UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Departamento de Fisica
Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN PUERTO GABOTO
Informe Final

I. OBJETIVOS

General

- Investigar el potencial arqueológico del fuerte de Sancti Spiritus a partir de los trabajos de Geofísica Aplicada empleando el método de georadar.

Específicos

- Evaluar el límite espacial del primer asentamiento europeo a través de la realización de prospecciones sobre el terreno en los nuevos sectores y áreas, con métodos no invasivos.

- Estudiar la potencialidad de anomalías en el subsuelo del yacimiento para su posterior contrastación arqueológica.

II. METODOLOGÍA EMPLEADA

Georadar

El método de Georadar consiste en enviar hacia el subsuelo un pulso electromagnético emitido por un dipolo oscilante ubicado en la superficie de la tierra, y medir el intervalo de tiempo entre su emisión, reflexión en una dada interfaz, y recepción, esto último llevado a cabo a través de otra antena.

Los registros obtenidos son casi continuos a lo largo del perfil de adquisición. Los datos pueden ser usados para determinar la heterogeneidad del subsuelo, ya que la imagen muestra límites entre regiones que son estadísticamente homogéneas. El registro del tiempo total en que la onda se propaga desde que es emitida por el transmisor, reflejada en la heterogeneidad y recibida por el receptor, permite determinar la profundidad a la que se encuentra el reflector cuando la velocidad de propagación promedio del medio es conocida. De esta manera los registros de tiempo-distancia pueden ser transformados en un perfil continuo del subsuelo similar a una sección geológica. A estos registros se los denomina radargramas. Con este intervalo de tiempo y suponiendo conocida la velocidad de propagación en el subsuelo, se calcula la profundidad del reflector. De esta manera, utilizando métodos de interpretación adecuados, es posible definir las estructuras que componen el subsuelo.

La profundidad de penetración que puede alcanzarse con este método depende de la frecuencia del pulso utilizado y de las características del suelo, siendo más adecuado en casos con conductividad eléctrica baja o moderada. Diferentes configuraciones de GPR han sido utilizadas para caracterizar estructuras arqueológicas. La más frecuente consiste en la modalidad de dominio temporal y reflexión, con una separación fija entre la antenna emisora y receptora, ya que ella optimiza las características positivas mencionadas. En esta modalidad, la antena emisora traduce una señal eléctrica en ondas electromagnéticas que forman un pulso temporal, el cual se transmite hacia el suelo. El pulso se propaga, refleja y/o refracta en las sucesivas discontinuidades de permitividad eléctrica del mismo, incorporando distinto tipo de información en el transcurso de su trayectoria. En esta modalidad, los datos son adquiridos sobre el terreno, en posiciones cercanas entre sí formando líneas de sondeo, que se distribuyen sobre el sector configurando grillas, que permiten tras su interpretación, obtener imágenes 3D del subsuelo.

III.TRABAJO DE CAMPO

En la Fig 1 se muestra la foto aérea del sitio donde se observa el sector excavado y se indica con círculos las zonas propuestas para la prospección geofísica.

Figura 1. Foto aérea del sitio. Se observa la zona excavada, donde se prospectó en el 2008. Los óvalos amarillos indican las zonas a estudiar

Dentro de las zonas indicadas hay parcelas ocupadas con casas, algunas privadas y otras ya expropiadas, y si bien en algunos casos se podía acceder a los patios traseros, no estaban en condiciones para poder utilizar el georadar. Finalmente se seleccionaron los dos sectores que cumplían los requisitos necesarios para obtener imágenes relevantes; estos se muestran en la Fig. 2.

Figura 2. Vista aérea del sitio. En amarillo se indican los dos sectores en los cuáles se realizó la prospección con georadar.

El Sector 1 lo dividimos en dos partes, Sector 1A, de 18 m x 18 m, y el Sector 1B de 15 m x 7 m, más corto para evitar una parte del terreno que estaba muy irregular. En la Figura 3 se muestra un esquema, donde se ubican algunos rasgos presentes (árboles, irregularidades del suelo, etc) a tener en cuenta cuando se interpreten los resultados.

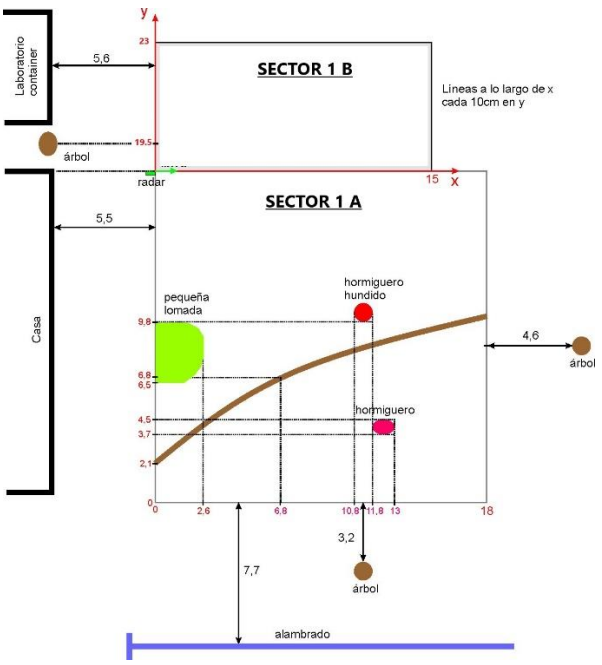

Figura 3. Esquema del Sector 1A y B. Las medidas están indicadas en metros. Se marcan algunos rasgos evidentes en superficie.

En la Fig. 4 se muestra una foto del Sector 1 al momento de realizarse la prospección.

Figura 4. Foto correspondiente al Sector 1.

El Sector 2 es de 13 m x 5 m. En la Fig. 5 se muestra un esquema de este sector y en la Fig. 6, una foto al momento de las mediciones.

