

## El radar de penetración terrestre como una herramienta de geofísica somera, aplicado a la exploración arqueológica

Walter Antonio Flores García\*

*Recibido en junio de 2017; aceptado en diciembre de 2017*

### Abstract

In the case of remote sensing of archaeological sites, GPR is rapidly becoming the most versatile geophysical tool that can help reduce the need for archaeological excavations without a preamble rather than empirical knowledge. However, GPR data are not trivial and processing them properly or extracting the information needed to solve a problem is not always easy. Therefore, when using a qualitative interpretation, it becomes essential to integrate processes that give us results that contribute characteristics that can not be visible in an individual process, as is the case of time domain radargrams and their analysis trace (individually known as A-scans). In the present work, it is proposed to study the traces in the frequency domain and to identify contrasting and interesting details, taking into account the average behavior of the bandwidth in which the central frequency of the antenna used works.

Using the spectrograms that were used in this work, it was possible to know the behavior of a trace (previously selected) throughout its travel time, thanks to a sweep employed to the trace by means of the short transform of Fourier that was applied to it.

*Key words: GPR, archeology, processing, radargrams, traces.*

### Resumen

En el caso de la detección remota de sitios arqueológicos, el GPR (Radar de Penetración Terrestre) se está convirtiendo rápidamente en la herramienta geofísica más versátil que puede ayudar a reducir la necesidad de excavaciones arqueológicas sin un preámbulo más que el conocimiento empírico. Sin embargo, los datos de GPR no son triviales y procesarlos adecuadamente o extraer la información necesaria para resolver un problema no siempre es sencillo. Por lo que, al recurrir a una interpretación cualitativa, se vuelve imprescindible integrar procesos que nos arrojen resultados que aporten características que no puedan ser visibles en un proceso individual, como es el caso de los radargramas en el dominio del tiempo y su análisis traza por traza (de manera individual también conocidos

.....  
\* Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Circuito de la Investigación Científica, 04510 Ciudad de México, correo electrónico: walterf1908@gmail.com

como A-scans). En el presente trabajo se propone estudiar las trazas en el dominio de la frecuencia e identificar detalles contrastantes y de interés, tomando en cuenta el comportamiento promedio del ancho de banda en el que trabaja la frecuencia central de la antena empleada.

Con ayuda de los espectrogramas que se emplearon en este trabajo fue posible conocer el comportamiento de una traza (seleccionada previamente) en todo su tiempo de viaje, gracias a un barrido mediante la transformada corta de Fourier que se le aplicó.

*Palabras clave: GPR, arqueología, procesado, radargrama, traza.*

## Introducción

Mediante técnicas indirectas como los métodos geofísicos, es posible el estudio de zonas de interés, tal como la identificación y delimitación de estructuras enterradas que se localizan en estratos someros del subsuelo. La aplicación de la geofísica en zonas someras tales como la arqueología, nos permite estudiar distintas propiedades y parámetros físicos como la susceptibilidad magnética, la densidad, resistividad, entre otras, a través de contrastes de parámetros entre el medio encajonante y el objetivo a localizar.

Dado que los objetivos de la Arqueología son considerados de carácter somero, es decir, situado a profundidades variables desde escasos metros hasta algunas decenas de metros, las mediciones indirectas son muy utilizadas en este campo de estudio.

Una de las premisas que se mantiene en la prospección de sitios arqueológicos es, dentro de lo posible, la no invasión de zonas de patrimonio, dicha premisa continúa siendo uno de los pilares fundamentales de la exploración indirecta de la Arqueología.

Entre tanto, las investigaciones realizadas en México demuestran aplicaciones del georadar ampliamente documentadas como técnica no invasiva y de alta resolución, optimizando la gran versatilidad que lo caracteriza. Los campos de estudio de esta técnica electromagnética incluyen investigaciones arqueológicas (Barba *et al.* 2015, Argote 2008); estimación de parámetros petrofísicos (Centeno 2016), entre otras aplicaciones que primordialmente se emplean en la industria geotécnica e ingeniería civil.

En este trabajo se propone el análisis de señales en el dominio del tiempo y frecuencia que nos revele otros aspectos de las ondas como la magnitud de cambio de los componentes de la señal en el tiempo o el espacio, esto con la idea de obtener una mayor información en la interpretación, contextualizando la zona de estudio y su entorno geológico.

### Técnica de alta resolución somera: GPR

La técnica de GPR se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell, las cuales relacionan el campo eléctrico y el campo magnético con las fuentes que los producen a partir de una serie de parámetros constantes para cada medio, estas constantes describen el comportamiento de las ondas electromagnéticas en diferentes materiales.

La forma en que el campo electromagnético interactúa con el medio de propagación, determina el comportamiento de la señal emitida, presentando efectos de reflexión, transmisión, atenuación y dispersión (Elizondo 2005).

Dada la resolución a profundidad que este equipo maneja, es posible mapear objetos anómalos que emitan contrastes electromagnéticos. Cuando el trazado de rayos llega a una interface contrastante entre dos materiales con propiedades electromagnéticas distintas (en función de parámetros electromagnéticos gobernados por la conductividad eléctrica,  $\sigma$ , constante dieléctrica,  $\epsilon$ , y permeabilidad magnética,  $\mu$ ), parte de ellas se reflejan, se refractan y otra porción es transmitida al interior del subsuelo atenuándose con el inverso de la distancia a profundidad.

