imagen 9. Abreviaturas de las distintas zonas del espectro electromagnético*

Los georradars emplean las frecuencias comprendidas entre HF y UHF.

Las siguientes ecuaciones describen un campo electromagnético según la teoría de Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Donde,

---

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

**B** es la densidad del flujo magnético (Wb/m<sup>2</sup> o Tesla).

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

**J** es la densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>).

**D** es el vector de desplazamiento eléctrico (C/m<sup>2</sup>).

**ρ** es la densidad de carga libre.

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:

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

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

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

Donde,

**σ** es la conductividad eléctrica (Siemens/m).

**ε** es la permitividad dieléctrica (F/m).

**μ** es la permeabilidad magnética.

---

La primera relación es la conocida ley de Ohm puntual. Las dos últimas relaciones corresponden a las ecuaciones constitutivas de un medio dieléctrico y de un medio magnético respectivamente.

La conductividad eléctrica representa la capacidad que posee un material para conducir la corriente eléctrica.

La permitividad dieléctrica nos proporciona la capacidad de polarización de un material cuando está presente un campo eléctrico.

La permeabilidad magnética mide la capacidad de un medio para atraer los campos magnéticos.

Estos tres parámetros son los que definen al medio en el momento que pasa la onda electromagnética.

## **2.5.2 Propiedades del medio de propagación**

La señal emitida por el georradar se ve afectada por varios parámetros característicos del medio por el que se propaga. 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.

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.

A continuación se van a explicar los parámetros mencionados.

## Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material de dejar pasar la corriente eléctrica, su aptitud para dejar circular libremente las cargas eléctricas. La conductividad depende de varios factores como pueden ser la estructura atómica y molecular del material o la temperatura.

La conductividad es la inversa de la resistividad y su unidad es el S/m (Siemens por metro):

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

La siguiente tabla contiene valores de conductividad de algunos de los materiales más frecuentes.

---

Material	Conductividad (S/m)
Aire	0
Agua dulce	$10^{-4}$ - $10^{-2}$
Agua Salada	4
Arenisca seca	$10^{-8}$ - $10^{-6}$
Arenas secas	$10^{-4}$ - $10^{-3}$
Arenas saturadas	$10^{-3}$ - $10^{-2}$
Arcillas secas	$10^{-4}$ - $10^{-3}$
Cemento seco	$10^{-3}$ - $10^{-2}$
Cemento húmedo	$10^{-8}$ - $10^{-6}$
Cobre	$10^8$

*Tabla 1. Valores de conductividad eléctrica de algunos materiales*

## Permitividad dieléctrica $\epsilon$

También se denomina constante dieléctrica dado que en un medio con las mismas características es constante. Es la medida de la capacidad de un material a ser polarizado por un campo eléctrico.

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

Donde,

**D** es el campo eléctrico.

**E** es el desplazamiento eléctrico.

$\epsilon$  es la permitividad eléctrica absoluta.

La permitividad dieléctrica absoluta de un material es el producto entre la permitividad relativa  $\epsilon_r$  y la permitividad del vacío  $\epsilon_0$ :

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

Se muestran algunos datos de la permitividad dieléctrica de algunos materiales:

Material	Permitividad dielectrica relativa
Aire	1
Hielo natural	3,6
Asfalto	3-5
Hormigon	4-11
Granito	4-7
Arenisca	6
Esquisto	5-15
Caliza	4-8
Basalto	8-9
Arenas saturadas de agua (20% de porosidad)	19-24
Suelos y sedimentos	4-30
Cobre	1
Agua	81

*Tabla 2. Valores de permitividad dieléctrica de algunos materiales*

---

## Permeabilidad Magnética

Es 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.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Sus unidades en el sistema internacional son Henri/metro (H/m).

La permeabilidad del vacío, conocida también como constante magnética se representa mediante el símbolo  $\mu_0$ .

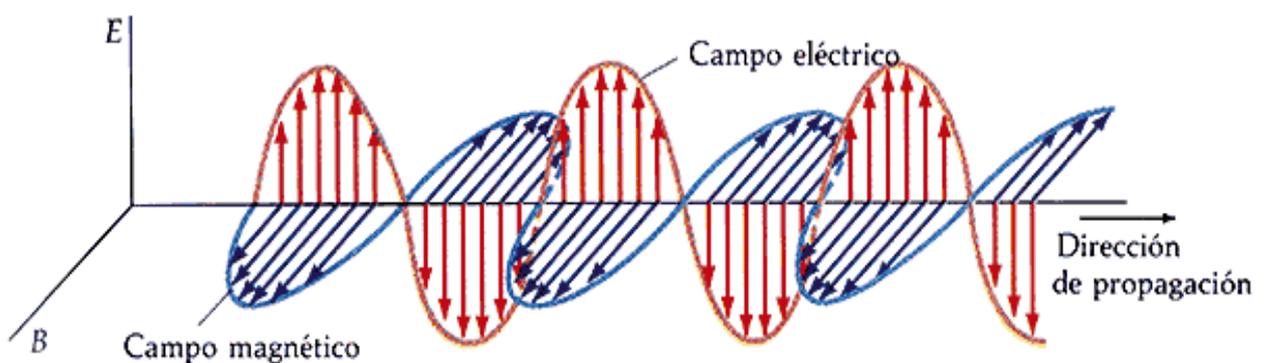
Para comparar entre si los materiales, se define la permeabilidad magnética absoluta  $\mu$  como producto entre la permeabilidad magnética relativa  $\mu_r$  y la permeabilidad magnética del vacío  $\mu_0$ :

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

En la mayoría de los casos el valor de  $\mu$  es cercano a 1 dado que la mayoría de los materiales no contiene elementos ferromagnéticos.

### 2.5.3 Propiedades de las ondas electromagnéticas

La radiación electromagnética es un tipo de campo electromagnético variable, es decir, una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. Desde el punto de vista clásico la radiación electromagnética son las ondas electromagnéticas generadas por las fuentes del campo electromagnético y que se propagan a la velocidad de la luz. La generación y la propagación de estas ondas son compatibles con el modelo de ecuaciones matemáticas definido en las ecuaciones de Maxwell.



*Imagen 10. Propagación del campo electromagnético*

---

Las ondas electromagnéticas que componen la radiación electromagnética pueden ser representadas como campos eléctrico y magnético autopropagados en forma de onda transversal. El diagrama muestra una onda plana linealmente polarizada que se propaga de izquierda a derecha. El campo eléctrico (rojo) está sobre el plano vertical y el campo magnético (azul) está sobre el plano horizontal. Los campos eléctricos y magnéticos en este tipo de ondas siempre están en fase a 90° una respecto a la otra.

## Propagación

Una onda electromagnética armónica plana se comporta a y se propaga como una onda transversal; es decir, su dirección de “vibración” o de oscilación es perpendicular a la dirección de propagación.

A continuación se describirán los parámetros que caracterizan las ondas electromagnéticas.

## Longitud de onda

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia, a lo largo de la dirección de propagación, entre dos puntos consecutivos que tienen el mismo desfase (por ejemplo, la distancia entre dos máximos). La longitud de onda en un medio depende de la velocidad de fase y de la frecuencia de la onda:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

---

## La frecuencia

La frecuencia ( $f$ ) es el número de ciclos que realiza una onda por unidad de tiempo. Su relación con la frecuencia angular ( $\omega$ ) también es directa:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

## Velocidad de propagación

Los valores de la longitud de onda ( $\lambda$ ) y de la frecuencia ( $f$ ) y, en consecuencia, también de la constante de onda ( $k$ ) y de la frecuencia angular ( $\omega$ ), están relacionados entre sí mediante el valor de la velocidad de propagación de la onda ( $v$ ):

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

Donde  $k$  es la constante de onda:

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

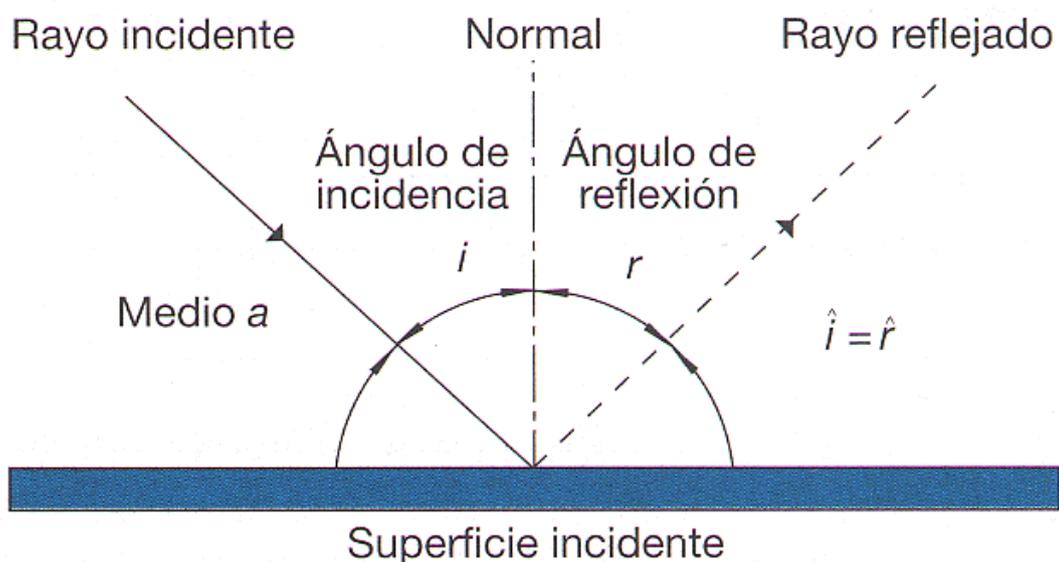
## Reflexión

La reflexión es el cambio de dirección de una onda, que, al entrar en contacto con la superficie de separación entre dos medios cambiantes, regresa al punto donde se originó. La reflexión ocurre cuando los rayos que inciden en una superficie chocan en ella, se desvían y regresan al medio que salieron formando un ángulo igual al de la rayo incidente.

Es el cambio de dirección, en el mismo medio, que experimenta un rayo luminoso al incidir oblicuamente sobre una superficie. Para este caso las leyes de la reflexión son las siguientes:

**1a. ley:** El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal, se encuentran en un mismo plano.

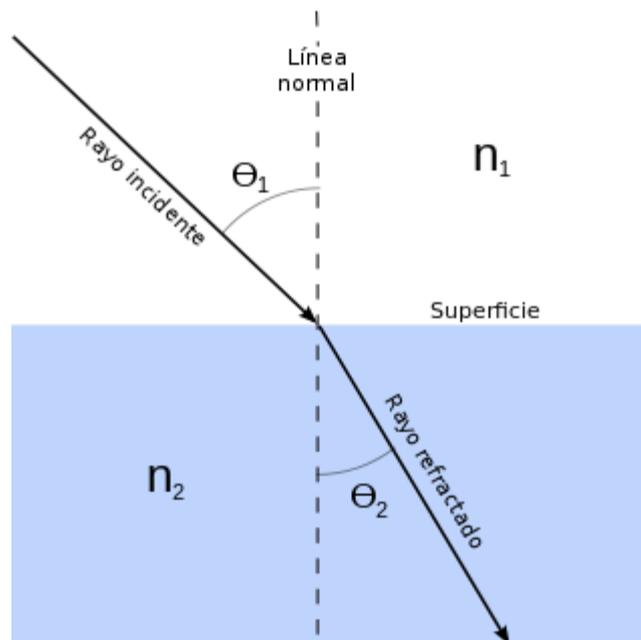
**2a. ley:** El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.



*Imagen 11. Las dos leyes de reflexión*

## Refracción

Se produce cuando la luz pasa de un medio de propagación a otro con una densidad óptica diferente, sufriendo un cambio de rapidez y un cambio de dirección si no incide perpendicularmente en la superficie.



*Imagen 12. Fenómeno de refracción*

Esta desviación en la dirección de propagación se explica por medio de la **ley de Snell**:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n = \frac{c}{v}$$

## 2.6 Georradar

### 2.6.1 Descripción

La técnica que se ha empleado en este trabajo es la del georradar. También llamado GPR (Ground Penetrating Radar). Es un método no invasivo que se utiliza para investigar o detectar objetos y estructuras por debajo del nivel del suelo.

Es una técnica de análisis de materiales basado en la transmisión de ondas electromagnéticas. Una antena situada sobre la superficie del área de trabajo transmite una onda que se propaga hacia el interior del material. Al pasar de un medio con unas propiedades eléctricas a otro medio con propiedades eléctricas distintas, una parte de la señal electromagnética se refleja y se capta por la antena del radar. Esta señal se registra para su posterior procesamiento.

Uno de los límites de esta técnica es la profundidad, ya que a mayor profundidad la onda reflejada es de menor intensidad y los resultados se ven afectados de ruido.

Este dispositivo, creado gracias a las investigaciones militares, se usa mucho en el ámbito de la geofísica y permite obtener datos sobre los perfiles continuos de distintos tipos de materiales, y después procesar y analizar los resultados obtenidos.

Sin duda el georradar es la técnica más moderna y avanzada para la obtención de información sobre el terreno, que no necesita, como se hacía antiguamente, una previa excavación de prueba o de cualquier otro trabajo de investigación previo. La ventaja indiscutible del georradar es su versatilidad., gracias a esto, el aparato puede ser utilizado no solo en el ámbito de la geología, sino también en el ámbito de la

---

ingeniería, construcción industrial o civil, mantenimiento de redes de saneamiento u otros tipos de redes, donde es necesario un estudio del terreno.

El georradar, cuyo funcionamiento empieza por emitir en el terreno estudiado ondas electromagnéticas y recibir las señales reflejadas por los objetos y las estructuras no homogéneas que existen en el subsuelo.

Este método de escaneo del terreno recibe el nombre de método de investigación y control no destructivos gracias a que no se necesita una intervención física en el terreno. La onda emitida tiene la propiedad de reflejarse de los objetos o medios no homogéneos del subsuelo, que tienen distinta permitividad dieléctrica. La onda se recibe por la antena receptora y se registra.

La profundidad de alcance del georradar varía de 0,3m a 50m y depende de la frecuencia de la onda emitida y de la calidad del terreno estudiado.

Por ejemplo en terrenos arcillosos la calidad de la señal recibida empeora, pero existe la posibilidad de mejorar los resultados al aplicar algoritmos adecuados en la fase de procesamiento de los datos.

El estudio del terreno se realiza deslizando la antena sobre la superficie que a su vez emite y recibe las señales electromagnéticas reflejadas. El espaciado de las pasadas es muy importante dado que a menor distancia entre las pasadas obtenemos mayor resolución (el espaciado mínimo puede ser igual a varios milímetros).

---

Como resultado se obtienen secuencias ordenadas de señales recibidas, que nos muestran secciones del terreno perpendiculares a la antena, llamadas radargramas. En base a las radargramas el operador puede establecer tanto los límites de las diferentes capas del suelo como la existencia de objetos o estructuras.

Como cualquier dispositivo el georradar tiene sus limitaciones. Una de las más importantes es la calidad del suelo estudiado ya que existen tipos de suelo que pueden dispersar la señal.

## 2.6.2 Aplicaciones

### 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

### 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.

**Instrumentación y software  
empleado**



---

## 3. Instrumentación y software empleado

En este apartado se van a describir los componentes del georradar utilizado y el programa informático empleado para el procesado de los datos.

### 3.1 Equipos

El georradar utilizado es en el estudio realizado para el presente trabajo es el GSSI TerraSEARch SIR System-3000.



*Imagen 13. Georradar TerraSEARch SIR System-3000.*

Es un equipo ligero y de fácil manejo. Está constituido por

- ✓ Antena emisora y receptora.
- ✓ La unidad central
- ✓ Accesorios: este modelo tiene un odómetro incorporado, carro con ruedas, soporte para la antena y la unidad central, cableado.

### **3.1.1 Antena 400 MHz**

La antena es el aparato que se encarga de emitir las ondas electromagnéticas hacia el interior del material estudiado y en este caso también es la unidad receptora de las ondas reflejadas.

Las antenas están caracterizadas básicamente por su frecuencia de emisión ya que determina la penetración de la señal emitida en el medio a estudiar.

La casa GSSI posee antenas de diferentes frecuencias. La antena considerada como idónea para este estudio la antena de 400 MHz modelo 5103.



*Imagen 14. Antena 400 MHz. Modelo 5103*

Ésta antena trabaja en un rango de profundidades de 0 a 5 metros y tiene las siguientes características:

Características antena 400 MHz modelo 5103	
Rango	50 ns
Numero de puntos de ganancias	5
Velocidad de transmisión	100KHz
Velocidad de registro	64
Filtro vertical paso-alto	100 MHz
Filtro vertical paso-bajo	800 MHz
Puntos por traza	512
Resolución	16 bits

*Tabla 3. Características de la antena 400MHz. Modelo 5103*

---

### 3.1.2 Unidad Central

La función principal de la unidad central es controlar y registrar la señal recibida por la antena del georradar. También en la unidad central se definen los parámetros de trabajo como el espaciado y el origen de coordenadas del trabajo realizado.



*Imagen 15. Unidad central del georradar*

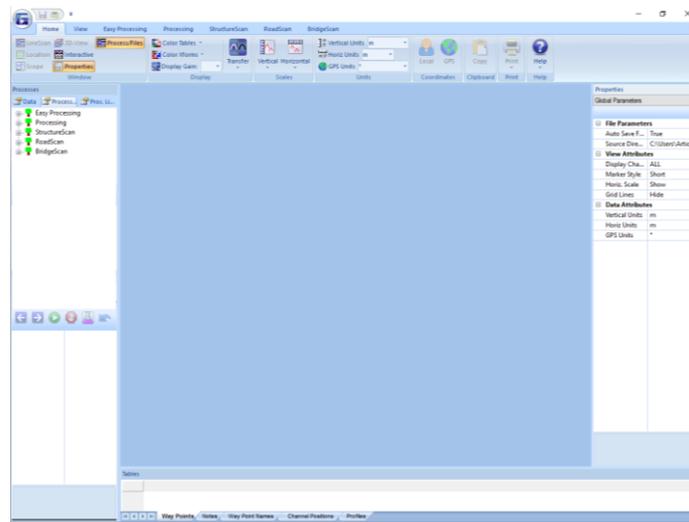
La unidad central tiene instalado un software para poder codificar la señal recibida en un formato específico y registra los datos en una unidad de memoria interna para su posterior procesamiento.

### 3.1.3 Accesorios

La unidad central se instala sobre un soporte a una altura cómoda para el operador. El georradar cuenta también con un carro con ruedas con el odómetro incorporado. La antena se fija en la parte inferior del carro sobre su soporte protector.

## 3.2 Programa informático Radan 7

Radan 7 es el software para GPR (Ground Penetrating Radar) más avanzado. Radan es el software utilizado por la casa GSSI. Con su diseño modular, este programa permite a sus usuarios seleccionar las funciones del procesado que mejor se adapten a sus necesidades profesionales.



*Imagen 16. Programa informático RADAN 7*

En el apartado de procesado de los datos se explicará con más detalle el funcionamiento del programa.



## **Toma de datos**



---

## 4. Toma de datos

Dado que en la plaza hay objetos como arboles, banquillos, farola y un pequeño jardín se ha decidido dividir el área de trabajo en dos zonas:

- ✓ Zona 1
- ✓ Zona 2



*Imagen 17. Emplazamiento de las zonas de trabajo 1 y 2*

---

## 4.1 Zona 1

Para la zona 1 se ha definido un rectángulo de longitud igual a 13 metros y anchura igual a 7 metros. Las pasadas se han efectuado a lo largo del eje Y con una distancia entre dos pasadas consecutivas de 1 metro, y a lo largo del eje X con distancia entre dos pasadas consecutivas cada 0,5 metros.



*Imagen 18. Malla. Zona 1*

Cada pasada como resultado es un perfil. Cuantos más perfiles se tengan mejores resultados se obtienen. Asimismo en la zona 1 de trabajo hay 14 perfiles en dirección del eje X y otros 15 en dirección del eje Y.

---

## 4.2 Zona 2

En este caso se ha definido un rectángulo de Longitud 20 de metros y anchura de 3 metros. A lo largo del eje Y se han efectuado 21 mediciones con una distancia entre dos mediciones consecutivas de 1 metro y a lo largo del eje X se han efectuado 7 mediciones con una distancia de 0,5 metros entre cada una de ellas.



*Imagen 19. Malla. Zona 2*

Cada medición es un perfil resultante, por lo tanto se obtienen 28 perfiles, 7 de los cuales en el eje X, y 21 perfiles en el eje Y.



## **Procesado de los datos**



## 5. Procesado de los datos

En este apartado se van a explicar los pasos que se han seguido para el procesado de los datos tomados en campo.

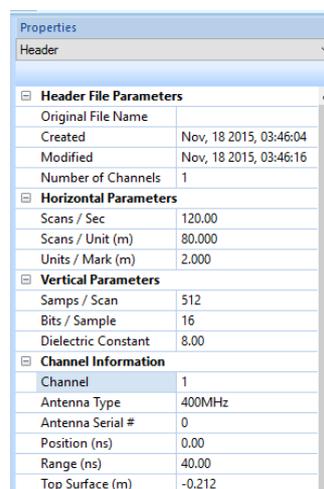
El Programa informático que se ha empleado es el RADAN 7.

### 5.1 Zona 1

#### 5.1.1 Fichero de cabecera

El fichero de cabecera contiene los datos básicos sobre la fecha de la medición, los datos sobre la antena, la constante dieléctrica etc.

La siguiente imagen corresponde al fichero de cabecera de la toma de datos en la Zona 1.



Properties	
Header	
<b>Header File Parameters</b>	
Original File Name	
Created	Nov, 18 2015, 03:46:04
Modified	Nov, 18 2015, 03:46:16
Number of Channels	1
<b>Horizontal Parameters</b>	
Scans / Sec	120.00
Scans / Unit (m)	80.000
Units / Mark (m)	2.000
<b>Vertical Parameters</b>	
Samps / Scan	512
Bits / Sample	16
Dielectric Constant	8.00
<b>Channel Information</b>	
Channel	1
Antenna Type	400MHz
Antenna Serial #	0
Position (ns)	0.00
Range (ns)	40.00
Top Surface (m)	-0.212

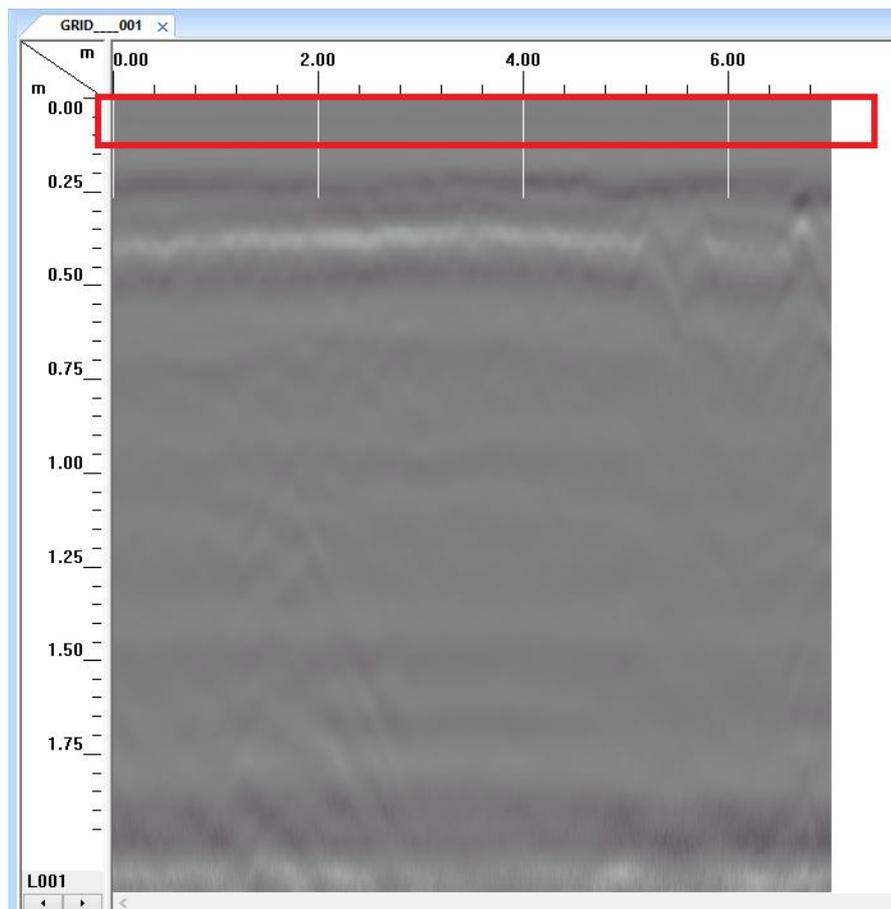
**Imagen 20. Fichero de cabecera. Zona 1**

### 5.1.2 Corrección TIME ZERO

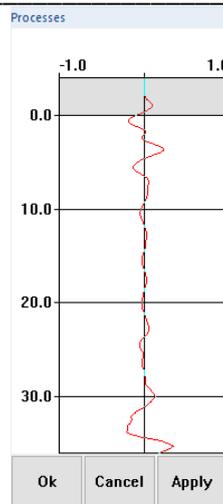
El primer paso que vamos a dar en el procesamiento de los datos es la corrección “Time Zero”. La finalidad de esta corrección es de eliminar la parte que corresponde al tiempo que viaja la onda desde la antena y hasta que llega a la superficie del terreno. Para cálculos de profundidad más precisos esta corrección es imprescindible.

A continuación se muestra el ejemplo de corrección “Time Zero” de la medición de la Zona 1.

Imagen antes de corregir:

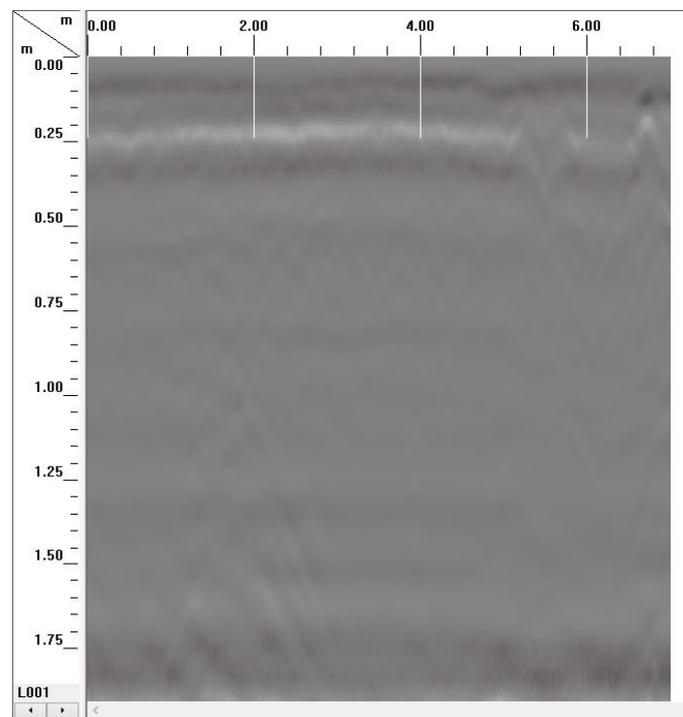


*Imagen 21. Corrección TIME ZERO antes de aplicar. Zona 1*



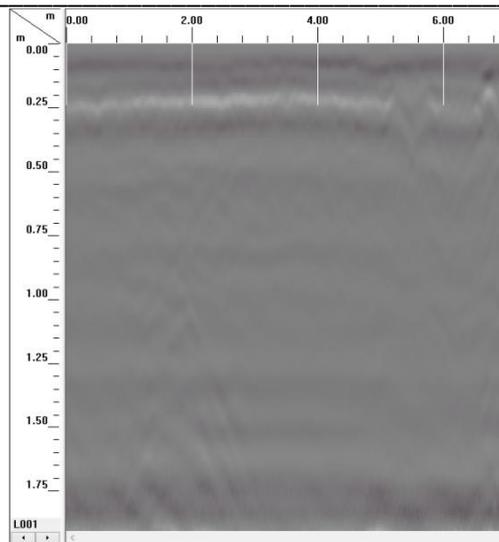
*Imagen 22. Gráfico corrección TIME ZERO antes de aplicar. Zona 1*

Las siguientes dos imágenes representan el resultado de la corrección:



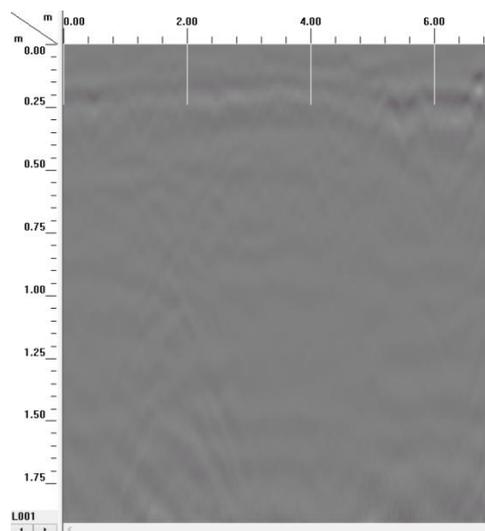
*Imagen 23. Resultado corrección TIME ZERO. Zona 1*





*Imagen 25. Radargrama antes de aplicar el*

**BACKGROUND REMOVAL. Zona 1**



*Imagen 26. Radargrama después de aplicar el*

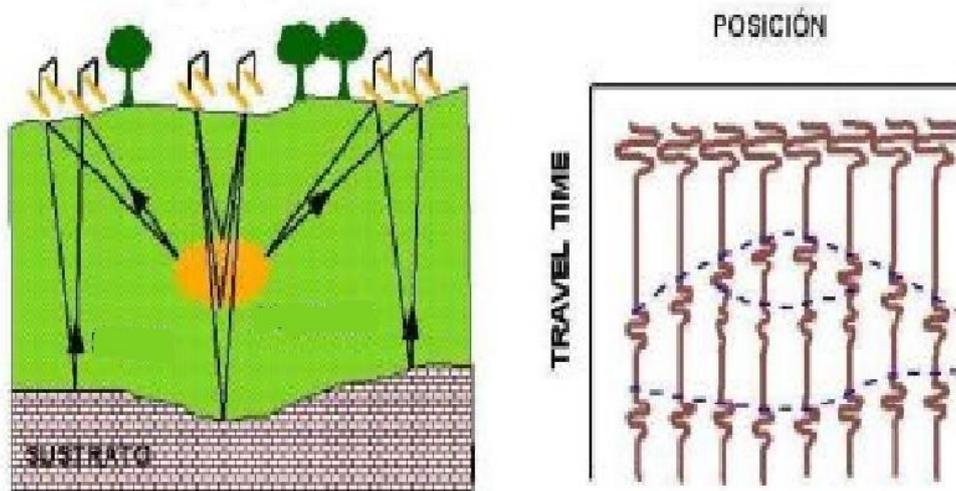
**BACKGROUN REMOVAL. Zona 1**

Se puede observar como desaparecen las líneas pronunciadas de la parte superior de la imagen.