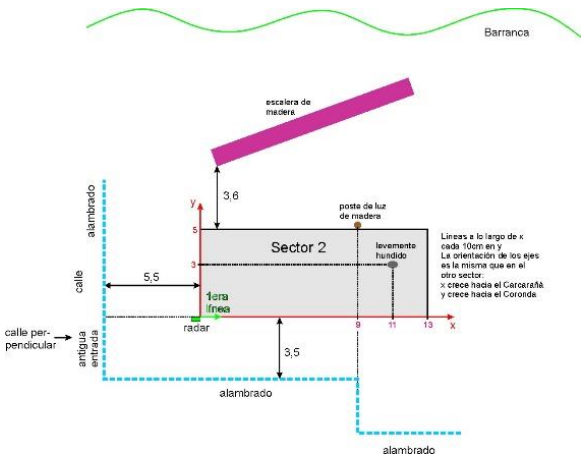

Figura 5. Esquema correspondiente al Sector 2. Las medidas se indican en metros.

Figura 6. Fotos correspondientes al Sector 2.

Las prospecciones se hicieron con un equipo PulseEKKO PRO. Teniendo en cuenta que la resolución y penetración de las señales de georadar dependen de la frecuencia de la antena emisora, (mayor frecuencia, mejor resolución aunque menor profundidad de penetración) se utilizaron antenas de 500 MHz, y se llevaron a cabo sondeos en la modalidad de separación constante entre la antena emisora y receptora.

Como el objetivo geofísico para cada sector es obtener mapas en planta a distintas profundidades, con buena resolución tanto lateral como en profundidad, se cubrieron los sectores con perfiles a lo largo del eje X (ver Figs. 3 y 5) con separaciones entre líneas de 0.10 m, mientras que la separación entre dos puntos consecutivos a lo largo de una línea era de 0.025 m. Cada punto se tomó con un stacking de 16 (es decir, se toman 16 mediciones en el punto y se promedian para tener una buena estadística y disminuir el error).

Así, se adquirieron 230 perfiles (radargramas) en el Sector 1 y 50 perfiles en el Sector 2.

Los datos se procesan a fin de descubrir y resaltar las señales de interés, aplicando diferentes filtros y ganancias. En la Fig. 7 se muestran como ejemplo, datos obtenidos en el Sector 1; en la Fig. 7a los datos crudos y en la Fig. 7b los datos procesados.

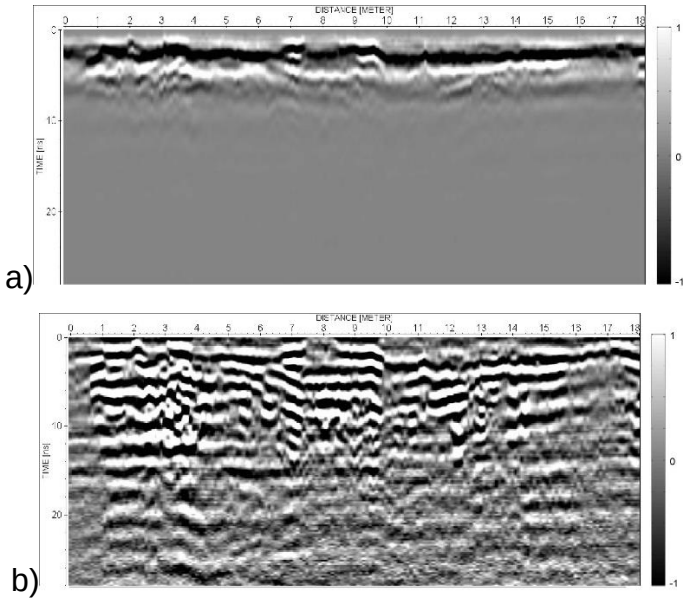

Figura 7. Radargrama obtenido en el Sector 1 a) datos en crudo, b) datos procesados

Los radargramas presentan la respuesta del medio en función del tiempo, en nanosegundos (ns), como se ve en la Fig. 7. Para transformar la coordenada temporal en profundidad, hay que determinar la velocidad de la onda electromagnética en el medio. Una metodología adecuada en este caso es realizar un estudio estadístico con un número N de reflectores identificados en los distintos perfiles; así se obtuvo una velocidad promedio aproximada de (0.089 +/- 0.009) m/ns (con N = 91). Con este valor se calcularon las profundidades.

III. ANALISIS DE LOS DATOS

Los radargramas procesados se analizaron primero individualmente a fin de detectar y reconocer la presencia de anomalías. Luego se interpolaron a fin de obtener una imagen 3D y a partir de estas imágenes se hicieron cortes en planta a distintos tiempos (profundidades) para determinar la correlación de las anomalías encontradas. En cada corte, se clasificaron distintos tipos de anomalías, las cuales se describen detalladamente a continuación.

IV a. Sector 1

En este sector, la penetración del método utilizado es 0.53 - 0.89 m (12 - 20 ns), según la posición x-y sobre el terreno.

Corte en planta a t = 0.6 ns (0.03 m).

En la Fig. 8 se muestra el corte en planta y se definen una serie de anomalías, indicadas con las letras A hasta F.

Anomalía A. Son reflexiones de alta amplitud correspondientes a la parte superior de una sucesión de capas de sedimento que cubre una depresión, que denominamos X (ver Figs. 13 y 14), la cual es relativamente extensa horizontalmente y alcanza un máximo de profundidad de 0.65 m (15

ns). Esta depresión parece cortar la matriz sedimentaria que la rodea. Su origen puede ser tanto natural como cultural.