La capacidad de esta técnica para prospectar de forma somera, la convierte en una herramienta de gran interés para la investigación arqueológica, ya que se pueden planear estrategias de excavación a partir de la información recuperada. Como consecuencia de esto, el GPR ha sido una de las técnicas con mayor crecimiento en la investigación arqueológica durante los últimos 25 años. El producto resultante de un levantamiento será una serie de planos horizontales a distintas profundidades llamados cortes de profundidad, similares a los obtenidos en una tomografía médica (Barba *et al.* 2015). En la exploración de radar, es posible contar con antenas bajo un ancho de frecuencias proporcional al tipo de estudio y objetivo al que se desea aplicar. En la actualidad se cuentan con dos tipos de antenas, monoestáticas y biestáticas (Figura 1). Mediante la primera de éstas pueden realizarse las siguientes formas de adquisición:

- Adquisición de datos mediante perfiles 2D
- Adquisiciones puntuales
- Adquisición de datos por sondeos

Con las antenas biestáticas, además de los métodos anteriores, también se pueden aplicar:

- Técnicas del punto medio común (CMP)
- Transiluminación o tomografía
- Sondeos en pozos

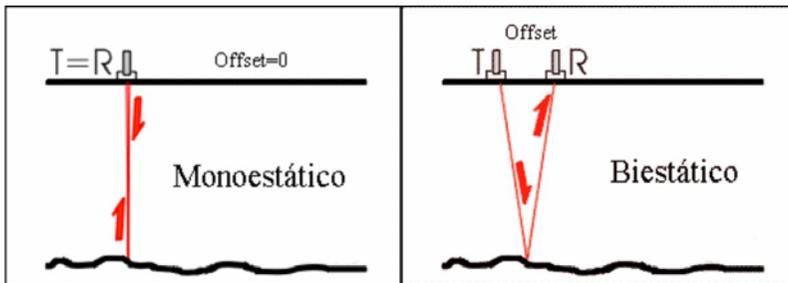
Las metodologías que se utilizaron en este trabajo fue la de adquisición mediante perfiles 2D y el punto común medio (CMP), la segunda de ellas fue

utilizada para estimar la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en la zona de estudio.

Con este parámetro fue posible establecer la profundidad de los perfiles 2D, igualmente realizados en la zona de estudio.

El concepto de sondeos de velocidades de CMP es equivalente al concepto de un CMP gather en la adquisición sísmica donde el objetivo es obtener numerosas reflexiones de un mismo punto de atribución. Los sondeos CMP se usan para obtener una estimación de la velocidad de la señal del radar en función de la profundidad en el suelo, variando la distancia de la antena en un lugar fijo y midiendo el cambio del tiempo de recorrido bidireccional a las reflexiones (Annan 2003).

Los datos se recogen en múltiples desplazamientos, ya que las antenas se mueven simétricamente a partir de la posición de desplazamiento cero. La calidad de los datos de salida mejora significativamente con un gran número de desplazamientos y muestras. Sin embargo, al utilizar una gran cantidad de desplazamientos y apilamiento, la adquisición de datos puede llevar mucho tiempo. (Russian 2006).

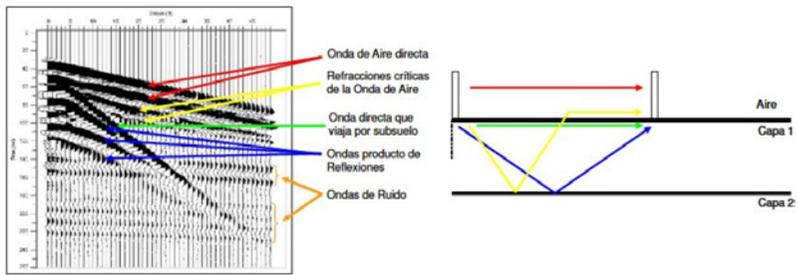


**Figura 1.** Esquema representativo de un levantamiento monoestático y biestático. Modificado de Pérez (2007), Luca Bardello (2003).

Los tiempos de llegada de la reflexión deben tener una dependencia hiperbólica (de primer orden) en la separación de la antena (Annan 2003).

Es posible obtener una gran cantidad de apilaciones de CMP a una sola traza, dando como resultado una sección apilada corregida con una relación señal-ruido significativamente mejorada (véase Figura 2). El método de análisis de velocidad utilizado comúnmente se basa en calcular el espectro de velocidad.

Las velocidades de apilamiento se interpretan a partir de los espectros de velocidad eligiendo la función de dicho parámetro que reproduzca la mayor coherencia en tiempos con amplitudes de eventos significativos (Manual del usuario, RADAN 6.5 GSSI 2007).



**Figura 2.** Esquema representativo de un levantamiento monoestático y biestático. Modificado de Pérez (2007), Luca Bardello (2003).

### Representaciones Tiempo-Frecuencia

Debido a su sencillez y similitud en cuanto a concepto y estrategia de cálculo con los métodos espectrales clásicos, las representaciones Tiempo-Frecuencia lineales son ampliamente utilizadas en el análisis de señales geofísicas (Elizondo, 2005).