### 5.1.4 MIGRACIÓN

Los objetos encontrados por el georradar en las radargramas aparecen como hipérbolas. Esto se debe a que cuando el georradar está en movimiento y el objeto está delante, la onda tarda más en viajar hasta el objeto y regresar que cuando la antena está sobre su vertical. Lo mismo sucede cuando la antena se aleja.

En la siguiente imagen se puede ver este efecto:



*Imagen 27. Funcionamiento del georradar*

El proceso de migración consiste en anular este efecto y para colapsar las hipérbolas transformando los datos registrados a datos con las anomalías del subsuelo localizadas en su posición correcta.

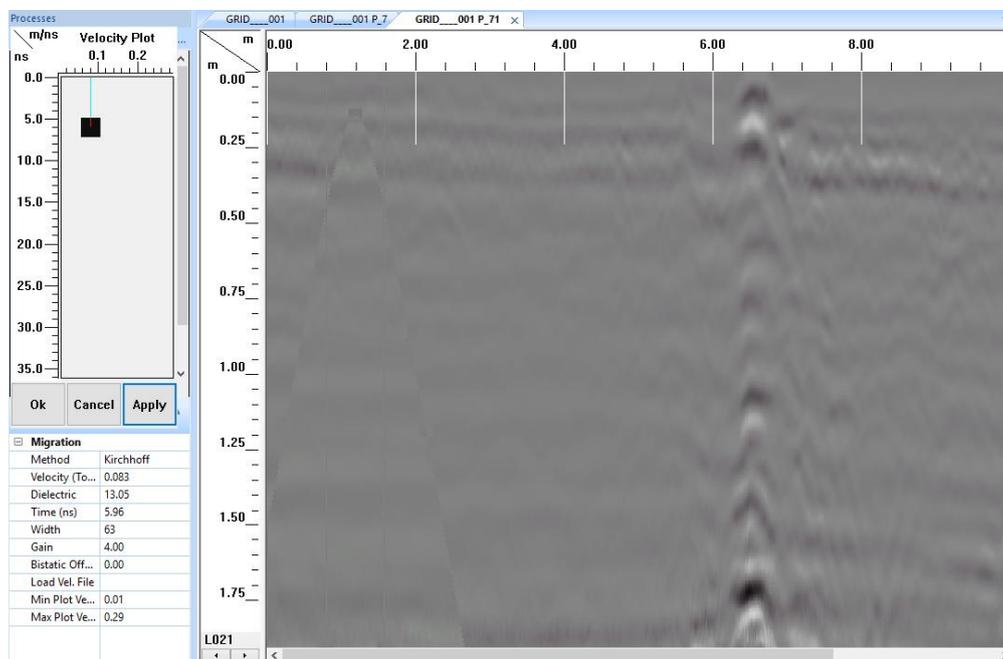
El programa nos ofrece dos métodos diferentes de migración: Kirchhoff y suma hiperbólica.

- ✓ Suma hiperbólica. El programa hace una suma a lo largo de cada hipérbola y coloca en sus ápices respectivos las medias resultantes
- ✓ Kirchhoff. Es un método parecido al anterior, pero a su vez más preciso y más lento.. Este método utiliza las ecuaciones de la hipérbola. Sumando las amplitudes de los registros de la hipérbola coloca el resultado en el vértice . Este método tiene en cuenta la fase.

Se opta por el método Kirchhoff al ser este más preciso aunque más lento.

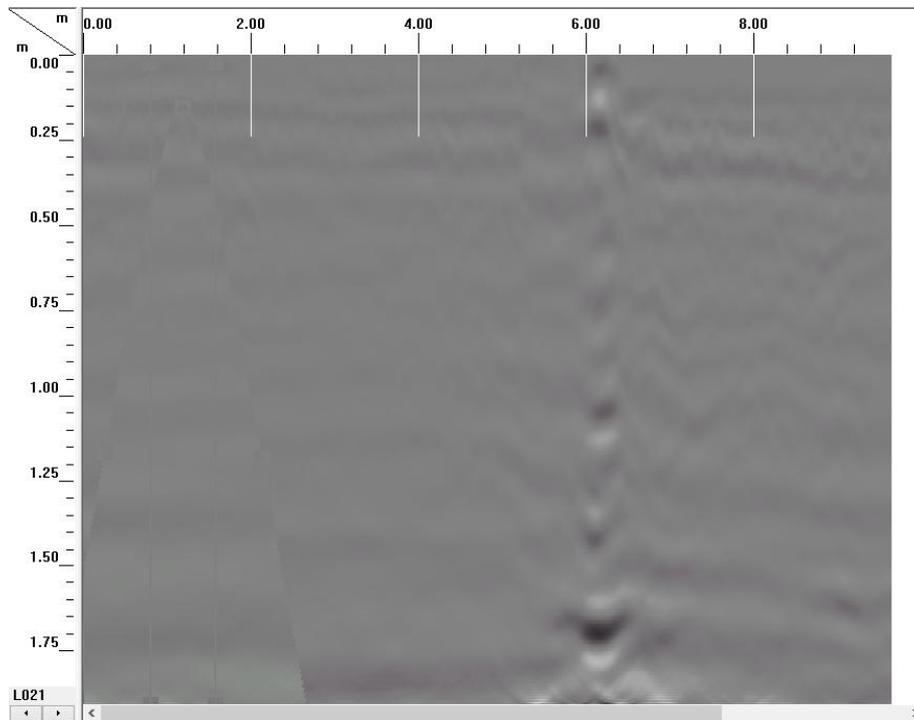
El resultado de la aplicación de la migración se muestra a continuación. Para una mejor observación de los cambios producidos se va a mostrar el radargrama L021.

Antes:



**Imagen 28. Radargrama L021 ante de aplicar la Migración. Zona 1**

Después



*Imagen 29. Radargrama L021 después de aplicar la Migración. Zona 1*

### 5.1.5 Ajuste de la ganancia

Por regla general el proceso de migración reduce la amplitud de la señal del radar. Aumentar la ganancia del escaneado permite la recuperación de la amplitud de la señal electromagnética en el radargrama, realizándose con precaución dado que al recuperar gran cantidad de la información perdida se aumenta en gran medida el ruido de la señal, empeorando en muchos casos la calidad de los datos.

El Radan tiene como opciones cuatro tipos de ajuste de ganancia:

- ✓ Automático. El programa automáticamente ajusta la ganancia en cada medición.
- ✓ Lineal. Aplica una ganancia lineal entre los puntos
- ✓ Exponencial. Aplica una curva exponencial para la ganancia.
- ✓ Inteligente. Disponible solo para antenas específicas.

Por defecto el programa tiene activado el ajuste automático, pero para que el operador pueda controlar el proceso de ajuste, se ha optado por el ajuste lineal.

Se añaden 5 puntos, y se van a ampliar las amplitudes de los puntos del medio, dado que representan la profundidad que más importancia tiene para el presente estudio.

Se va a mostrar un ejemplo de ajuste con el perfil L021.

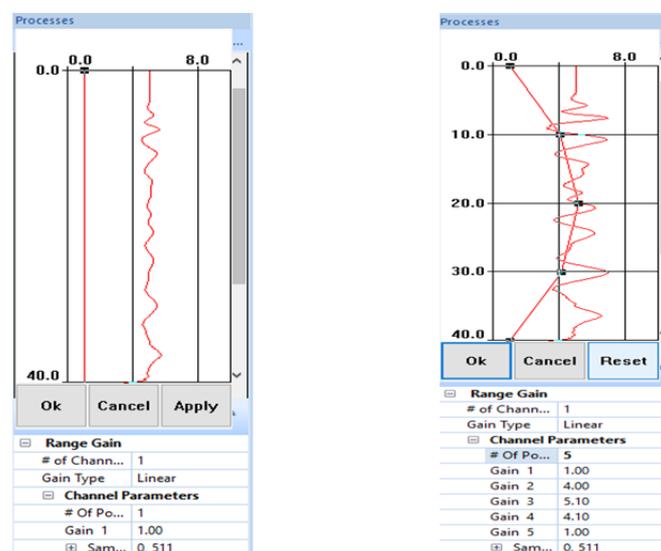
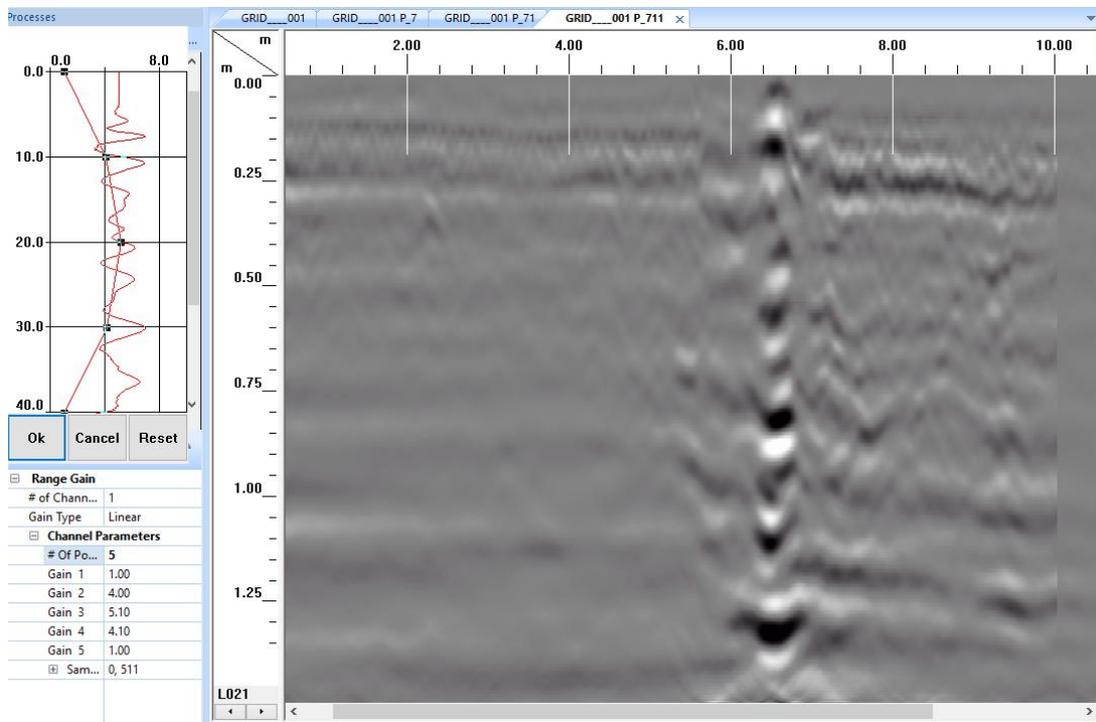


Imagen 30. Ajuste de la Ganancia. Los parametros a ajustar. Zona 1

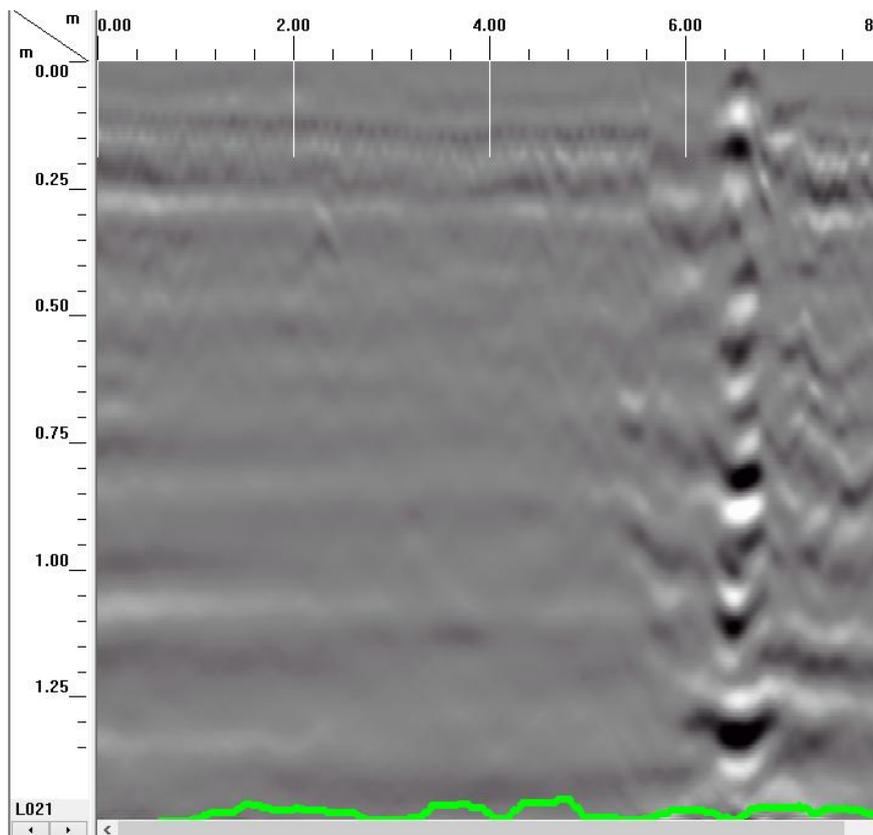
Y como resultado se obtiene:



**Imagen 31. Radargrama resultado del ajuste de la ganancia. Zona 1**

### 5.1.6 Profundidad máxima

Es una función donde el programa analiza el ruido y la pérdida de la señal y estima una profundidad de penetración efectiva. Este límite se traza mediante una línea verde en el radargrama. Ejemplo



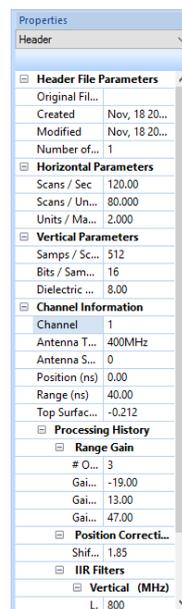
*Imagen 32. Línea que define la profundidad máxima efectiva.*

## 5.2 Zona 2

El proceso de tratamiento de los datos se ha explicado en el apartado anterior al tratar los datos del área del trabajo zona 1. Por ello para la zona de trabajo 2 solo se mostrarán ejemplos de los cambios en los radagramas al efectuar cada proceso.

### 5.2.1 Fichero de cabecera

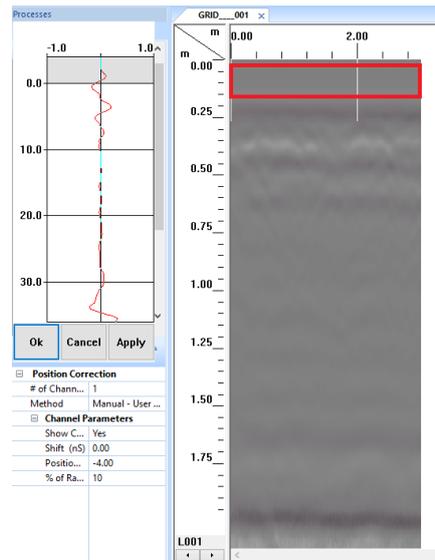
Este es el archivo de cabecera con los parámetros de la toma de la zona 2.



*Imagen 33. Fichero de cabecera. Zona 2*

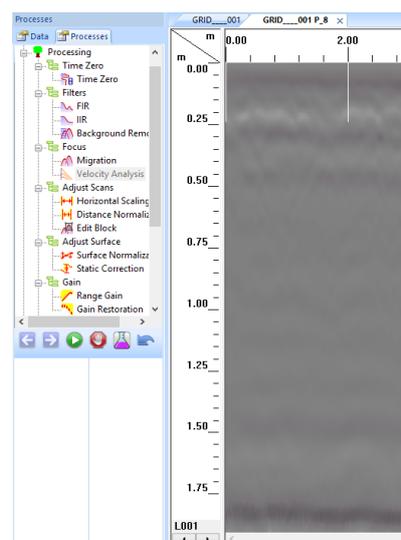
## 5.2.2 Corrección TIME ZERO

Antes de aplicar Time Zero :



**Imagen 34. Antes de aplicar TIME ZERO. Zona 2**

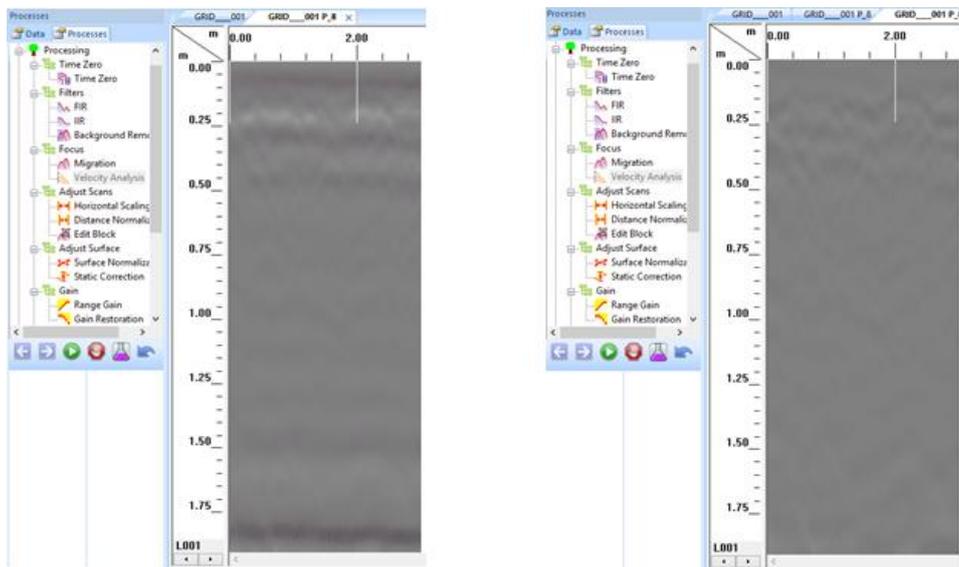
Después de aplicar Time Zero:



**Imagen 35. Radargrama después de aplicar TIME ZERO. Zona 2**

### 5.2.3 BACKGROUND REMOVAL

Se aplica el filtro BACKGROUND REMOVAL a los radargramas.

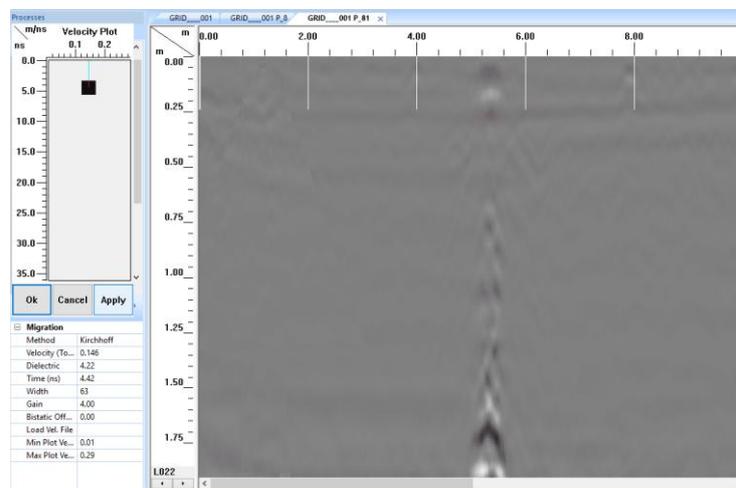


**Imagen 36. Radargramas antes y después de aplicar el filtro BACKGROUND REMOVAL. Zona 2**

## 5.2.4 MIGRACIÓN

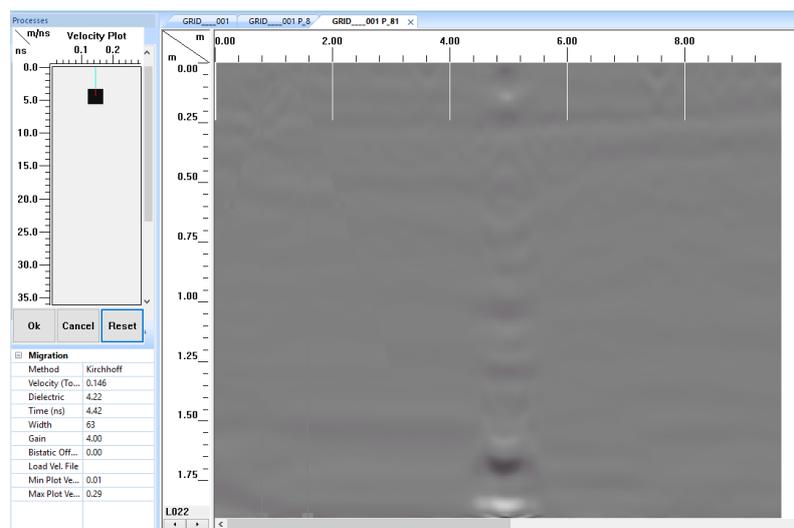
Igual que en el caso de la zona 1 aquí también se ha optado por el método Kirchhoff:

Imagen antes de aplicar la migración:



*Imagen 37. Radargrama antes de aplicar la Migración. Zona 2*

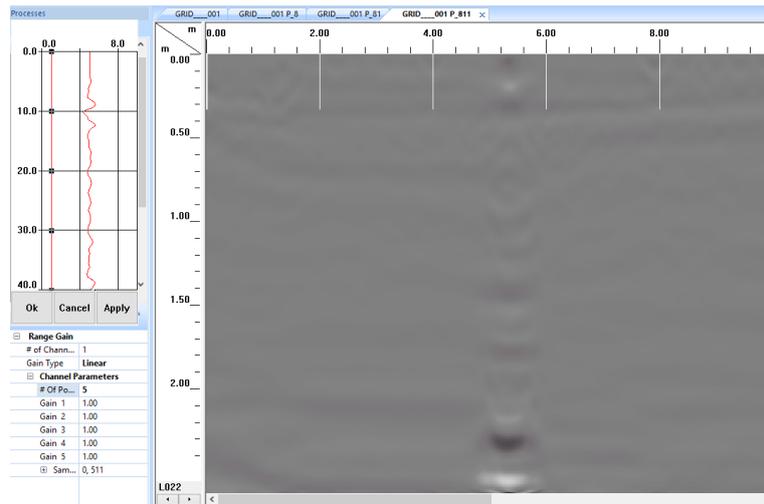
Imagen después de aplicar la migración:



*Imagen 38. Radargrama resultado de la aplicación de la Migración. Zona 2*

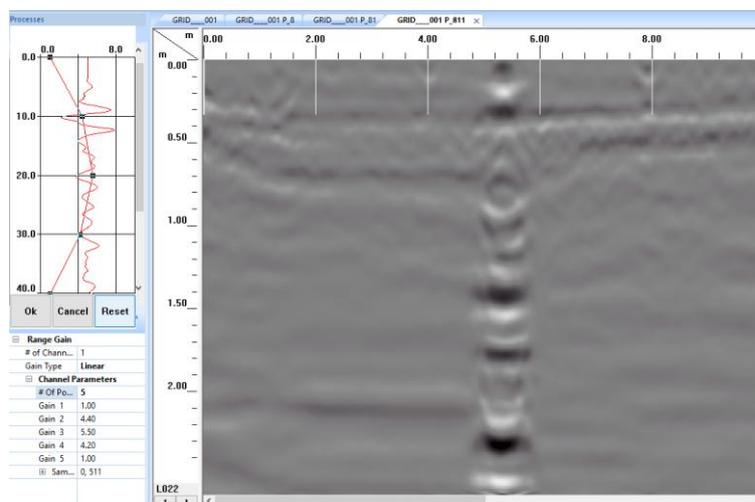
## 5.2.5 Ajuste de la ganancia

Como se puede ver en la imagen siguiente se han establecido manualmente 5 puntos para el ajuste de la ganancia:



**Imagen 39. Ajuste de la ganancia. Radargrama antes de aplicar el ajuste. Zona 2**

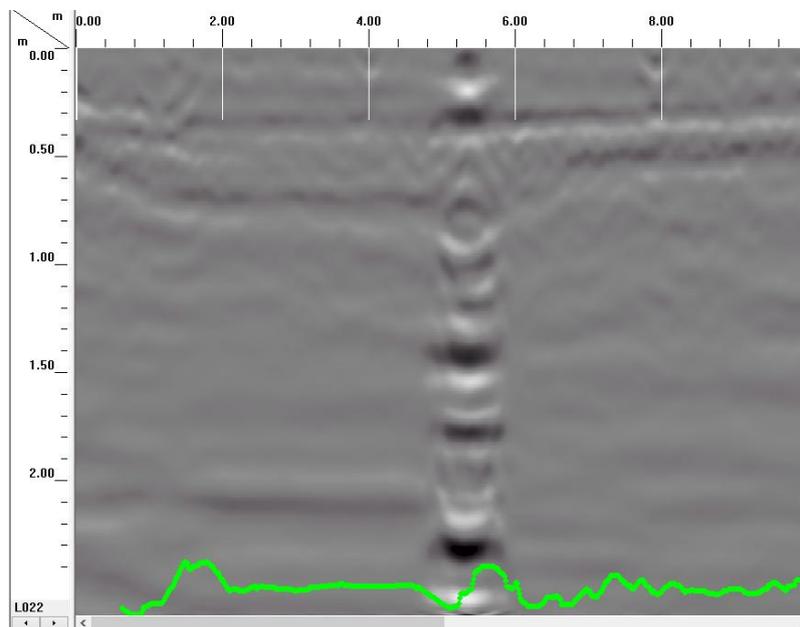
Y esta imagen es el resultado:



**Imagen 40. Ajuste de la ganancia. Radargrama resultado del ajuste. Zona 2**

## 5.2.6 Profundidad máxima

Un ejemplo de un perfil con su línea de profundidad máxima efectiva trazada con color verde:



*Imagen 41. Línea de profundidad máxima efectiva. Zona 2*



## **Análisis de los resultados**



## 6. Análisis de los resultados obtenidos

Este apartado está dedicado al análisis de los resultados obtenidos tras el procesado de los perfiles anteriormente comentado.

### 6.1 Zona 1

Recordemos que en esta zona se han obtenido 29 perfiles. Tras el correcto procesado de todos los perfiles en conjunto se va utilizar una herramienta del programa informático Radan 7 llamada vista 3D. Esta herramienta permite ver todos los perfiles en conjunto y analizar los posibles objetos.