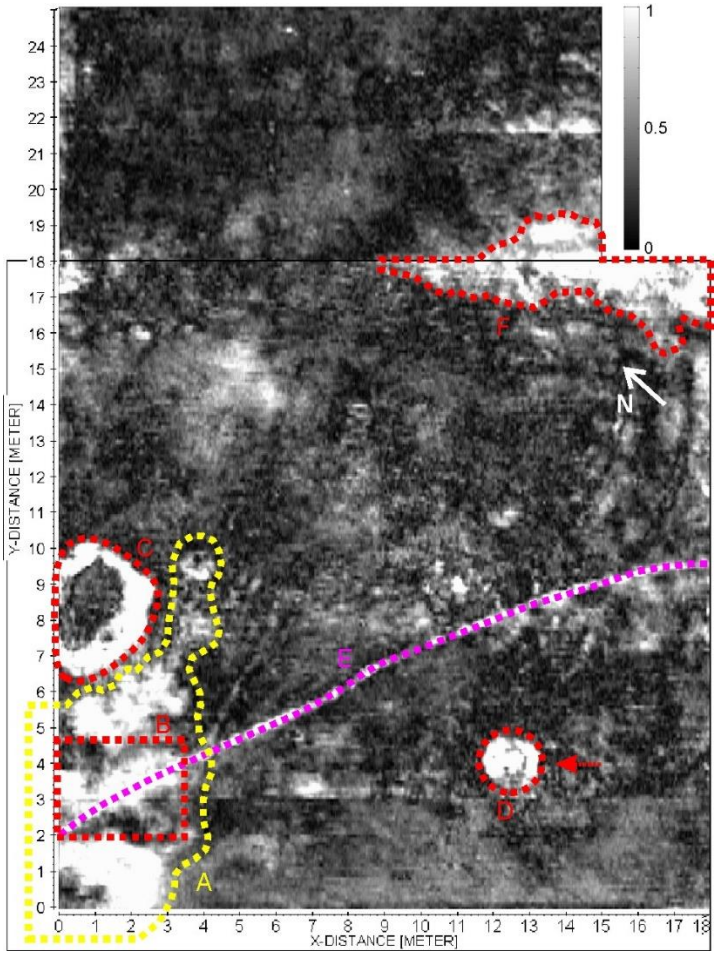

Figura 8. Sector 1. Amplitud instantánea de los datos a una profundidad aproximada de 0.03 m (t = 0.6 ns).

Anomalía B. Corresponden a una elevación local de reflectores ubicados entre 0.00 m y 0.20 m de profundidad (0 - 4.1 ns). Esta elevación es alargada, con altura menor que 0.10 m (2 ns). La cresta de la elevación aparece en la figura en tonalidad clara.

Anomalía C. Es una estructura aproximadamente oval, con borde elevado respecto de su centro y profundidad máxima 0.15 m (3 ns). La

posición x-y de la estructura coincide con una pequeña elevación de la interfaz aire-suelo (ver Fig. 3).

Anomalía D. Anomalía ubicada entre la superficie aire-suelo y los 0.25 m de profundidad (6 ns). Coincide con una elevación superficial correspondiente a un hormiguero (ver Fig. 3).

Anomalía E. Reflexión correspondiente a una cañería superficial. Coincide con una leve depresión de la superficie aire-suelo a lo largo de aquella (ver Fig. 3).

Anomalía F. Anomalía en la amplitud de reflexión. Se empieza a visualizar a menos de 0.05 m de profundidad.

Corte en planta a t = 3 ns (0.13 m)

En la Fig. 9 se muestra este corte, con anomalías denominadas con las letras G a K.

Anomalía G. Límite de las capas de sedimento con reflexiones de alta amplitud. El límite sur de esta área es bastante lineal, en oposición al resto del límite.

Anomalía H. Depresión de menos de 0.05 m de profundidad, en un reflector ubicado a profundidad menor que 0.1 m.

Anomalía I. Reflexiones en partes de raíces.

Anomalías J. Ejemplos de anomalías relativamente pequeñas, muchas de ellas con formas x-y aproximadamente circulares, cuyo tamaño en planta es de 0.1 - 0.3 m. Éstas parecen estar compuestas por una reflexión más superficial, ubicada a profundidad 0.09 - 0.15 m (2.0 - 2.6 ns), y al menos una reflexión ubicada inmediatamente por debajo de la primera, a profundidad 0.19 - 0-32 m. Las características de estas anomalías son compatibles con

las determinadas previamente en este sitio para perforaciones correspondientes a postes (Bonomo y otros, 2012, Journal of Applied Geophysics 83,57–64). Cabe aclarar que esta interpretación no es unívoca, y que las anomalías también podrían ser producidas por otros tipos de reflectores, incluso de origen natural.

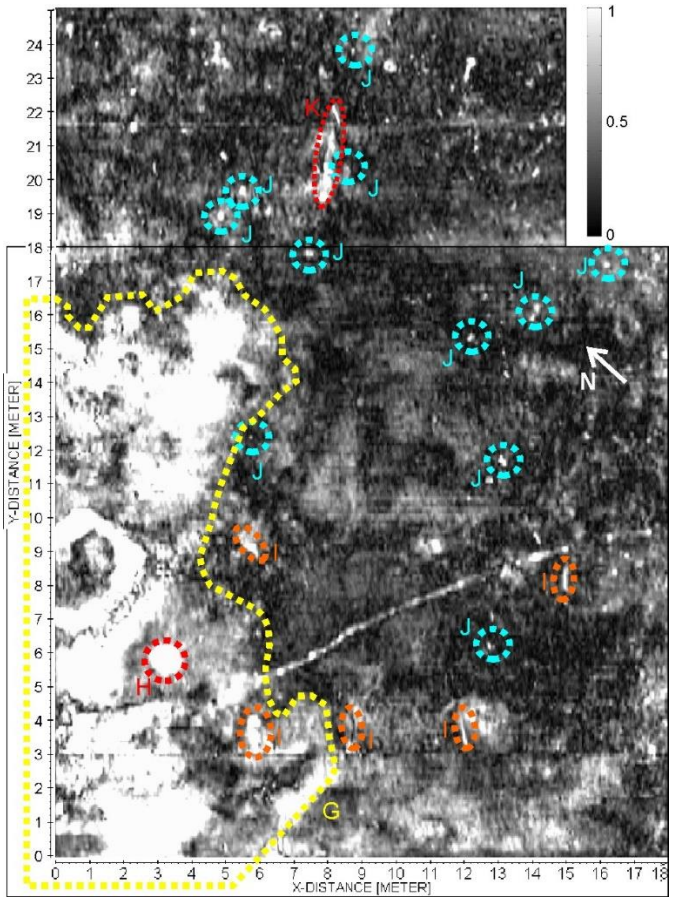

Figura 9. Sector 1. Amplitud instantánea de los datos a una profundidad aproximada de 0.13 m (t = 3 ns).