Entre las principales exponentes de este tipo de representaciones se encuentran la Transformada Corta de Fourier, la Transformada de Gabor y la Transformada Wavelet. La contribución de este trabajo se centrará en la Transformada Corta de Fourier.

### Transformada de Fourier

La transformada de Fourier puede ser vista como un prisma matemático que descompone una función en las frecuencias que le forman, de una manera análoga sucede en la naturaleza mediante un prisma de cristal con la luz que lo atraviesa.

Sin embargo, el análisis de Fourier presenta un gran problema al pretender determinar el instante en que ocurre un evento en particular, por lo que se hizo necesario el mejoramiento en los procesos que involucran a la investigación de señales en las distintas disciplinas de la ciencia e ingeniería.

En la implementación de estas actualizaciones a los estudios previos realizados por Fourier, aparece en 1946, Denis Gabor, quien adapta la transformada de Fourier para permitir el análisis en el tiempo, aplicando la misma a pequeñas secciones de la señal; desarrollando una técnica conocida como el ventaneado (Burke 1997). Este procedimiento no resuelve todas las dificultades por lo que en algunas ocasiones se tiene la necesidad de efectuar análisis más detallado, debido a que la misma ventana se aplica para todas las frecuencias (Cortés *et al.* 2007).

*Transformada corta de Fourier (STFT)*

La forma de seccionar la señal se realiza mediante una función  $h(t)$  tiempo-ventana que será desplazada, cuyo ancho corresponde a la longitud de cada segmentación de la señal. Con la función ventana, delimitamos la señal alrededor de un instante de tiempo  $\tau$  y calculamos su transformada de Fourier, luego trasladamos la función ventana hasta que no se superponga con la anterior, cubriendo una nueva porción de la señal a la que volvemos a calcular su transformada de Fourier. Este proceso es reiterado hasta que se ha cubierto la totalidad de la señal y dicho proceso puede representarse de la siguiente manera:

$$STFT(t, \omega) \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)h^*(\tau - t)e^{-i\omega\tau} dt \quad (1)$$

Donde  $f(t)$  representa a una señal de tiempo continuo. Si consideramos a  $h(t)$  como una función ventana de valores sólo reales, no complejos, de tal manera que  $h(-t) = h^*(t)$ , entonces nos queda:

$$STFT(t, \xi) \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)h(t - \tau)e^{-i\xi\tau} dt \quad (2)$$

La expresión anterior calcula el producto interno entre la señal y la función tiempo-ventana desplazada y calculada (Acevedo 2009).

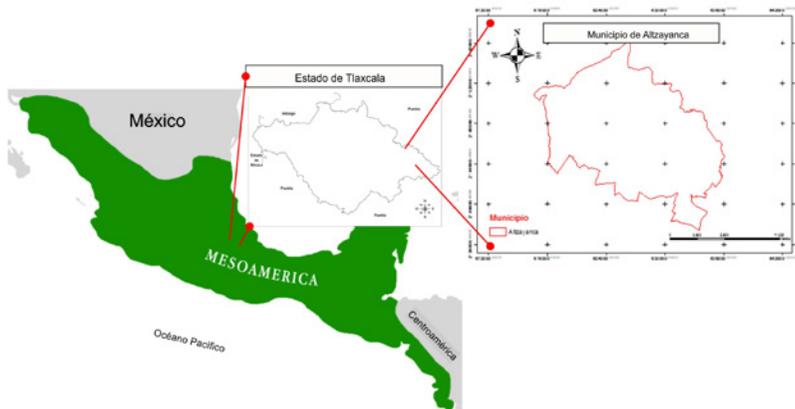
De esta forma, se logra una representación tiempo-frecuencia de la señal, que permite conocer no sólo el valor de sus componentes en frecuencia, sino también su ubicación temporal. Sin embargo, el inconveniente surge dado que una vez que se escoge un determinado tamaño para la ventana de tiempo, dicha ventana es la misma para todas las frecuencias. Muchas señales requieren un acercamiento más flexible, de modo tal que sea posible variar el tamaño de la ventana para determinar con mayor precisión el tiempo o la frecuencia, a esto hace mención el principio de incertidumbre de Heisenberg.

**Localización de la zona de trabajo**

En el área de estudio se han encontrado evidencias que corresponden a zonas arqueológicas, los rasgos que fueron posibles de observar en campo se dirigen a un montículo en el que al centro se localiza un túnel de saqueo, localizado en la parte central de un polígono ocupado para el uso agrícola, además de esto también se identificaron en la zona, muestras físicas como puntas de flecha de obsidiana, bloques de piedra tallados por el hombre y restos de cerámica.

El estado de Tlaxcala es de los menos poblados del país, cuenta con 1,170 mil habitantes y una tasa de crecimiento promedio anual de 1.8, lo cual corresponde con la media nacional. El municipio de Atzayanca cuenta con un total de 15,935 habitantes, mientras que en Huamantla hay 84,979 habitantes.

El municipio colinda al norte y al este con el estado de Puebla; al sur con Huamantla y Cuapiaxtla; y al oeste con Huamantla y Terrenate. Una de las localidades con mayor hallazgo de restos arqueológicos, corresponde a la localidad de Xalasco que se encuentra a 18 kilómetros de Huamantla, siendo un sitio con hallazgos de restos arqueológicos los cuales tuvieron un periodo de ocupación entre el 100 y el 700 D.C.



