

Estudios geofísicos en Chinikihá.

Informe de campo

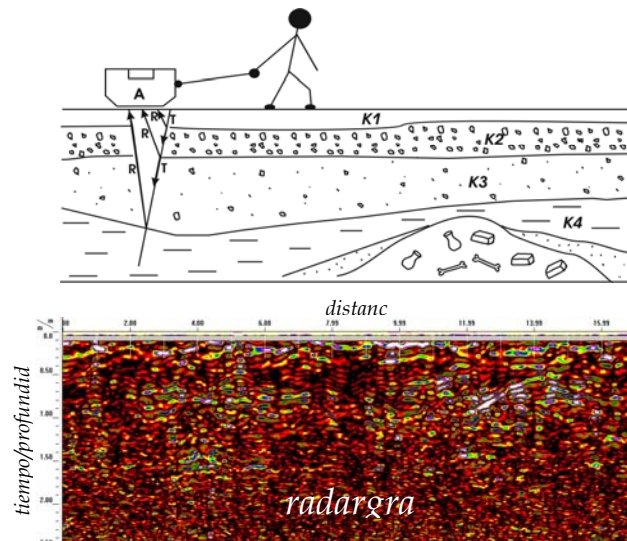
Luis Barba, Agustín Ortiz y Jorge Blancas
IIA-Unam

Metodología

Georadar

El georadar o radar de penetración terrestre (*ground penetrating radar, gpr*) es una técnica geofísica que emplea ondas electromagnéticas de radiofrecuencia del orden de 10 a 2500 MHz, la técnica es similar en sus principios teóricos al sonar y a la sísmica de reflexión.

Los fundamentos del radar de penetración terrestre son simples, una antena transmite ondas de radiofrecuencia a través del subsuelo, cuando llegan a la interfase entre dos materiales con propiedades electromagnéticas diferentes (conductividad, constante dieléctrica, velocidad de propagación, permeabilidad magnética), parte de ellas se reflejan, mientras otras son refractadas. La unidad de control medirá el tiempo transcurrido entre las ondas transmitidas y las reflejadas, esta sucesión de eventos se repite en intervalos de tiempo muy cortos del orden de nanosegundos ($1 \text{ ns} = 1 \times 10^{-9} \text{ s}$) mientras la antena está en movimiento y las ondas reflejadas se representan como trazas dibujadas consecutivamente que corresponden a las posiciones de la antena sobre la superficie del terreno y forman un perfil continuo llamado radargrama, como se ilustra la figura.



Principios básicos del georadar en arreglo de reflexión en modo continuo.

El Georadar en Chinikihá

La adquisición de los datos fue realizada con un equipo SIR System 2 y una antena monoestática de 400 MHz en modo continuo para explorar el subsuelo a una profundidad aproximada de 2.5 m.

En las áreas de estudio se realizaron 18 líneas. En total se recolectaron **470 m** de georadar con ventana de tiempo de 50 y 60 ns, 32 trazas por segundo y 512 muestras por traza.

Los datos se procesaron con el programa *Radan 6 de GSSI* para remover ruido y ofrecer una mejor resolución, normalizar la distancia horizontal y estimar la profundidad. Algunos de los procesos empleados fueron:

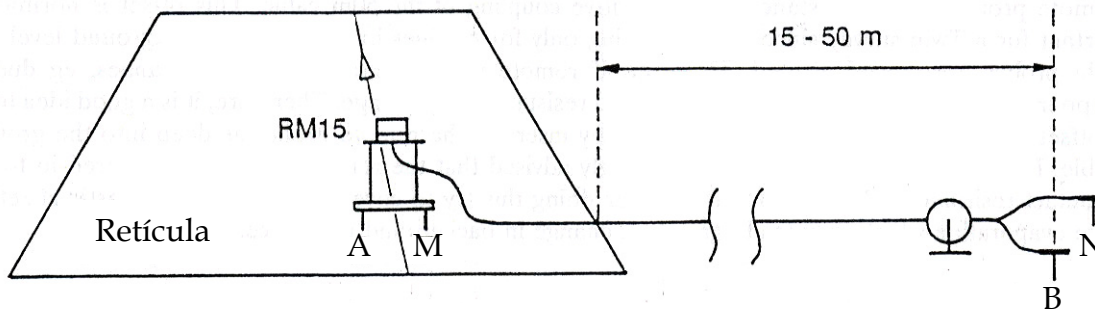
Filtro paso-banda con frecuencia de corte de (75-800MHz), filtro background removal de 999 trazas, filtro running average de 7 trazas, migración, normalización de la distancia y ajuste de ganancias.



Adquisición de datos con georadar en modo continuo

Resistividad Eléctrica

Los métodos eléctricos son empleados para medir la variación de la resistividad eléctrica en función de la profundidad y la distancia. El arreglo más empleado por el laboratorio es un dispositivo conocido como polo-polo o gemelos (twin), que consiste de cuatro electrodos que se colocan sobre la superficie del terreno. Dos electrodos son empleados como electrodos móviles y dos como electrodos fijos. Los electrodos A y B son de corriente y los M y N son de potencial. Los electrodos (A y M) se mueven sobre la superficie del terreno mientras los electrodos (B y N) permanecen fijos conectados en el “infinito” o a una distancia muy grande, como se ilustra en la figura. El resultado es una configuración de valores de resistividad aparente que muestran la variación de ésta en un mapa o una gráfica para una profundidad relativamente constante.



Configuración en campo de un Arreglo Polo-Polo

En el sitio se adquirieron **485** lecturas puntuales con el equipo Geoscan RM15, distribuidas en 8 líneas eléctricas sumando 475 m lineales, cinco retículas de 20x20 m, tres de 20x90 m, y una de 10x20 m, cubriendo un área total de 7,600 m².

Los datos fueron procesados con el software *Geoplot*. Los procesos empleados fueron *la interpolación, filtrado paso-bajas y paso-altas, despiking y zero-mean grid*. Posteriormente las líneas fueron graficadas en el programa *Plot* y las retículas configuradas en *Transform* y *surfer* para determinar en que lugares se presentaban altos o bajos resistivos que pudieran estar asociados con la presencia de elementos arqueológicos.



Levantamiento de calicatas y líneas eléctricas

Gradiente Magnético

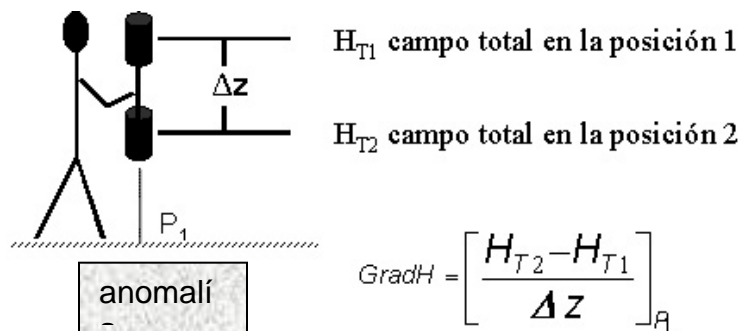
Esta técnica de prospección se emplea en la arqueología para medir las variaciones del campo magnético terrestre, provocadas por la presencia de restos de estructuras arquitectónicas con propiedades magnéticas que alteran el campo natural.

La magnetización de los materiales es ocasionada por la inducción del campo magnético terrestre y por la magnetización remanente o termorremanente. La intensidad de la magnetización inducida depende principalmente de la susceptibilidad magnética (χ) del material y de las características del campo magnético terrestre, $M_i = \chi H$. En cambio, la intensidad de la magnetización remanente depende tanto del material como de la temperatura alcanzada, y su valor es independiente del valor del campo magnético terrestre. Casi siempre la magnetización por inducción (M_i) es mayor que la magnetización remanente (M_r), pero hay situaciones comúnmente encontradas en prospección arqueológica en donde la magnetización remanente es mucho mayor, como es el caso de los hornos.

La magnetización total (M_T) del cuerpo es expresada como:

$$M_T = M_r + M_i$$

El gradiómetro funciona como un magnetómetro diferencial, en donde el espaciamiento entre los sensores es fijo y pequeño con respecto a las fuentes generadoras de campos magnéticos (estructuras de piedra). La diferencia de las mediciones del campo dividida por la distancia entre los sensores es el gradiente medido para el punto medio del espaciamiento entre ellos, como se muestra en la figura:



Obtención del gradiente de campo magnético

Esta técnica remueve automáticamente el gradiente regional y de esta forma define mejor las anomalías superficiales que son las de interés en la prospección arqueológica. También remueve los efectos producidos por las variaciones diurnas y las tormentas magnéticas. El problema en el caso de La Mesa es que los materiales en el subsuelo y los asociados a vestigios culturales tienen susceptibilidades magnéticas similares y muy bajas lo que los hace muy difíciles de identificar.

En total se adquirieron **2850 m²** en lecturas de gradiente con el equipo Geoscan FM36 en modo puntual. Los datos fueron sometidos a diferentes técnicas de proceso con el software *Geoplot* para corregir errores en la adquisición de datos, para eliminar parte del ruido magnético y para representar los datos con buena calidad. Algunos de los procesos fueron *la interpolación, filtrado paso-bajas, despiking y zero-mean grid*. Una

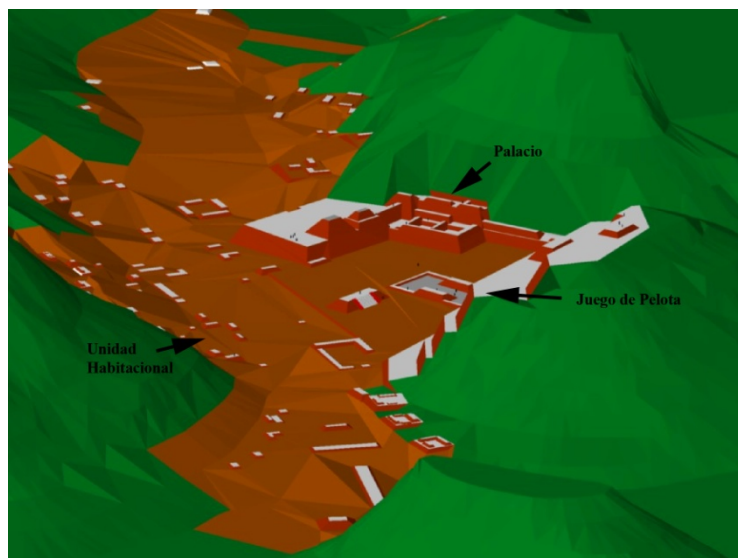
vez realizado el proceso los datos fueron configurados con el programa *Transform* y *Surfer* en mapas de pseudocolor para destacar anomalías sutiles y fuertes como dipolos magnéticos, superficies sometidas a calentamiento y material superficial.