Anomalía K. Sucesión aproximadamente horizontal de reflexiones, localizadas a profundidad 0.03 - 0.10 m (0.6 - 2.2 ns). Éstas no llegan a ser resueltas por el método utilizado, debido a su cercanía, tamaño y forma variables.

Corte en planta a t = 4 ns (0.18 m)

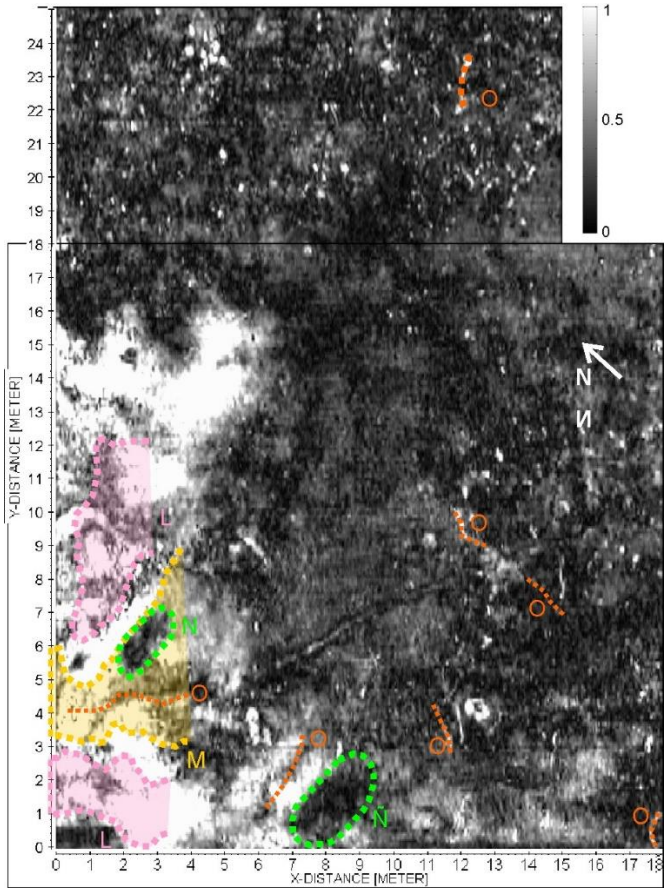

Figura 10. Sector 1. Amplitud instantánea de los datos a una profundidad aproximada de 0.18 m (t = 4 ns).

Anomalía L. Áreas de la depresión X más profundas (ver también Figs. 13 y 14).

Anomalía M. En esta área, la depresión X presenta una elevación local, con tope aproximadamente horizontal (Figs. 13 y 14). Este tope coincide con la interfaz entre dos capas de sedimento, que denominamos Y, la cual se interrumpe en la depresión X, y se vuelve a continuar fuera de esta última. La profundidad del reflector Y es 0.27 - 0.36 m (6 - 8 ns).

Anomalías N - Ñ. Anomalías de baja amplitud, con formas x-y alargadas y secciones verticales aproximadamente rectangulares en las posiciones x-y centrales de las anomalías. El límite superior de las estructuras que producen estas anomalías no es claro. En el caso de la anomalía N, se estima que éste estaría ubicando a una profundidad de hasta 0.13 m (3 ns). La profundidad de la base de la anomalía N es 0.29 - 0.33 m (6.5 - 7.5 ns). En el caso de la anomalía Ñ, estos valores son 0.15 m (3.4 ns), y 0.27 - 0.29 m (6.0 - 6.5 ns), respectivamente. Ambas anomalías se apoyan sobre el reflector Y. Las características de amplitud y forma de las anomalías se asemejan a las obtenidas previamente en el sitio para paredes de tapia (Bonomo y otros, 2012). Tal como ocurre en el caso de las anomalías J, las anomalías N - Ñ también podrían corresponder a otros tipos de estructuras, tanto culturales como naturales.

Anomalía O. Ejemplos de reflexiones en raíces.

Corte en planta a t = 5 ns (0.22 m)

Anomalía P - U. Conjunto de rasgos aproximadamente lineales y paralelos entre sí, con dirección E-O. Estos rasgos forman un ángulo de 90º respecto de la proyección de las estructuras del Fuerte Sancti Spiritus identificadas con GPR en las campañas anteriores (Bonomo y otros, 2012). Cabe aclarar que este cálculo ha sido realizado asumiendo que los límites de las áreas prospectadas en ambas oportunidades son paralelos entre sí. Las líneas P-Q y S-T son tangentes a los límites de las áreas N y Ñ descriptas en la figura anterior. Las líneas Q-R y T-U delimitan áreas con capas de sedimentos que descienden a partir de las anteriores, en dirección de la depresión X, mayormente con pendientes altas.