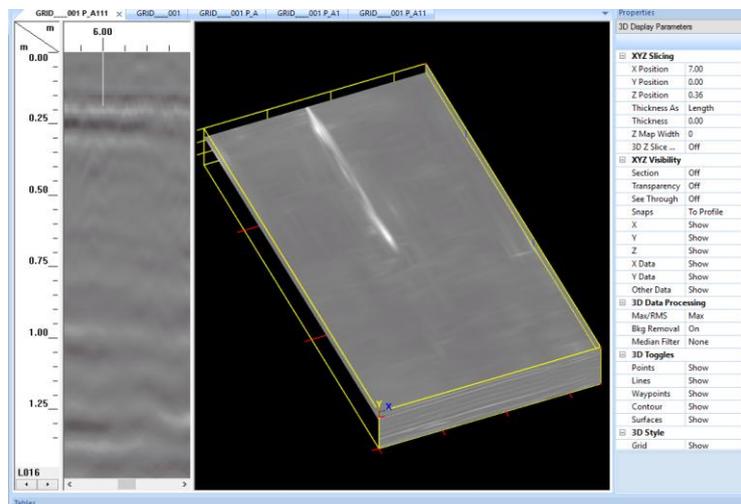
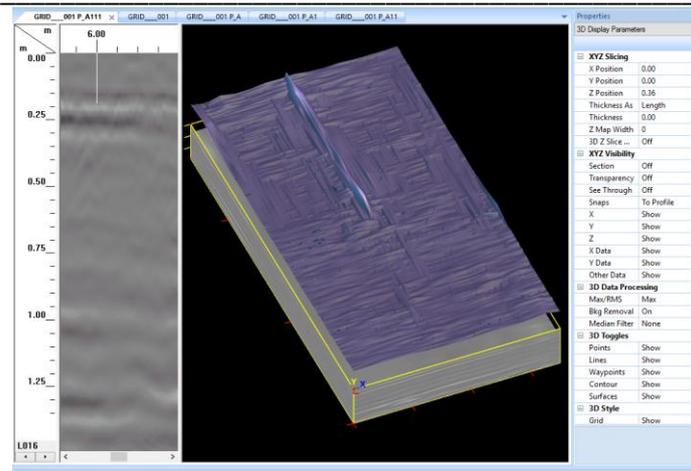
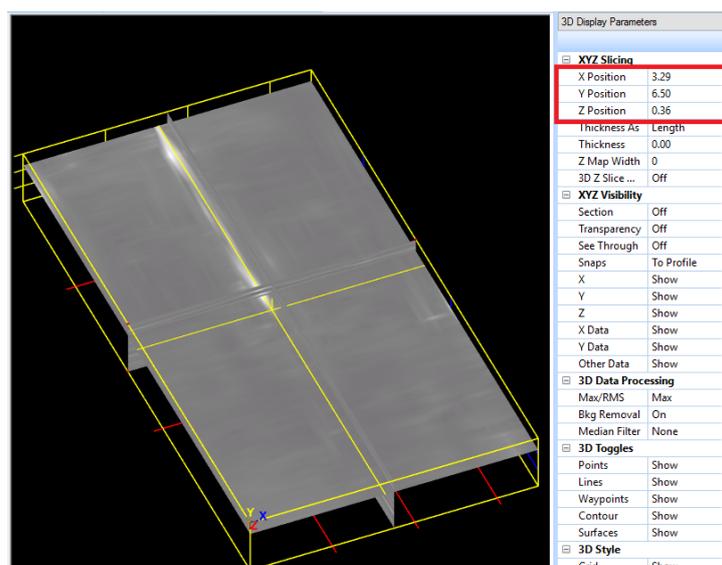


Imagen 42. Vista 3D de la zona 1



**Imagen 43. Vista 3D con contrornos de la zona 1**

Como bien se puede apreciar en la imagen anterior una línea bien definida. A primera vista se puede decir que es una tubería por la forma que tiene y por su emplazamiento. Al movernos por los ejes X, Y y Z se puede decir que la profundidad a la que está el objeto encontrado es de  $Z=0,36$  m. Comienza en las coordenadas  $X=3,29$  e  $Y=6,50$ . El objeto es paralelo al eje X del sistema definido para la zona1 de trabajo. Las coordenadas donde acaba el objeto son  $X=3,29$ ,  $Y=13$  (lo que quiere decir que la tubería tiene continuidad fuera del área estudiado) y  $Z=0,36$ .



**Imagen 44. Punto final de la tubería. Zona 1**

Para una mayor certeza se ha realizado otra visita a la zona de trabajo para examinar visualmente el terreno estudiado. En la zona1 de trabajo justamente en el lugar donde empieza la tubería de la imagen anterior hay una alcantarilla.



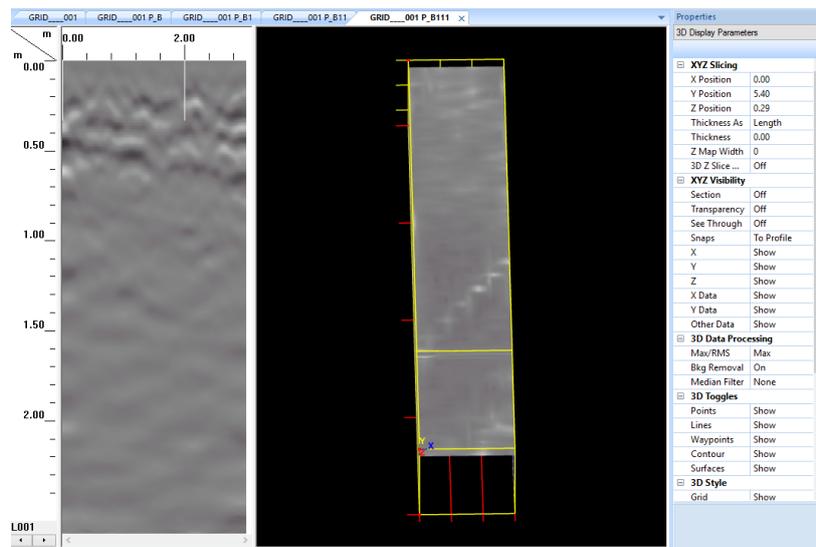
*Imagen 45. Zona 1 de trabajo. Alcantarilla*

Por lo tanto el objeto que aparece en las imágenes de la malla 3D, puede ser perfectamente una tubería.

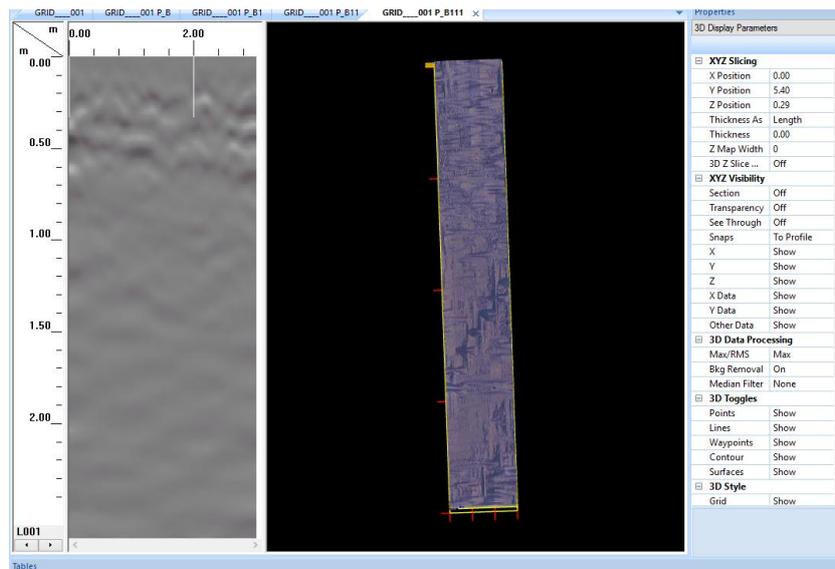
No se ha encontrado ningún objeto que se parezca a un muro en esta zona de trabajo.

## 6.2 Zona 2

La zona 2 es un rectángulo de 3 por 20 metros. Siguiendo el mismo procedimiento y la misma herramienta que se ha utilizado para analizar los resultados de la zona 1, tenemos:



*Imagen 46. Vista 3D de la zona 2*



*Imagen 47. Vista 3D con contornos de la zona 2*

---

Se puede observar perfectamente en las dos imágenes un objeto. Es continuo y atraviesa el área de trabajo. Esta a una profundidad de  $Z=0,29$  m. Comienza en las coordenadas  $X=0$ ,  $Y=5,40$  y acaba en las coordenadas  $X=3$ ,  $Y= 10$ . Por lo tanto el objeto tiene una longitud de 5,50 metros. Según su forma se puede decir que es una tubería.

No se ha encontrado ningún objeto que se parezca a un muro en esta zona de trabajo.



## **Conclusiones**



---

## 7. Conclusiones

Primero me gustaría recordar los objetivos que se fijaron al principio de este trabajo y fueron los siguientes:

- ✓ Buscar restos arqueológicos de la antigua muralla.
- ✓ Conocer los fundamentos físicos en los que se basa la tecnología del georradar.
- ✓ Conocer las técnicas de toma de datos con georradar.
- ✓ Emplear los conocimientos adquiridos para una correcta interpretación de los resultados.

Sobre el primer objetivo puedo decir que aunque no se han encontrado restos de ningún muro, o alguna estructura que podría ser claramente parte de la antigua muralla, el objetivo se da por cumplido dado que se ha llevado a cabo una investigación y como conclusión de esta investigación se puede afirmar que no hay restos arqueológicos en la plaza De las Fuentes. Entiendo que en trabajos con georradar este tipo de acontecimientos son probables y frecuentes.

Respecto al segundo objetivo puedo decir que ha sido exitoso. El hecho de realizar este trabajo me ha servido para adentrarme de lleno en el fundamento teórico del georradar. También tengo que decir que me ha servido para tener una capacidad mayor de análisis de los datos obtenidos por esta técnica de prospección geofísica.

Los dos últimos objetivos se dan por cumplidos. He aprendido mucho sobre el georradar, sobre las técnicas que se emplean para optimizar el tiempo y el volumen de trabajo. He aprendido a analizar la zona de estudio para poder utilizar después las

---

herramientas idóneas para llevar a cabo una prospección de este tipo. También he conocido las ventajas que tiene el georradar como por ejemplo la versatilidad en el uso en diferentes aspectos de la ingeniería, arqueología, geología, etc. Otra ventaja muy importante es que el georradar es un método no invasivo de prospección geofísica lo que lo hace muy atractivo como método en muchas otras ocasiones. Tiene también sus limitaciones, como pueden ser la penetración limitada del subsuelo, gran dependencia de la naturaleza del suelo que se va a estudiar, la señal se ve afectada por la humedad del suelo etc.