**Figura 3.** Esquema representativo de un levantamiento monoestático y biestático. Modificado de Pérez (2007), Luca Bardello (2003).

Según los elementos que se han encontrado en diversas excavaciones, esta zona indica una relación económica e ideológica con Teotihuacan, como figurillas, alineación arquitectónica similar al patrón teotihuacano, obsidiana verde de la Sierra de las Navajas, cerámica utilitaria y ritual importada de la gran urbe y contactos con el sur de Puebla.

Las rutas de acceso principales son la carretera 136 en su tramo Apizaco-Huamantla y la autopista Puebla-Perote, además de caminos alternos y terracerías.

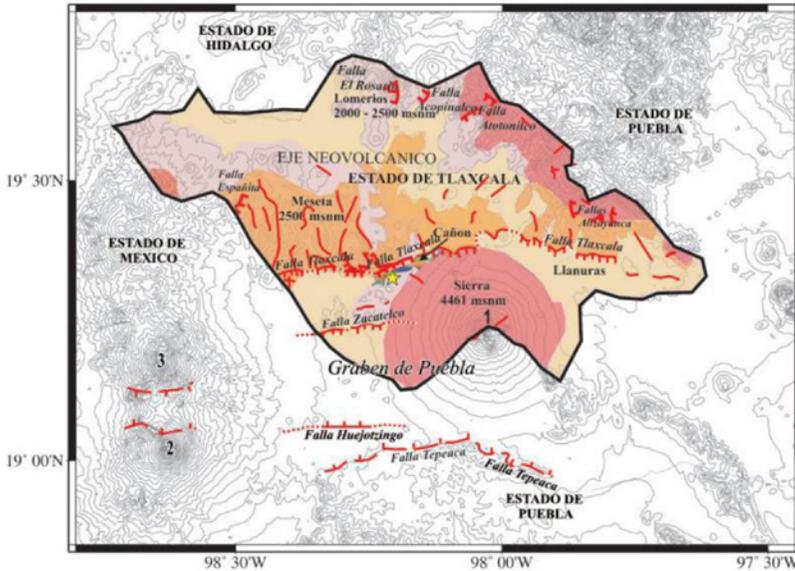
**Marco geológico**

El estado de Tlaxcala se ubica en la parte central de la República Mexicana, y se localiza dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Esta región describe un vulcanismo que está conformado principalmente de estratovolcanes, calderas y domos de composición andesítica (Mooser *et al.* 1996).

El estratovolcán, La Malinche se ubica en el límite entre la FVTM y la sierra Madre del Sur, al norte y noroeste de este gran estratovolcán, se observa un campo

volcánico reciente que rodea la zona urbana del municipio de Apizaco, compuesto de conos monogenéticos de composición basáltico-andesítica, emitiendo corrientes moderadas de lava, cubiendo parcialmente a rocas correspondientes al Plioceno, al noreste se encuentra la sierra de Tlaxco, donde sus elementos principales son un conjunto de volcanes erosionados alineados en la dirección NW a SE, algunos de estos muestran grandes cráteres y calderas cuyas emisiones lávicas y piroclásticas contribuyen al relleno de esta región (Angulo, 2013). Debido a estar en las proximidades del volcán La Malinche, la geología mencionada forma parte importante de la zona de trabajo.

El área de trabajo se encuentra dominada por rocas volcánicas del tipo andesitas y tobas andesíticas, en especial arenas y gravas formadas con este tipo de roca originadas en el Pleistoceno.



**Figura 4.** Mapa geomorfológico y tectónico del estado de Tlaxcala. La estrella indica la capital y los números representan a los volcanes La Malinche, Popocatepetl e Iztaccihuatl de manera consecutiva. Las líneas rojas son las fallas y lineamientos. (Lermo-Samaniego, Bernal-Esquía, 2006).

La morfología presente en la zona de estudio se debe a la actividad volcánica y a los procesos exógenos. Las topofomas que muestra la región de manera general, abarca: sierras, lomeríos, llanuras y mesetas. En los extremos norte y sur, se localizan los volcanes Huintetepetl y La Malinche (Martínez *et al.* 2007).

En la región se encuentran elementos como tobas, abanicos volcánicos, depósitos lacustres antiguos y modernos, así como también, depósitos aluviales.

Los depósitos tanto aluviales como lacustres se ubican en valles y planicies con elevaciones aproximadas a los 2,200 msnm (Angulo 2013).

Los trabajos realizados en campo consistieron en dos modalidades de adquisición de GPR, esto es, un perfil de CMP con la finalidad de identificar las velocidades de onda electromagnética en el subsuelo, la Figura 6 muestra el modelo adquirido en campo, su procesamiento y su interpretación de dichas velocidades obtenidas en un punto de atribución.

Posteriormente, se realizaron cuatro levantamientos 2D con antena de 270 MHz. El levantamiento con la técnica de CMP se adquirió con antena de 100 Mhz con 50 trazas m-1, cada traza contiene 512 muestras en una longitud de 15 metros. Mientras que los perfiles 2D se realizaron con longitudes de 32.4 m, 42.40 m, 14.64 m y 31.28 m con una resolución horizontal de 2 cm en cada uno (véase Figura 7).