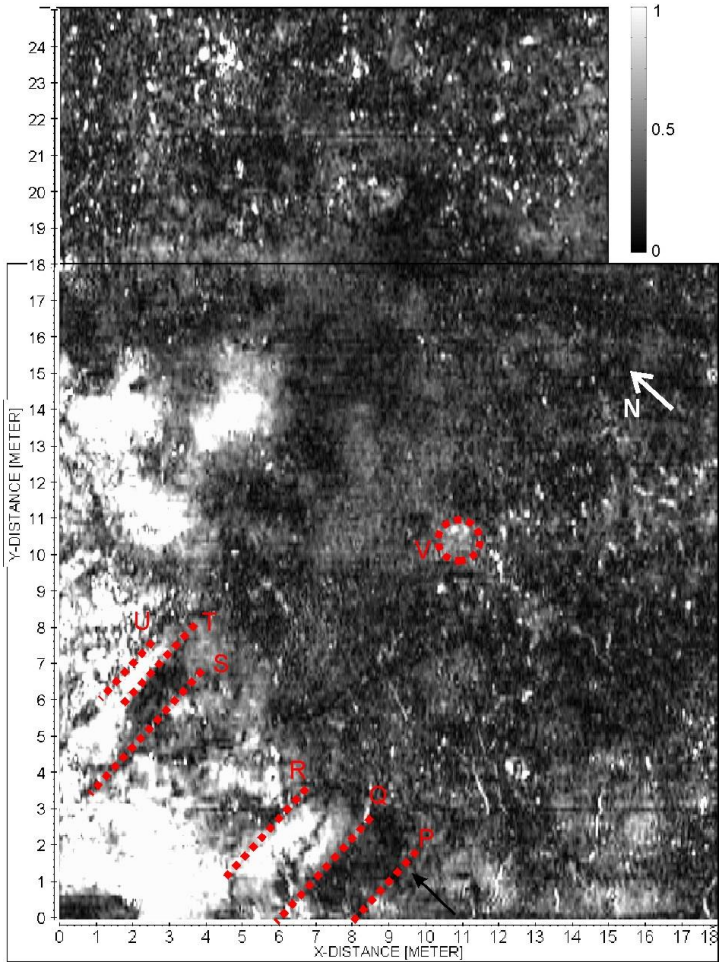

Figura 11. Sector 1. Amplitud instantánea de los datos a una profundidad aproximada de 0.22 m (t = 5 ns).

Anomalía V. Anomalía posiblemente relacionada con una pequeña depresión de la interfaz aire-suelo, la cual dista horizontalmente alrededor de 0.20 m de la primera, y que coincide con un hormiguero. La anomalía V ocupa el intervalo de profundidades 0.00 - 0.22 m (0.5 - 5 ns).

Corte en planta a t = 8.6 ns (0.38 m)

Anomalía W. Anomalía de alta amplitud localizada a profundidad de entre 0.25 - 0.33 m (5.6 - 7.5 ns) y 0.45 m (10 ns). Está compuesta por reflexiones con formas heterogéneas.

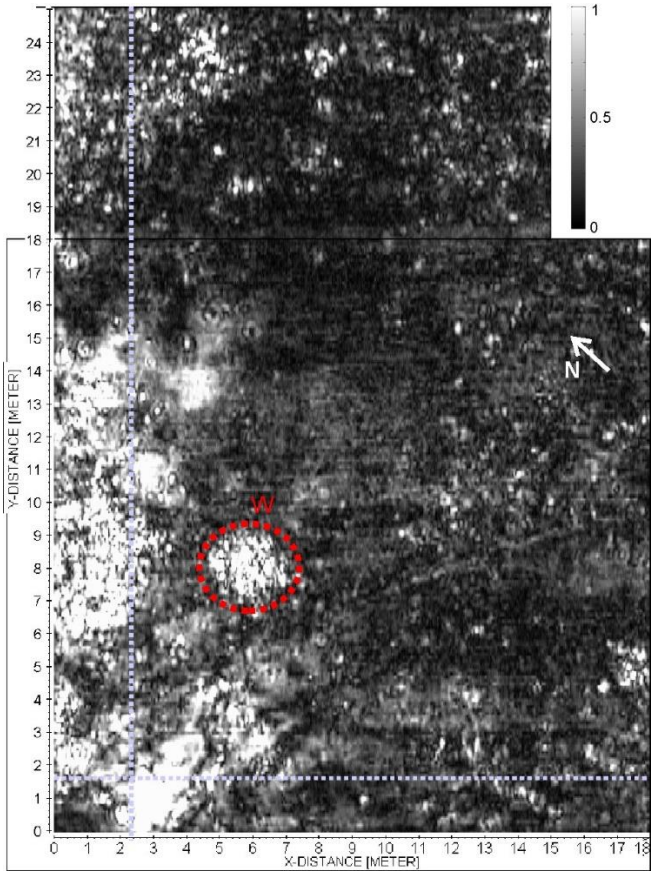

Figura 12. Sector 1. Amplitud instantánea de los datos a una profundidad aproximada de 0.38 m (t = 8.6 ns).

Las líneas grises indican las posiciones de los cortes de las Figuras 13 y 14 a continuación.

Corte vertical (radargrama) en y = 1.6 m

Las anomalías A, G, O, Q, P, R, X e Y corresponden a las anomalías y estructuras descriptas en las figuras anteriores. En particular, pueden observarse las anomalías X e Y, anteriormente citadas (corresponden a una depresión que parece cortar la matriz sedimentaria, y a un reflector sobre el cual se apoyan las anomalías N y Ñ, respectivamente)

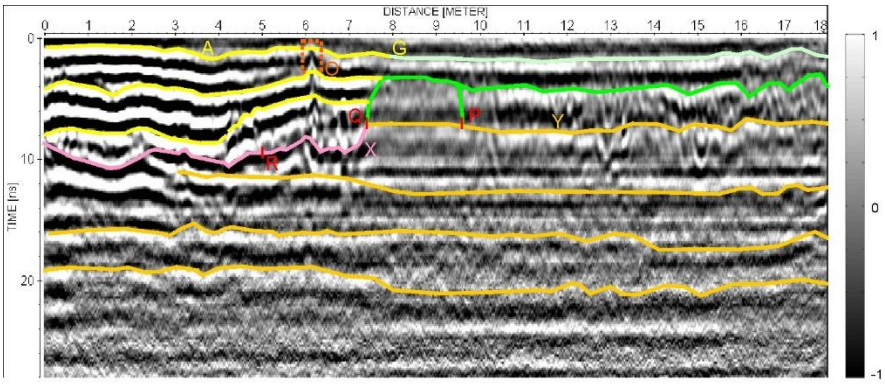

Figura 13. Sector 1. Corte vertical de la amplitud de los datos, en y = 1.6 m.