Recolección de retículas magnéticas

Resultados de la prospección geofísica en Chinikihá

Se trabajaron tres zonas principales como apoyo al proyecto. El juego de Pelota, la parte posterior del Palacio y una Unidad Habitacional.



Juego de pelota

En primer lugar se estudio con gradiente magnético el juego de pelota, el cual se cubrió en su totalidad con 6 retículas. En cabezal oeste se realizó la retícula 1 de 15 x 20 m



y se complementó con la retícula 2 de 15 x 10 directamente traslapada en su parte baja.

La retícula 3 se trazó perpendicularmente al cabezal con una retícula de 20 x 10 m con la intención de cubrir la parte central del juego.





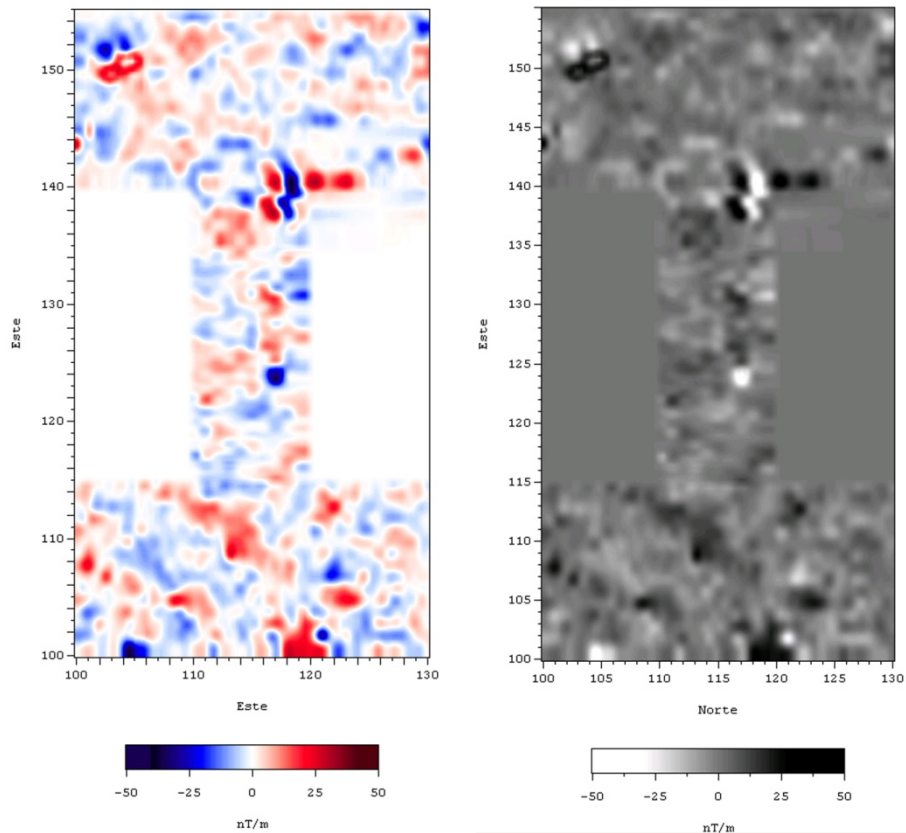
El cabezal Este también se cubrió de la misma manera que el oeste con dos retículas. La retícula 4 de 20 x 15 y por debajo la retícula 5 de 10 x 15.





Por último para cubrir la parte central del juego de pelota y complementar la retícula 3. Se anexó la retícula 6 con una pequeña retícula de 5 x 10 m que tuvo una orientación similar a la de los dos cabezales.



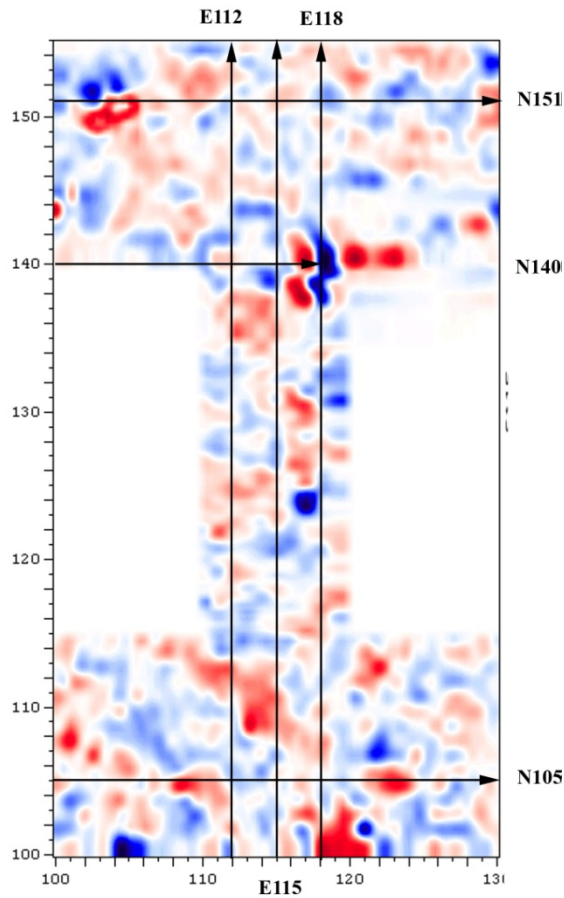


El estudio de gradiente magnético muestra resultados interesantes. El cabezal superior muestra en una de sus esquinas una anomalía termorremanente. Hacia la parte donde termina la parte media del juego, se puede observar un dipolo muy fuerte que puede ser producido por un objeto metálico. En la parte media se puede ver bajos valores magnéticos que corresponden a la zona alterada anteriormente durante la excavación del pozo y un dipolo magnético inmediatamente a su izquierda, del cual es interesante su ubicación.

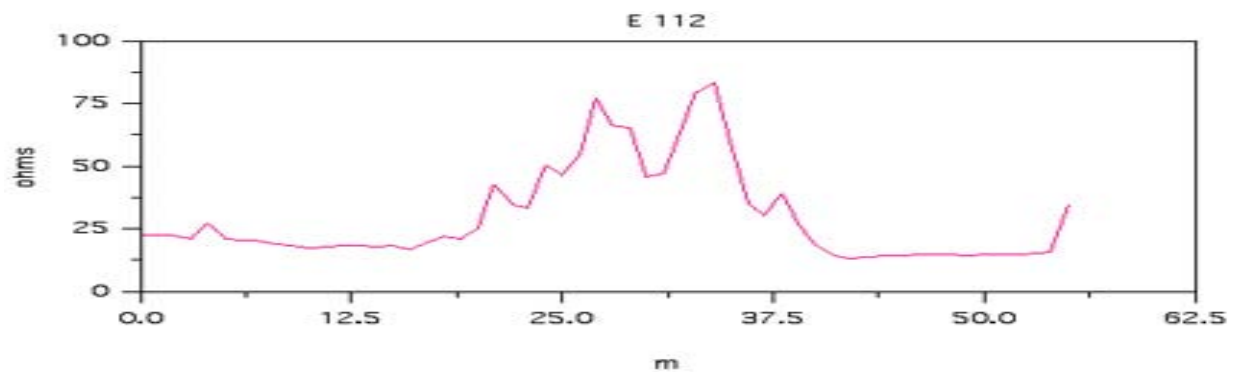
El cabezal inferior muestra alineamientos diagonales que pueden ser debidos a alteraciones en el terreno original rellenos con un material con mayor susceptibilidad magnética. Así mismo se distingue otra anomalía termorremanente.

Uno de los intereses principales del estudio geofísico en el juego de pelota fue la localización de marcadores de juego de pelota en el interior del mismo. Al respecto sería de particular interés excavar a manera de comprobación, el dipolo magnético que se localiza aproximadamente cerca del pozo de excavación anterior, hacia la parte central del juego.

A partir del estudio de gradiente magnético y de las anomalías observadas, se determinó realizar seis líneas eléctricas en el juego de pelota, tres a lo largo de toda la cancha para tratar de localizar los marcadores, uno en el cabezal inferior y 2 en el cabezal superior.



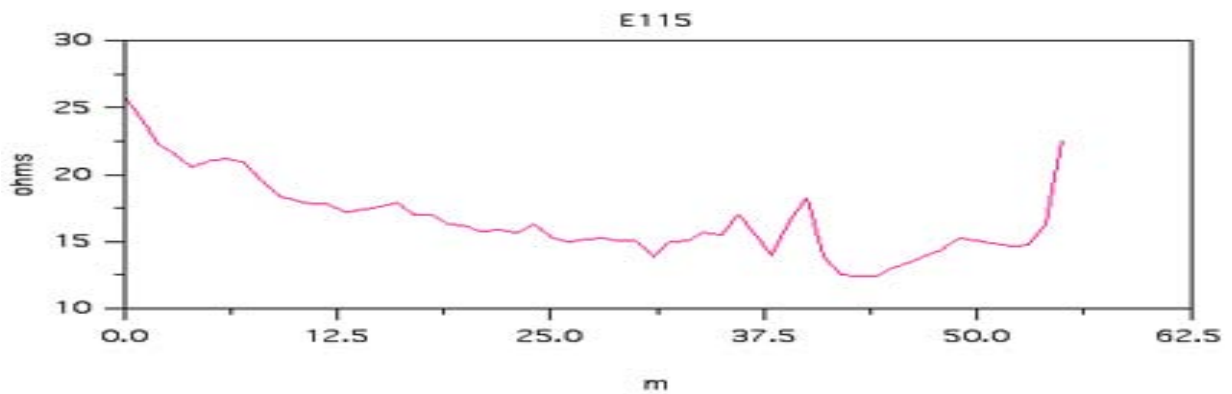
E112



La línea E 112 se desplaza de N 100 a N 155 Puede observarse que la respuesta principal se da al centro del juego de pelota debida principalmente al aumento de material constructivo producido por la existencia de la banqueta. Pueden observarse valores muy homogéneos con excepción de los extremos del cabezal.