En la Figura 5 se muestra un esquema representativo del flujo de trabajo empleado en el procesado de los radargramas adquiridos en Altzayanca, Tlaxcala.

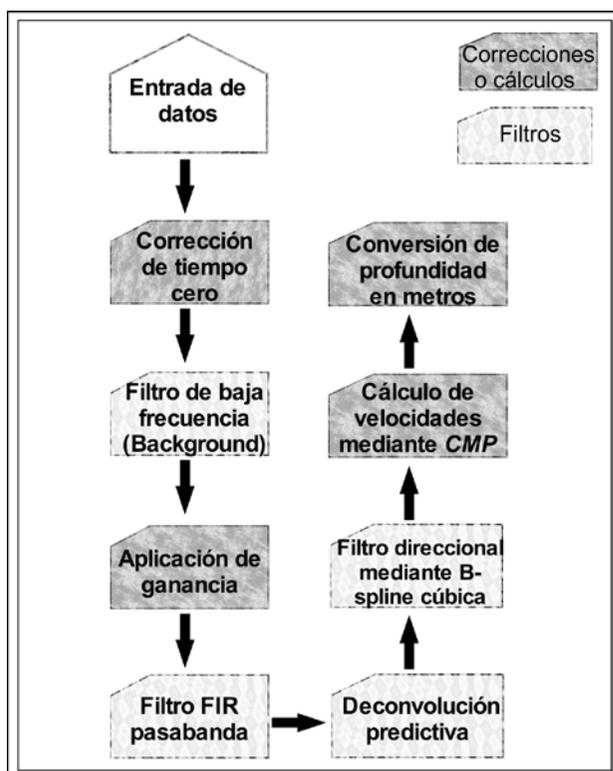
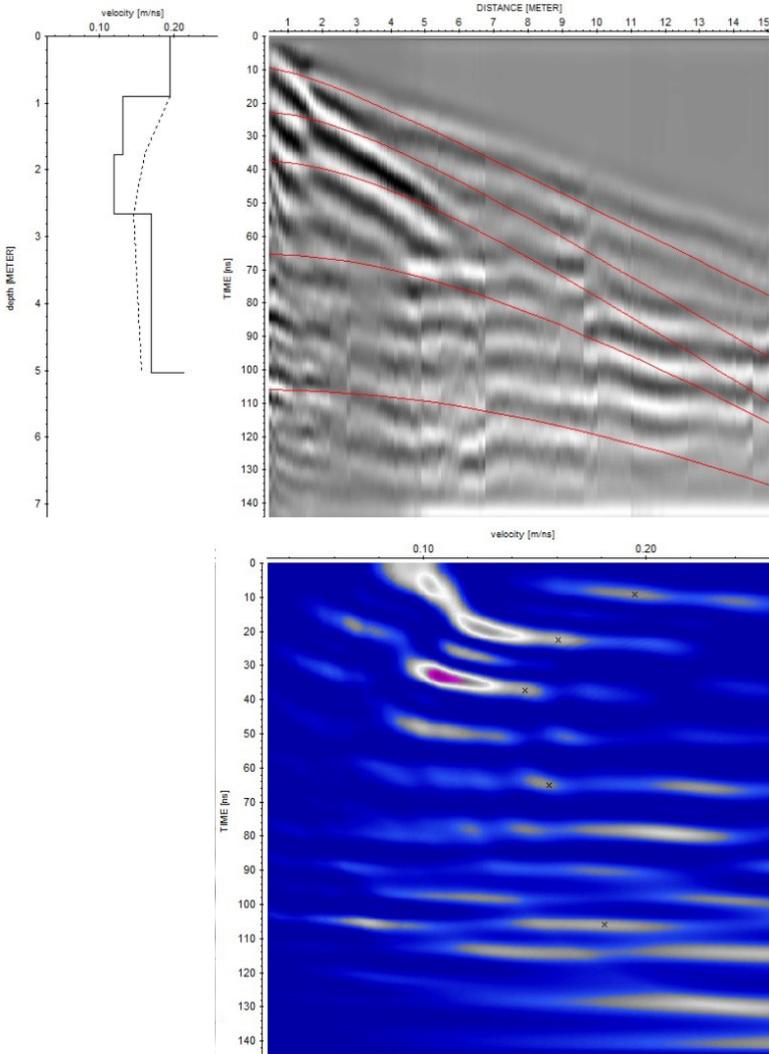


Figura 5. Diagrama de flujo en el procesado de radargramas.

Con estos parámetros fue posible estudiar la variación de las ondas emitidas por el GPR, esperando identificar rasgos someros que señalan erosiones antropogénicas en las primeras capas del terreno como también reflectores que se asocian a materiales cerámicos o de construcción por antepasados en dicha área de estudio.



