

Portada Externa de Tesis

<p>Autor</p> <p>Nombre de la tesis</p> <p>2012</p>	 <p>Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería</p> <p>Criterio de interpretación estratigráfica en trazas de muestreo con el método geofísico del GPR (Ground Penetrating Radar) por medio de análisis de imágenes.</p> <p>Tesis Que como parte de los requisitos para obtener el diploma/grado de (o la)</p> <p>Licenciatura en Ingeniería Civil</p> <p>Presenta Oscar Ávila Vargas</p> <p>Lugar y fecha</p>
--	--



Portada Interna de Tesis

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en ingeniería Civil

CRITERIO DE INTERPRETACIÓN ESTRATIGRÁFICA EN TRAZAS DE MUESTREO CON EL MÉTODO GEOFÍSICO DEL GPR (GROUND PENETRATING RADAR) POR MEDIO DE ANÁLISIS DE IMÁGENES.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el diploma/grado de (o la)

Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Oscar Ávila Vargas

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

SINODALES

Nombre del Sinodal
Presidente

Firma

Nombre del Sinodal
Secretario

Firma

Nombre del Sinodal
Vocal

Firma

Nombre del Sinodal
Suplente

Firma

Nombre del Sinodal
Suplente

Firma

Nombre y Firma
Director de la Facultad

Nombre y Firma
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Fecha
México

RESUMEN

El Radar de Penetración Terrestre (GPR, por sus siglas en inglés) es un método geofísico, que registra la señal de propagación de ondas electromagnéticas, de donde es posible obtener la distribución de estructuras en el subsuelo a partir de las propiedades de transmisión de dichas señales. Este método presenta la ventaja de no ser invasivo, por lo que es muy útil en la detección de objetos someros; ha sido utilizado en la geofísica, en aplicaciones ambientales, en la ingeniería civil y en la arqueología. El sistema del radar consiste en un generador de señal, antenas transmisoras y receptoras, y un receptor. Mientras la antena se mueve sobre la superficie, la señal recibida se presenta como una función del tiempo de viaje, en forma de radargrama. El radargrama es la representación gráfica de las señales electromagnéticas tal que, el eje horizontal de la sección representa la posición del sistema GPR sobre la superficie terrestre y el eje vertical es el tiempo de viaje de la onda electromagnética. En general el procesamiento de señales aplicado al GPR es interpretar el radargrama como una imagen del subsuelo que permita clasificar las reflexiones de la onda electromagnética generadas por la existencia de estructuras geológicas en el mismo. Debido a las analogías entre las ondas electromagnéticas y las sísmicas, actualmente los datos de GPR se pre-procesan con técnicas que fueron desarrolladas para el procesamiento de datos de reflexión sísmica. Debido a que el GPR, no contaba con un manual y/o guía de uso, para esta investigación fue necesario realizar pruebas de calibración variando los parámetros de adquisición antes de comenzar con el muestreo presentado, adicionalmente se efectuaron pruebas de laboratorio y gravimetría con la finalidad de contar con más información de ayuda para establecer un criterio.

(Palabras clave: Radar de penetración terrestre, ondas electromagnéticas, perfiles de suelo, método no invasivo)

**A los alumnos de los posgrados de la
Universidad Autónoma de Querétaro**

Las dedicatorias son opcionales

AGRADECIMIENTOS

En la preparación de este manual se recogieron las opiniones desinteresadas de los Directores y Coordinadores de Investigación y Posgrado de todas las Facultades de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como de investigadores, académicos y personal administrativo de la misma.

En particular, la Dirección de Servicios Escolares y la Dirección de Investigación y Posgrado, agradecen al Mtro. Francisco Perusquía Monroy el haber revisado el texto y por sus atinados comentarios para mejorarlo.

INDICE

	Página
Resumen	i
Índice	iii
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION DE LITERATURA	6
Ecuaciones de Maxwell	7
Naturaleza de onda en campos EM	8
Propiedades de las ondas	11
Reflexión, refracción y transmisión en interfaces	13
GPR fuente cerca de un interfaz	15
Agua y GPR	16
Propiedades de las mezclas de los materiales	17
Metodología del sondeo GPR	20
Compensación de estudios comunes de reflexión	21
Geología del Valle de Querétaro	23
III. METODOLOGIA	32
Materiales	32
Método	33
Guía rápida de funcionamiento del GPR	33
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	40
V. CONCLUSIONES	49
LITERATURA CITADA	51
ANEXO 1	55

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Ejemplos de Materiales Compuestos	18