## **Anexos**

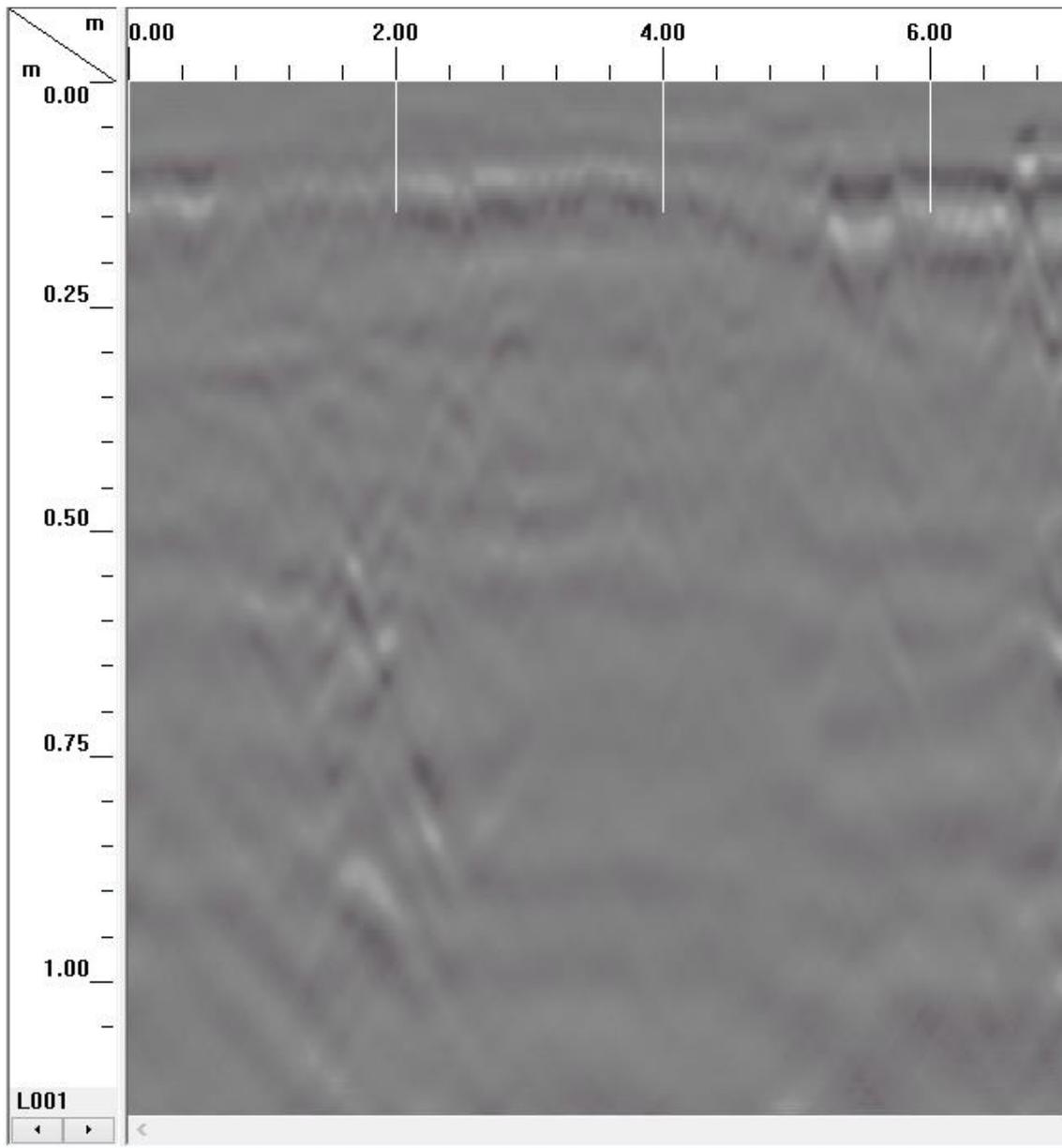


---

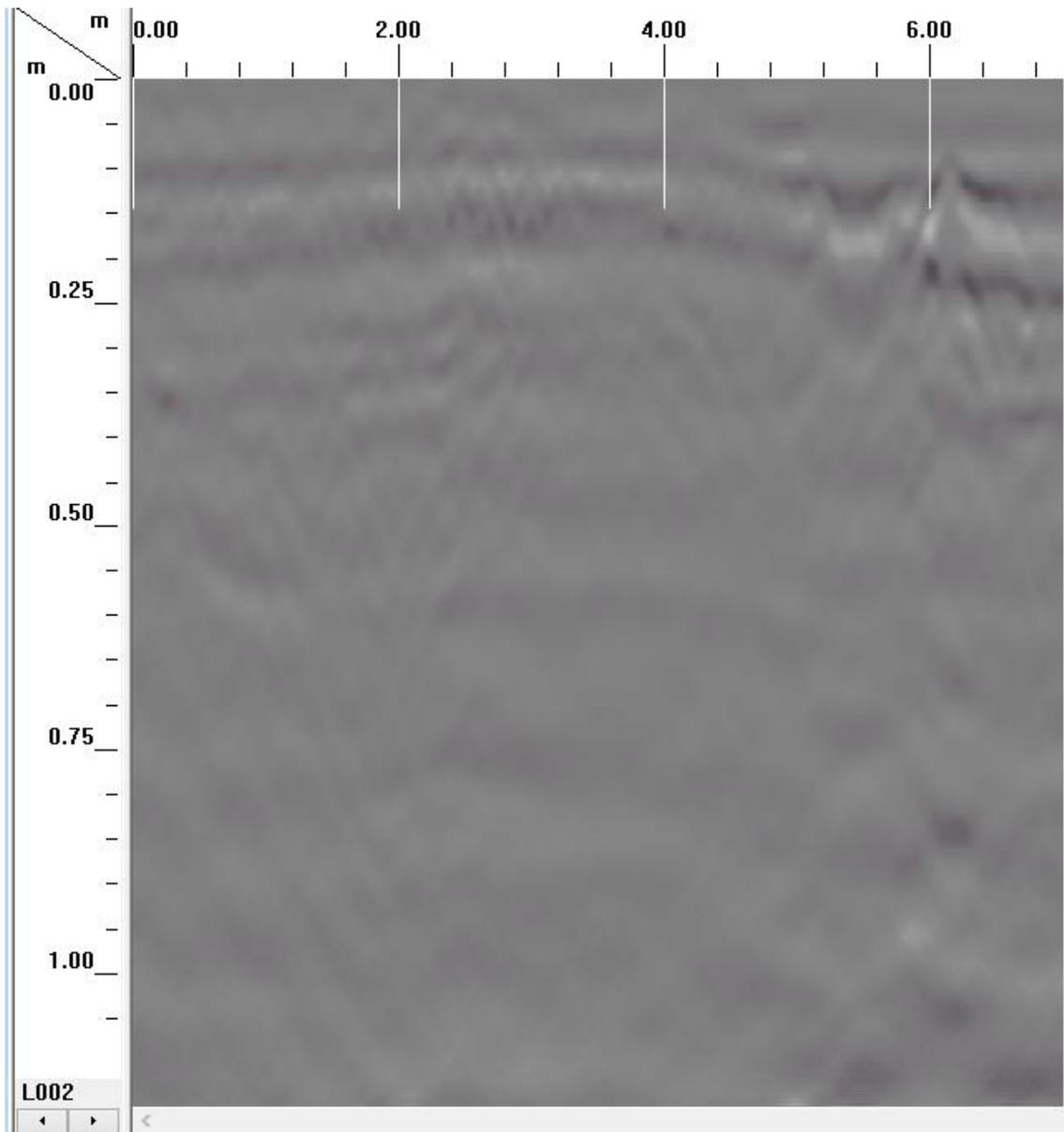
## 8. Anexos

### Radargramas de la zona 1

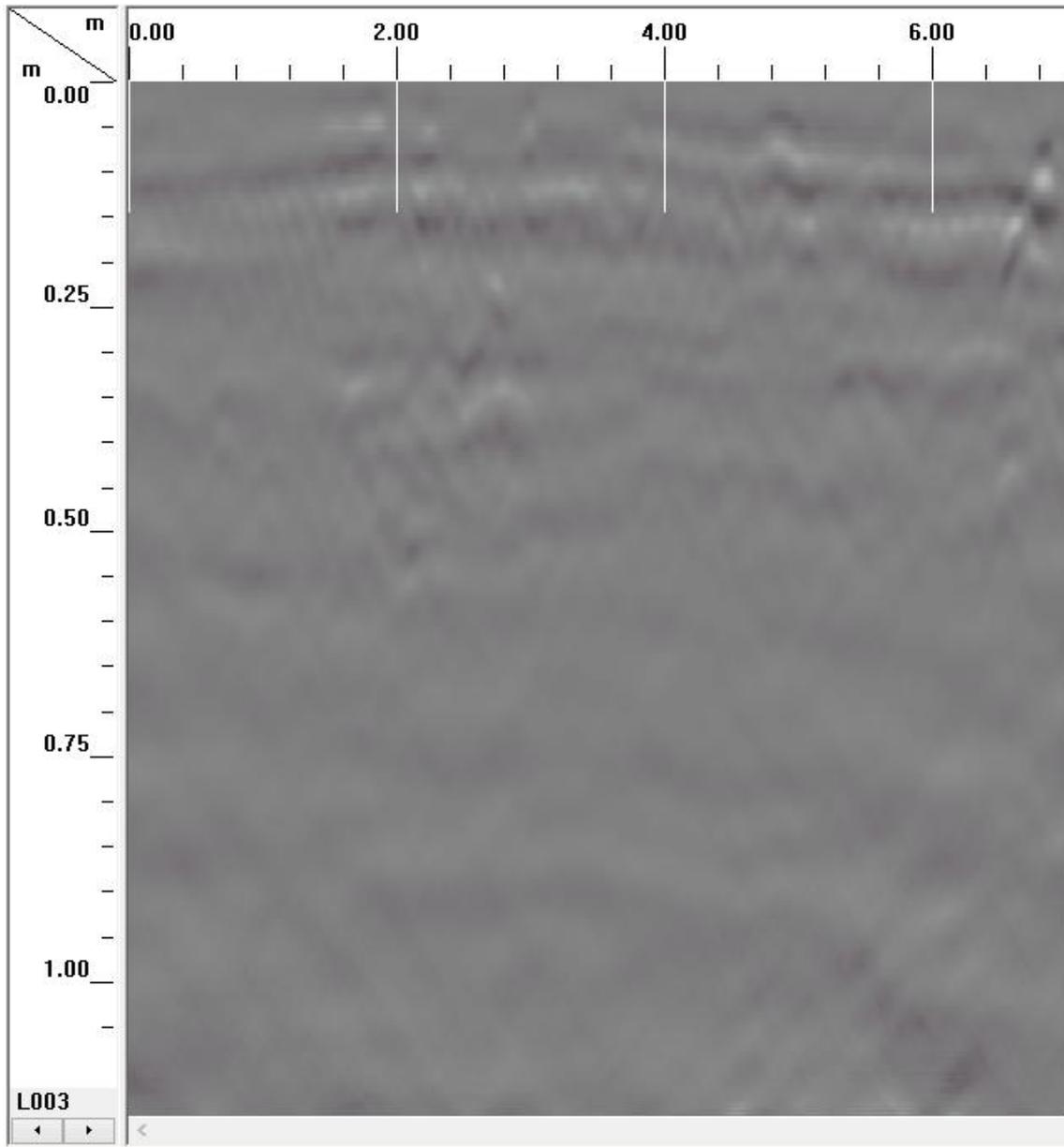
Radargrama L001



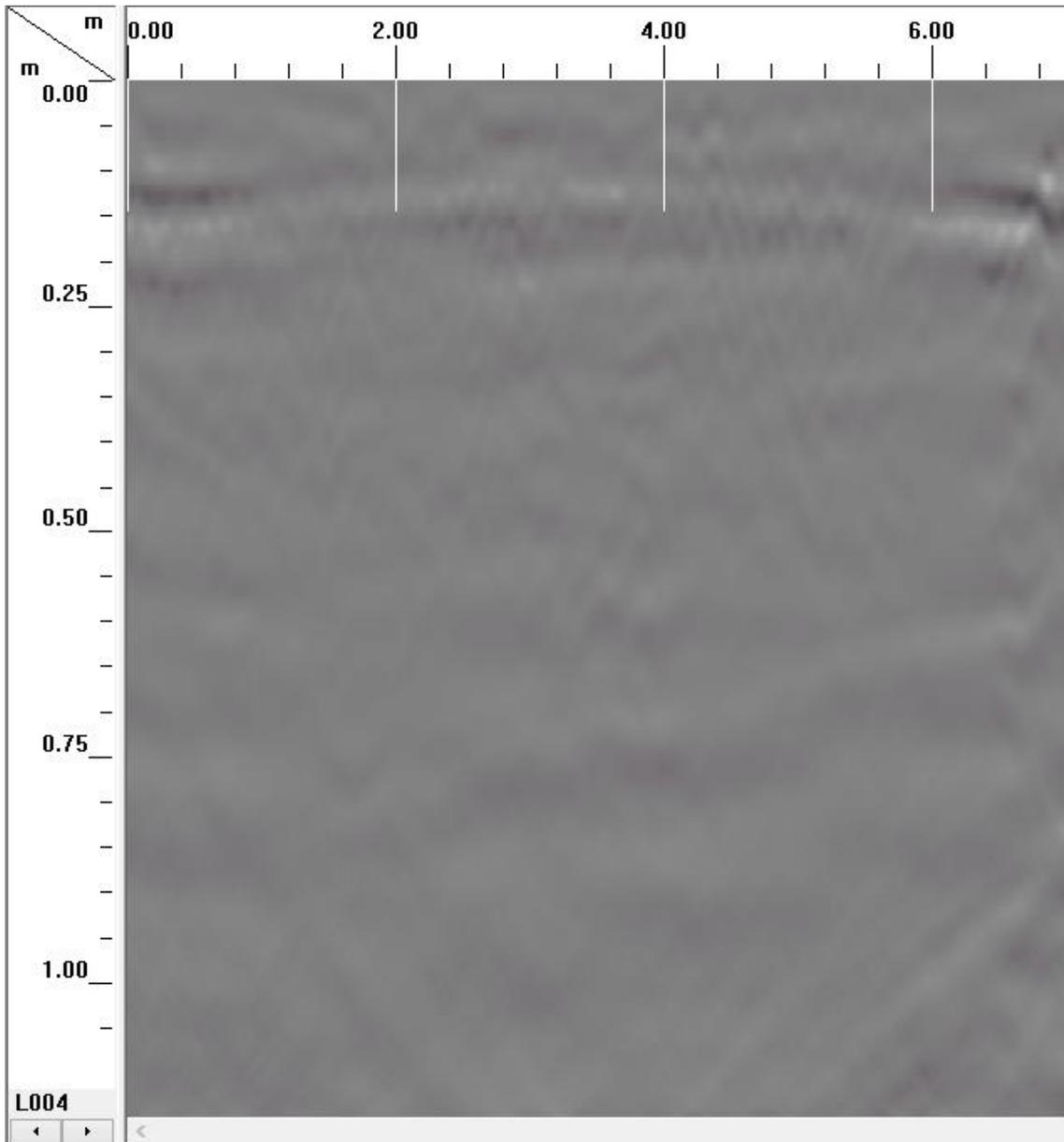
Radargrama L002



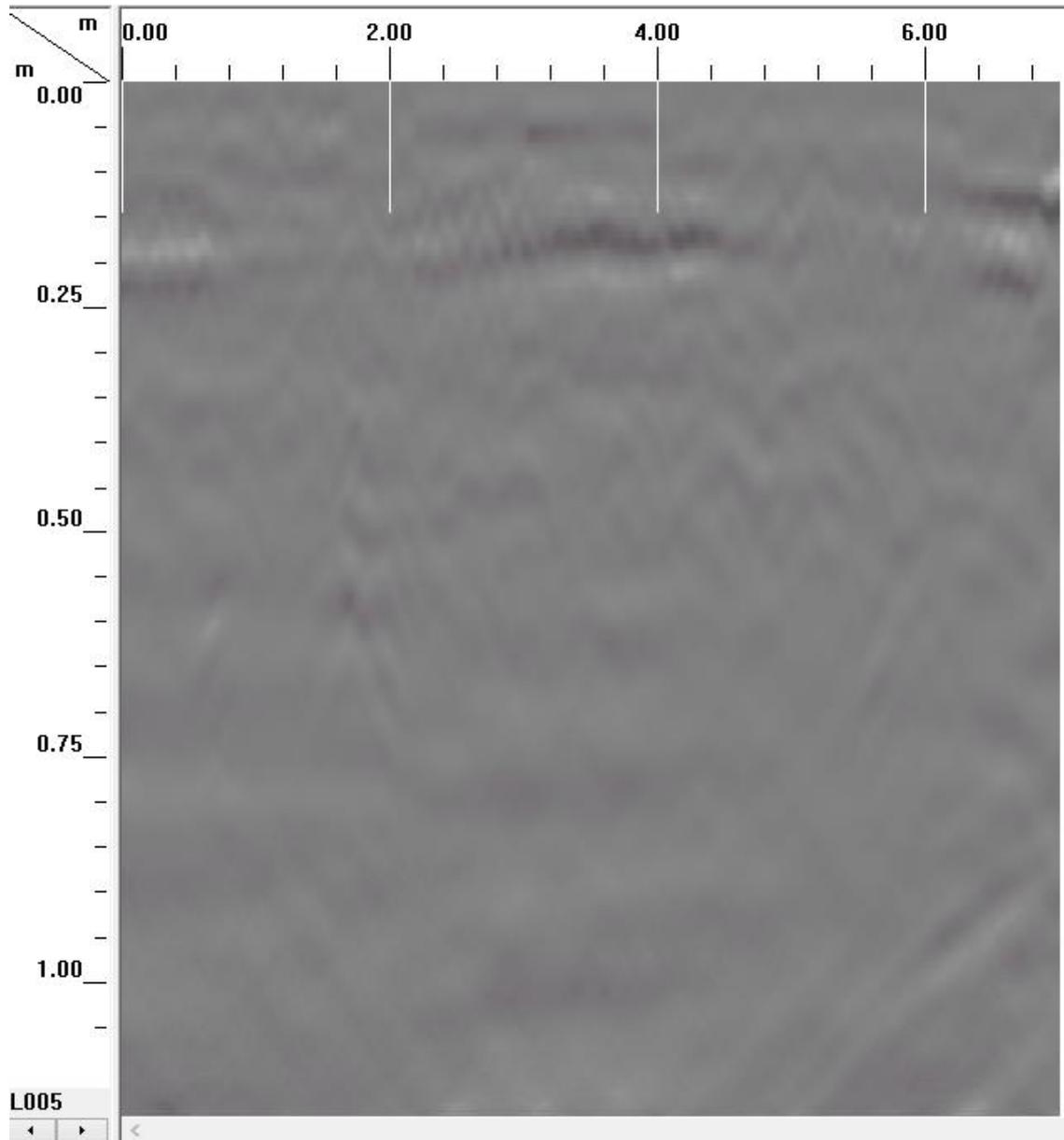
Radargrama L003



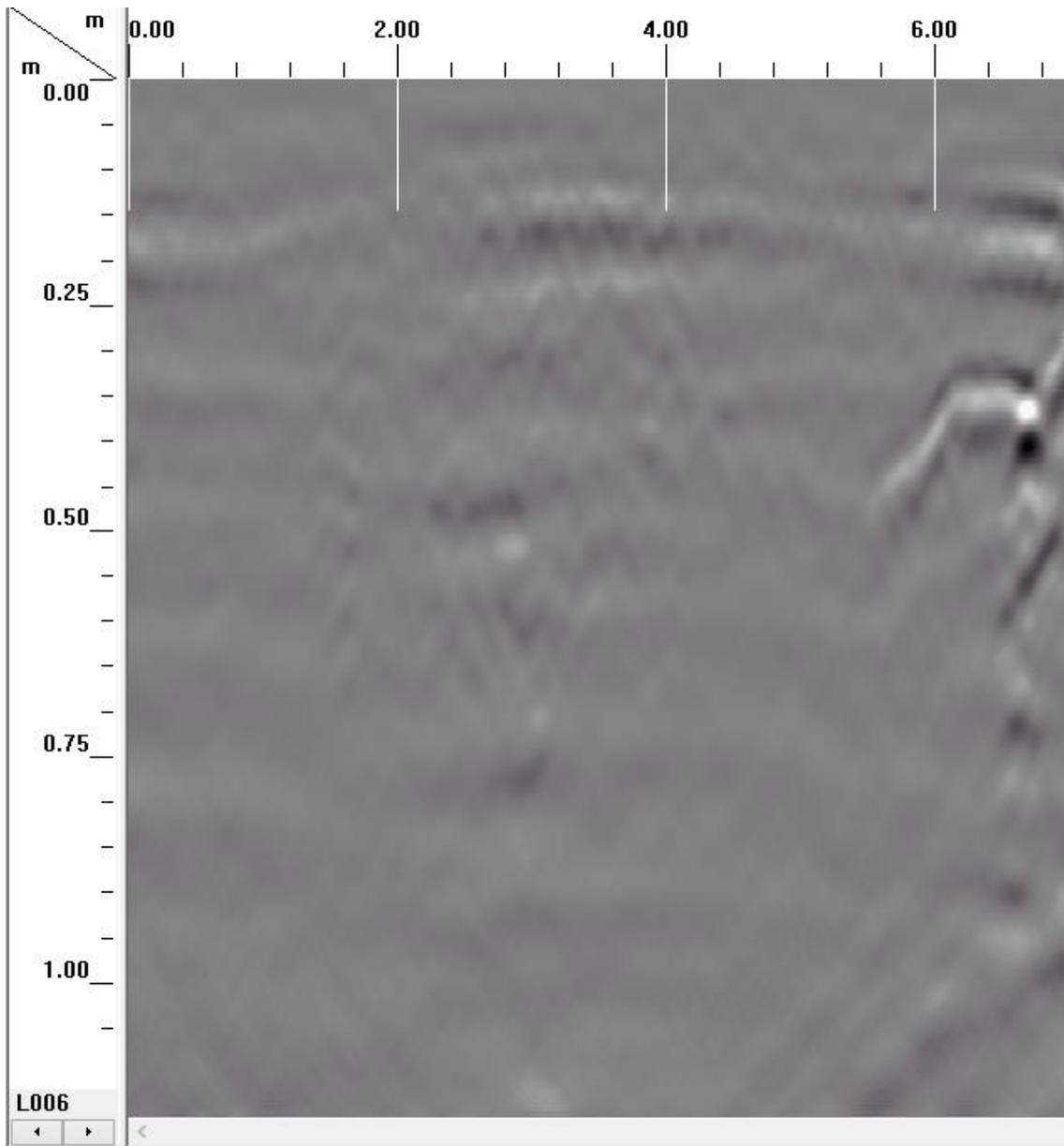
Radargrama L004



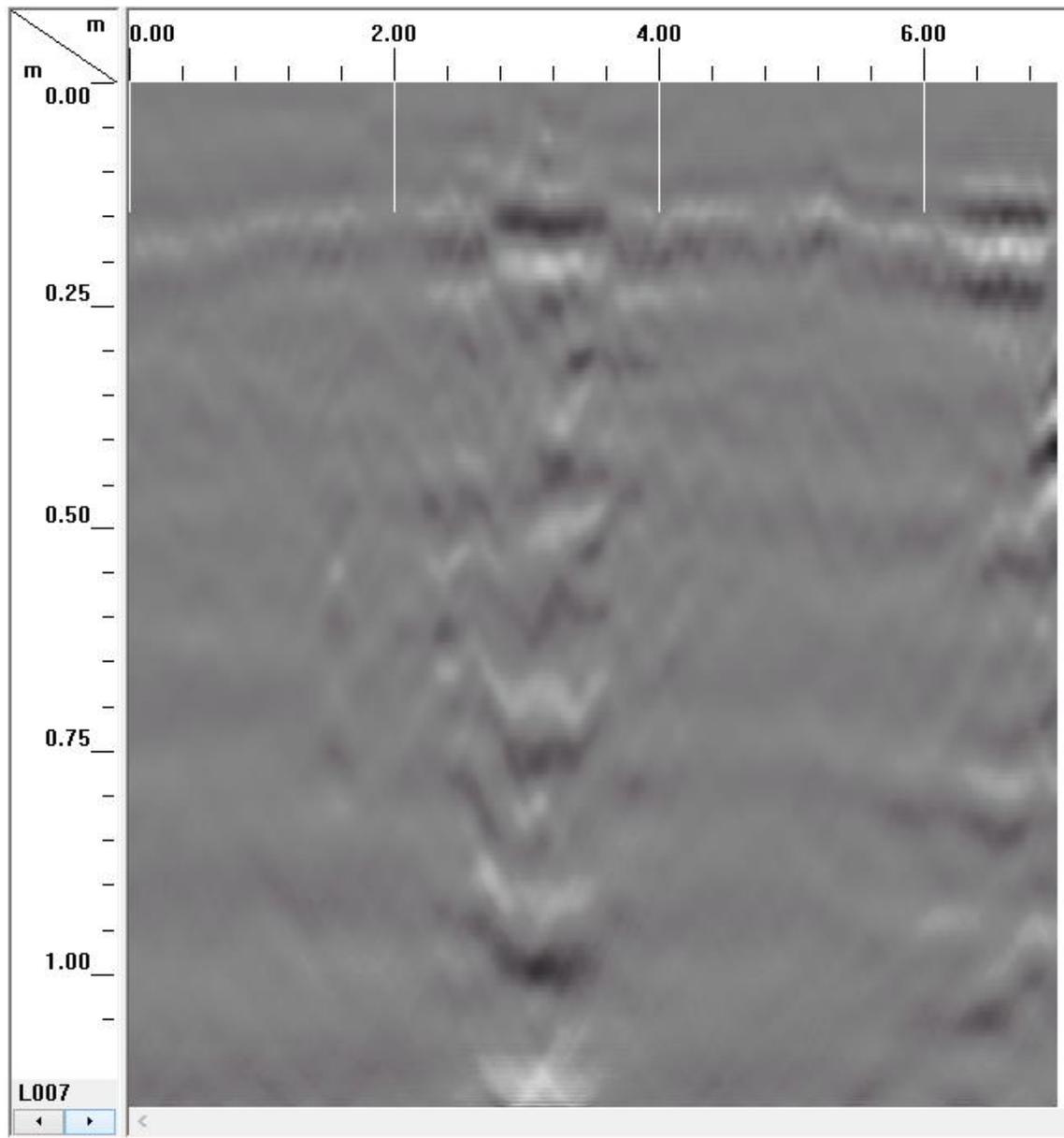
Radargrama L005



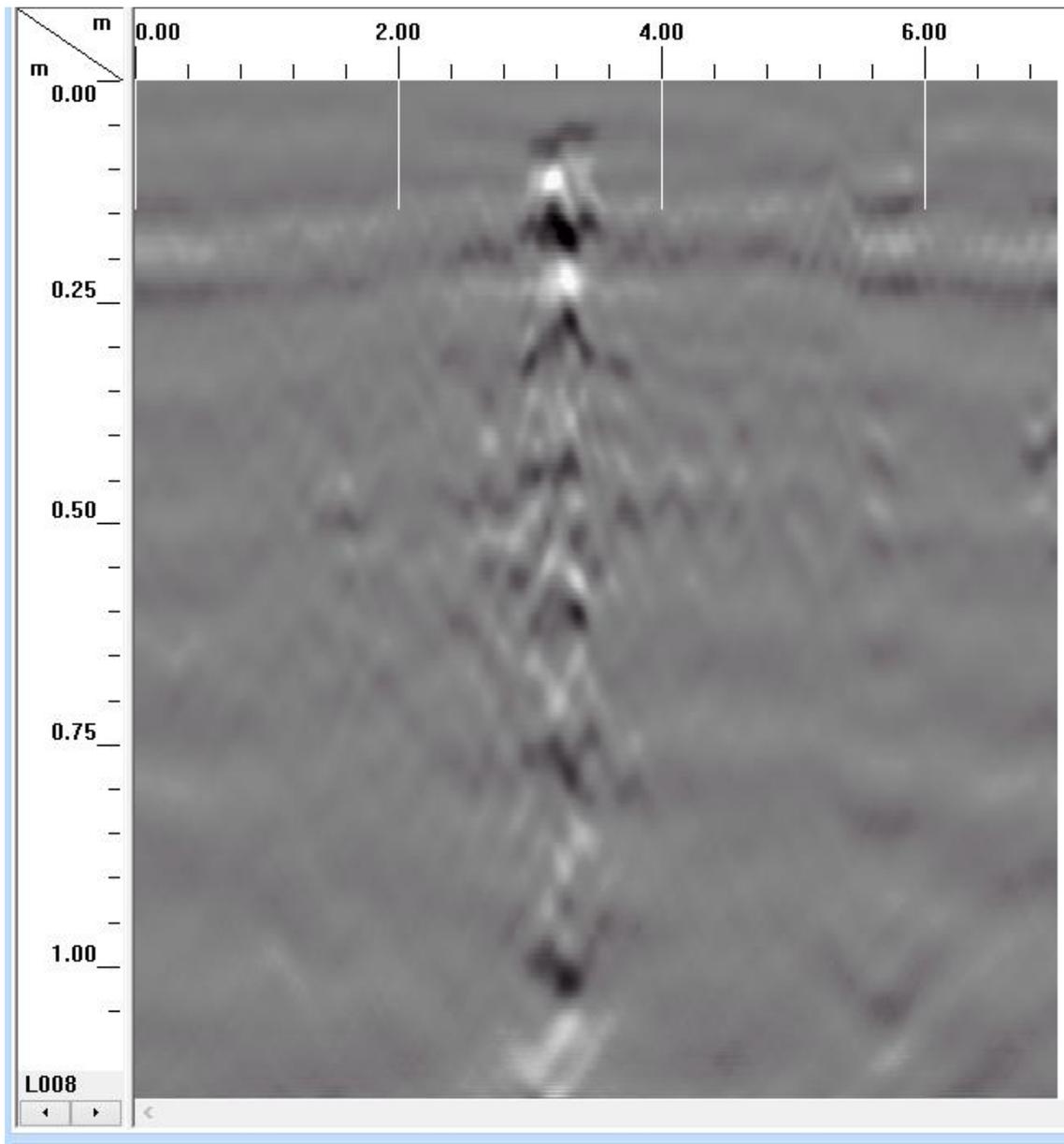
Radargrama L006



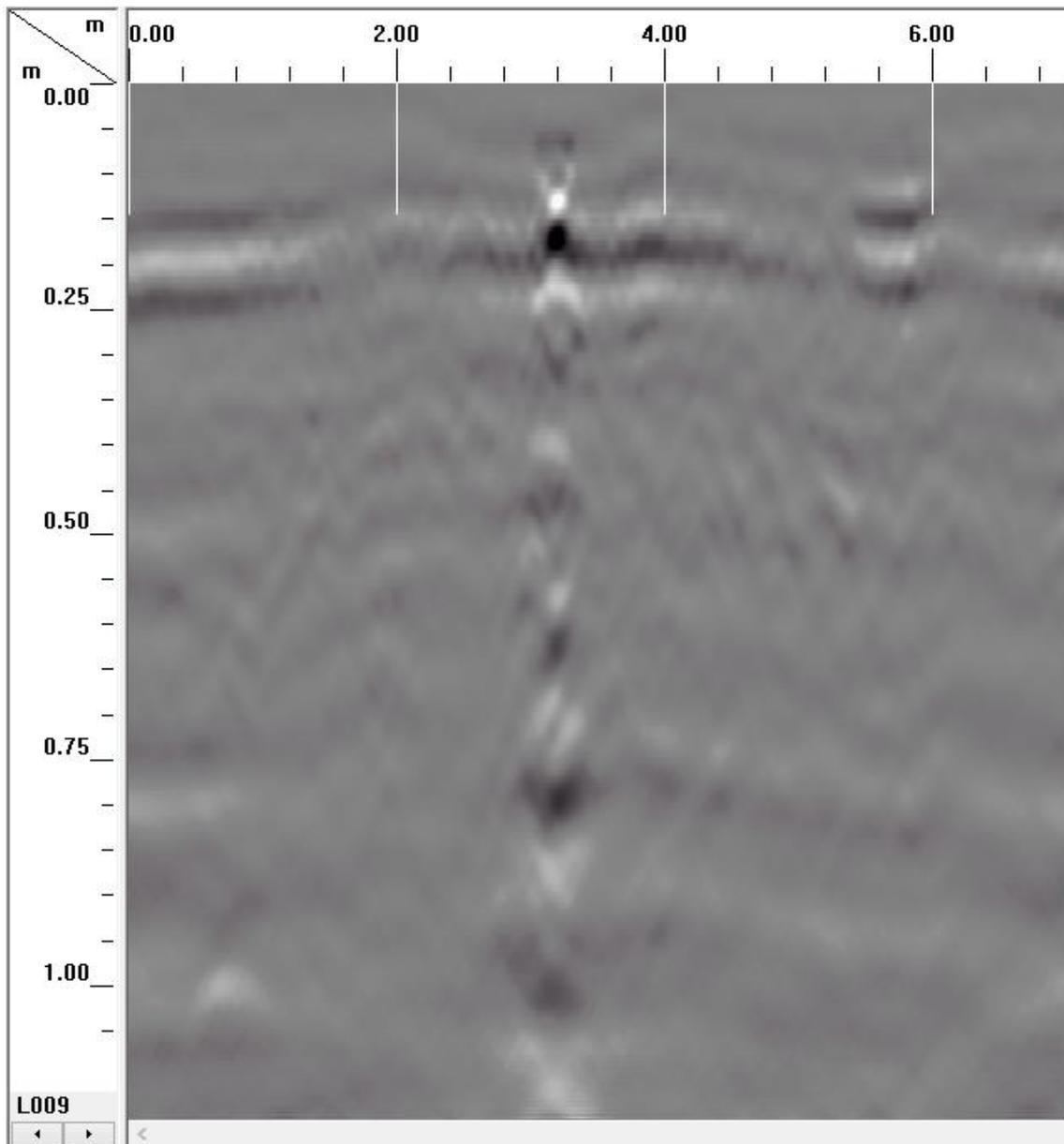
Radargrama L007



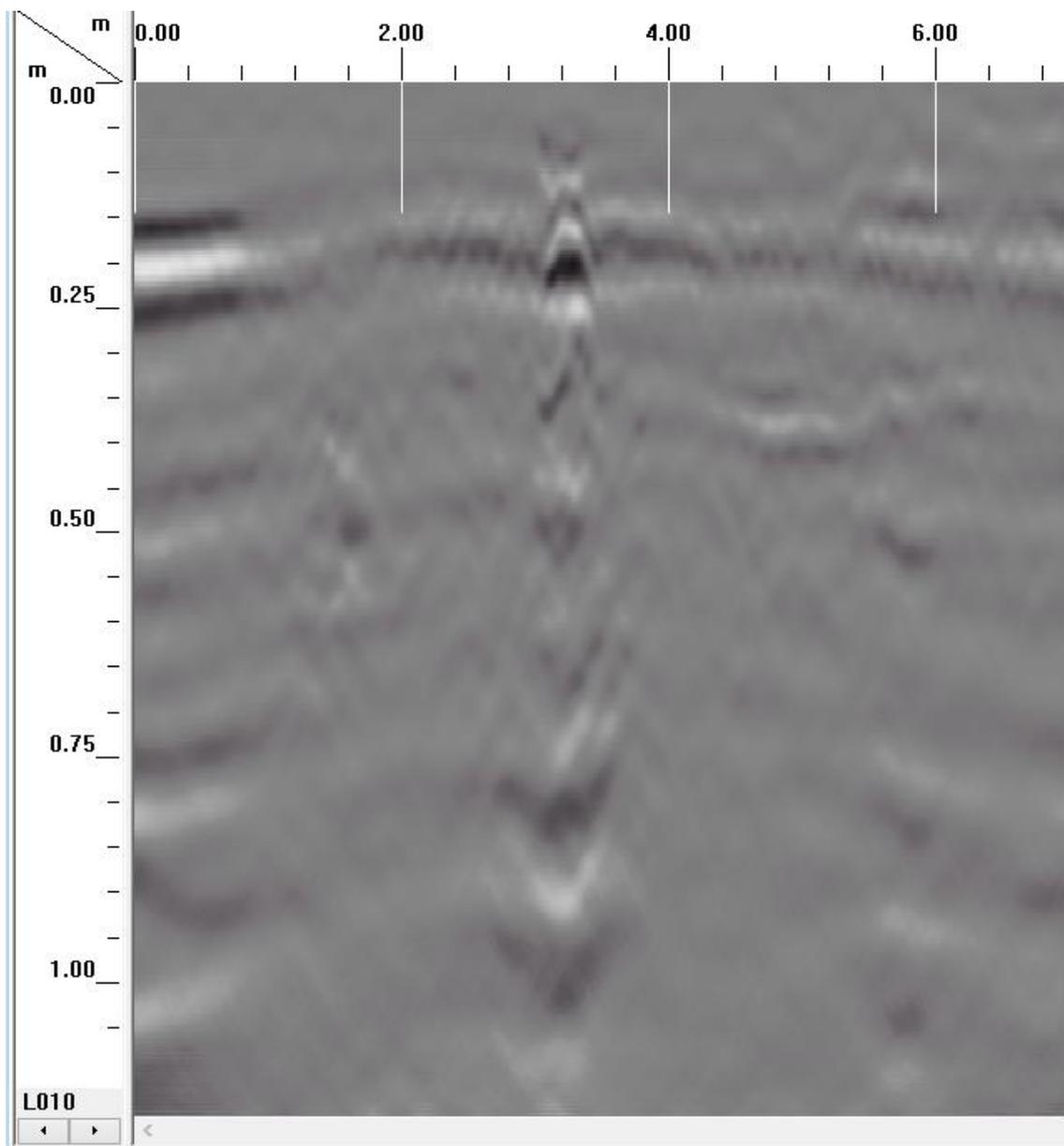
Radargrama L008



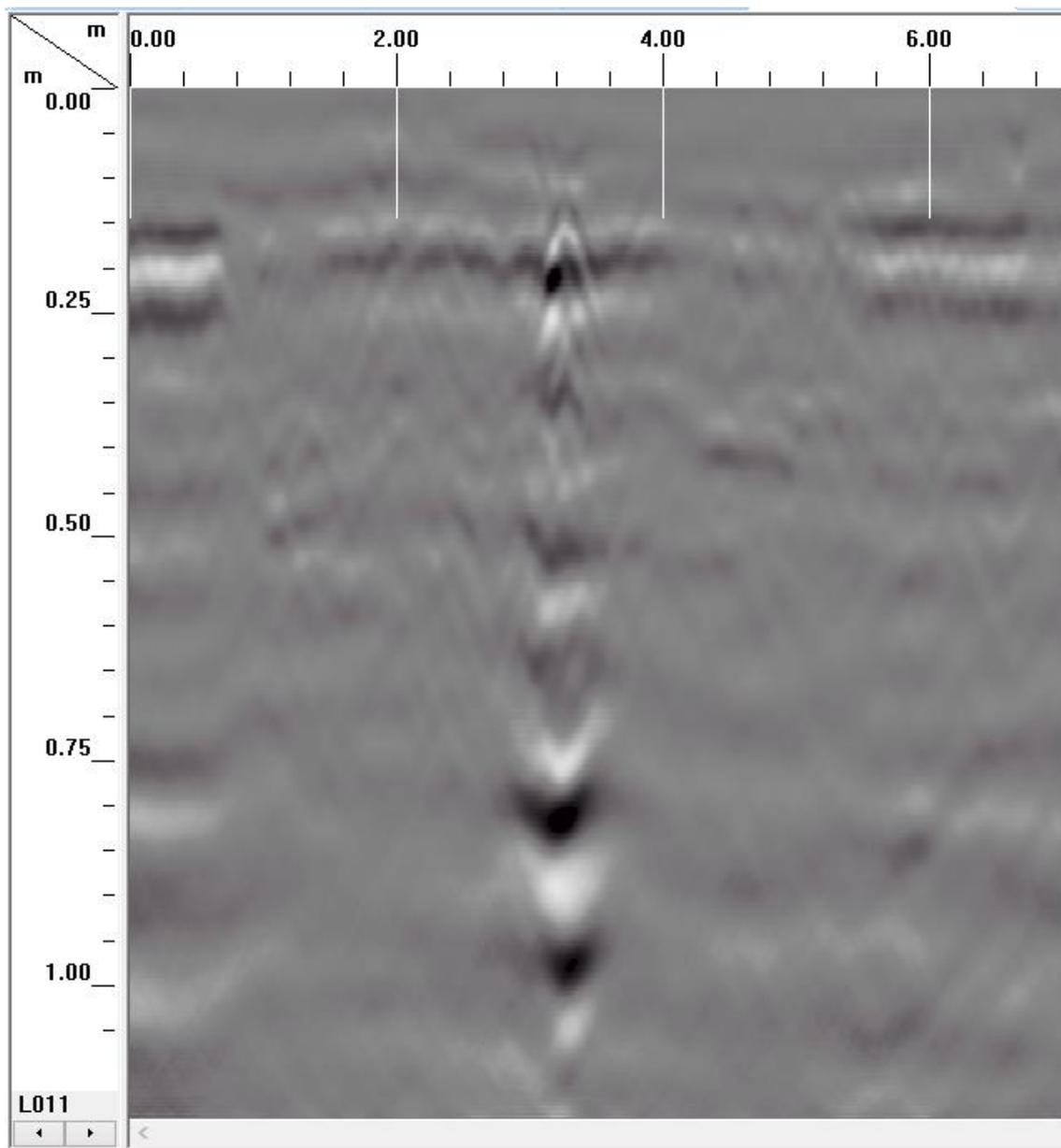
Radargrama L009



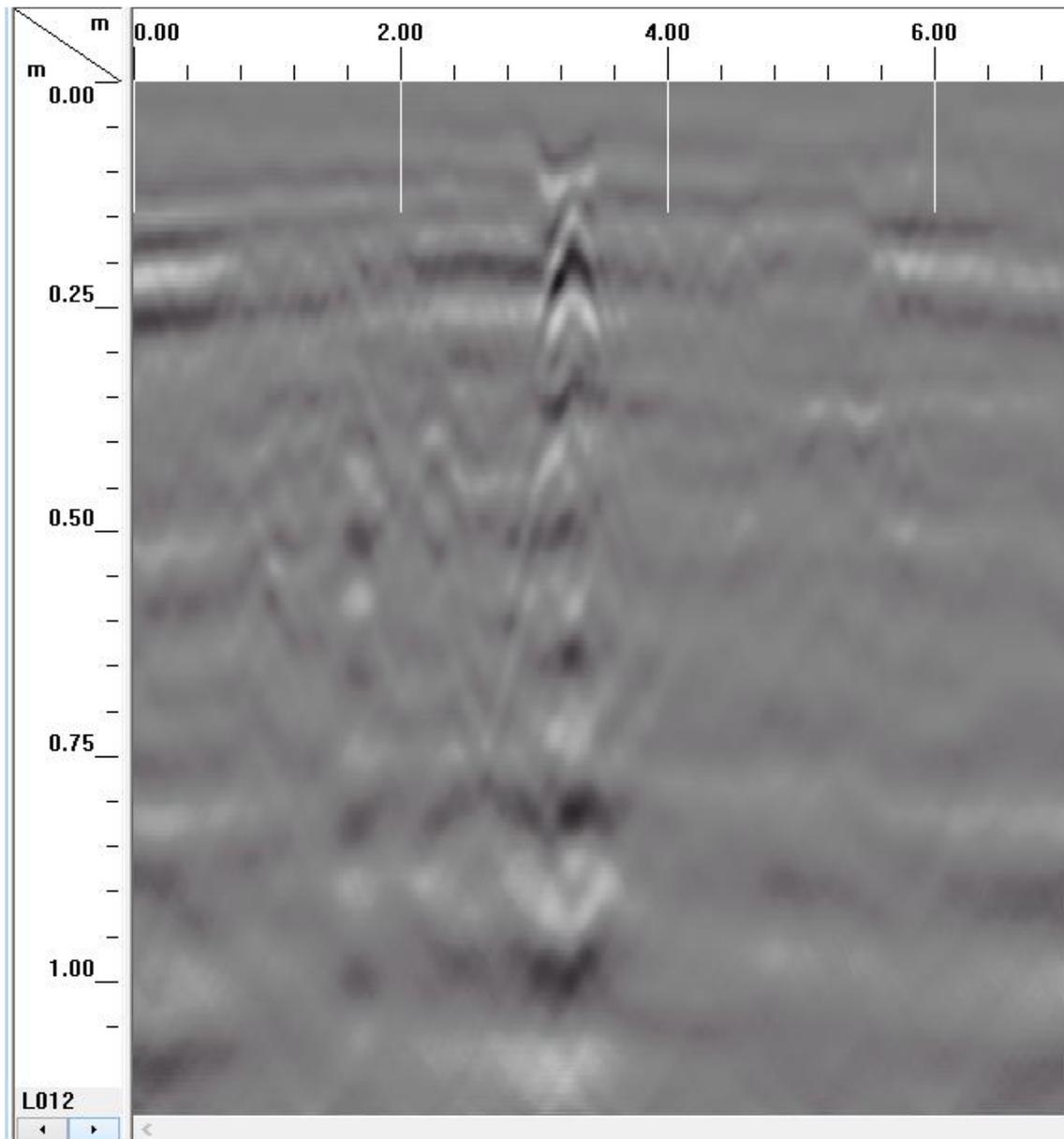
Radargrama L010



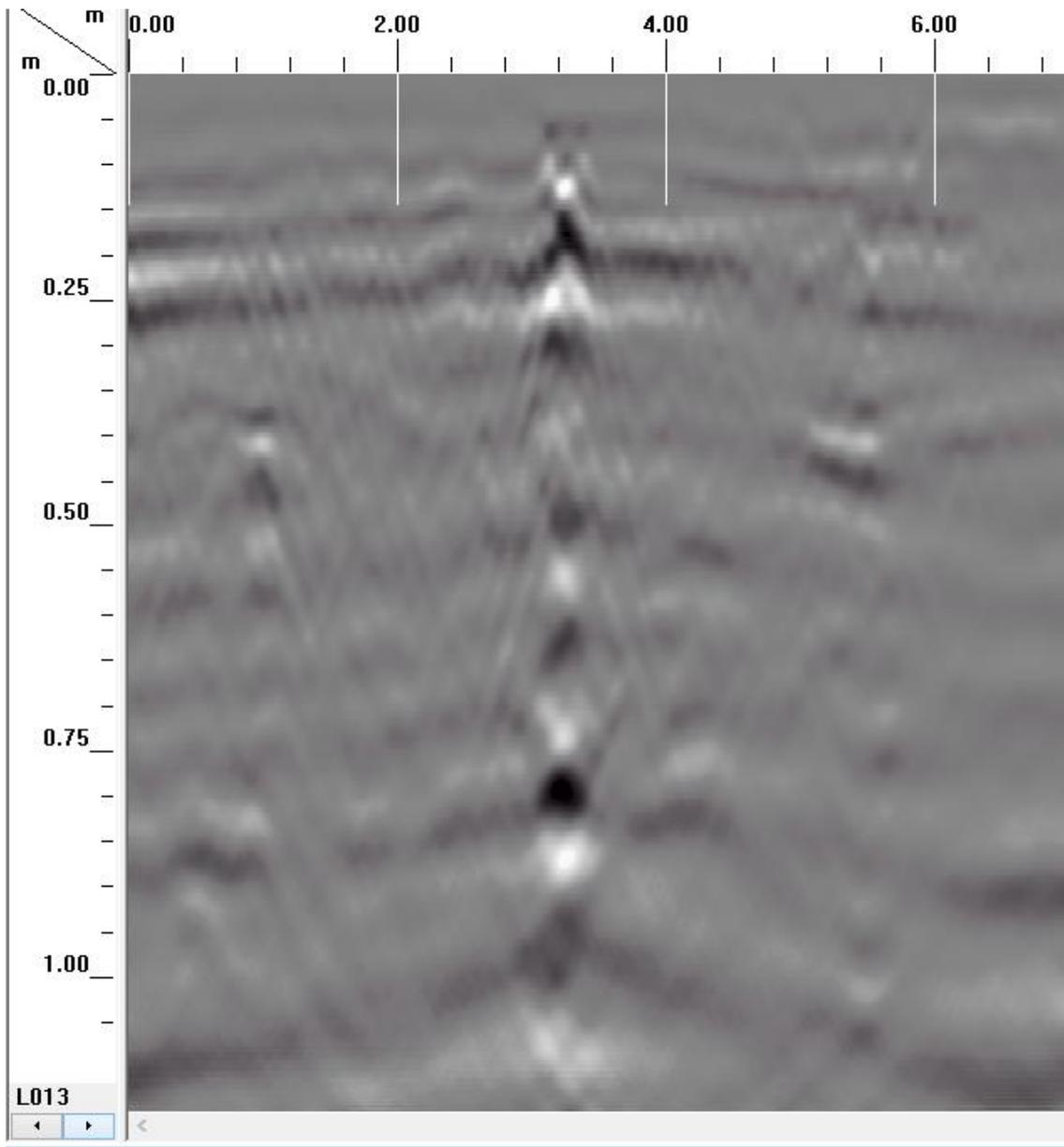
Radargrama L011



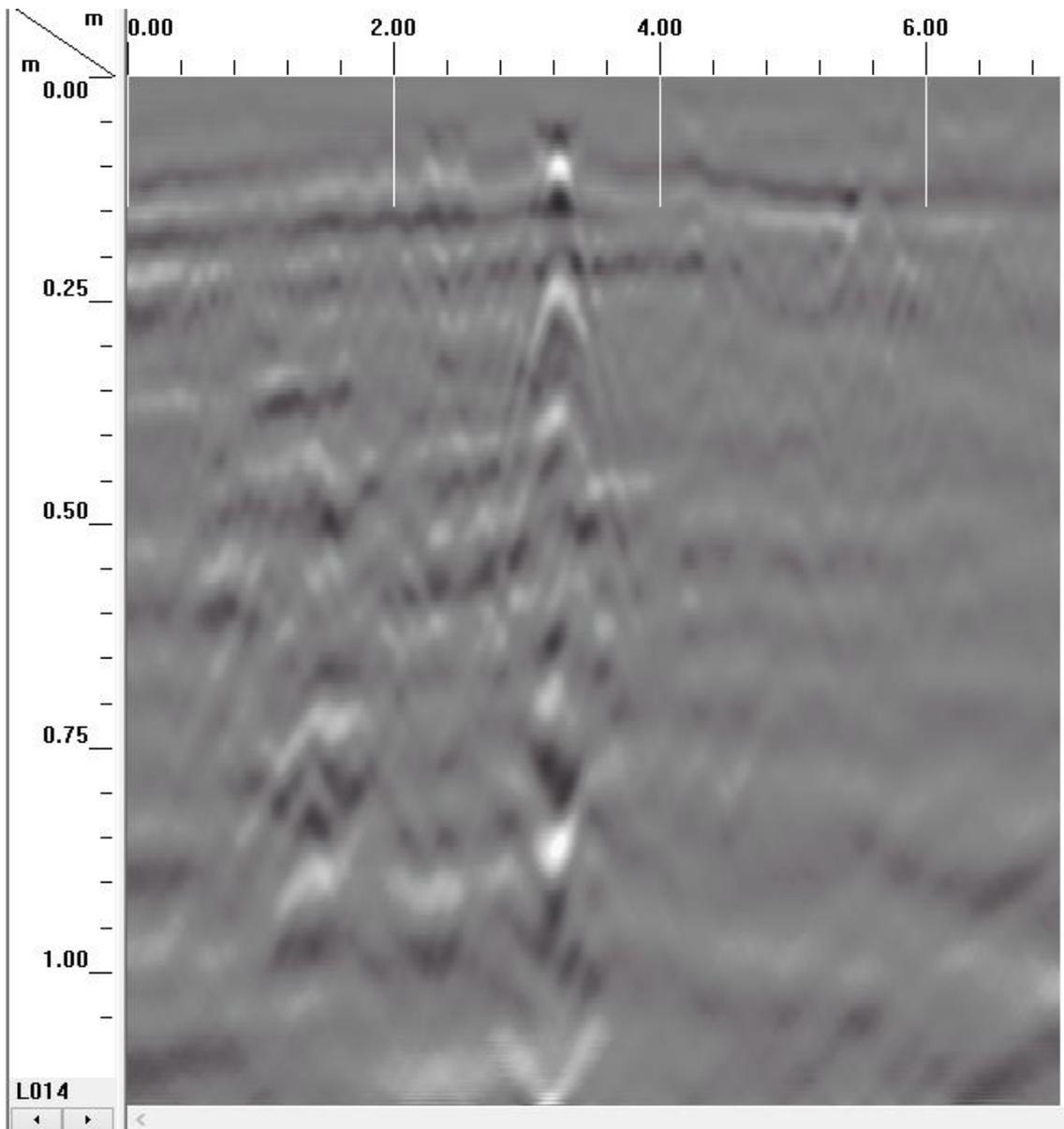
Radargrama L012



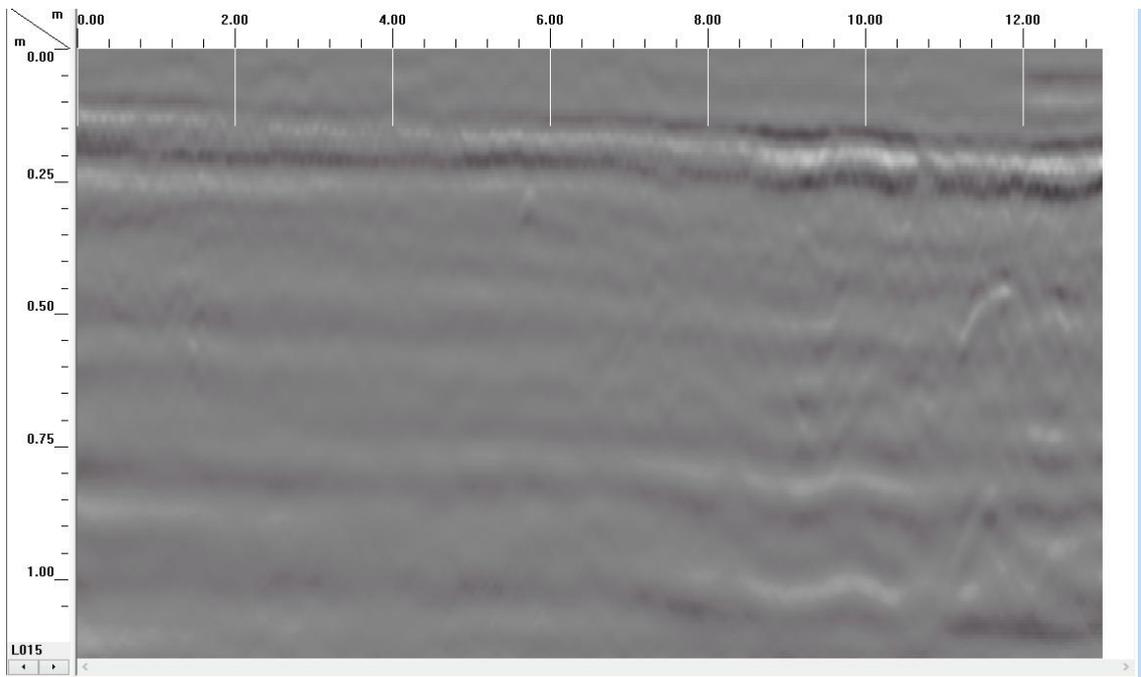
Radargrama L013



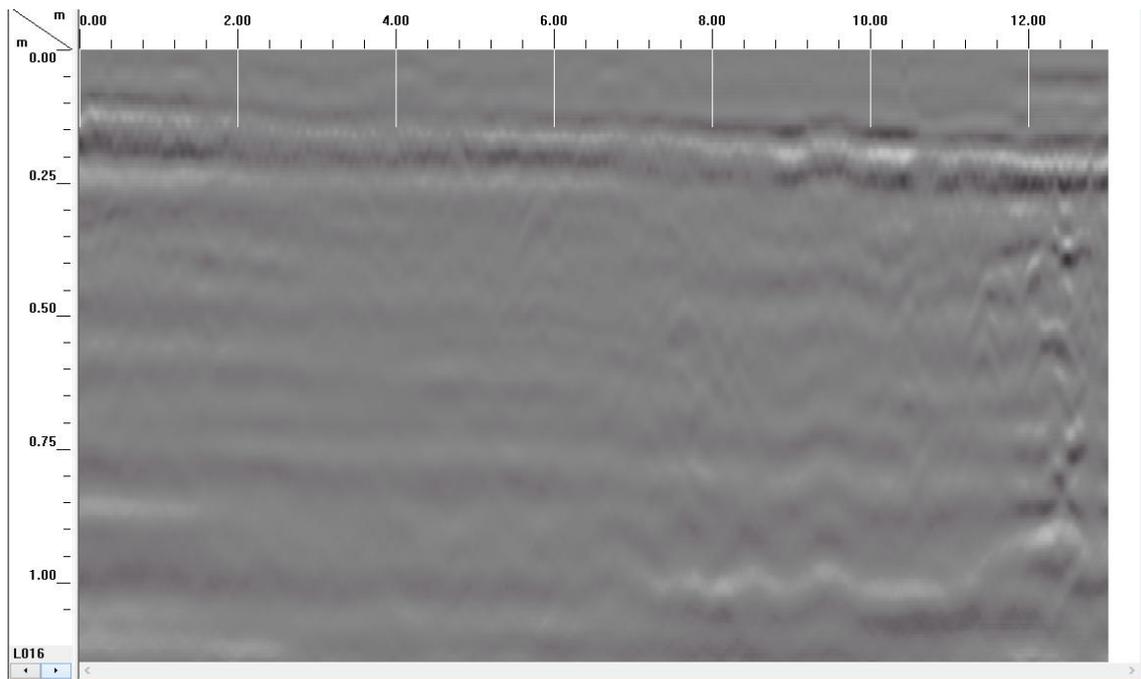
Radargrama L014



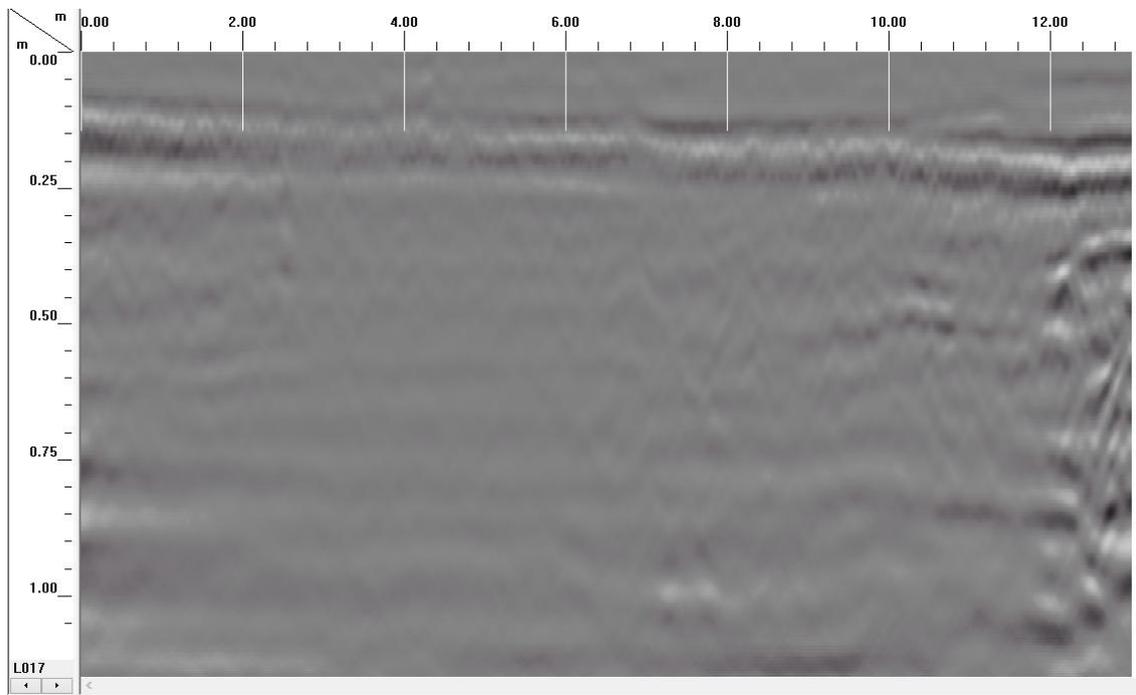
Radargrama L015



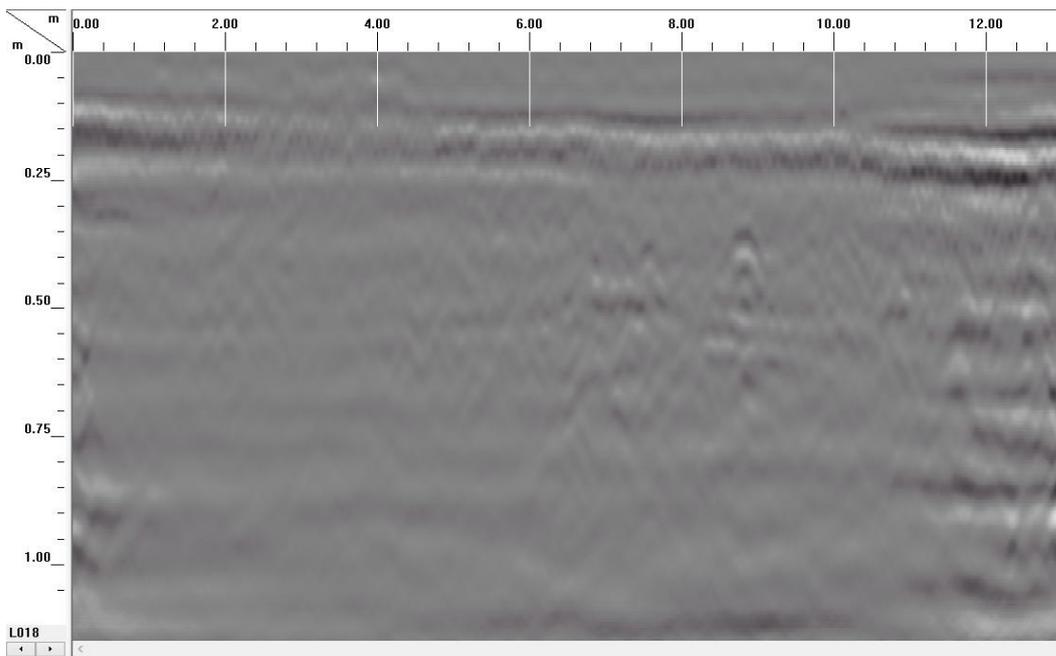