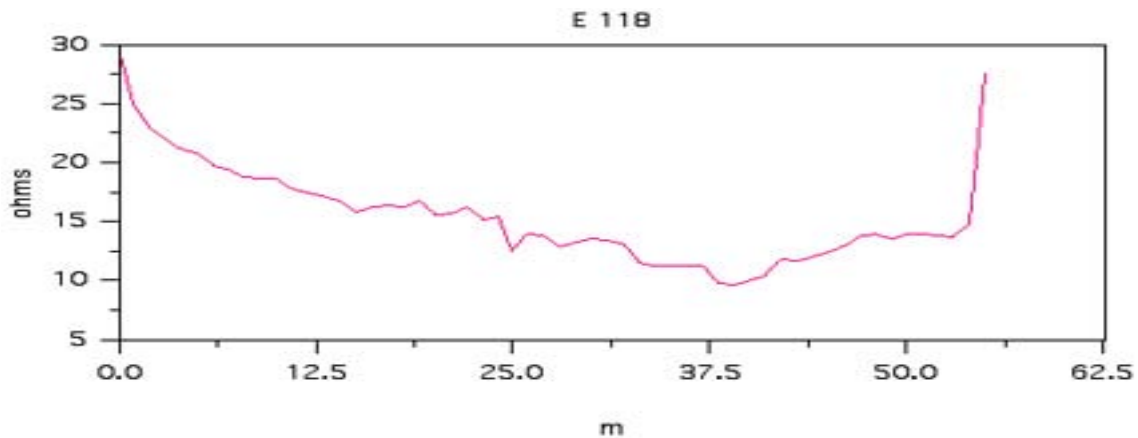
E 115



La línea E115 también se extiende de N100 a N 155. Al inicio presenta altos valores por la existencia de una escalinata de una estructura que cierra al oeste el juego de pelota. Al llegar a 40 m del recorrido se aprecia un aumento en la resistividad que corresponde a una bajo valor magnético que presenta una forma circular. La línea termina de Nuevo con altos valores por la existencia del cabezal superior.



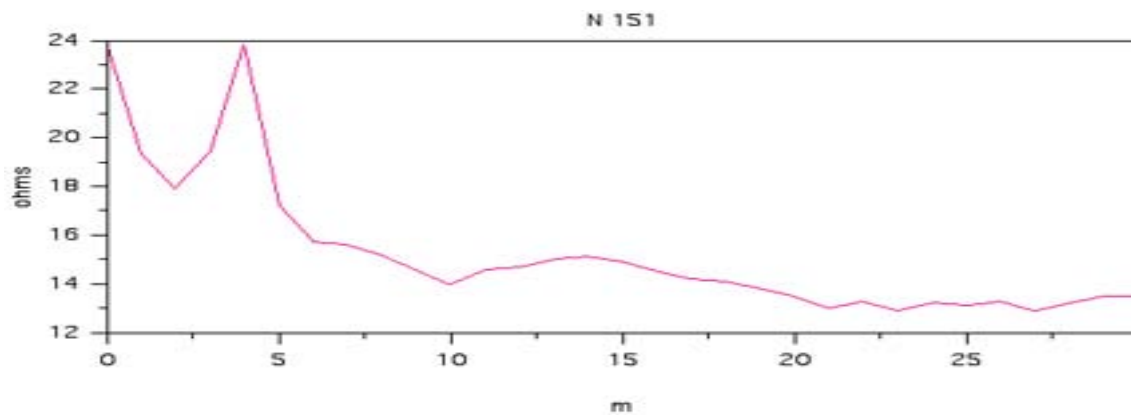
E 118



La línea E118 es la última que atraviesa totalmente el juego de pelota con la misma longitud de 55 mts. de N100 a N155. Por la localización de la escalinata al inicio de la línea, ésta presenta altos valores y posteriormente decrece. Esta línea tiene de particular que atraviesa uno de los pozos realizados en la temporada anterior. En este mismo pozo el dueño del terreno enterró un becerro. Al parecer la ubicación de este pozo coincide con un dipolo magnético y una baja en la resistividad eléctrica en 25 m del recorrido. En el metro 40 del recorrido se localiza una pequeña zanja con bajos valores eléctricos pero con altos valores de gradiente magnético, por lo que muy posiblemente se trata de un objeto metálico moderno. La línea E118 finaliza con altos valores por la presencia del cabezal superior.



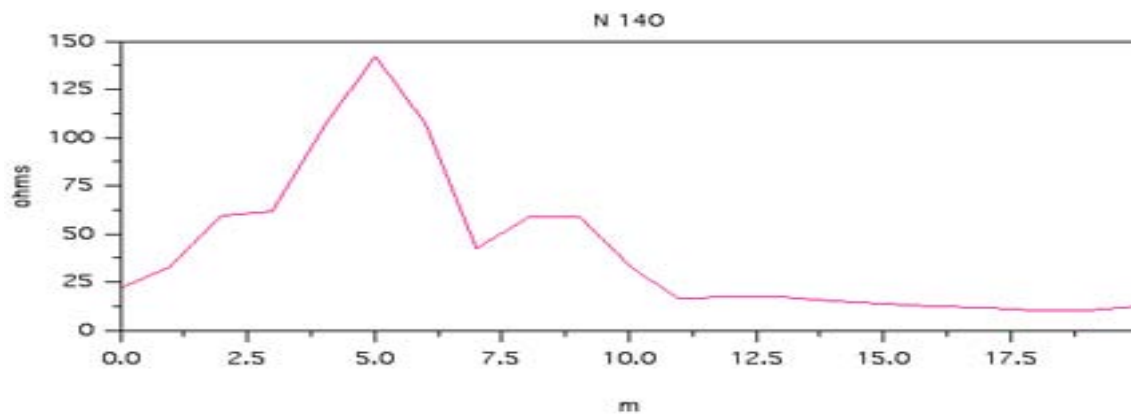
N 151



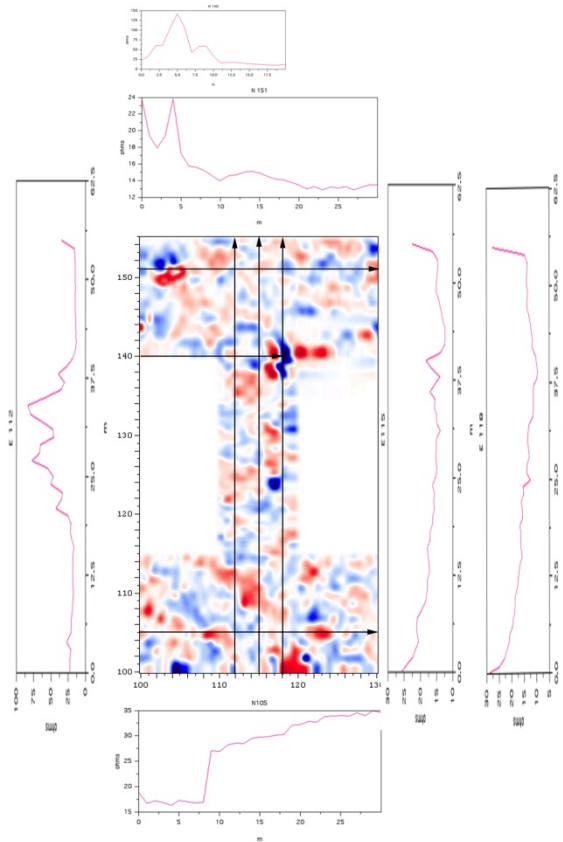
Esta línea de 30 m de longitud, presenta muy buena correspondencia con el estudio de gradiente magnético. Los primeros 5 m del recorrido coinciden con una anomalía terrmorremanente, por lo que posiblemente se trata de una pequeña estructura al interior del juego de pelota que sirvió para calentar algo, como un posible horno o quizá un pequeño temazcal. El resto de la línea presenta bajos valores eléctricos y magnéticos.



N 140



La línea eléctrica N140 presenta una longitud de 20 m. Los primeros 11 m del recorrido presentan altos valores dado que la línea atravesó perpendicularmente el extremo este de la banqueta norte. El resto de la línea eléctrica presenta bajos valores, incluyendo el alto dipolo magnético, con lo que se confirma que este último es producido por un objeto metálico moderno.

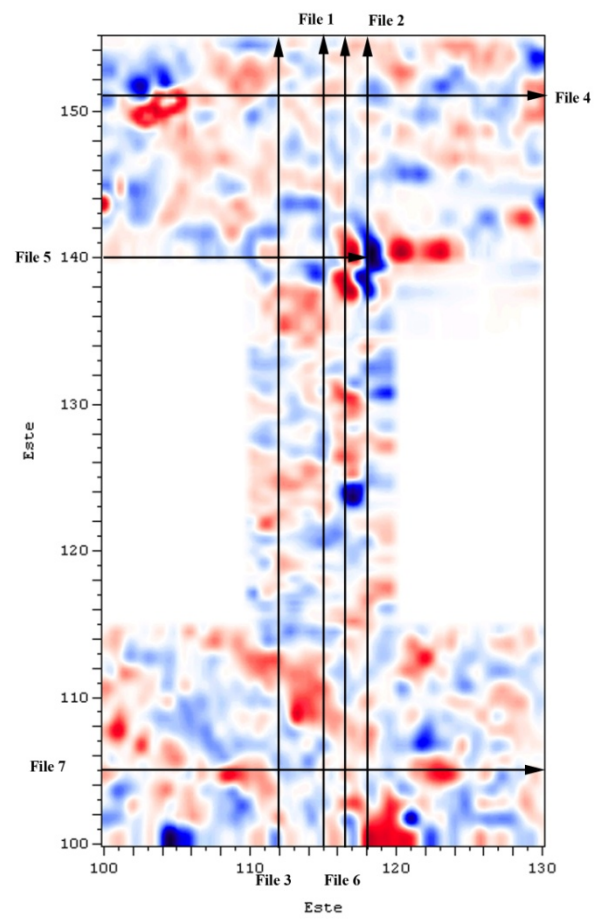


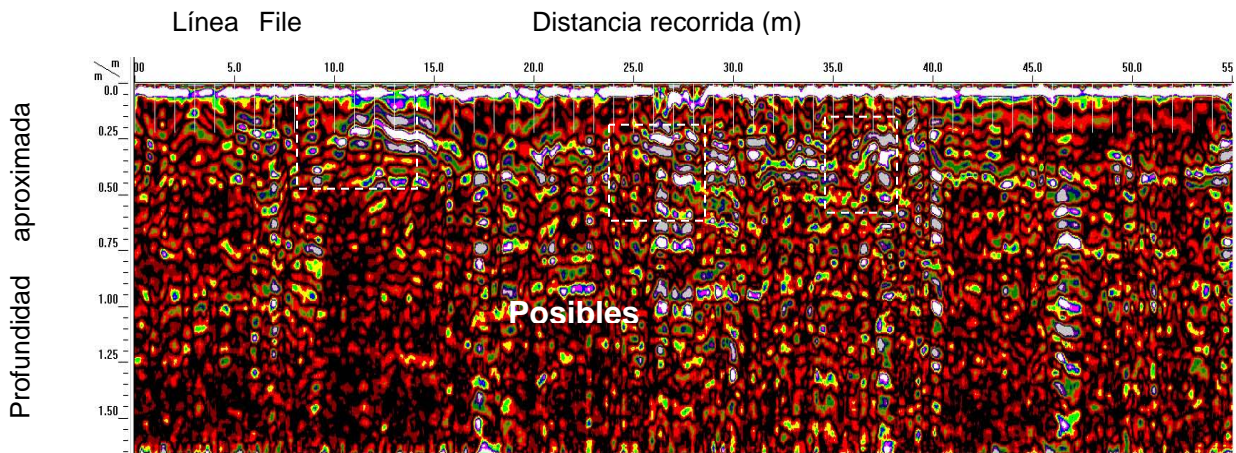
El comparativo del estudio eléctrico y el magnético a escala, proporciona una vista general integral de los estudios realizados en El Juego de Pelota.