Corte vertical (radargrama) en x = 2.34 m

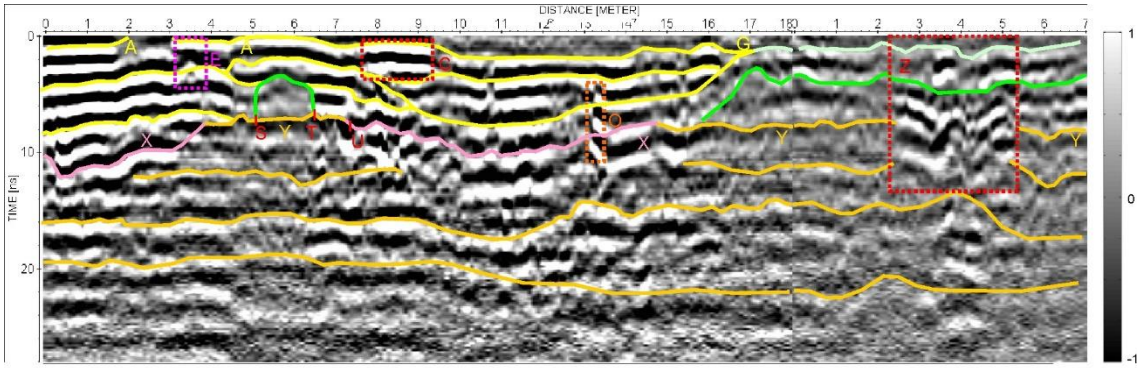

Figura 14. Sector 1. Corte vertical de la amplitud de los datos, en x = 2.34m.

Las anomalías A, C, E, G, O, S, T, U, X e Y corresponden a las anomalías y estructuras descriptas en las figuras anteriores.

La anomalía Z corresponde a un conjunto de reflexiones de alta amplitud. Éstas poseen tamaños y formas variadas, y están parcialmente superpuestas entre sí. Su profundidad es de 0.07 - 0.31 m (1.6 - 7.0) ns.

IV a. Sector 2

En este sector, la profundidad de penetración del método utilizado varía entre 0.40m y 0.67 m (9 - 15 ns), según la posición x-y, Marginalmente se alcanza una profundidad de 0.89 m (20 ns).

Corte en planta a t = 0 ns (superficie)

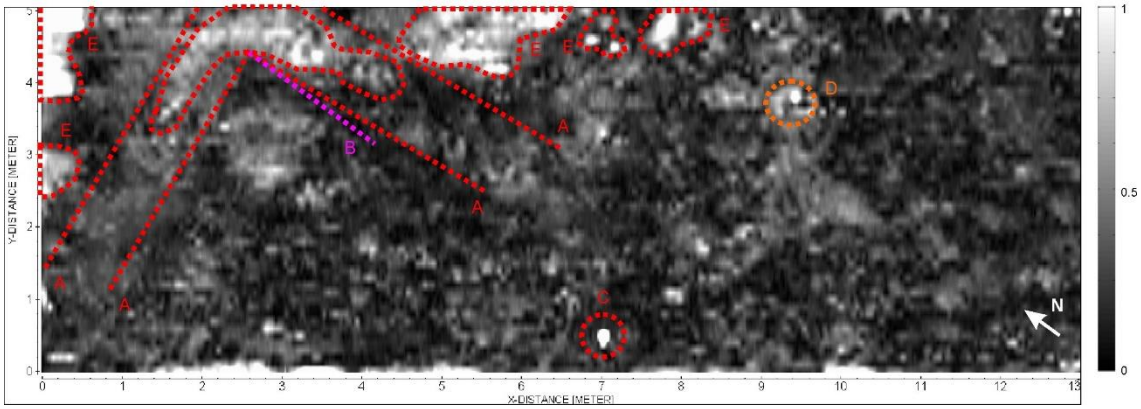

Figura 15. Sector 2. Amplitud instantánea de los datos a una profundidad aproximada de 0 m (t = 0 ns).

Anomalías A y proyección B. Las líneas A indican posibles rasgos lineales, difusos y con muy bajo contraste. Estos rasgos se localizarían a una profundidad de entre 0 m y 0.03 m (0.0 - 0.6 ns), y formarían un ángulo de 5.5º con la dirección de las estructuras que hemos detectado previamente con métodos geofísicos (Bonomo y otros, 2019). Esta dirección ha sido indicada en la figura con una línea fucsia (línea B). Tal como en el Sector 1, la proyección de los rasgos del fuerte ha sido realizada asumiendo que los bordes de los sectores investigados son paralelos entre sí.

Anomalía C. Reflector superficial, con tamaño en planta del orden de 0.2 m y probable origen cultural.

Anomalía D. Corresponde a una reflexión en parte de una raíz.

Anomalías E. Áreas con numerosas reflexiones, con formas y tamaños variados, las cuales no llegan a ser resueltas por la metodología utilizada. A pesar de esta limitación, puede decirse que una buena parte de las reflexiones estaría ligada a raíces. En la mayor parte del sector, estas reflexiones se ubican a profundidades 0 - 0.27 m (0 - 6 ns), mientras que hacia el vértice E del sector, alcanzan los 0.52 m (11.7 ns).

Corte en planta a t = 1.6 ns (0.07 m)

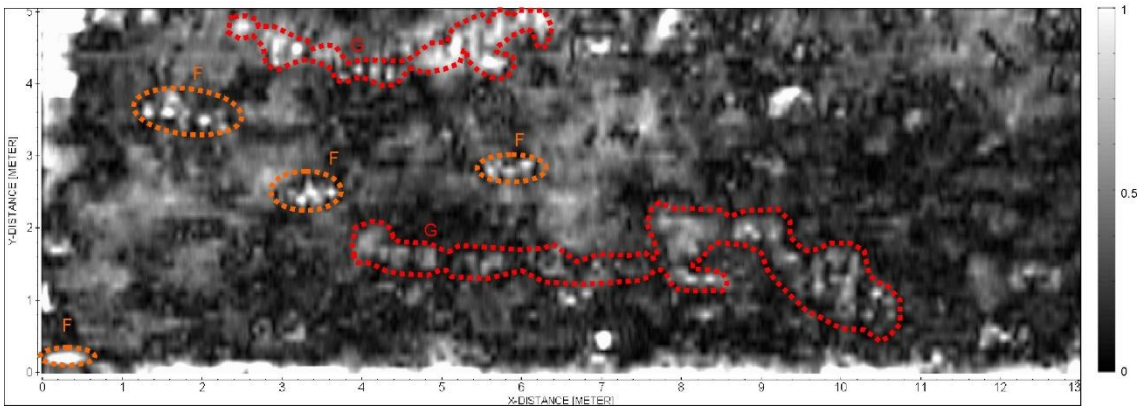

Figura 16. Sector 2. Amplitud instantánea de los datos a una profundidad aproximada de 0.07 m (t = 1.6 ns).