Radargrama L016



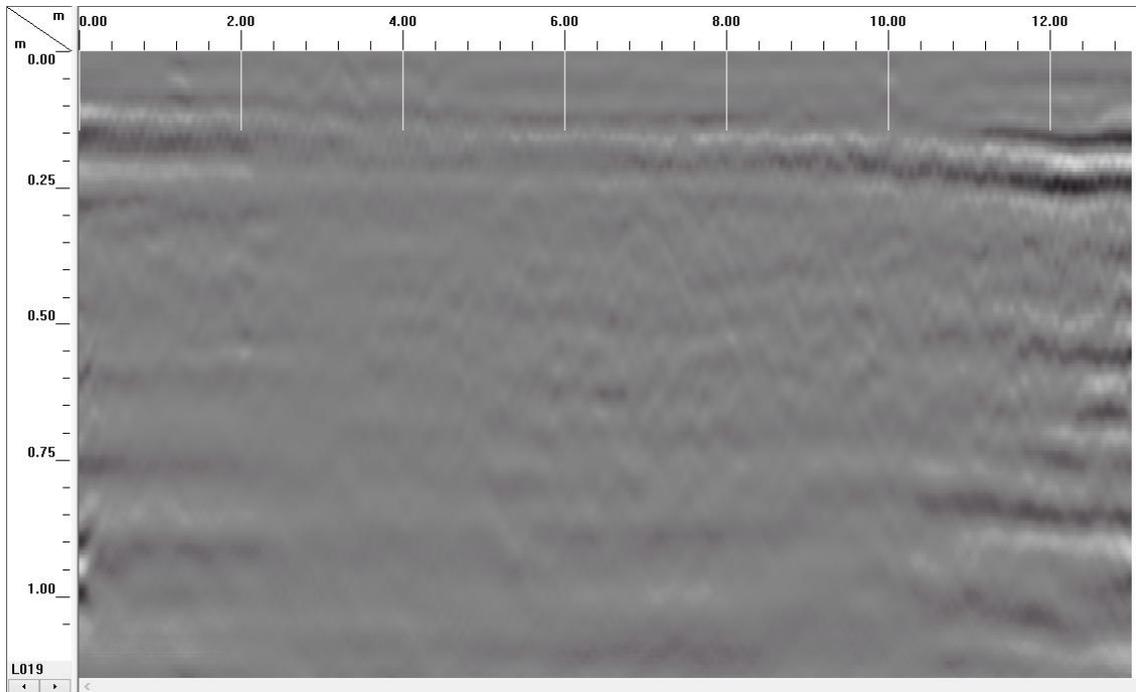
Radargrama L017



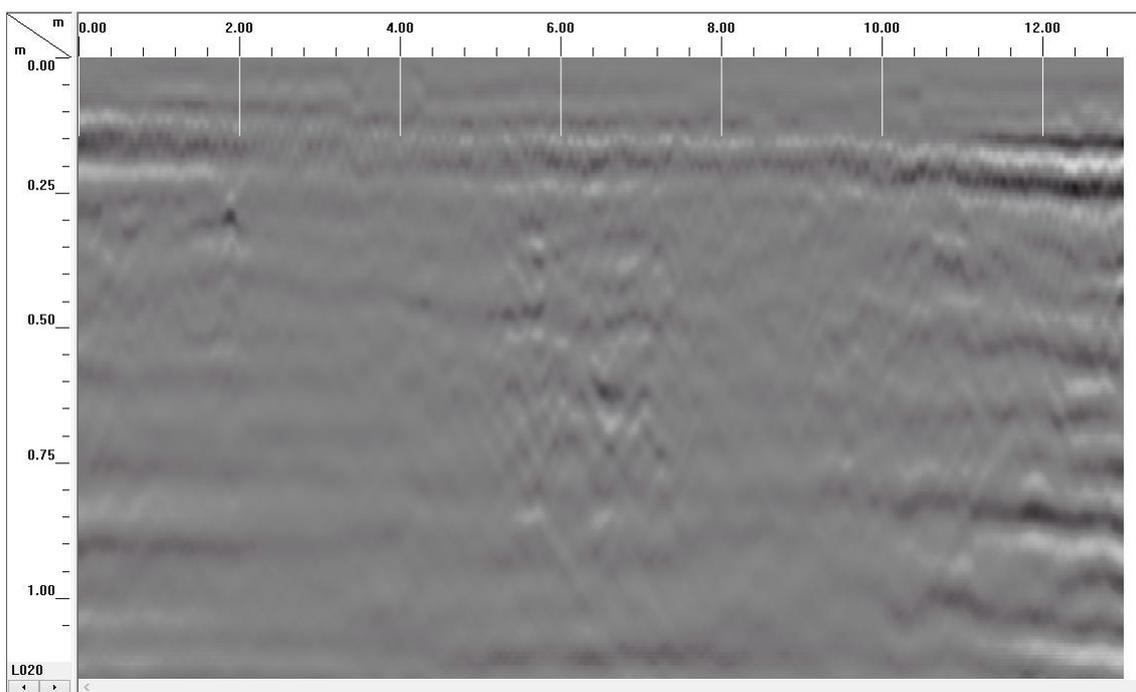
Radargrama L018



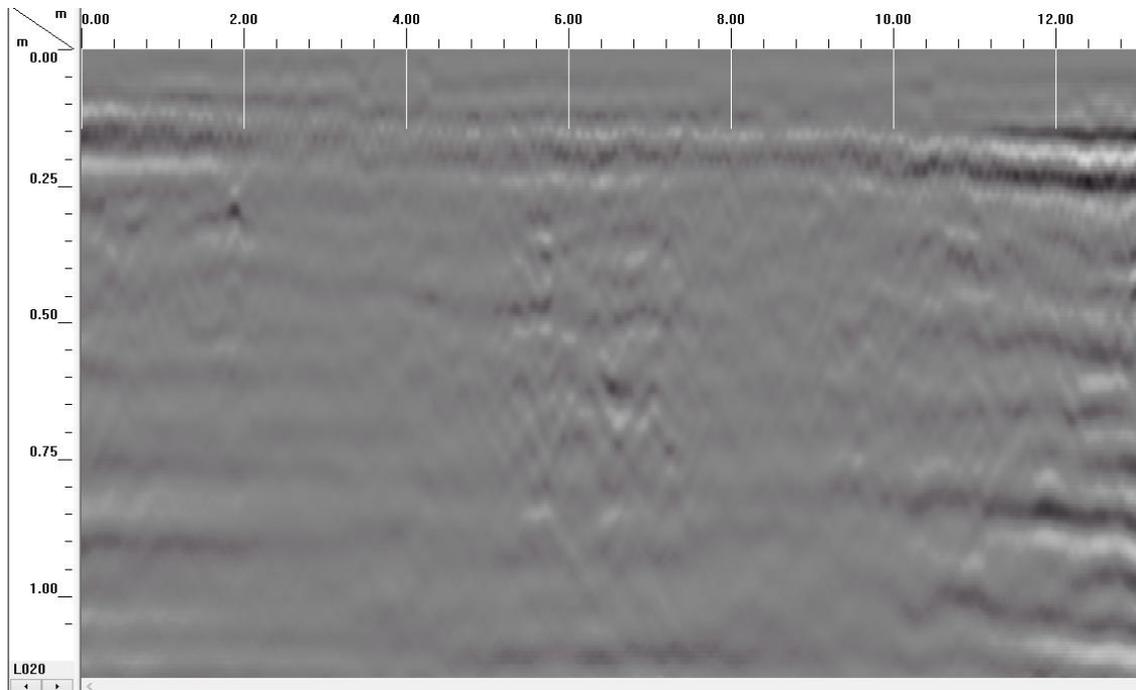
Radargrama L019



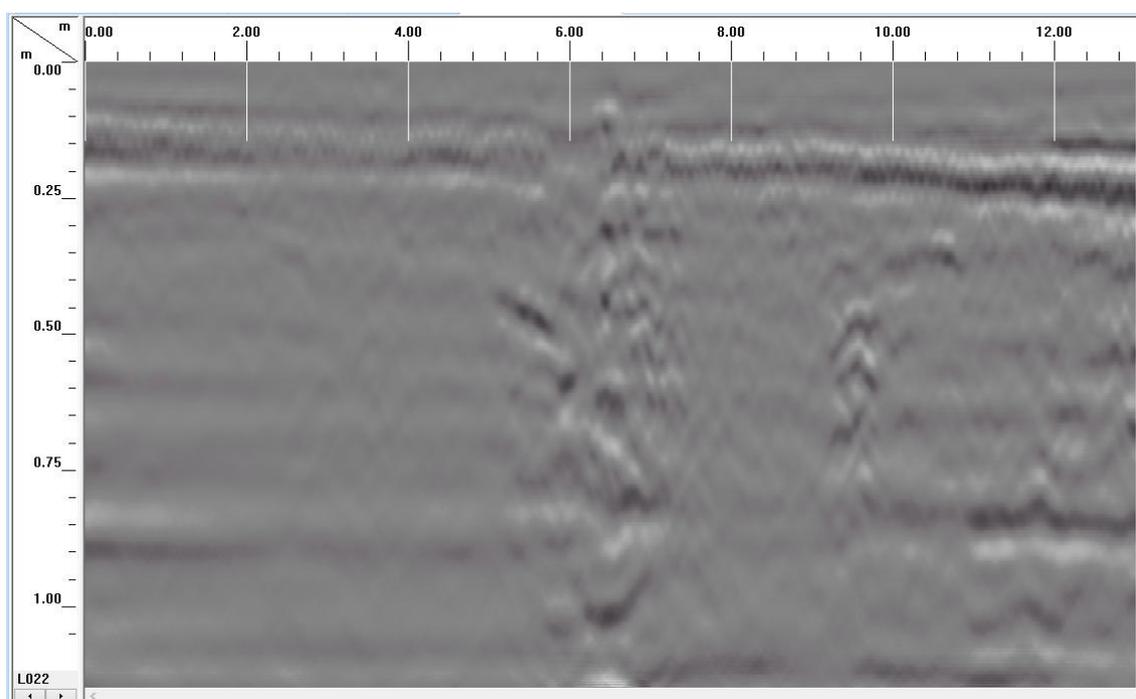
Radargrama L020



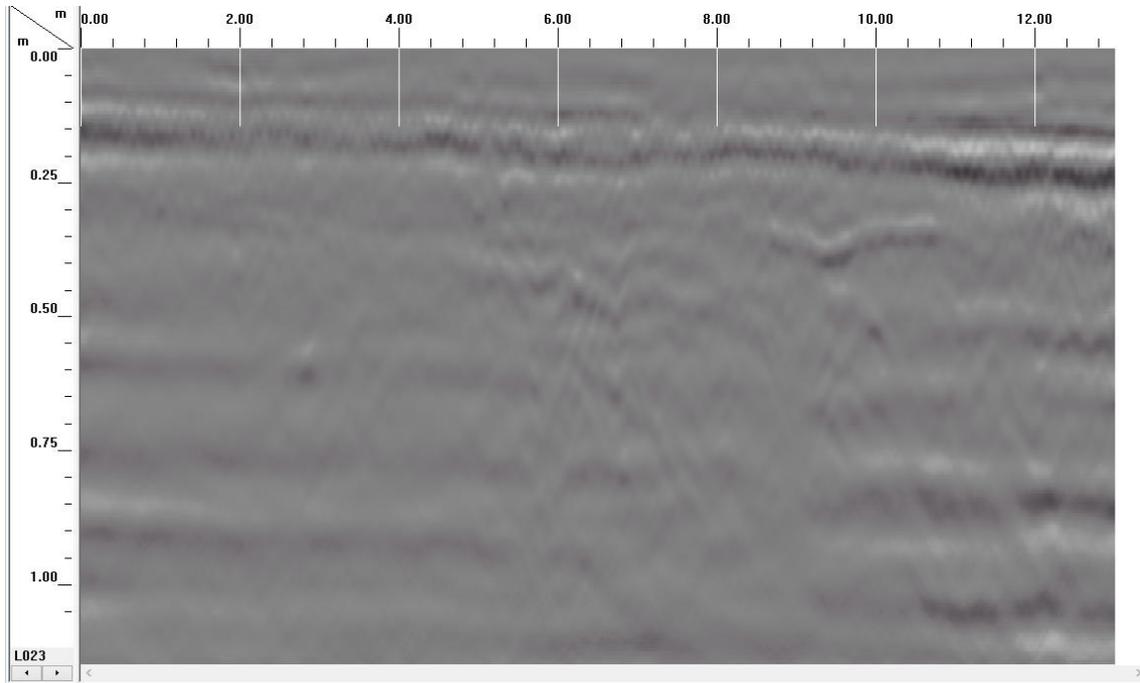
Radargrama L021



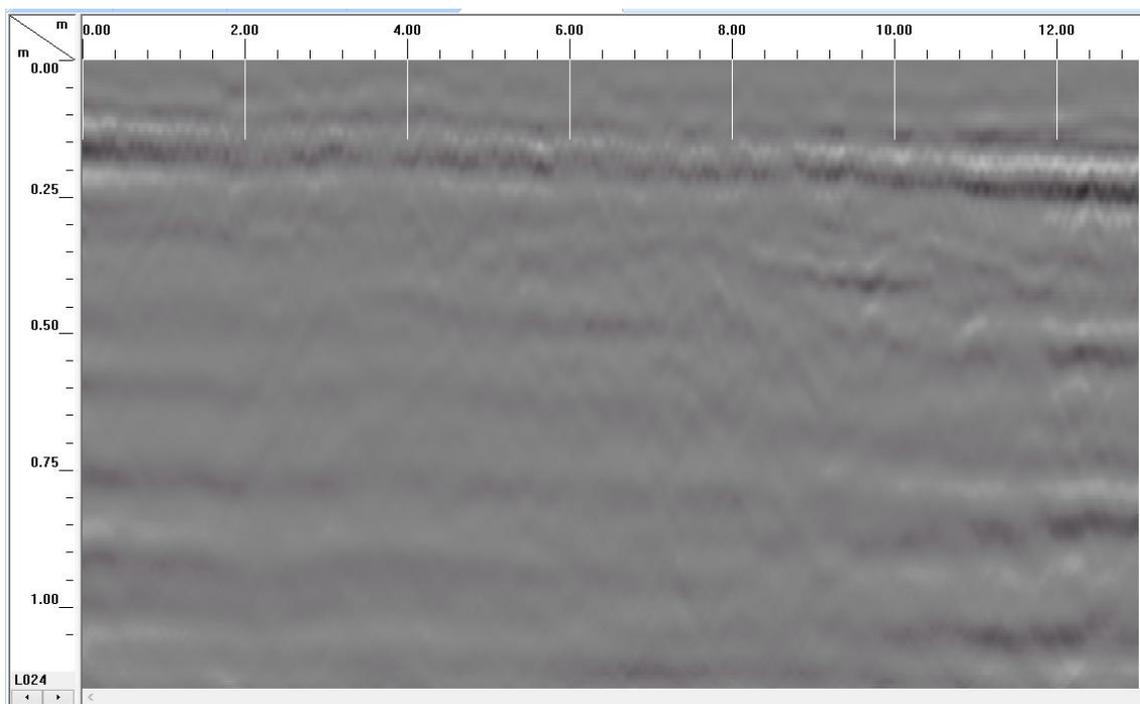
Radargrama L022



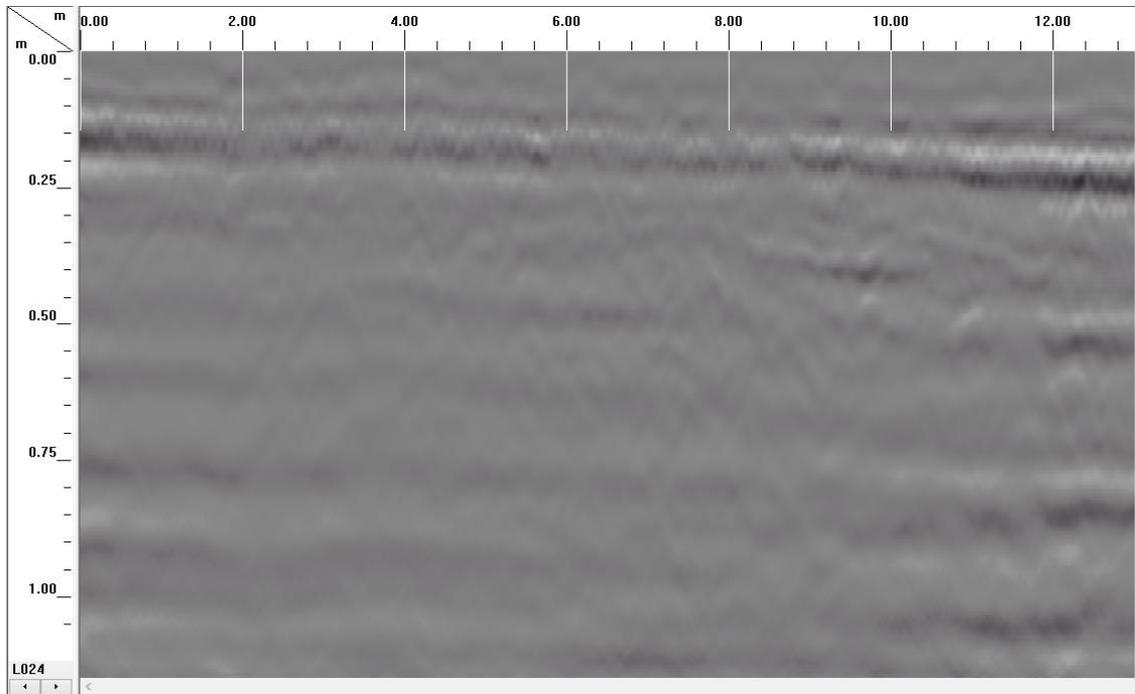
Radargrama L023



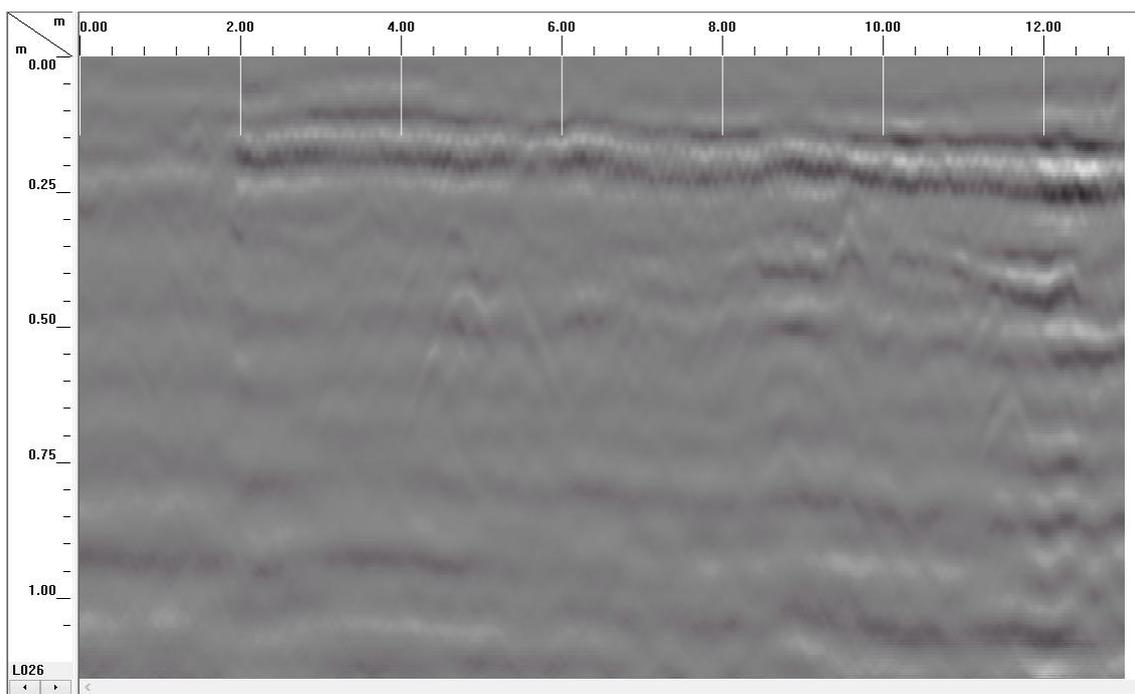
Radargrama L024



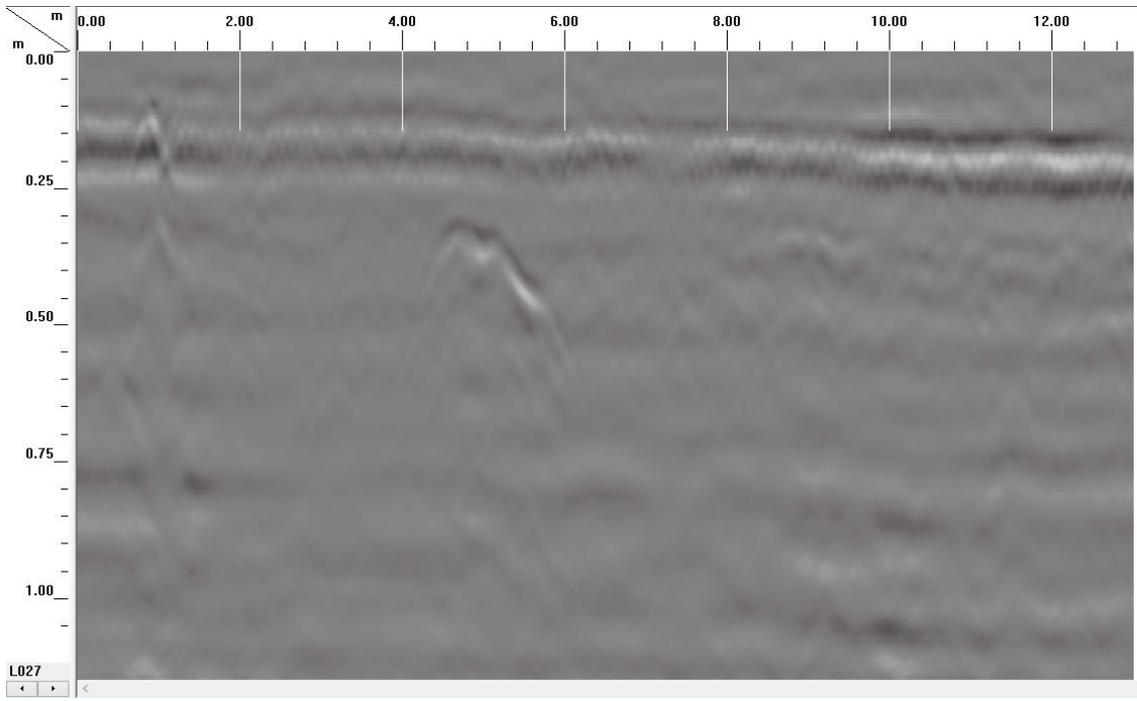
Radargrama L025



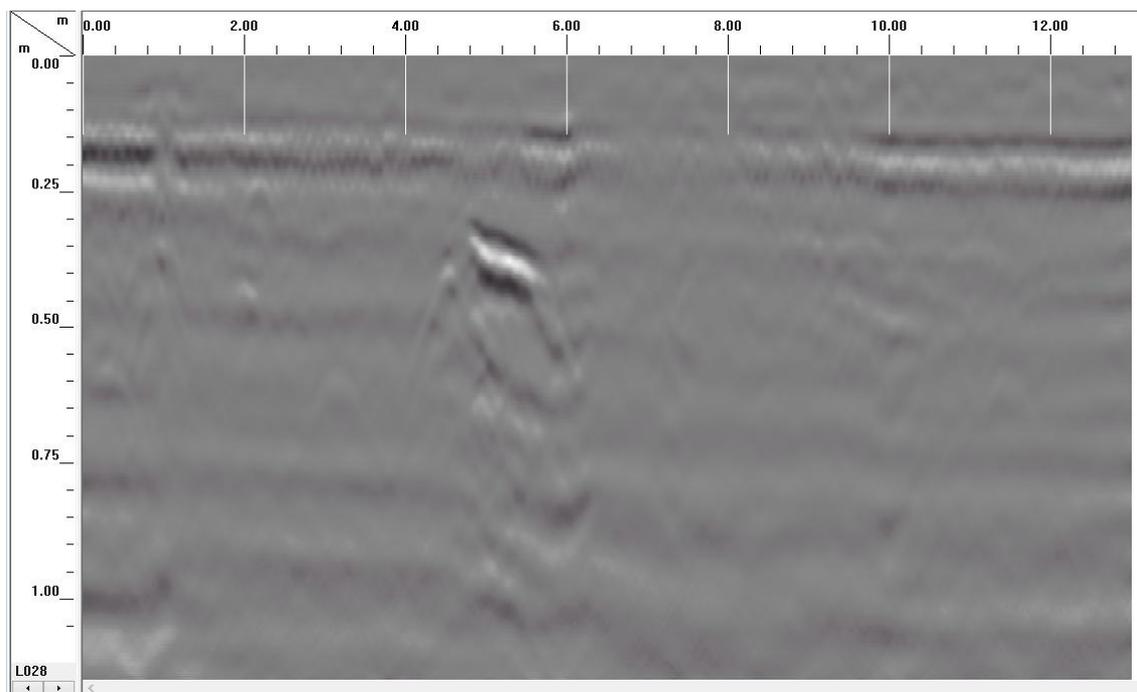
Radargrama L026



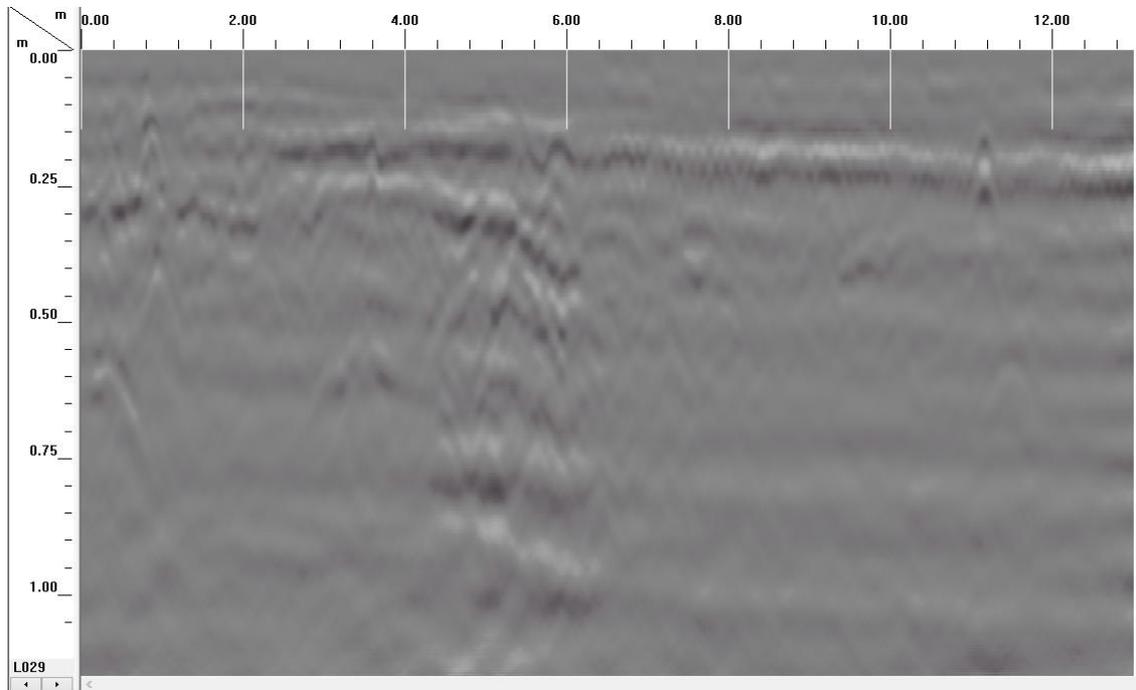
Radargrama L027



Radargrama L028

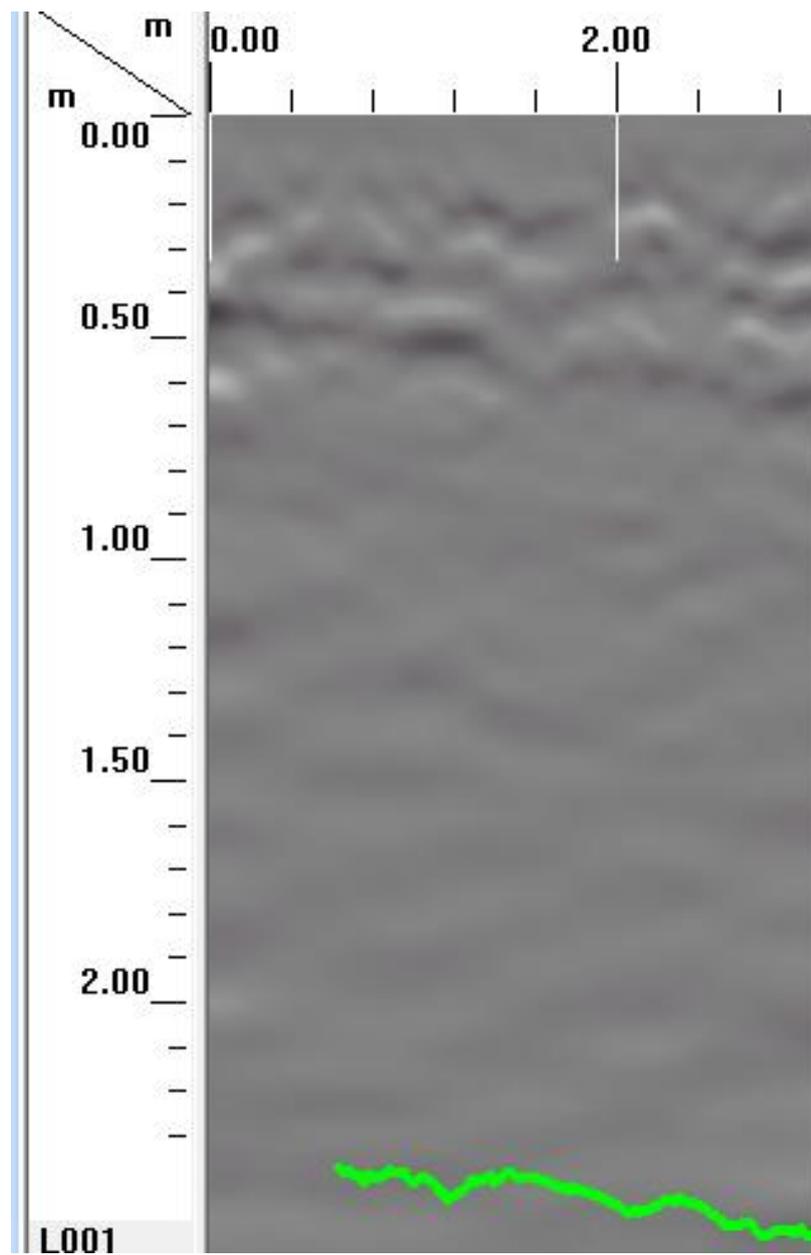


Radargrama L029

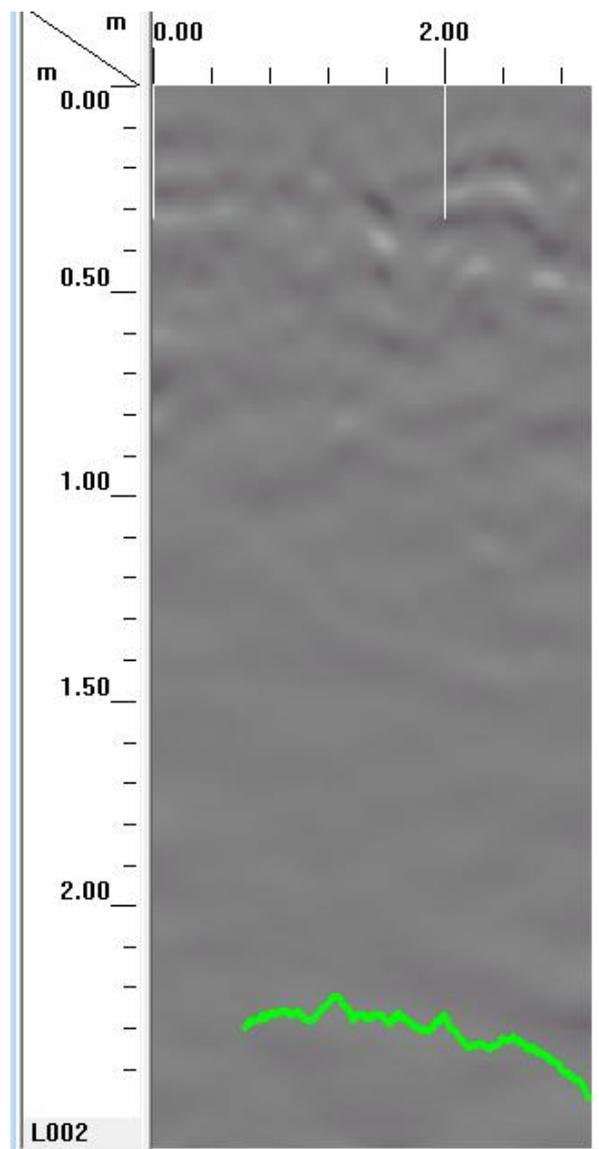


## Radargramas zona 2

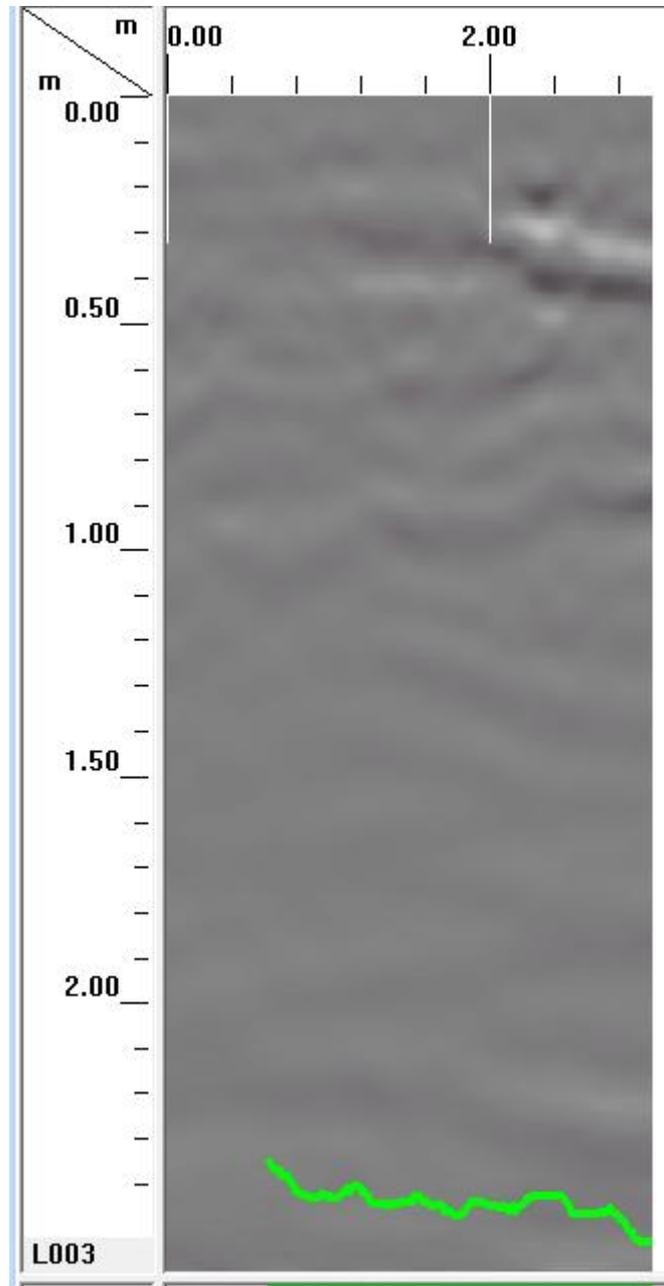
Radargrama L001



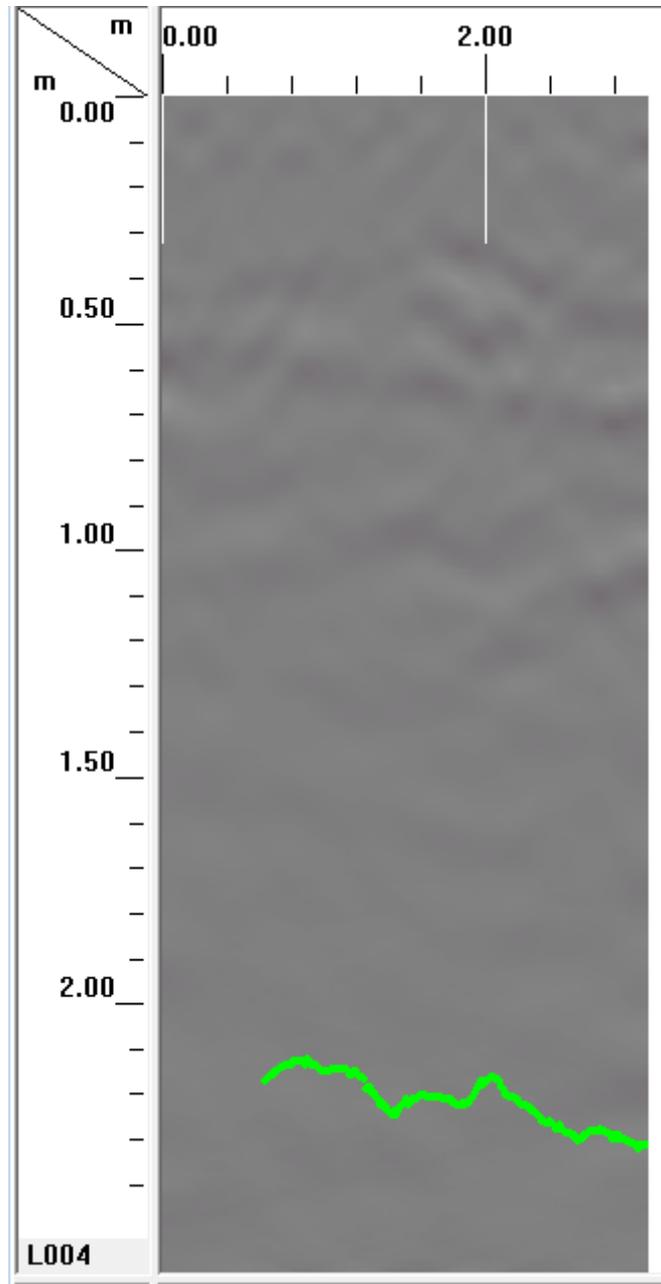
Radargrama L002



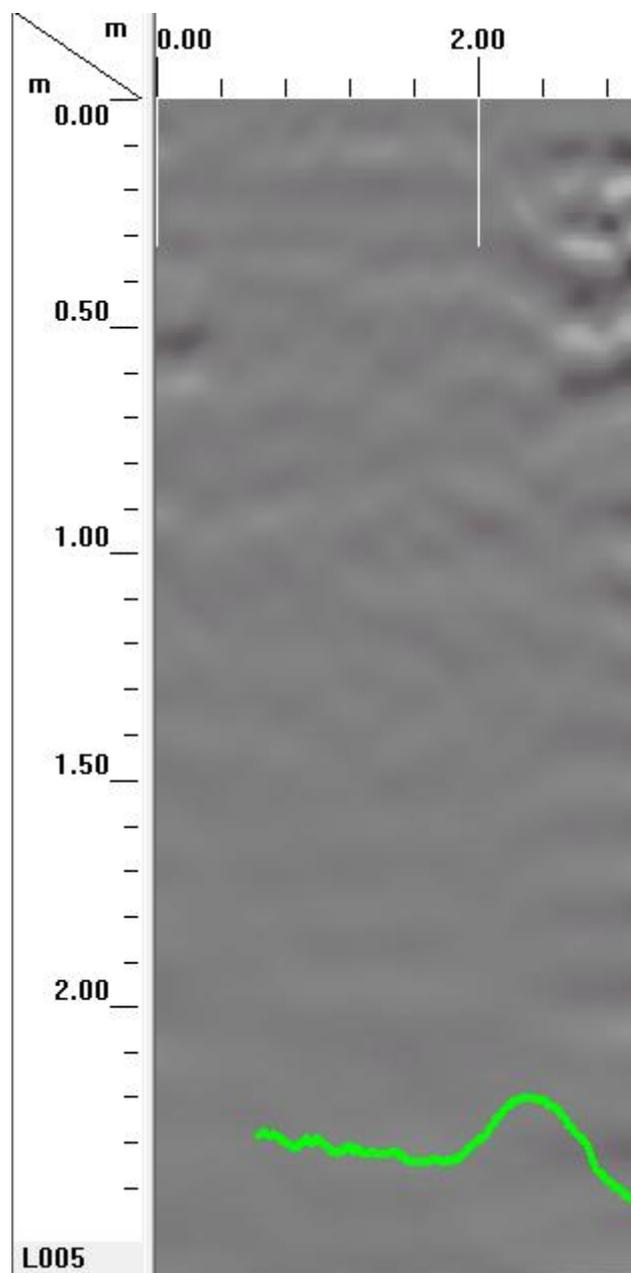
Radargrama L003



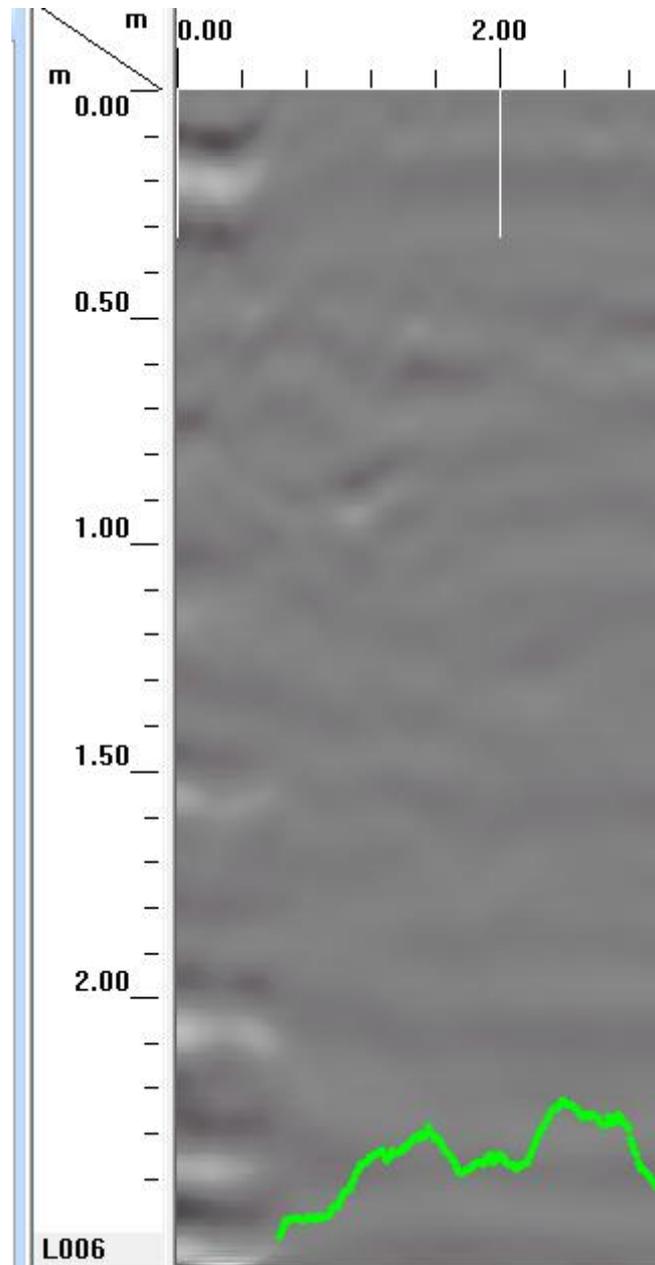
Radargrama L004