Georadar

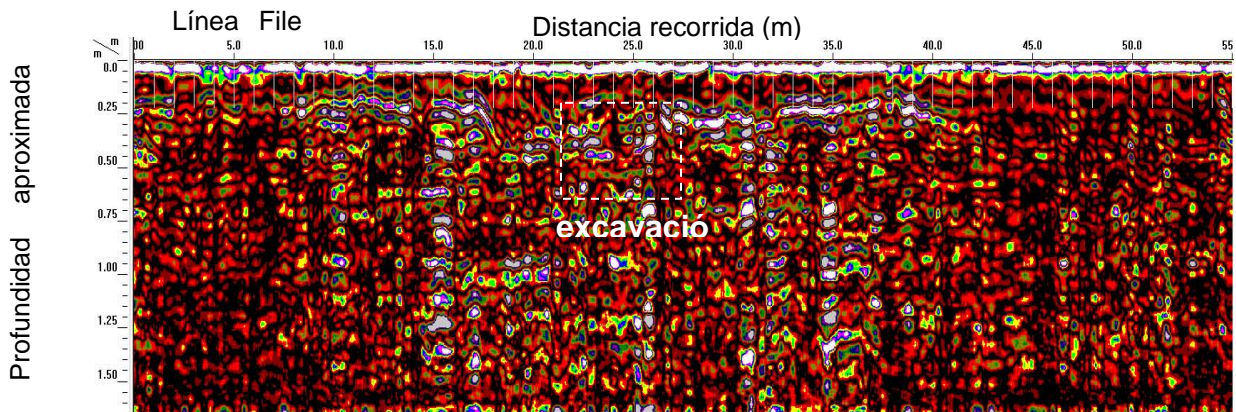
A la par del estudio eléctrico y de gradiente magnético se realizó el estudio con georadar prácticamente en las mismas líneas donde se realizaron los estudios eléctricos con excepción de la línea E 116.5.



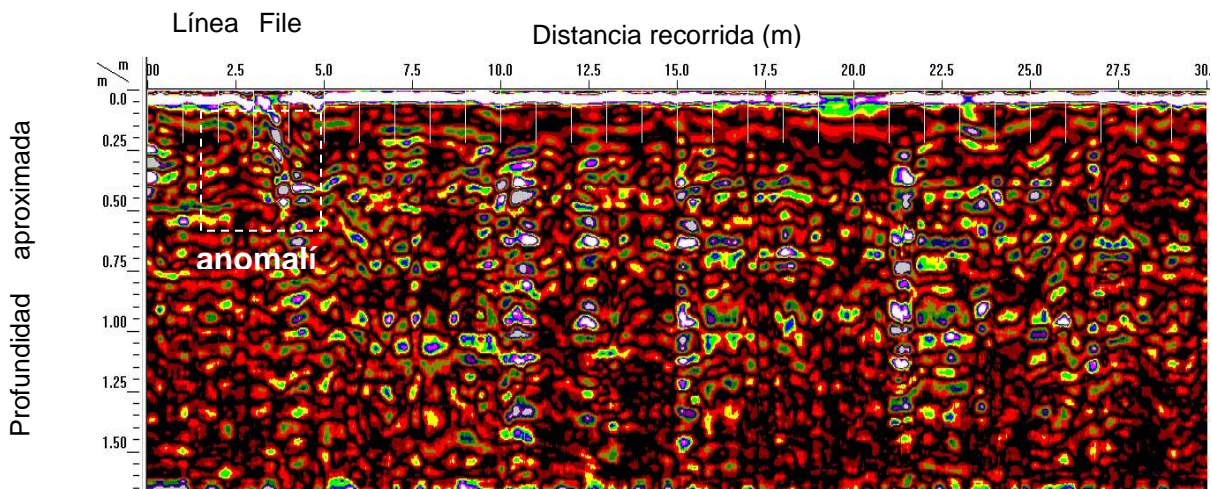




La línea de georadar File1, fue adquirida en la parte central del juego de pelota con el objetivo principal de encontrar los posibles marcadores que se encuentran en algunos de estos espacios. El radargrama exhibe tres reflexiones fuertes de 10-15, 26-30 y de 37-39 metros del recorrido. Los estudios de gradiente magnético y resistividad (línea E115), detectaron anomalías sutiles en estas posiciones y posiblemente estén asociadas con los marcadores buscados.



En la línea File 6, se registró al igual que en la línea File 1 un horizonte reflectivo de 8 a 42 metros del recorrido y entre 0.25 y 0.4 metros de profundidad, que cubre casi todo el espacio del juego de pelota. Esto puede explicarse como una superficie nivelada y que en el radargrama no lo apreciamos claramente por los cambios de elevación del terreno. Casi al centro del radargrama entre 25 y 26 m del recorrido se registra una posible excavación moderna marcada por una discontinuidad en la reflexión principal.



El radargrama de la línea File4, muestra una imagen con algo de ruido, caracterizado por bandas múltiples horizontales y verticales asociadas con vegetación alta y con alto grado de saturación del suelo. Dentro de la gran variedad de respuestas sobresale una reflexión localizada entre 3 y 4 m del recorrido, y que corresponde con un valor eléctrico alto (línea N151) y con la anomalía termorremanente magnética.

Parte posterior del palacio

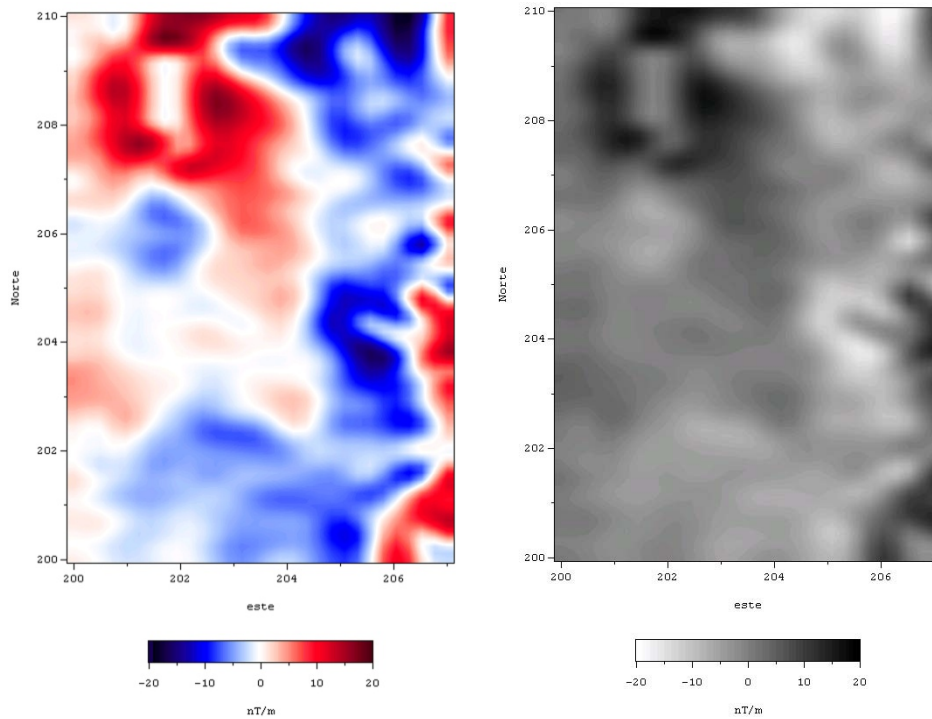
La retícula en la parte posterior del palacio presentó el interés principal de delimitar físicamente los límites de una posible festividad cuya evidencia se ve manifestada por el hallazgo de una gran cantidad de cerámica, restos de venado, caracoles, etc. localizados en dos pozos de excavación anteriores.

Al limpiar el área, se evidenció además la posibilidad de una posible galería por la existencia de un hundimiento con lajas en la parte sur de la retícula.



La retícula de 7 x 10 tuvo una orientación N-S y se comenzó en la esquina SW.





El estudio de gradiente magnético delimita claramente la zona de concentración cerámica en color rojo. E incluso puede verse que se continúa un poco más hacia el norte. También se puede observar en la parte media de esta zona de valores “altos”, la localización del pozo de excavación con bajos valores.

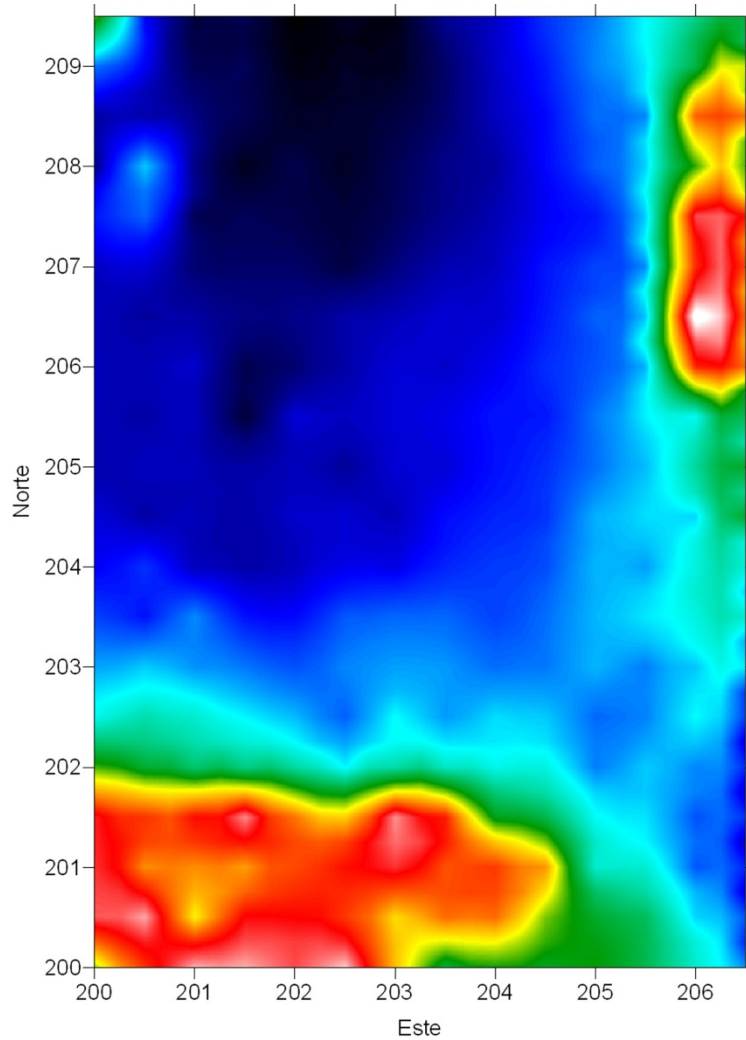
La parte Este de la retícula, caracterizada por bajos valores, parece coincidir con afloramientos de caliza en el área. Hacia la parte central sur, se puede notar claramente como una zona de bajos valores de susceptibilidad, el hueco que se observó desde superficie y que puede ser producido por la existencia de una galería por debajo. Como una anomalía semicircular. Se propone el estudio con georadar de penetración en esta zona para verificar las interpretaciones.