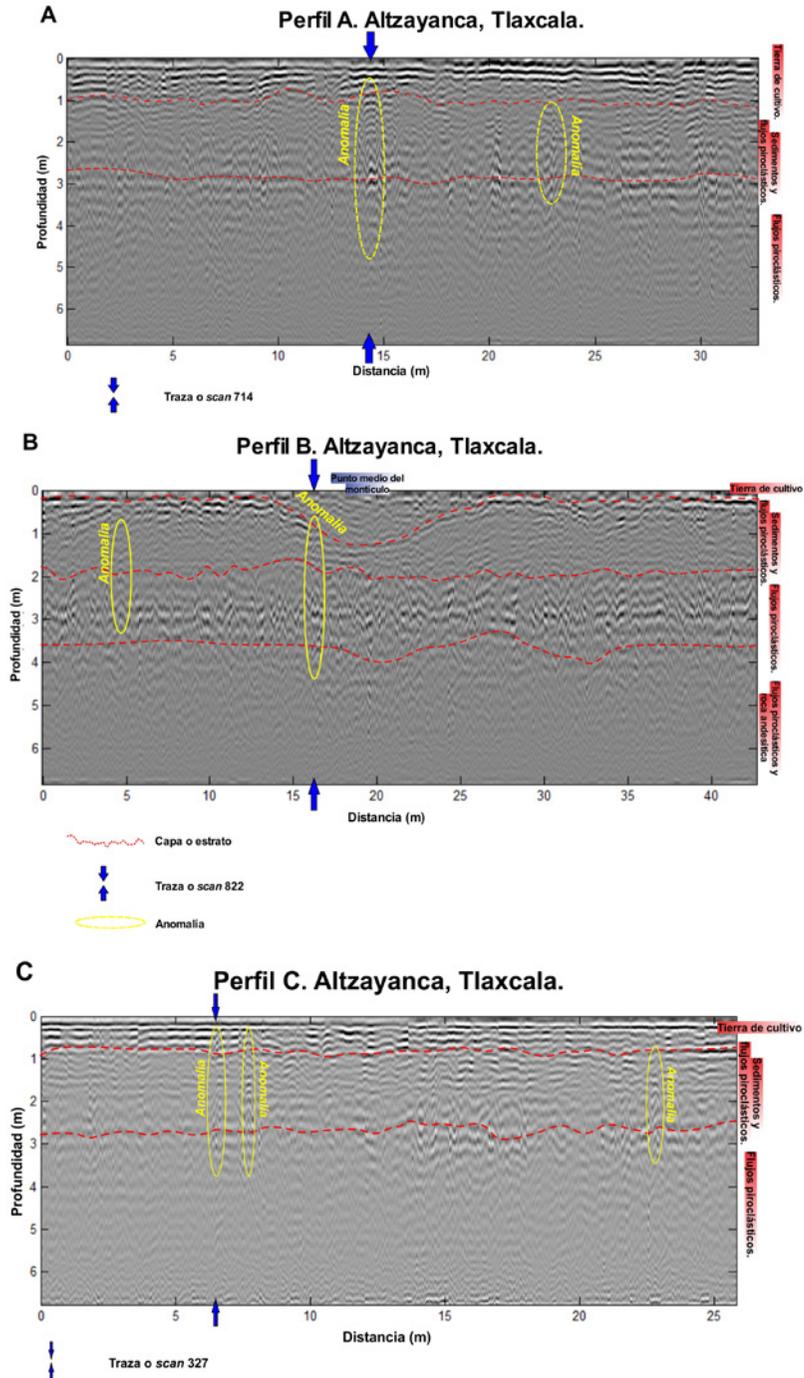
**Figura 6.** Datos y procesamiento de CMP que indican la velocidad en m ns-1 de lado izquierdo, los datos adquiridos en la parte central de la imagen y los datos procesados en la parte derecha de la imagen.

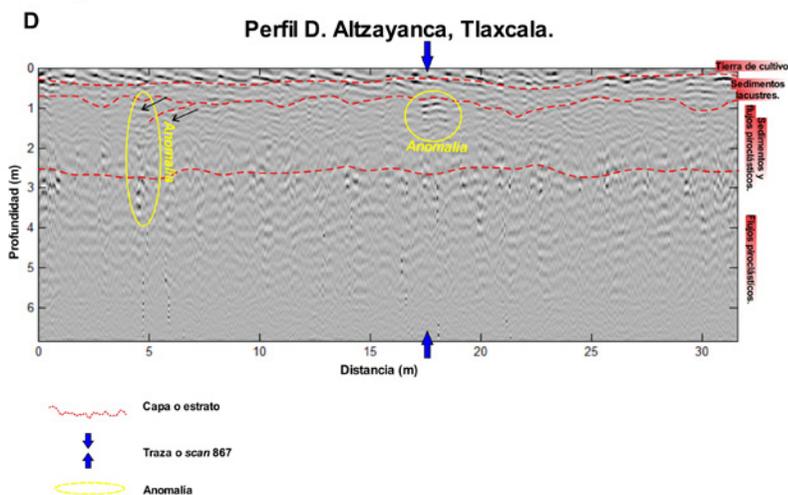
A continuación, se muestran los perfiles de GPR y su localización de levantamiento, los cuales se realizaron de manera tangente al montículo central donde se esperaba encontrar anomalías antropogénicas como anteriormente se mencionó.



**Figura 7.** Localización y trayectorias de los perfiles 2D A, B, C y D de GPR en el montículo.

Por último se realizaron análisis mediante la respuesta de tiempo-frecuencia con el fin de observar si la frecuencia central de la antena responde dentro de su ancho de banda nominal y a su vez, como ésta varía a través del tiempo de viaje en zonas con contrastantes ocasionadas principalmente por contactos geológicos, fuentes antropogénicas relacionadas con objetos de construcciones prehispánicas, zonas con material erosionado por el hombre durante la prehistoria, etc.