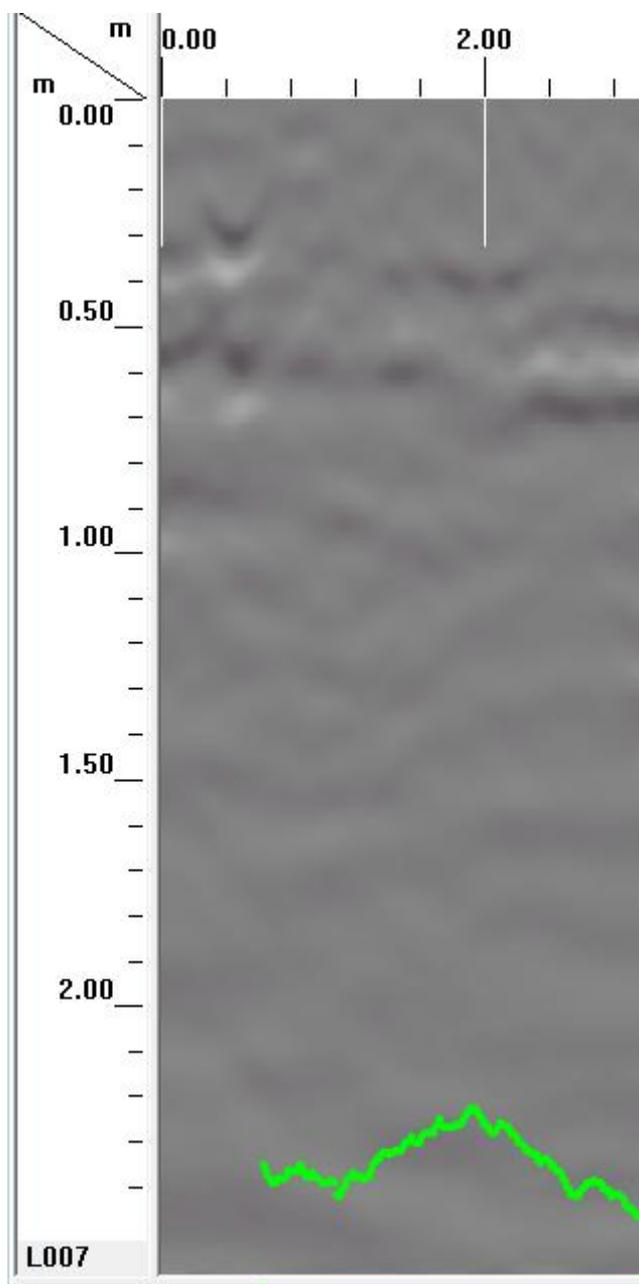
Radargrama L005



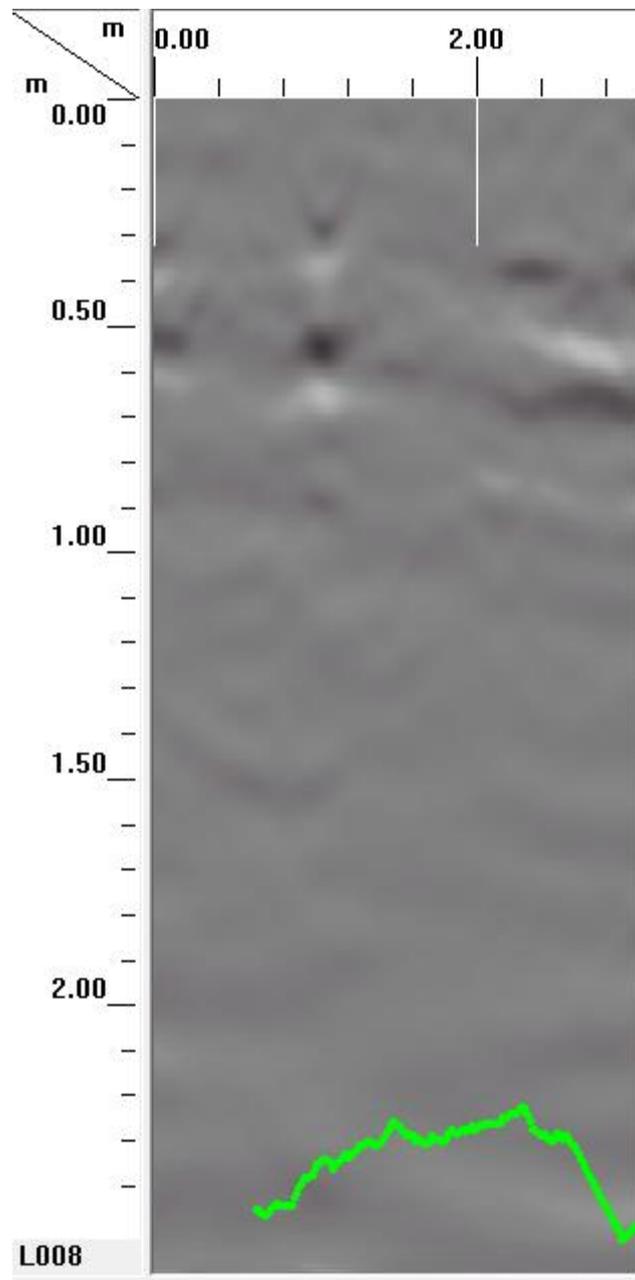
Radargrama L006



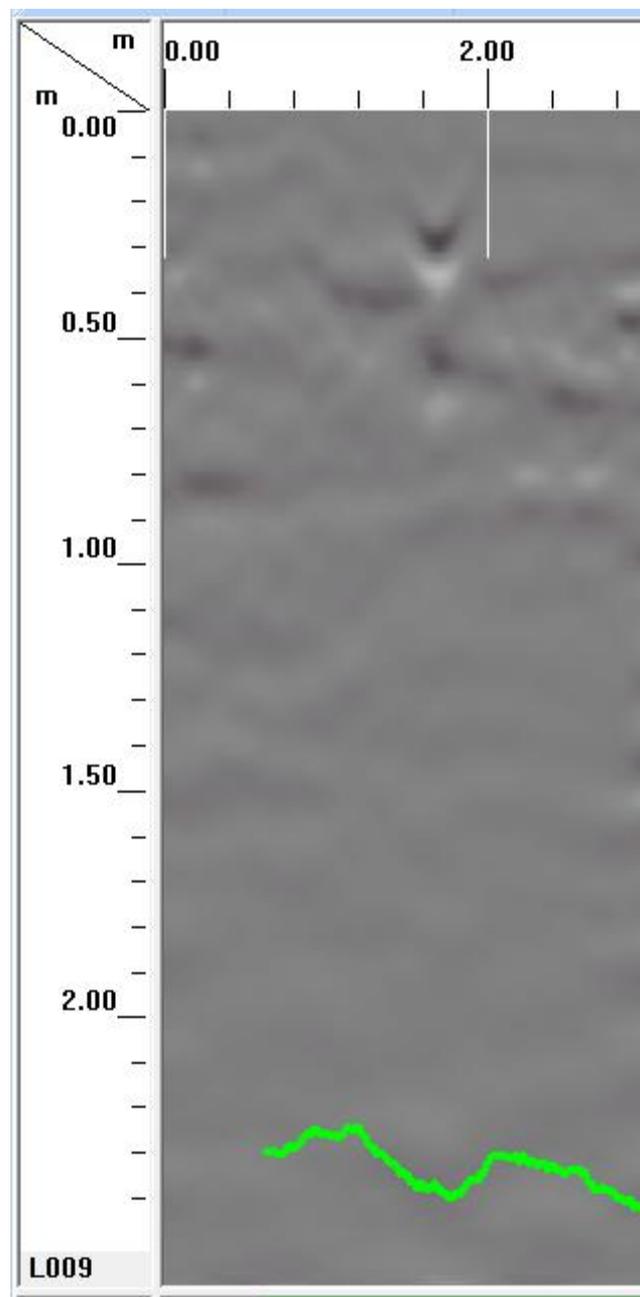
Radargrama L007



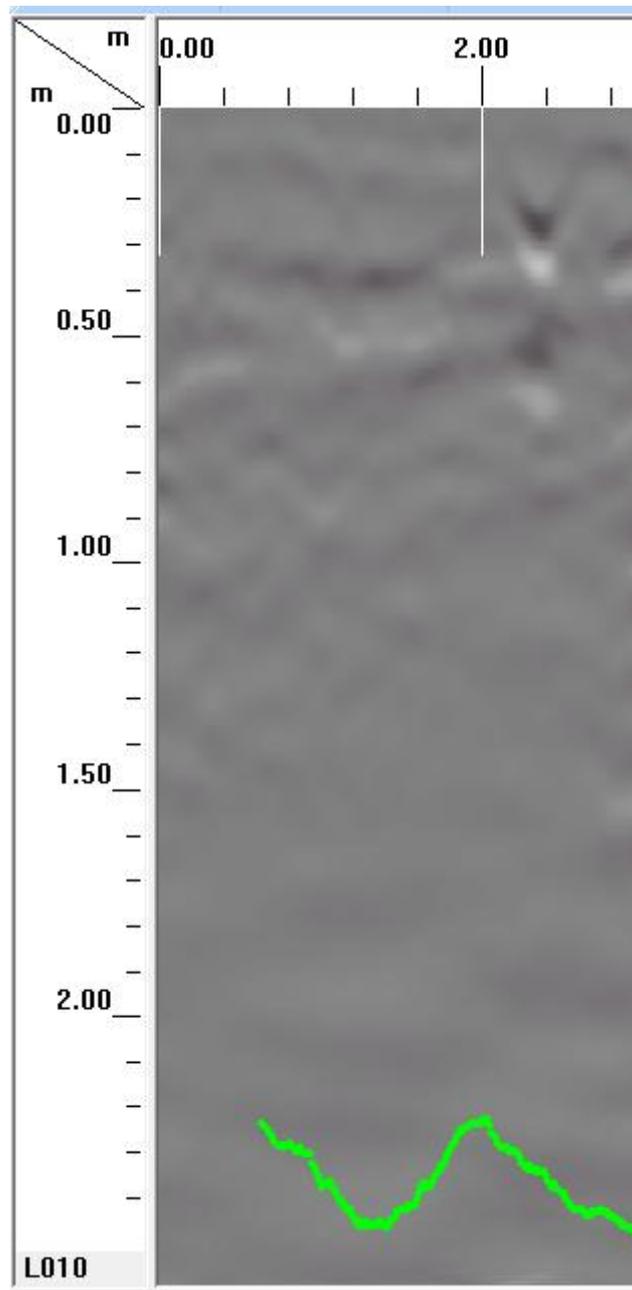
Radargrama L008



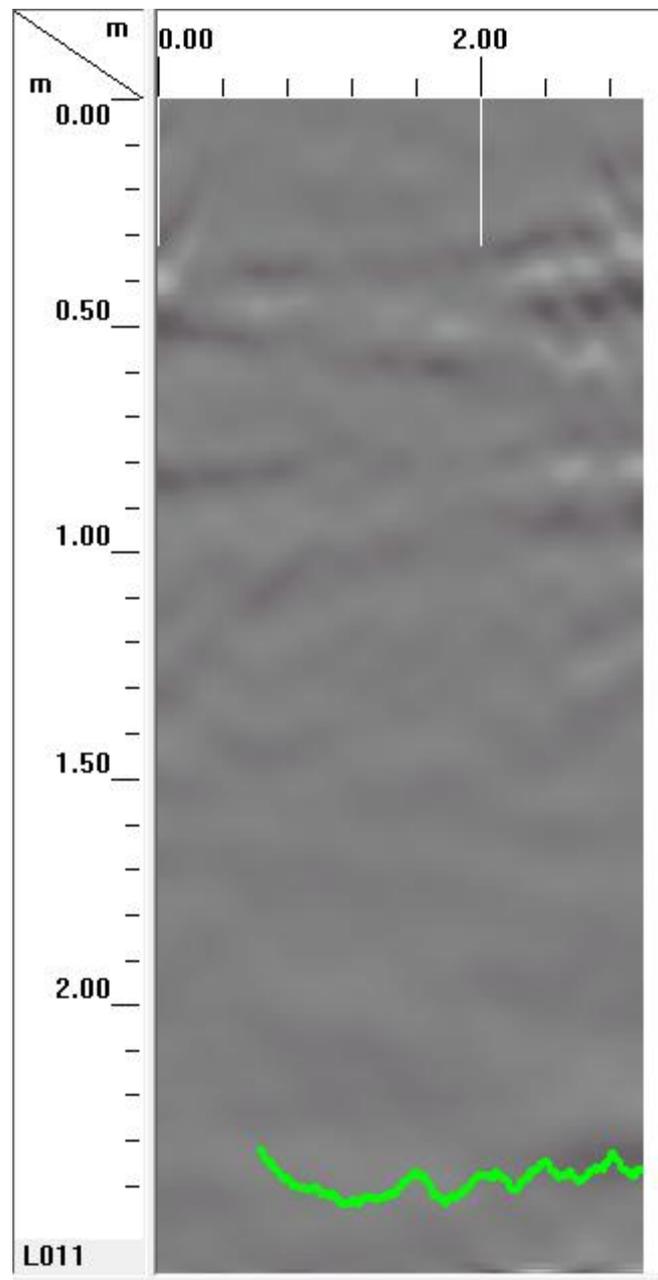
Radargrama L009



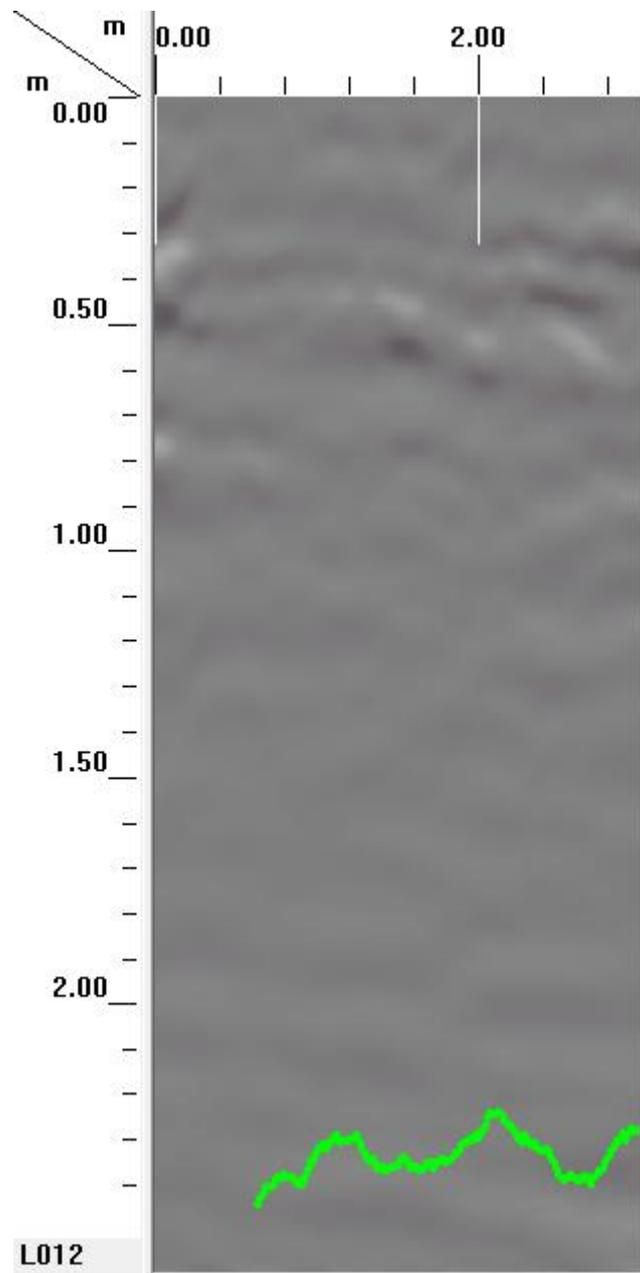
Radargrama L010



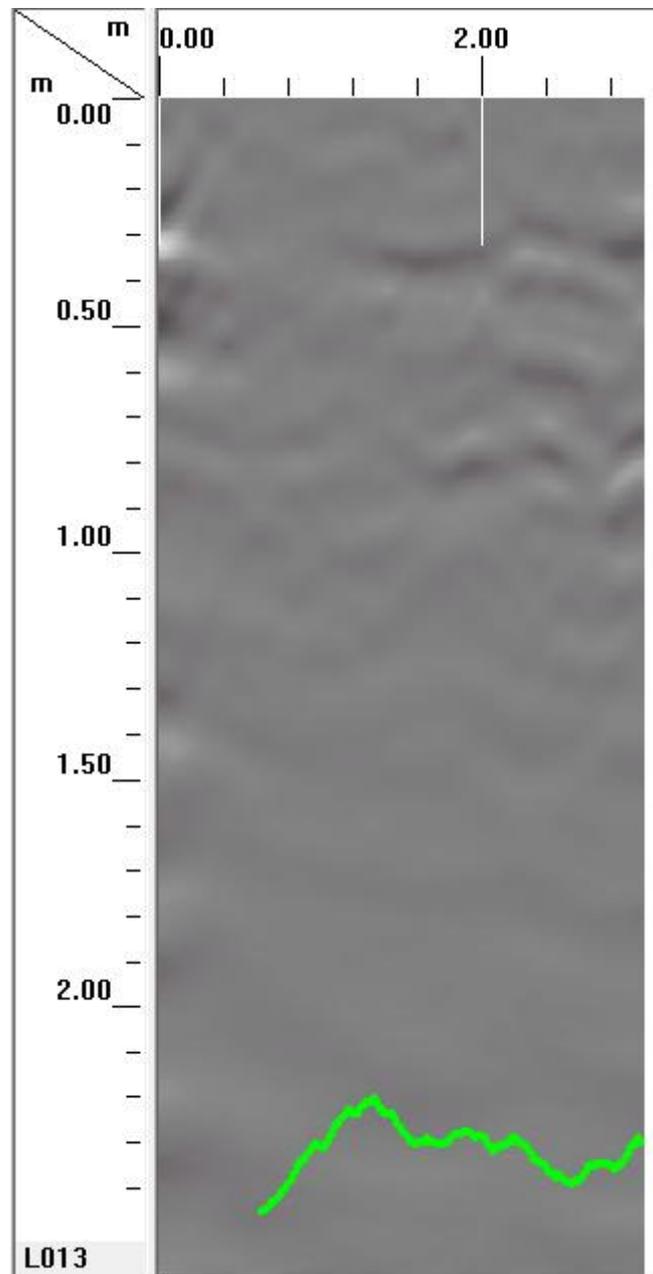
Radargrama L011



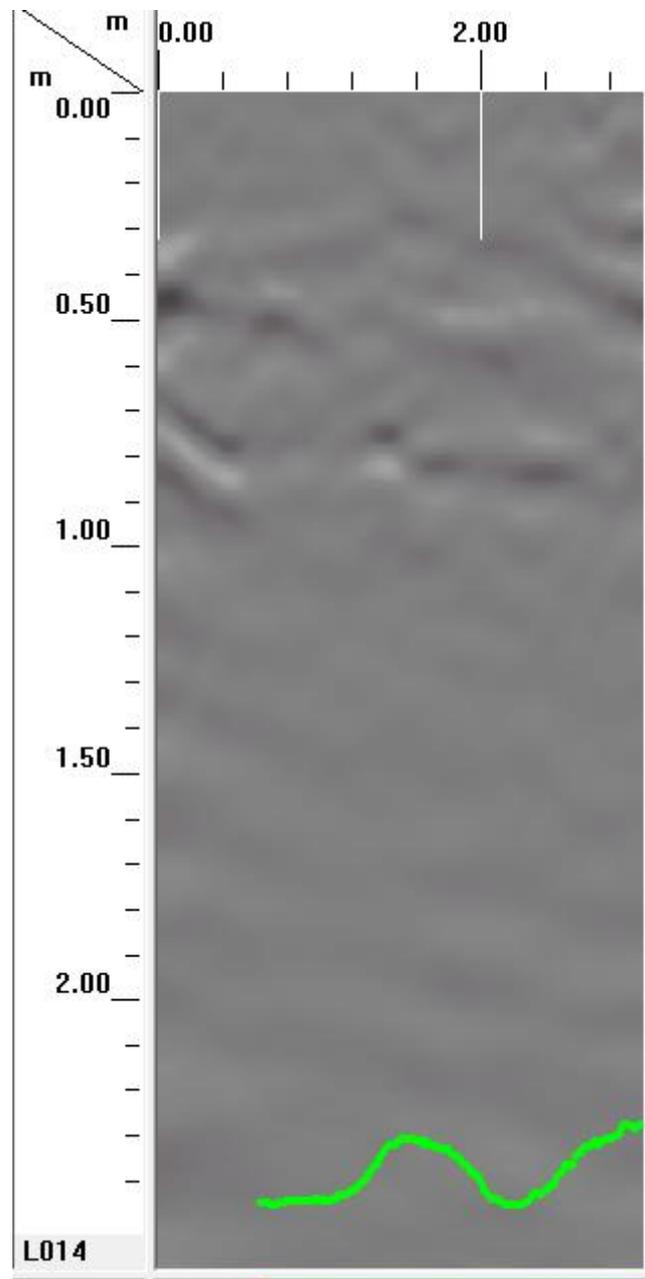
Radargrama L012



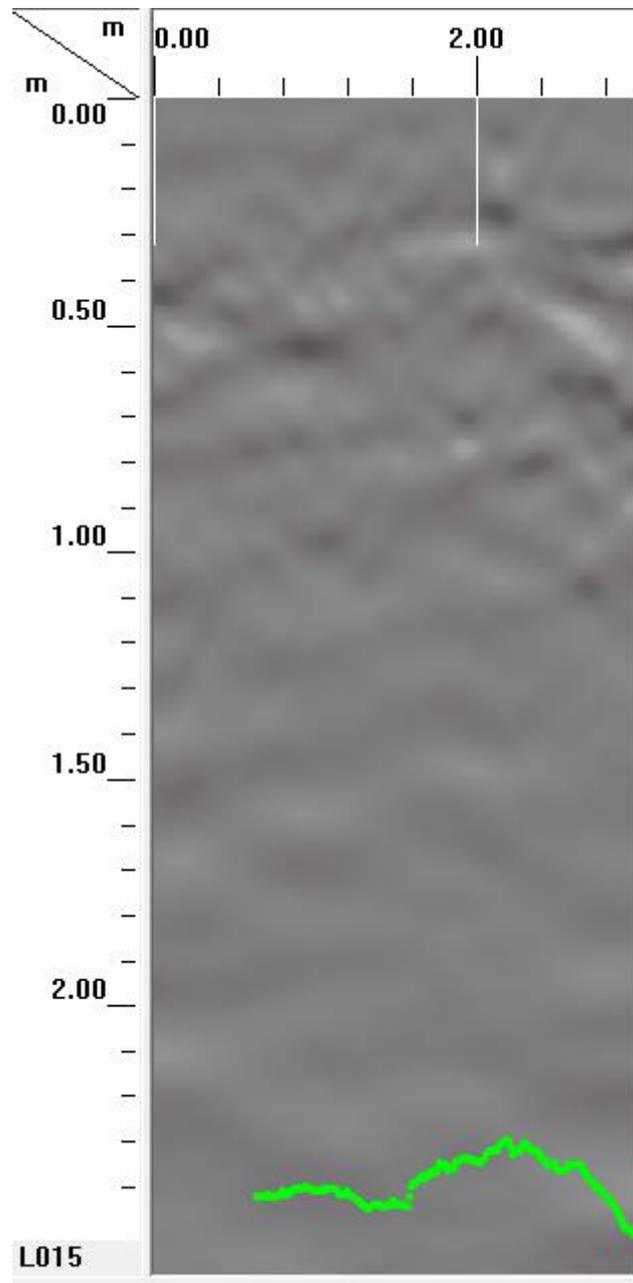
Radargrama L013



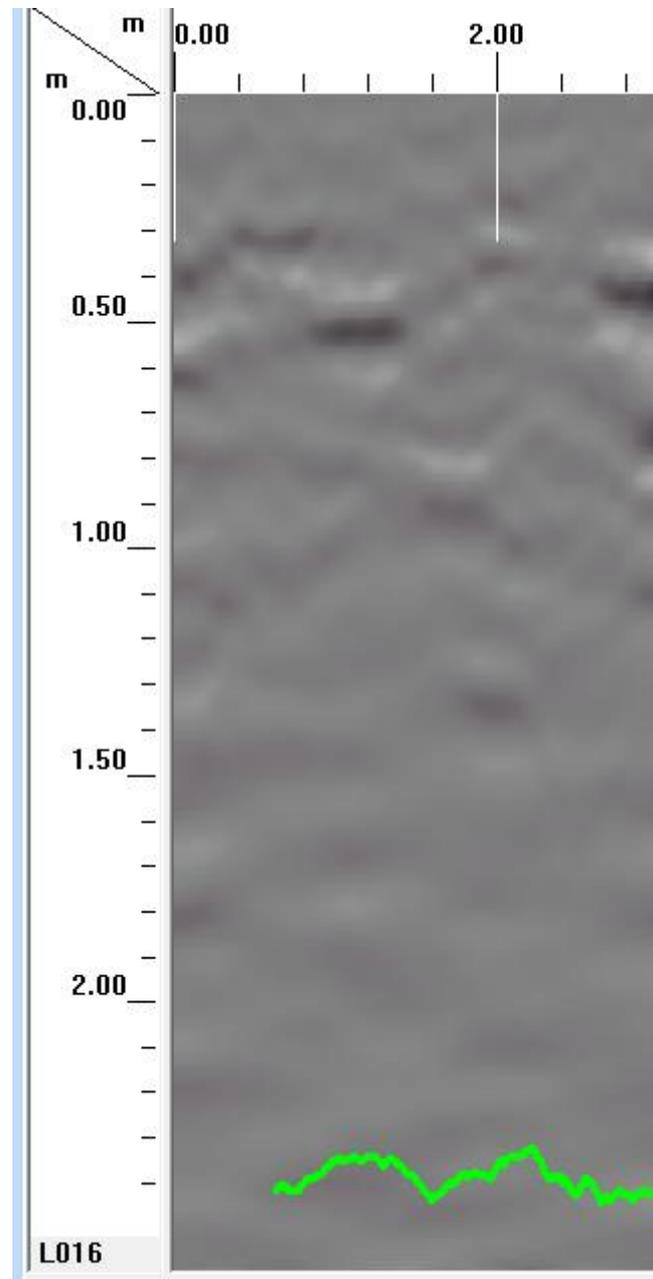
Radargrama L014



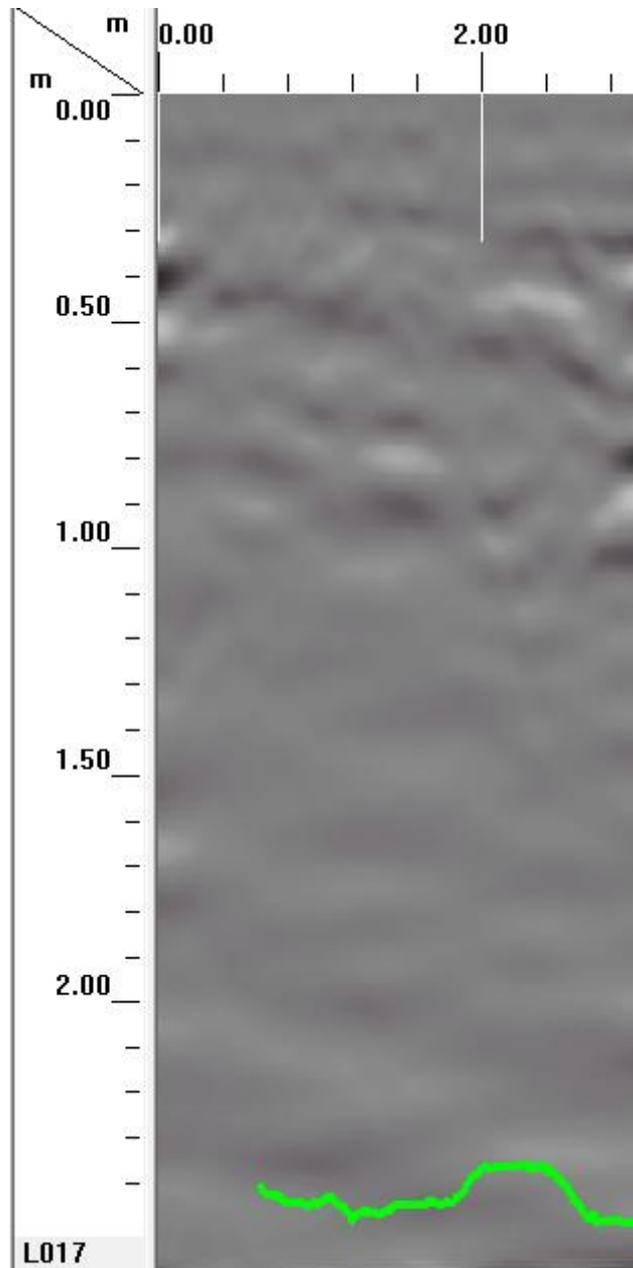
Radargrama L015



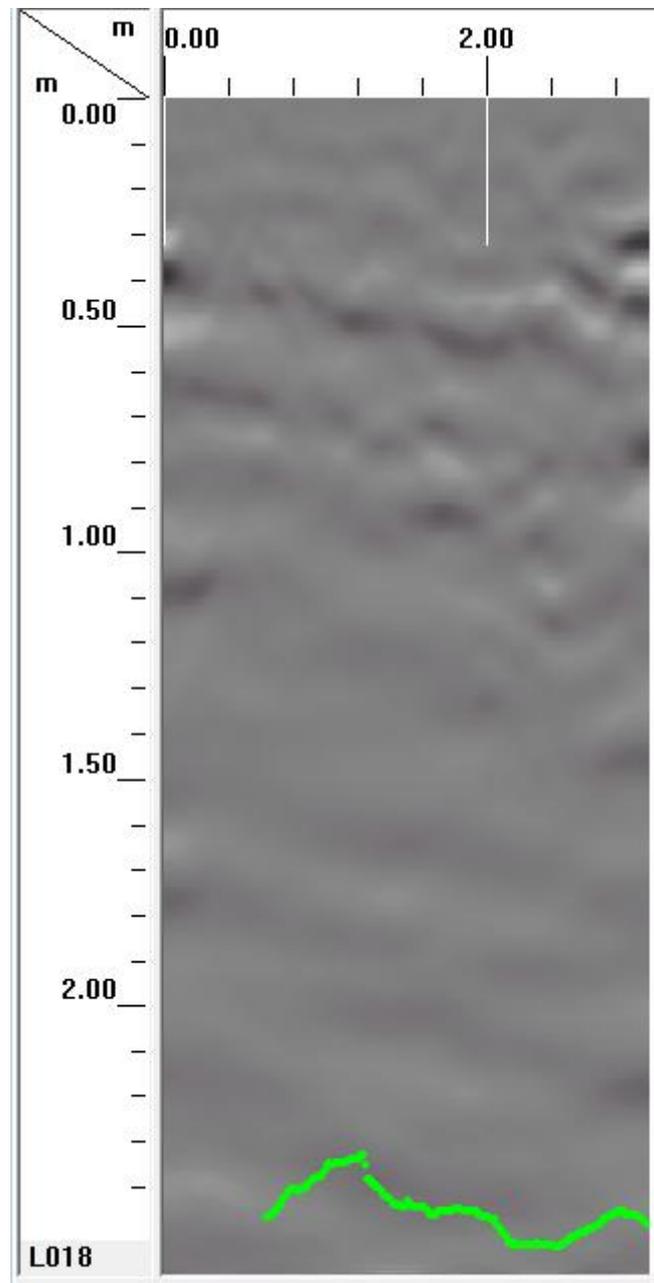
Radargrama L016



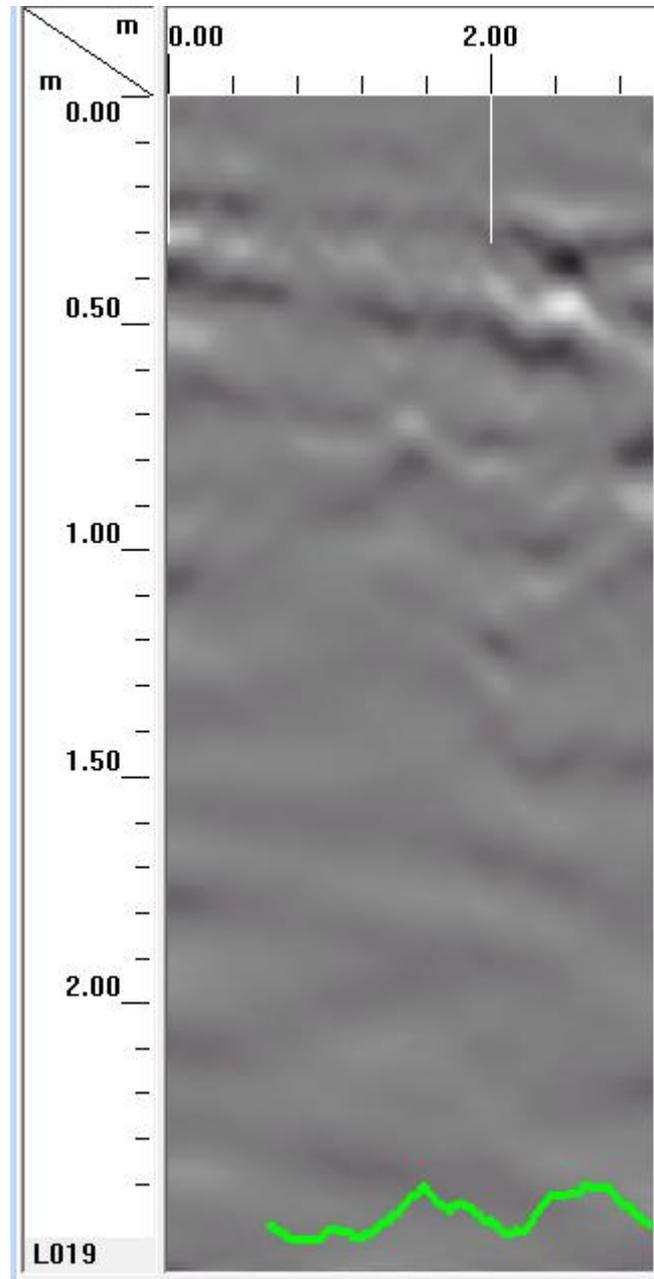
Radargrama L017



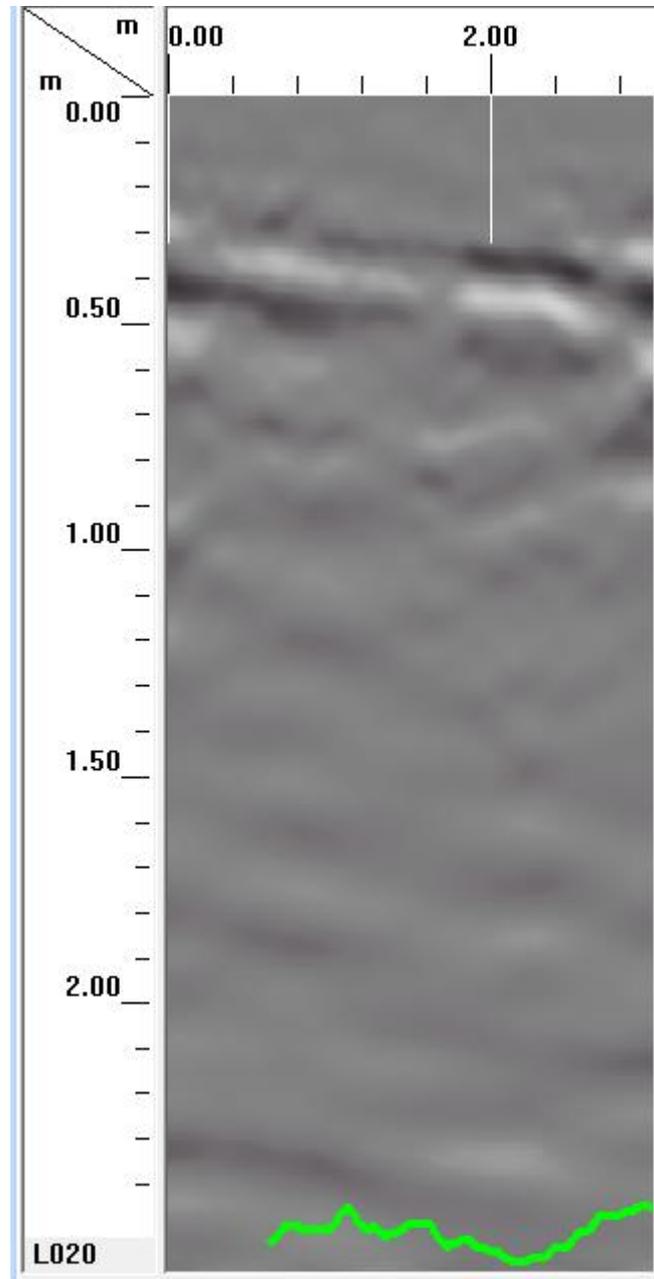
Radargrama L018



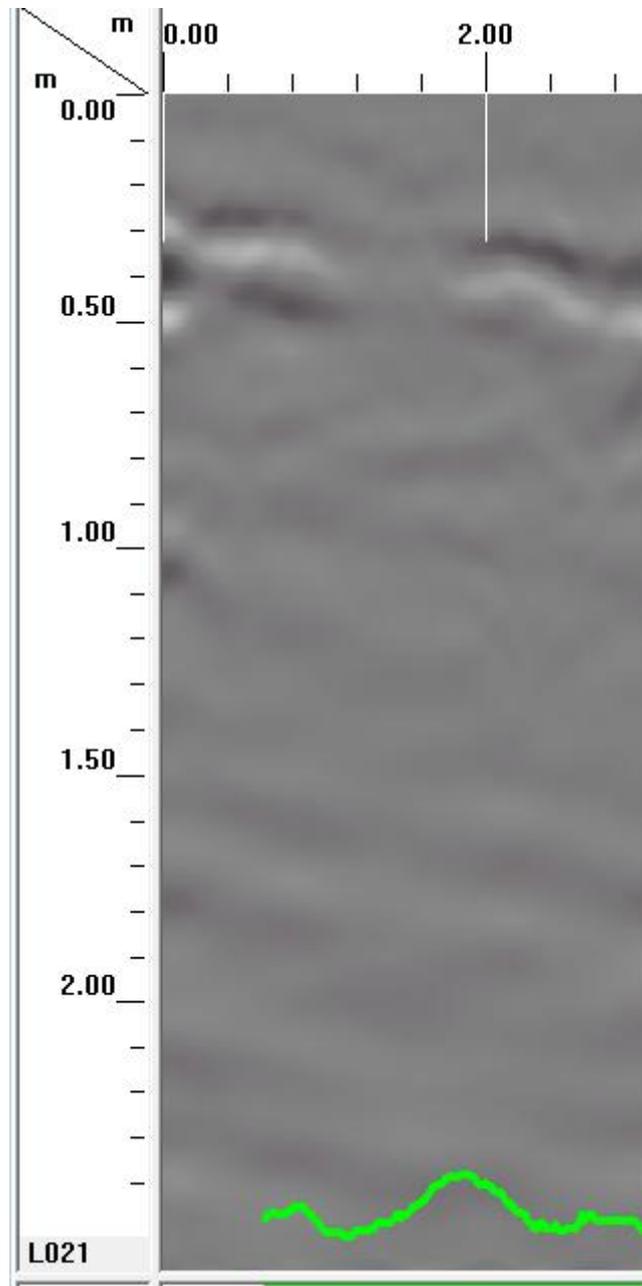
Radargrama L019



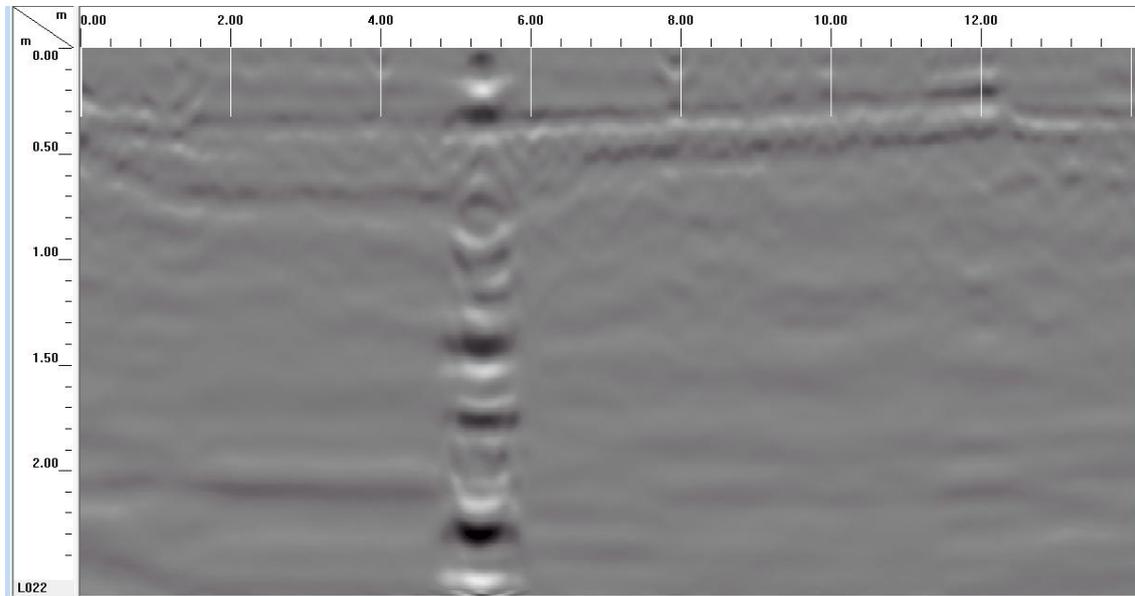
Radargrama L020



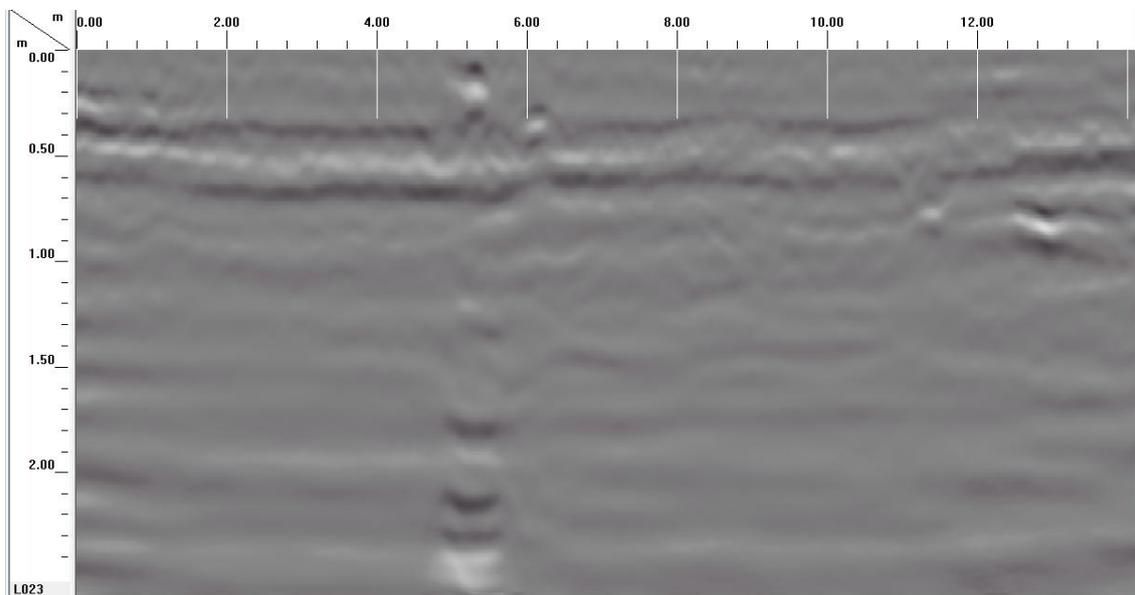
Radargrama L021



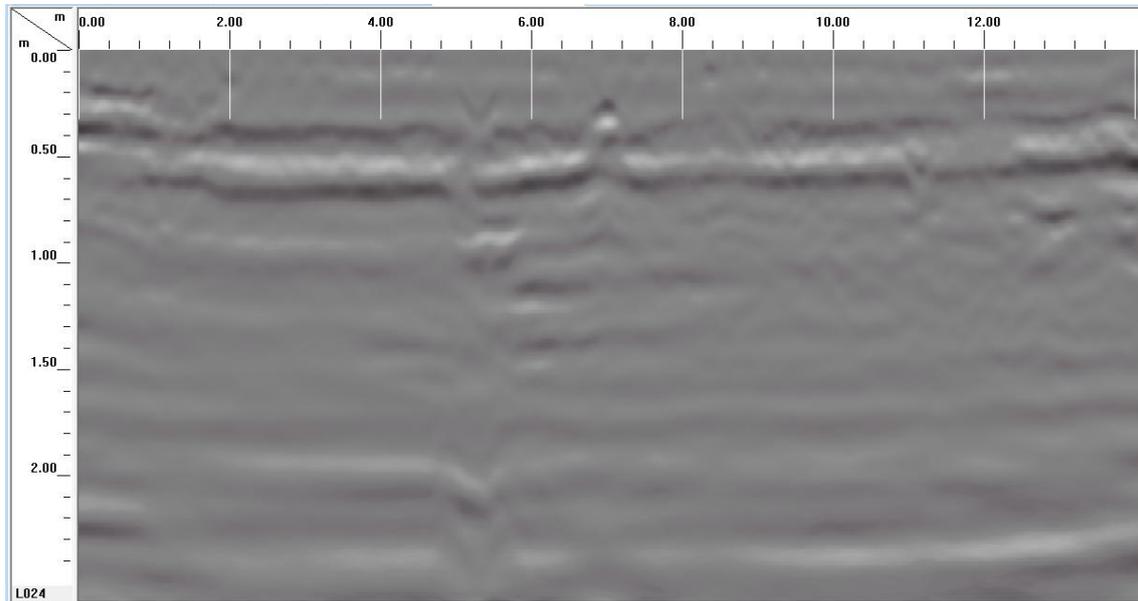
Radargrama L022