Eléctrica y Radar del Palacio

Por último se trazó nuevamente la retícula en la parte posterior del palacio con la finalidad de complementar la retícula de gradiente magnético con una retícula eléctrica y otra de georadar. La retícula nuevamente fue de 7 x 10 m con una orientación N-S. Se realizó exactamente sobre la retícula anterior, la única diferencia es que la zona se encontró más limpia de escombros y cubierta vegetal.

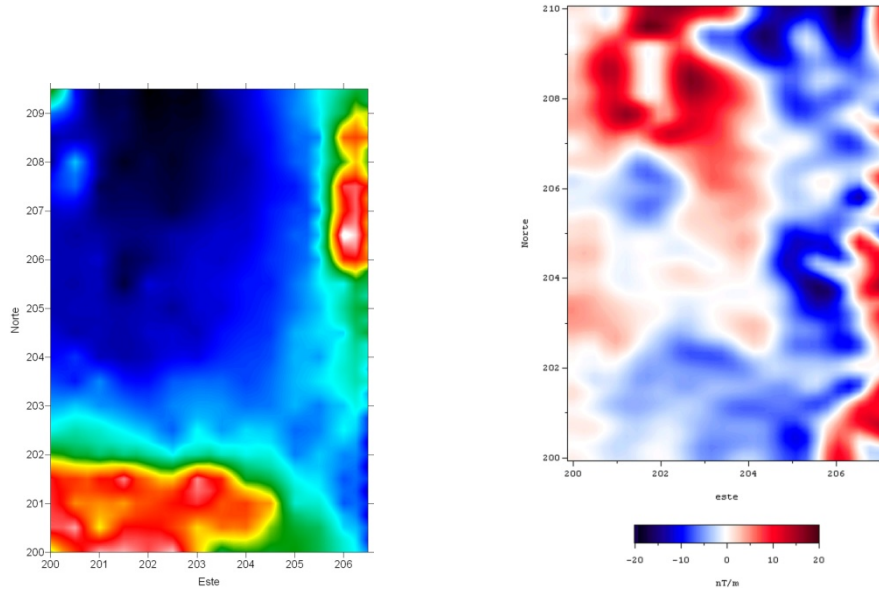


El estudio eléctrico se realizó con un desplazamiento de 50 cm para hacerlo más detallado. Con la intención de verificar la delimitación de la zona de concentración cerámica, previamente observada mediante el gradiente magnético.



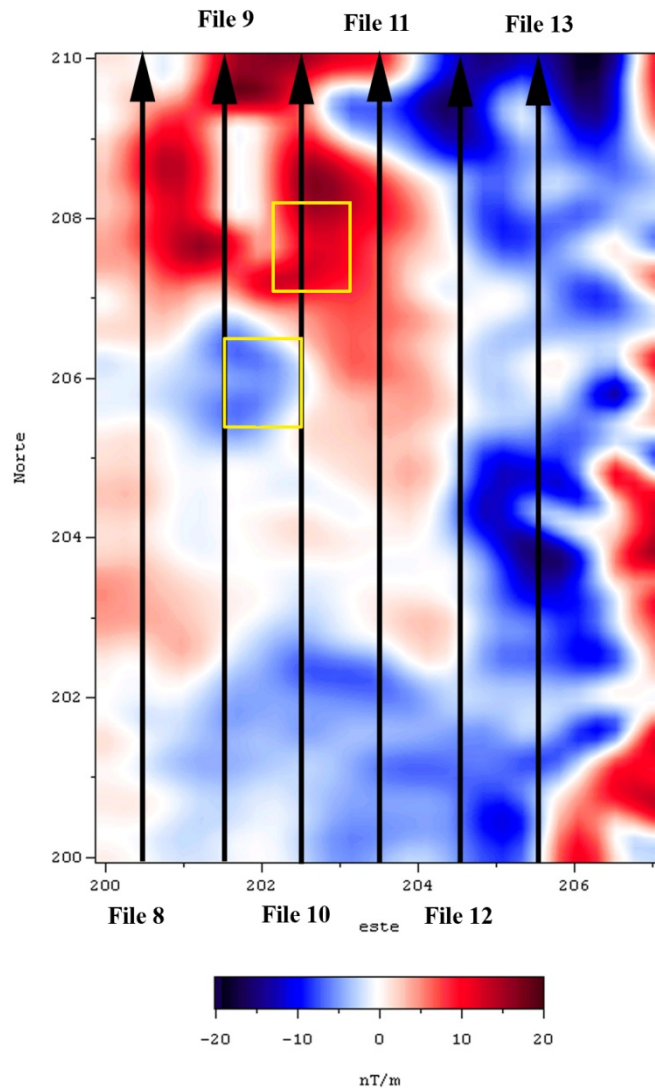
El mapa eléctrico confirma lo observado en el mapa de gradiente magnético. En donde la zona de concentración de cerámica, se observa una zona de alta conductividad (en azul oscuro), producida por el relleno donde se encuentra inmersa la cerámica. Al contrario la zona con mayor concentración de piedras y lajas se presenta como una zona de alta resistividad (en rojo).

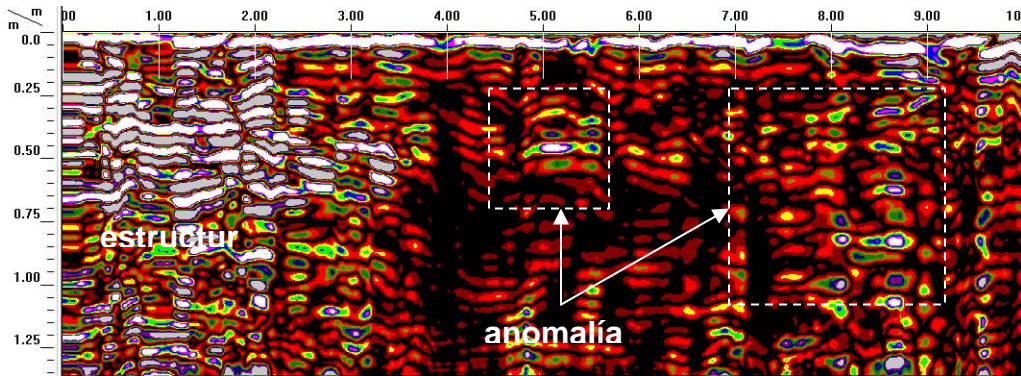
En el comparativo de los mapas eléctricos y magnéticos es evidente la semejanza de las anomalías aunque causada por propiedades distintas.



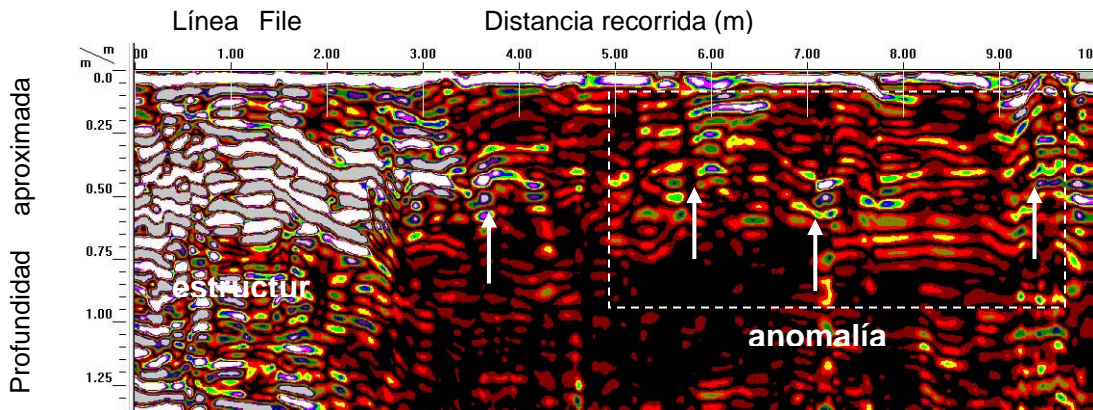
A partir de eso y con la finalidad de tratar de delimitar la profundidad y características de las anomalías detectadas previamente, el estudio se complementó con georadar .





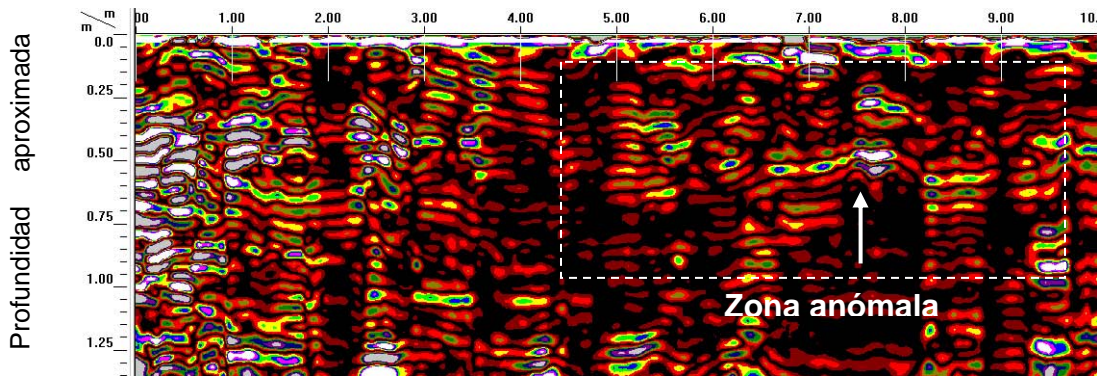


La línea File 8 registra en los primeros 3 metros del recorrido reflexiones muy fuertes producidas por estructuras constructivas de roca caliza. De 4.8-5.6 m del recorrido detecta un grupo de reflexiones de media amplitud asociadas seguramente con materiales culturales. De 7 a 9.4 m del recorrido nuevamente se registra un grupo de reflexiones que llegan hasta 1 metro de profundidad y que también pueden asociarse con cerámica, entierros y otros objetos culturales.



En el radargrama de la línea File 9, nuevamente se registró las reflexiones intensas de las estructuras constructivas de roca y una anomalía pequeña de 3.6 a 4.2 m del recorrido que parece ser independiente. De 5.3 hasta los 10 m del recorrido se detectó un grupo de reflexiones producidas por materiales de origen cultural. Llama la atención las reflexiones más intensas localizadas en 6, 7.2 y 9.5 m del recorrido, con excepción de la localizada a los 6 m que es parte de una excavación, las otras pueden asociarse con un posible entierro y con una mayor acumulación de objetos culturales.