**Figura 8.** Perfiles 2D (A, B, C y D) de GPR correlacionados con el perfil de CMP. Realizados en un montículo de restos arqueológicos en una zona de cultivo de Tlaxcala, adquiridos con antena de 270 MHz. Se identificaron con líneas punteadas en rojo los límites geológicos, los círculos amarillos representan algunas de las anomalías más representativas de los radargramas, mientras que las flechas en azul representan a las trazas que se analizaron en los espectrogramas.

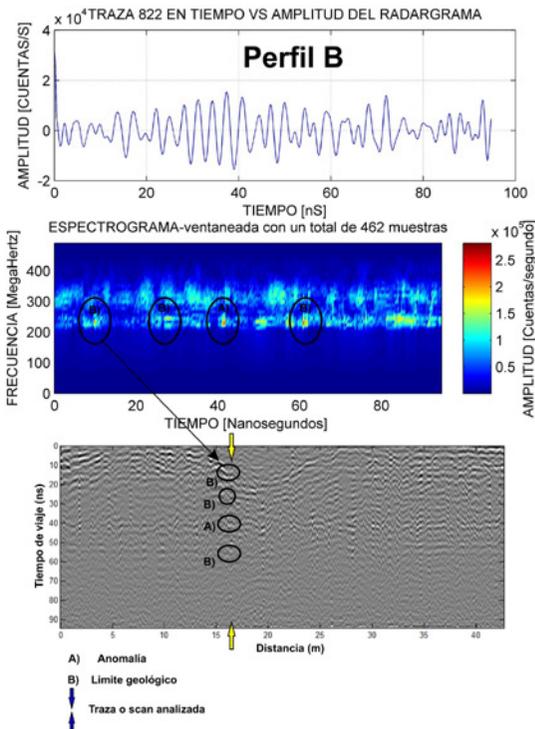
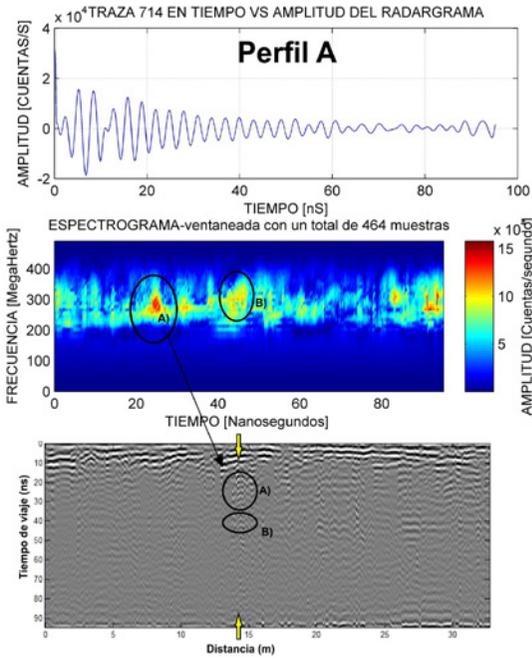
### Conclusiones

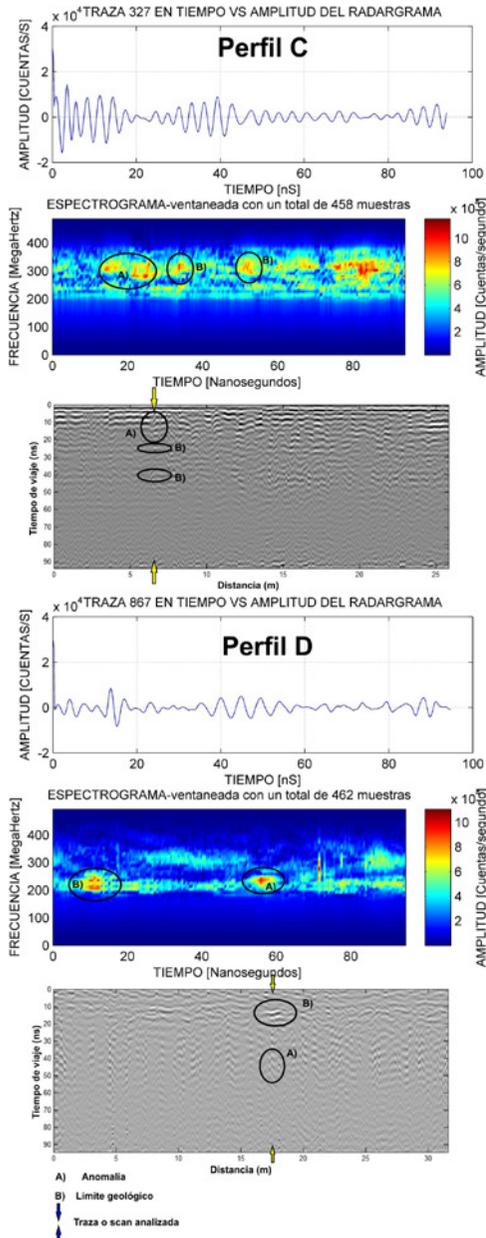
Con el análisis desarrollado en este trabajo fue posible identificar zonas en las que existen contrastes de manera puntual, entre ellas las de carácter geológico (como es el caso de contactos o límites geológicos) y también anomalías relacionadas con objetos o artefactos que se diferencian con el medio, las cuales son afines a la exploración arqueológica.