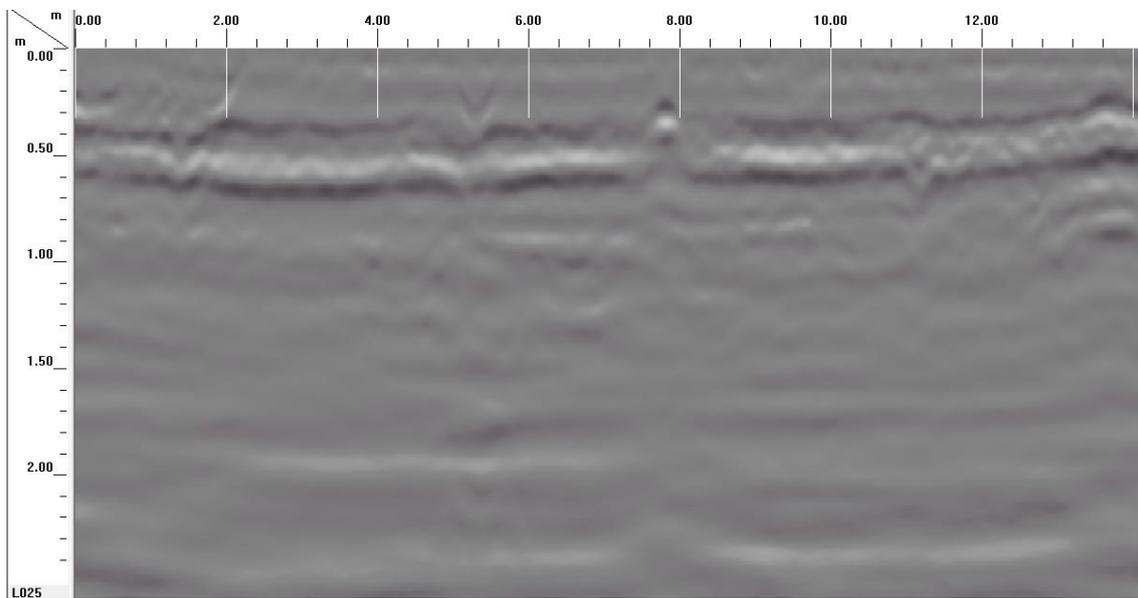
Radargrama L023



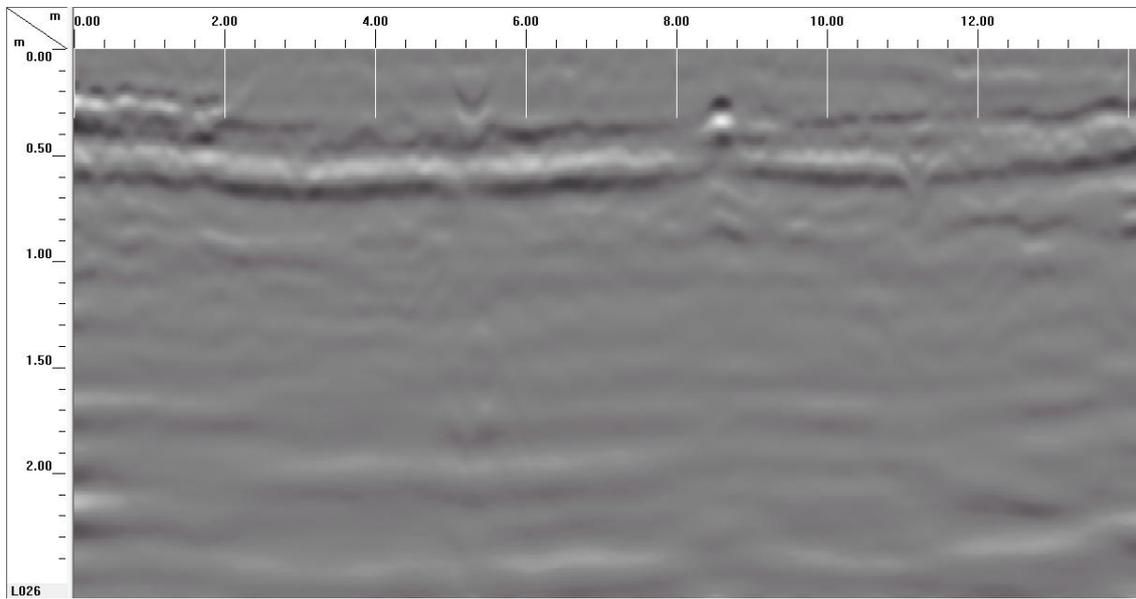
Radargrama L024



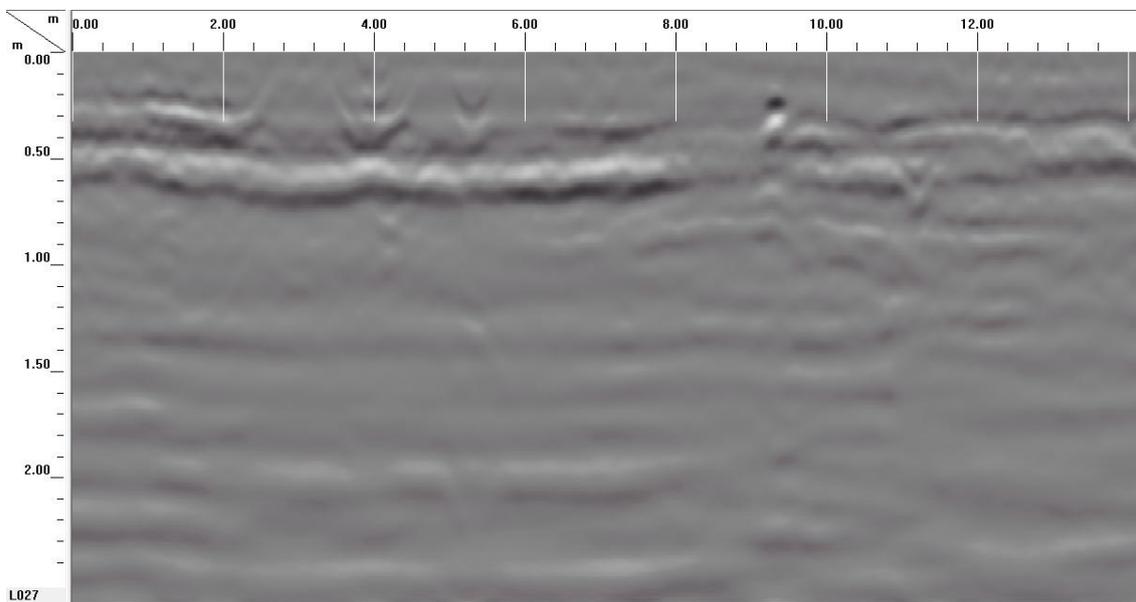
Radargrama L025



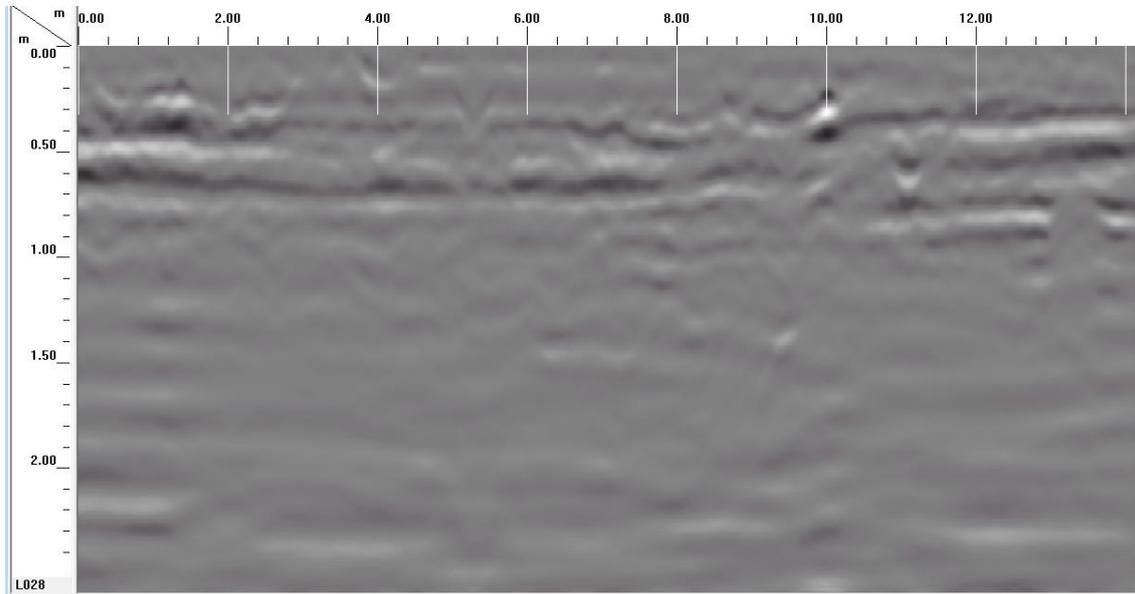
Radargrama L026



Radargrama L027



Radargrama L028





## **Bibliografía**

---

## 9. Bibliografía

- ✓ Perez Garcia, M<sup>a</sup> de la Vega (2001) Radar de Subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Tesis doctoral UPC, 2001.
- ✓ Daniels, David J. (2004) Ground penetrating radar. IEE Radar, Sonar and Navigation series15.
- ✓ Lorenzo Cimadevilla, Enrique (1996). Prospeccion geofísica de Alta Resolucion mediante Geo-Radar, Aplicaciones a obras civiles. CEDEX, Ministerio de Fomento. Madrid.
- ✓ Broseta Gutierrez, R. (2010), Georradar aplicado a la arqueología: El Palacio Real de Valencia. Catalunya. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Catalunya.
- ✓ Lorrain, P.; Corson, D. (1972). Campos y ondas electromagnéticos. Madrid: Selecciones Científicas.
- ✓ Finkelstein M. I. (1994). Подповерхностная радиолокация.