Anomalías F. Ejemplos de reflexiones en raíces.

Anomalías G. Reflexiones posiblemente debidas a raíces.

Corte en planta a t = 6 ns (0.27 m)

Anomalías H. Reflexiones en raíces.

Anomalía I. Área con reflexiones con formas complejas, las cuales no son resueltas por la metodología empleada. Estas se localizan entre 0.09 m y 0.89 m de profundidad (2 - 20 ns).

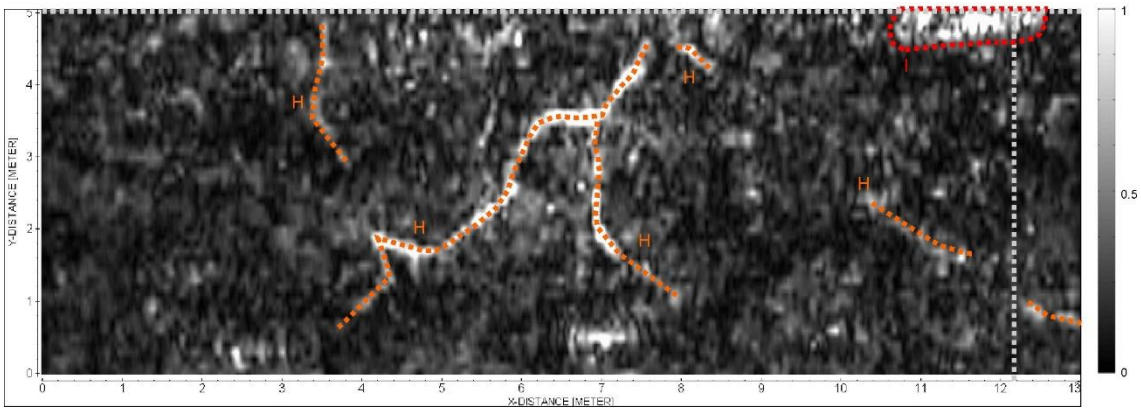

Figura 17. Sector 2. Amplitud instantánea de los datos a una profundidad aproximada de 0.27 m (t = 6 ns).

Las líneas grises indican las posiciones de los cortes de las Figuras 18 y 19, descriptas a continuación.

Corte vertical (radargrama) en y = 5.0 m

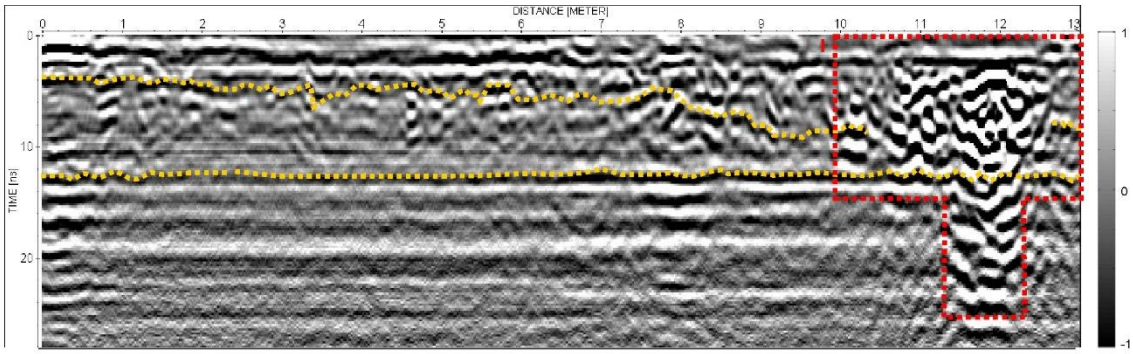

Figura 18. Sector 2. Corte vertical de la amplitud de los datos, en y = 5.0 m.

Se indican las reflexiones principales y la anomalía I, descrita en la Figura 17.

Corte vertical (radargrama) en x = 12.16 m

Se indican las reflexiones principales y la anomalía I, descrita en la Figura 17.

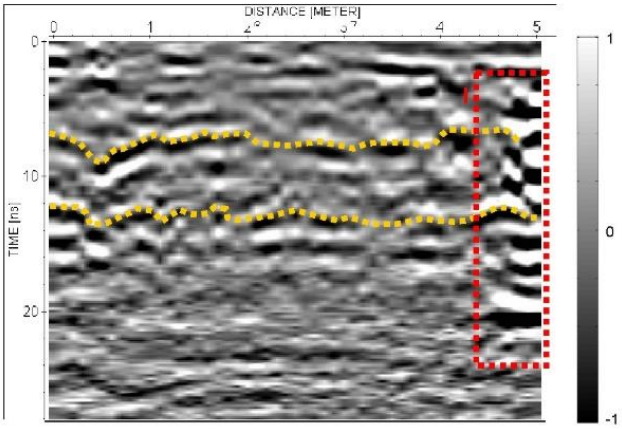

Figura 19. Sector 2. Corte vertical de la amplitud de los datos, en x = 12.16 m.

IV. SINTESIS DE LOS RESULTADOS

En ambos sectores prospectados, se observan diversas señales de acción humana sobre el suelo, tales como el tendido de cañerías y la existencia de excavaciones/estructuras de distinta data, algunas de las cuales son muy evidentes en las imágenes de GPR (ej, anomalías, C y E del Sector 1) y otras apenas distinguibles.