Una de las aportaciones que se obtuvieron en este trabajo fue la de analizar las trazas individuales de GPR (A-scan) en el dominio de la frecuencia, esto con el afán de observar grandes amplitudes que nos indicaran cambios de impedancia que en el tiempo/espacio no son posibles de identificar.

De igual manera el análisis tiempo frecuencia nos permitió observar en que ancho de banda trabajó la antena, tomando como referencia su frecuencia central. En la región de frecuencia se observaron que los rangos de información principal están entre los 170 Mhz y los 400 Mhz.

Una de las alternativas que se pueden aplicar al análisis aquí presentado, es realizar pruebas mediante otros exponentes del estudio tiempo-frecuencia como la transformada de Gabor, la transformada Wigner Ville y la transformada ondicular donde este último proporcionará el espectro de potencia en bandas de longitudes de onda, pero para toda la serie de datos, suavizando cualquier característica de longitud de onda local.





**Figura 9.** Análisis espectral de 4 trazas representativas de los perfiles A, B, C y D obtenido por medio de la transformada corta de Fourier. En ella se pueden ver los términos de interferencia identificados con círculos negros. Las figuras se dividieron por perfiles, la primera ventana representa a la traza individual en tiempo (A-scan) vs amplitud, la segunda ventana es dicha traza en tiempo-frecuencia-amplitud y finalmente la tercera ventana indica el radargrama de origen.

Con el flujo de procesado empleado fue posible obtener imágenes resolutiveas que permitieron visualizar rasgos en los primeros 3.5 metros de profundidad donde principalmente se observaban las primera capas de sedimento lacustre como también la tierra utilizada para el cultivo. Cabe mencionar que la zona de estudio implicaba un difícil acople de la antena con el terreno debido a los surcos de cultivo, por lo que se recomienda mantener una buena fricción de dicho módulo con el terreno para evitar entrada de aire en los registros.

### Agradecimientos

Agradezco de manera especial el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por las facilidades otorgadas, el apoyo en campo, así como el conocimiento y experiencia geofísica de la zona compartido en este trabajo, puntualmente a los ingenieros: Sandra Estévez Robles, Valeria Peña Gaspar, Juan Pablo Aguirre Díaz, Manuel Ortiz Osio y Alejandro García Serrano; a la doctora Denisse Argote por el contexto y experiencia arqueológica del lugar.

### Referencias

- Acevedo L., 2009, *Computación paralela de la Transformada Wavelet; aplicaciones de la Transformada Wavelet al álgebra lineal numérica*, Departamento de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Valencia, pp. 14-15, 127.
- Angulo J., 2013, *Microzonificación y escenarios sísmicos para la ciudad de Apizaco, Tlaxcala*, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 30-35, 105.
- Annan A. P., 2003, "Ground Penetrating Radar Applications Principles", *Procedures, Sensors & Software Inc.*, pp. 169, 278.
- Barba L.; Muñoz I. y Blancas J., 2015, *El uso de técnicas geofísicas para determinar sistemas constructivos y materiales presentes en los túmulos del período formativo en el valle de Apa, Arica, Chile*, Departamento de Antropología, Universidad de Tarapacá, Arica, Chile, p. 156.
- Burke B., 1997, "The world according to wavelets", *American Scientist*, vol. 85, no. 1, january-february, 1997, pp. 85-86.
- Centeno F., 2016, *Estimación de parámetros petrofísicos de materiales granulares, aplicando una inversión de amplitud, a partir de señales EM de alta frecuencia*, pp. 160, 261.
- Cortés J.; Medina F. y Chaves J., 2007, "Del análisis de Fourier a las wavelets análisis de Fourier", *Scientia et Technica*, año XIII, no. 34, mayo de 2007, Universidad Tecnológica de Pereira, ISSN 0122-1701, pp. 151-152, 156.
- Elizondo M., 2005, *Análisis de señales de GPR mediante la transformada de Wigner-Ville aplicado a un caso de ingeniería civil*, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 44, 115.

- Geophysical Survey Systems, Inc. 2007, *Radan 6.5 User's Manual*, Salem, New Hampshire 03079. 139, pp. 16,72.
- Martínez M.; Gutiérrez C.; Reyes J.; Mata I.; Sánchez L. y Ortiz G., 2007, *Estudio Hidrológico de la Porción Alfa del Acuífero Alto Atoyac Apizaco, Tlaxcala*, Instituto Mexicano de Tecnología y del Agua.
- Pérez R., 2007, *Uso del georadar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera*, Departamento de Ciencias de la Tierra, Coordinación de Ingeniería Geofísica, Universidad Simón Bolívar, pp. 8, 96.
- Russian C., 2006, *Correlación de facies y caracterización de fracturas utilizando GPR en el acuífero Arbuckle-Simpson*, Oklahoma, pp. 40, 81.
- Samaniego J. y Bernal E., 2006, "Zonificación sísmica del Estado de Tlaxcala, México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, número especial de Geología Urbana, tomo LVIII, núm. 2, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 215-221.