- ✓ Valeri Pomozov, Nikolai Semeikin, Yuri Semeikin, Andrey Nikiforov.(1997) ГЕОРАДАР- Принцип, Разработки и Геолокация.
- ✓ Reitz, J.; Milford F.; Christy R. (1960) Fundamentos de la teoría electromagnetica.
- ✓ User's Manual TerraSIRch SIR System-3000. Geophysical Survey Systems, Inc. 2003.

- 
- ✓ User's Manual Radan 7. Publicado por Geophysical Survey Systems, Inc.  
<http://www.uvm.edu/~lewebb/CCLI/Manuals/Radan7UserManual.pdf>
  
  - ✓ Jordá Bordehore, L. (2005) Técnicas geofísicas de reconocimiento del subsuelo: Georradar y tomografía eléctrica. Casos Practicos.  
[http://www.demecanica.com/contribuciones/Georradar\\_Tomologia.pdf](http://www.demecanica.com/contribuciones/Georradar_Tomologia.pdf)
  
  - ✓ Jordá Bordehore, L.; Jordá Bordehore, R. (2009) Estudio Geofísico Mediante Georradar y Tomografía Eléctrica en la Iglesia de San Juan Bautista en Burguillos del Cerro (Badajoz).  
<http://www.burguillosdelcerro.es/docs/files/39img.pdf>
  
  - ✓ WIDE WORLD GEOGRAPHIC SERVICES, S.L. Prospección geofísica mediante Georradar.  
<http://www.wideworld.es/PROSPECCION-GEOFISICA-GEORRADAR.pdf>