SECTOR 1

En las Figs. 20 a-c se muestra un resumen de las anomalías detectadas en el Sector 1. Estimamos que las anomalías que pueden resultar más interesantes en cuanto la investigación arqueológica son J, M-Ñ y P-U. Al comparar con los resultados previos (Bonomo, 2019), se tiene que J, M-Ñ y P-U muestran varias características geométricas y de amplitud que concuerdan con las de las estructuras previamente detectadas. En particular, las anomalías J podrían deberse a marcas dejadas por postes, mientras que los lineamientos y anomalías P-U y M-Ñ podrían corresponder a partes de algún tipo de estructura civil.

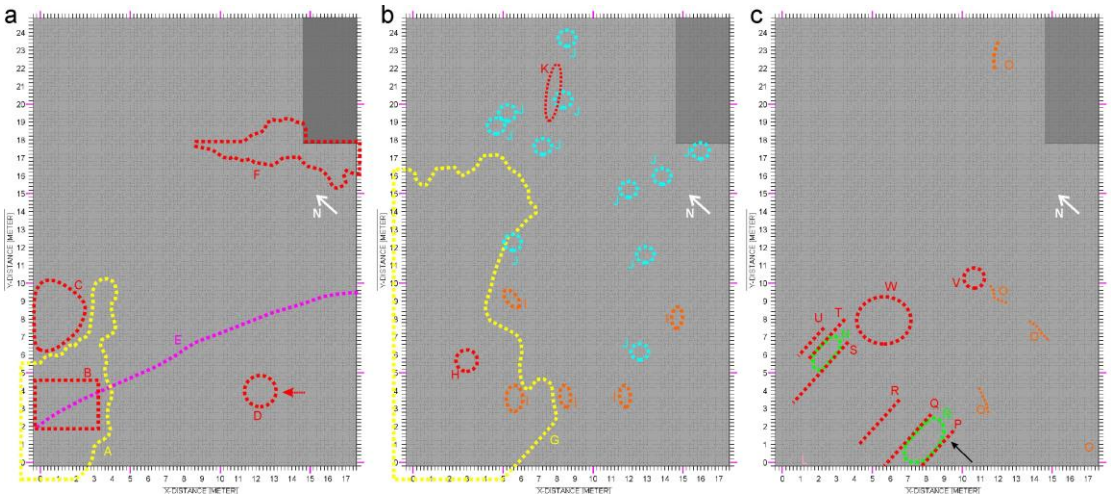

Figura 20. Esquemas de los rasgos y anomalías detectados a en el Sector 1, extraídos de la: a) Fig. 8 (z = 0.03 m), b) Fig. 9 (z = 0.13 m), c) Figs. 10 – 12 (z = 0.18 - 0.22 - 0.38 m).

Si bien las interpretaciones realizadas no son unívocas, sería conveniente realizar sondeos excavatorios a fin de determinar los orígenes de estas señales.

SECTOR 2

La Fig. 21 a-b muestra un resumen de los principales rasgos y anomalías detectados en el Sector 2. La mayoría de las anomalías de este sector se relaciona con reflexiones producto de la presencia de raíces (Figs. 21 a –b). En superficie, se vislumbra lo que podría ser un conjunto de rasgos lineales, con origen cultural (anomalías A en las Fig. 21 a y 15), pero que no se parece continuar en profundidad más allá de los 0.06 m. Otra anomalía que podría resultar de interés es la I (Fig. 21 b), la cual sí se extiende hasta cerca del metro de profundidad (Figs. 21 b, 18 y 19).

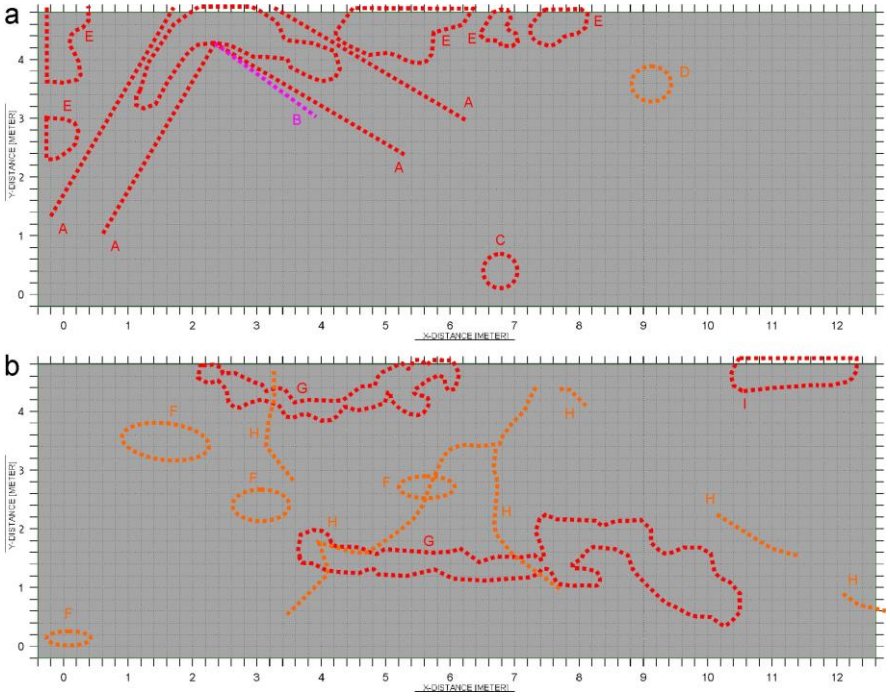

Figura 21. Esquemas de los rasgos y anomalías detectados a en el Sector 2, extraídos de la: a) Fig. 15 (z = 0 m), b) Figs. 16 – 17 (z = 0.07 - 0.27 m).

Dra. Ana Osella

Equipo de trabajo:

Dr. Néstor Bonomo

Dra. Patricia Martinelli

Dra. Vivian Grunhut

Lic. Peter Zabala Medina

Website: www.gaia.df.uba.ar

Emails: osella@df.uba.ar bonomo@df.uba.ar