Línea File Distancia recorrida (m)



Otra línea levantada casi en el límite este de la gran anomalía magnética, File 10, muestra al inicio las reflexiones de la estructura constructiva, de 5 a 10 m del recorrido una zona de reflexiones de media amplitud producida por el relleno cultural y en donde destaca una de las excavaciones previas a la prospección entre 7 y 8 m del recorrido.

Unidad habitacional (Grupo F)

En la parte NE del sitio se encuentra un conjunto habitacional caracterizado por un patio central rodeado por estructuras. La finalidad del estudio en esta zona fue la de tratar de encontrar evidencias de festividades parecidas a las que se localizaron en la parte superior del palacio tanto en el patio como en la parte posterior de las estructuras. Por otra parte, tratar de diferenciar espacios internos o cuartos en la parte superior de las estructuras.

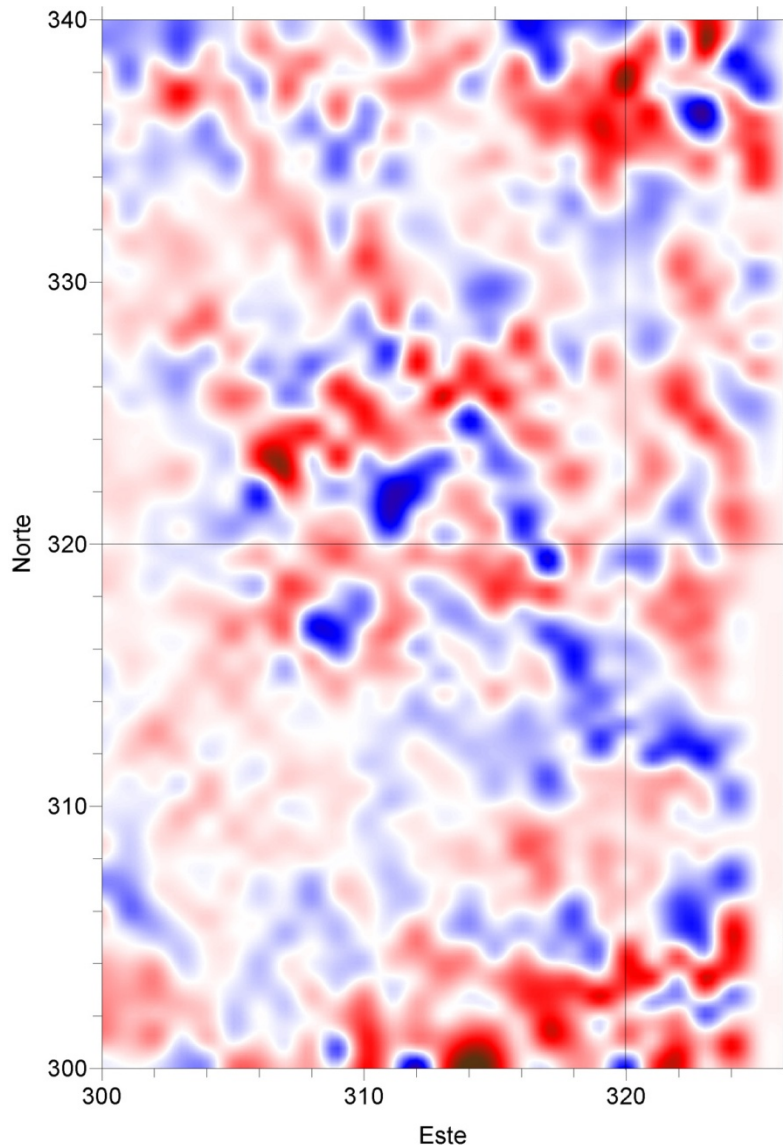
Para tal efecto se reticuló la totalidad del patio, la parte media de las estructuras y rebasando sus límites N-S para intentar contrastar la hipótesis de la festividad o la existencia de basureros en la parte posterior de los montículos.

Se realizó una retícula de 40 x 25 m





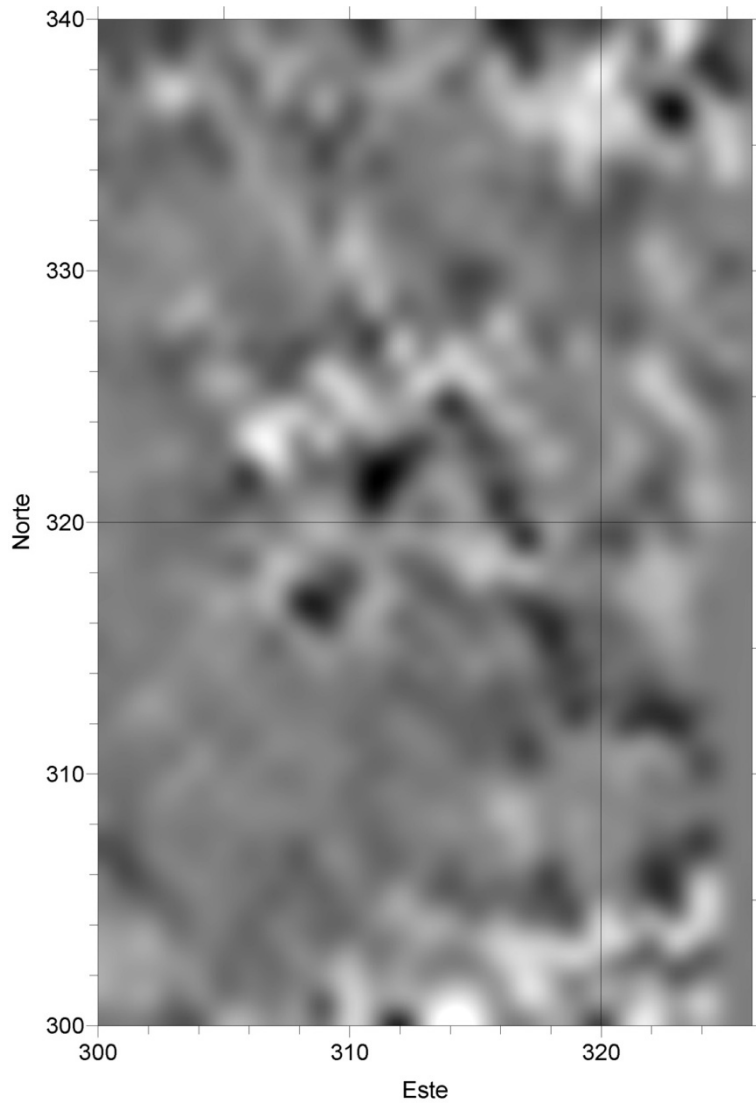




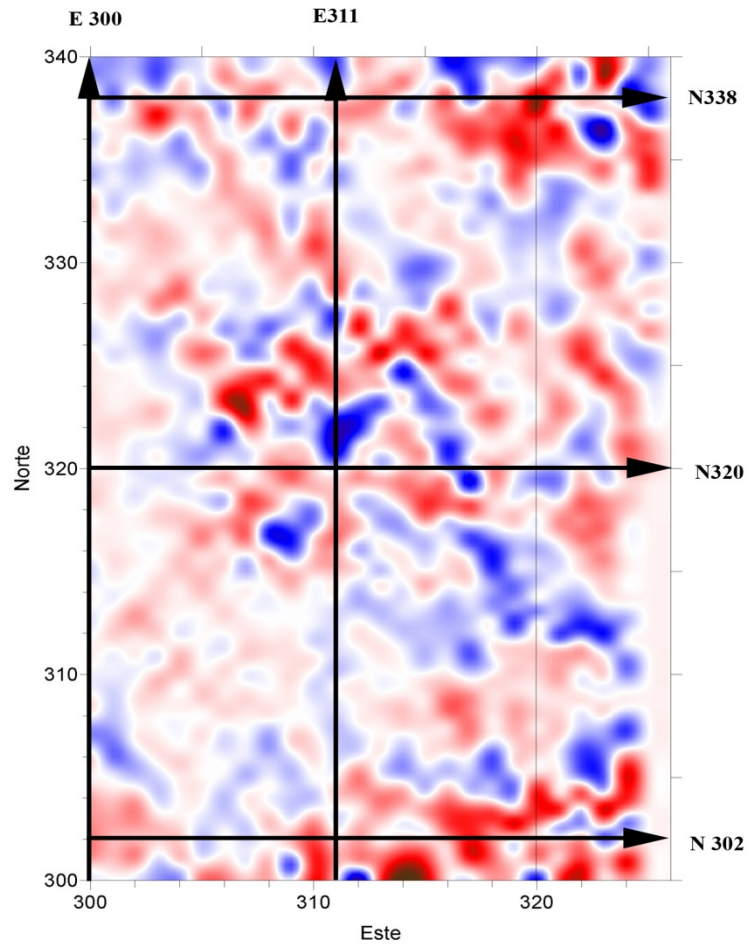
El estudio de gradiente magnético evidenció la existencia de una anomalía cuadrangular de aproximadamente 10 x 10 m en el centro del patio. Con altos dipolos magnéticos en su parte interna. Por otra parte en los extremos norte y sur de las retículas, ambos rebasando las estructuras, se observan altos valores de gradiente magnético que podrían ser debidos a concentraciones cerámicas parecidas a las encontradas en la parte superior del palacio.

Otra característica que se resalta en este estudio, es la no respuesta magnética de las estructuras que rodean el patio, dada su construcción con piedra caliza. Por lo mismo destaca principalmente la anomalía central del patio.

Al parecer la única estructura que se destaca por alguna razón, es el extremo este de la estructura que remata al sur de la unidad habitacional. Donde en el mapa de grises se puede ver algo que podría tratarse de un cuarto interior. Sin embargo, será necesario complementar el estudio con líneas eléctricas y de georadar para contrastar ésta hipótesis.

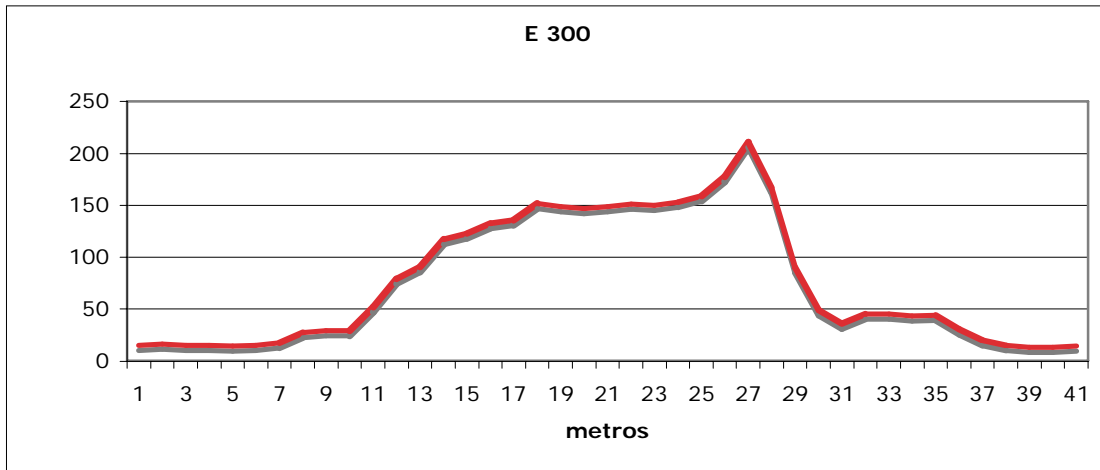


A partir del estudio de gradiente magnético se realizaron 5 líneas eléctricas que atraviesan la unidad habitacional. Dos de norte a sur (E 300 y E 311) y tres de este a oeste (N302, N320 y N338)



E300

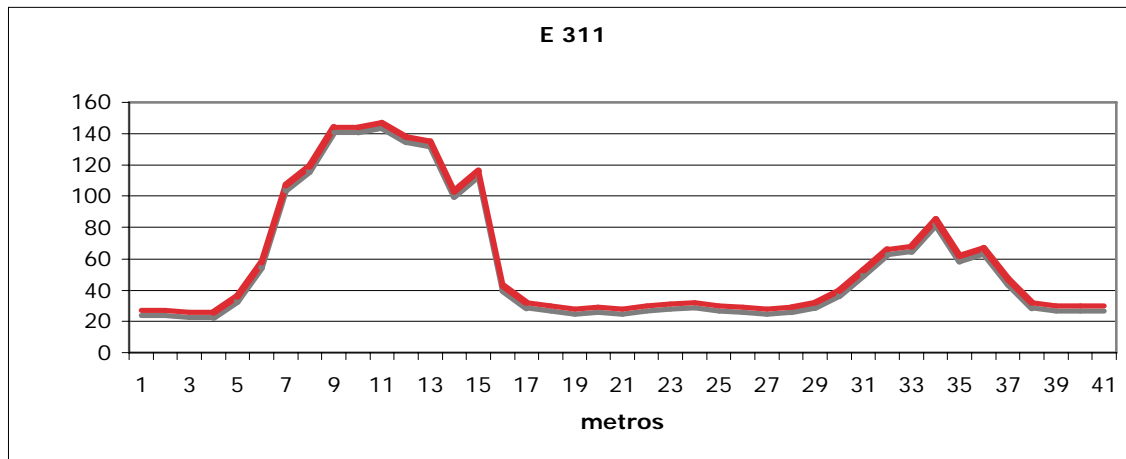
De 40 m de largo de N 300 a N 340. Atraviesa la orilla oeste de la retícula. En ella se observa claramente el alza de la resistividad al atravesar el montículo oeste de N310 a N331. En el recorrido puede verse en N318 y en N326 un alza en la resistividad que puede ser debida a muros en la parte superior del montículo. Lo que nos daría un cuarto de por lo menos 8 m de largo.



E311

Esta línea eléctrica atraviesa de norte a sur la retícula con 40 m de largo. En ella claramente se observa el paso por los montículos sur y norte. Al pasar por la anomalía central del patio que claramente se ve en el mapa de gradiente magnético puede verse un incremento muy leve de N321 a N324 en el aumento de la resistividad y que nos puede estar evidenciando algún elemento arqueológico al centro del patio.

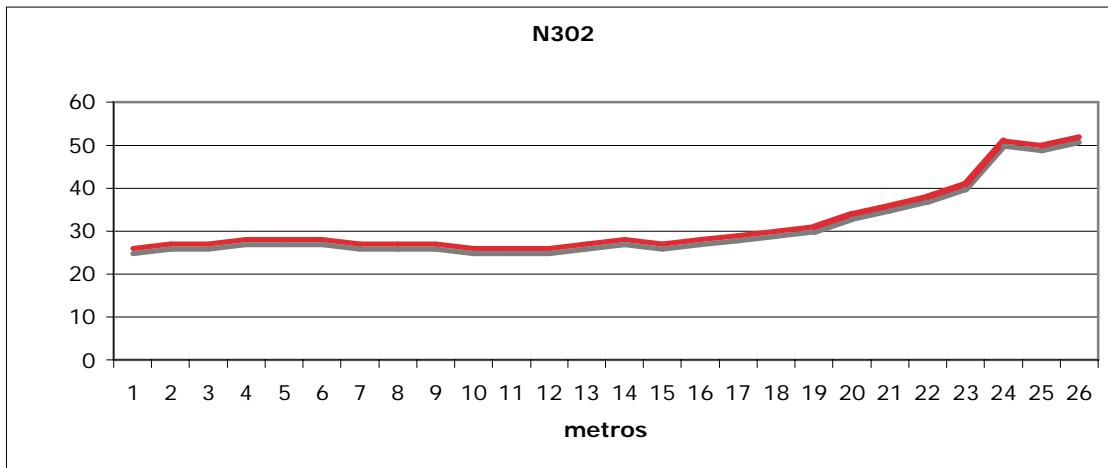




N302

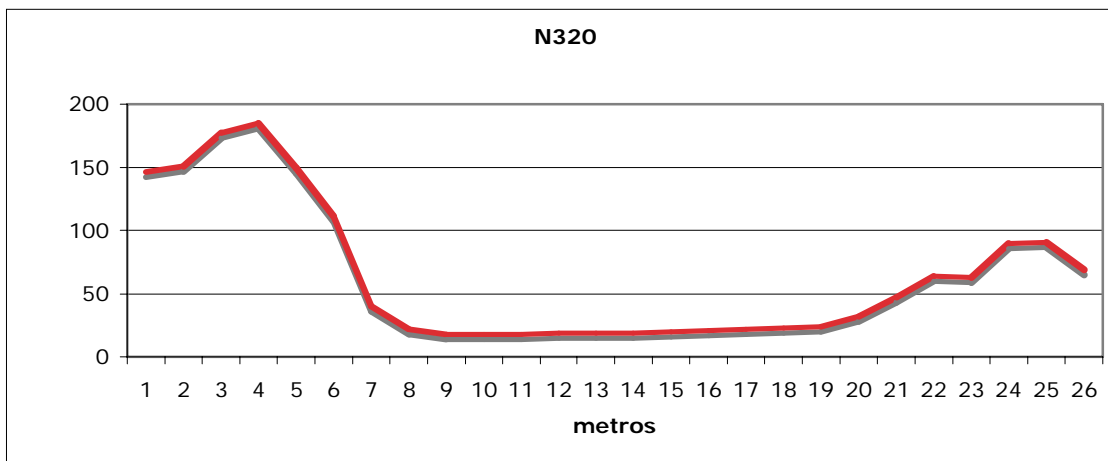
Esta línea atraviesa de oeste a este la retícula. Presenta 25 m de largo. Y se localiza por detrás del montículo sur. Se realizó para verificar una zona de altos valores de gradiente magnéticos que se encontraban en la mitad sureste. Se puede observar que la línea eléctrica corresponde bien con el estudio magnético. Y se incrementa a partir del E 317 a E325 de 30 a 52 ohms.

Se pudo observar al realizar este estudio, un incremento de material constructivo disperso en superficie, lo cual contribuyó al aumento de la resistividad.



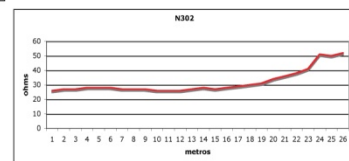
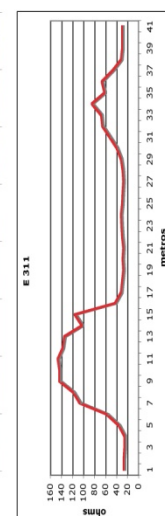
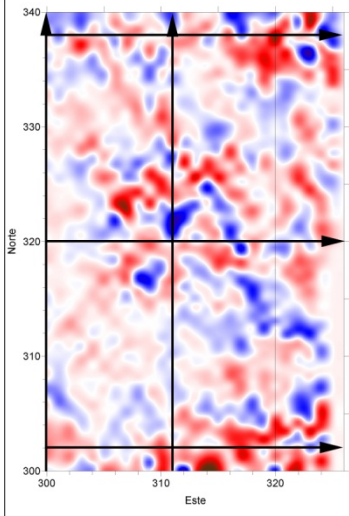
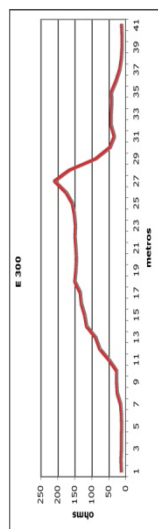
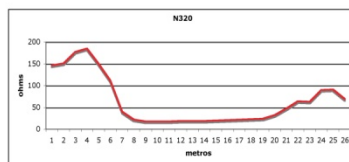
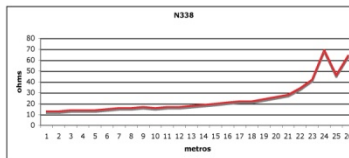
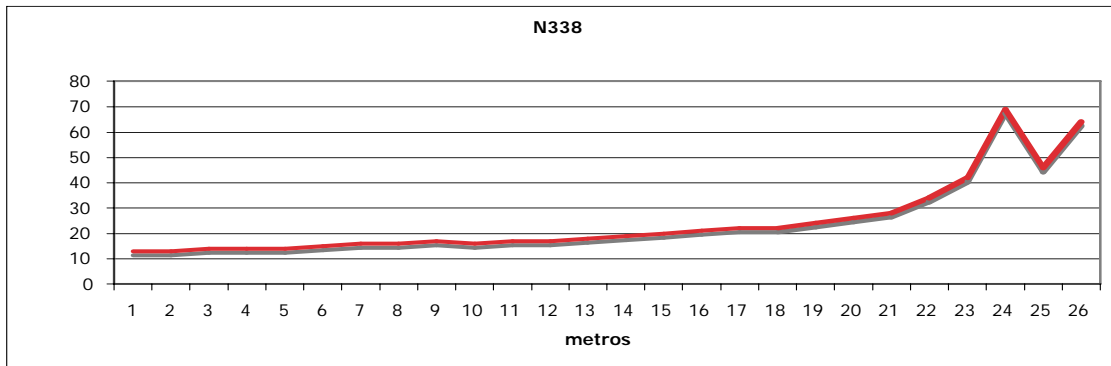
N320

Esta línea eléctrica atraviesa la parte media de la retícula de oeste a este. En ella se ven claramente el alza de resistividad de los montículos Oeste y Este. Y el bajo valor central del patio. Que no corresponde con la fuerte anomalía central de gradiente magnético.



N338

Esta línea atraviesa la parte norte de la retícula de oeste a este. Tiene una longitud de 25 mts. Pasa por detrás del montículo norte. Al igual que la línea N302 presenta altos valores eléctricos al final de la línea, que corresponden con un fuerte dipolo magnético.



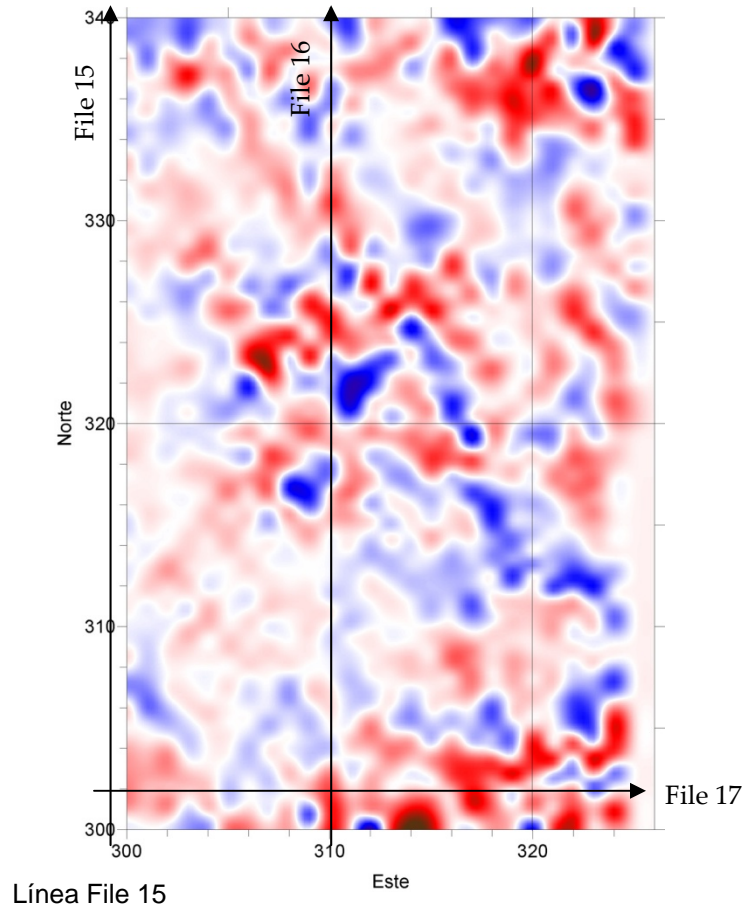
Al observar el comparativo se puede llegar a la conclusión de que el cuadrángulo que se observa claramente al centro del patio parece corresponder en realidad con los límites de las estructuras que lo rodean. Al parecer al ser el patio la parte baja, éste se ha rellenado con algún material con mayor susceptibilidad magnética que el resto. No obstante, es evidente la existencia de una anomalía al centro del patio.

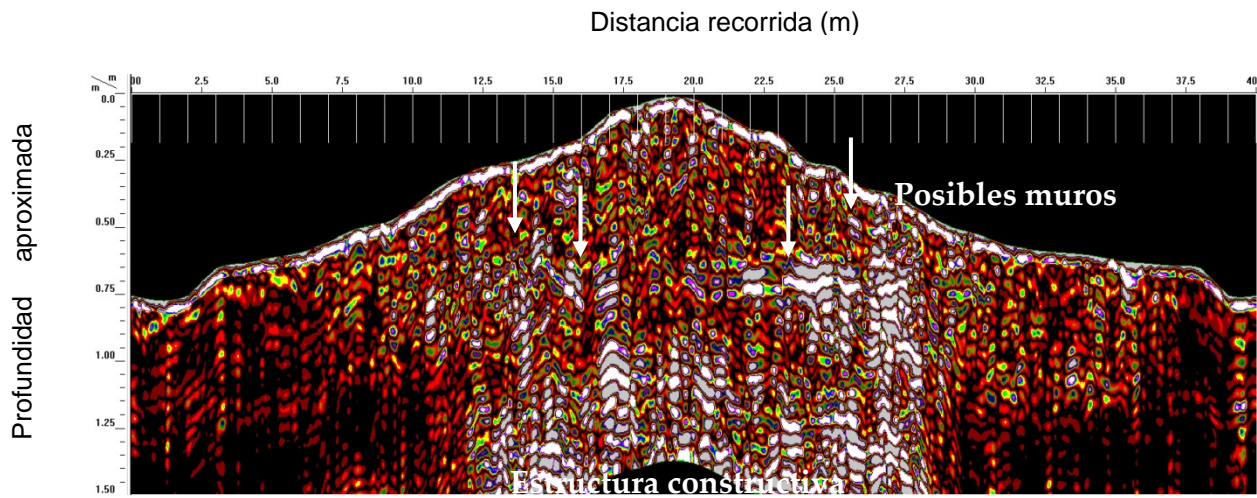
Por otra parte, en un principio se pensó que la zona de máximos magnéticos ubicada por detrás de los montículos norte y sur podría corresponder a una zona de

concentración cerámica. Sin embargo, como se observó en la parte posterior del Palacio, para que este fenómeno se repitiera en la unidad habitacional, este incremento debería corresponder con bajos valores eléctricos, los cuales no se ven reflejados en este estudio.

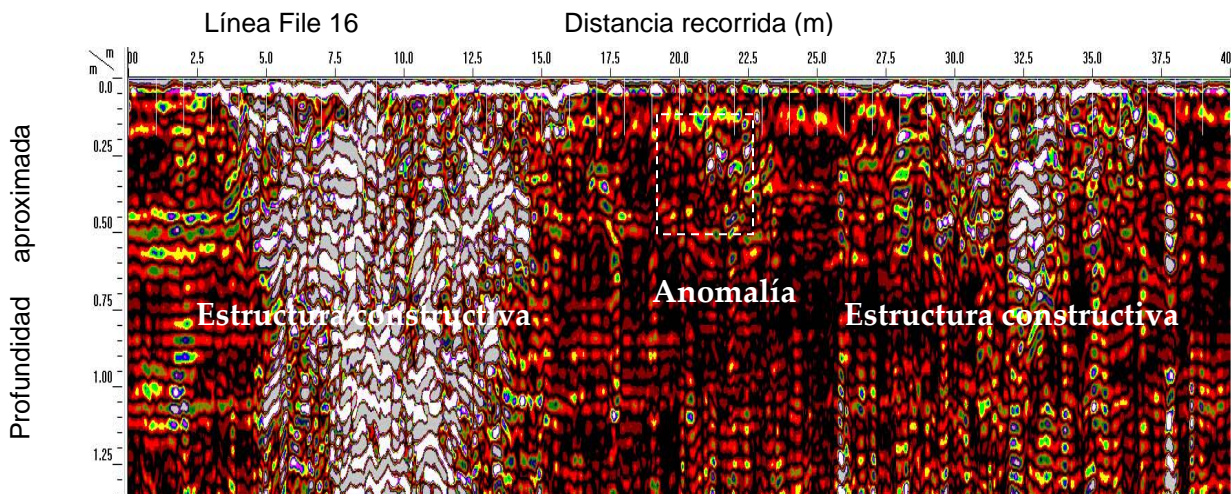
Estudio con georadar

En este espacio se levantaron 5 líneas de verificación, desafortunadamente el equipo presentó fallas y sólo fue posible analizar 3 líneas que registraron datos interpretables.

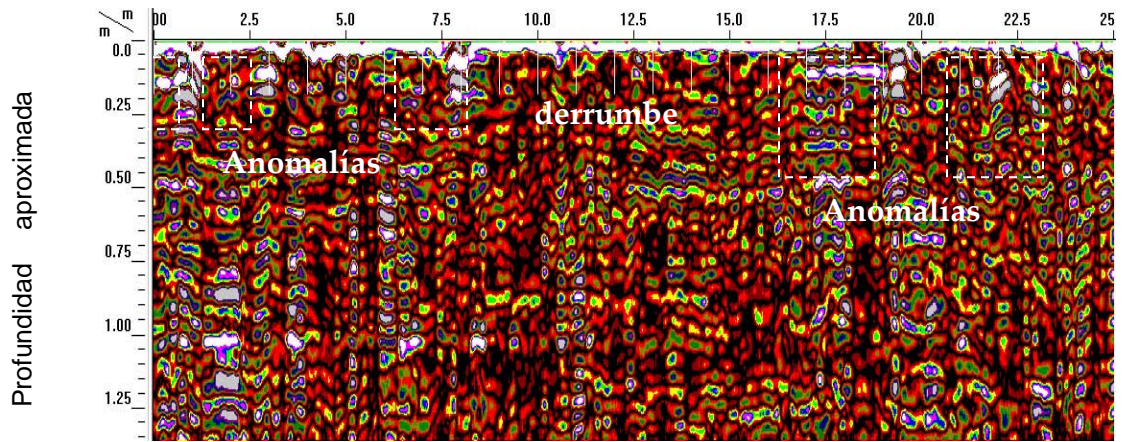




El radargrama de la línea File 15 representa una imagen aproximada del montículo situado al oeste de la unidad habitacional, la imagen será corregida una vez que se tengan los datos topográficos. En la imagen se observa en la parte central un núcleo con reflexiones fuertes producidas por una estructura constructiva de piedra. En la parte superficial y en los extremos se observan reflexiones menos intensas debidas al material de derrumbe. Uno de los objetivos principales del estudio con esta técnica era detectar posibles muros al interior y que no habían sido registrados con la resistividad y el gradiente magnético. El radargrama muestra reflexiones verticales que sugieren la presencia de muros divisorios en el interior de esta estructura.



Casi al centro de este espacio en E311 se levantó otra importante línea de georadar, File 16, para verificar una de las alteraciones magnéticas evidenciadas en el mapa y que posiblemente estarían relacionadas con un entierro o con materiales culturales. Los datos exhibieron en los extremos dos grupos de reflexiones fuertes provocadas por dos estructuras constructivas. Al centro entre 21 y 22.5 m del recorrido se registró una anomalía de media amplitud que esta relacionada con la alteración magnética, esta línea pasa a un lado de la excavación arqueológica (al oeste) y valdría la pena extenderla hacia esta posición para compararla directamente con el radargrama.



Al sur del sitio se levantó la línea File 17 para verificar una alteración magnética en la parte sureste. El radargrama registra datos con mucho ruido que después de filtrarlos dejan ver algunas reflexiones que podrían asociarse con materiales culturales situados de 17-19.5 y de 22 a 24 m del recorrido y que están relacionados con diversos objetos culturales aunque no son tan evidentes. En 1,3 8 metros del recorrido se registran otras reflexiones más pequeñas que también pueden ser provocadas por objetos culturales, sin embargo pueden ser originados por el derrumbe de la estructura.