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Las ecuaciones de Maxwell describen auto perpetúas secuencias de campo que se desarrollan en el espacio y el tiempo. Una carga en movimiento o J corriente crea un campo magnético B, que induce un campo eléctrico E, que a su vez provoca carga eléctrica para desplazarse, y así sucesivamente.	8
Figura 2. Las direcciones del campo eléctrico E, el campo magnético B, y la propagación de k, son ortogonales, u, w y k son vectores unitarios ortogonales....	9
Figura 3. Campos electromagnéticos de baja pérdida en condiciones de movimiento a través del espacio a una velocidad finita y disminución de la amplitud de cómo se disipa la energía. Los tiempos secuencia t_1, t_2 y t_3 indican cómo se mueve el campo a través del espacio.....	10
Figura 4. Variación de velocidad y atenuación en un medio simple con propiedades físicas no dispersivas, con c y Z_0 la velocidad y la impedancia de espacio libre (es decir, un vacío).	11
Figura 5. Ondas EM son vectores de onda transversal. Para cualquier dirección de propagación dado, existen dos campos independientes. Para las interfaces de plano, es tradicional discutir dos ondas, una con la campo eléctrico en el plano de interfaz, denominada transversal eléctrico (TE), y uno con el vector del campo magnético en el plano de la interfaz, denominada transversal magnética (TM)...	14
Figura 6. Frentes de onda que se extienden a partir de una fuente localizada. En (a), la fuente se encuentra por encima del suelo, con las líneas de puntos que indica la señal reflejada. En (b), la fuente se encuentra en la interfase aire-tierra, con las líneas punteadas que indican las ondas refractadas. Las líneas oscilantes indican ondas evanescentes.....	15
Figura 7. Ejemplo de una medición de la transiluminación de la perforación.....	21
Figura 8. Un área de estudio generado por una serie de líneas de prueba. La respuesta del suelo se mide en puntos discretos a lo largo de la línea del sondeo. Si bien la práctica de campo puede ser más errática, los datos de este formato	

son la clave para la mayoría de los sistemas de datos de procesamiento y visualización.....	21
Figura 9. Representación esquemática común de la compensación de un solo perfil a lo largo de una línea que muestra los principales parámetros de especificación de la prueba.	22
Figura 10. (a) Columna estratigráfica reportada para el valle de Querétaro por Carreón-Freyre et al. (2005). (b) simplificación de la columna geológica para fines del modelado de datos gravimétricos y de simulación de la subsidencia del valle.	25
Figura 11. Carta geológica simplificada del Valle de Querétaro. Tomada y adaptada de Arroyo et al., 2002. La nomenclatura de fallas es la usada por Aguirre-Díaz et al. (2005).....	28
Figura 12. Ubicación la zona de análisis de la falla “5 de Febrero”. El nombre de los sitios corresponde al nombre de la calle donde se ubican.....	29
Figura 13. Ubicación de la zona de análisis del lugar donde se encuentran estratos rocosos cerca de la carretera a Tlacote.	30
Figura 14. Zona de análisis en Huimilpan donde se localiza el lugar con cavernas debajo del acceso a un observatorio.	30
Figura 15. Localización de la zona de análisis en la intersección del Boulevard Bernardo Quintana y la avenida Constituyentes.....	31
Figura 16. Vista de resultados con una paleta de colores generado por el usuario.	37
Figura 17. Vista filtros disponibles para mejorar la calidad de los resultados.	37
Figura 18. Superposición de radargramas en distintos intervalos de saturación con fotografía del perfil estratigráfico del banco.	40
Figura 19. Asentamiento presentado en la Calle Vicente Acosta en la colonia Villa las Arboledas.	41
Figura 20. Asentamiento presentado en la Calle Federico Samaniego en la colonia Villa las Arboledas.	42
Figura 21. Asentamiento presentado en la Calle Paseo del Gorrión en la colonia Villa las Arboledas.	43

Figura 22. Asentamiento presentado en la Calle Sierra del Sur en la colonia la Sierrita.....	44
Figura 23. Traza efectuada sobre el Apoyo 5 del Distribuidor Vial Bicentenario..	45
Figura 24. Traza efectuada sobre el Apoyo 7 del Distribuidor Vial Bicentenario..	46
Figura 25. Descomposición de la saturación de radargrama referente a la excavación para pilotes del Distribuidor Vial Bicentenario.	47
Figura 26. Fragmentos de radargramas adquiridos en la carretera a Xichú, Gto. Presentados en el Estudio geofísico para la evaluación de las condiciones del subsuelo, (Arzate, 2010).	48
Figura 27. Se presentan dos configuraciones inversas (flechas negras), las cuales nos indican una posible cavidad inmediatamente debajo de esta profundidad o un cambio abrupto de material.....	57
Figura 28. Los primeros 2 m se realizaron cercanos al muro principal, se observa un comportamiento de material homogéneo hasta 2.00 m de profundidad (círculo amarillo), después de ésta zona se observa la excavación realizada en la zona con una profundidad de entre 1.20 y 1.50 m.....	58
Figura 29. Capilla de exposición al Santísimo, se observa una estructura posiblemente relacionada con alguna cavidad enterrada entre 1 y 1.50 m.....	58
Figura 30. Comportamiento de material homogéneo con estratificaciones paralelas, sala posterior al altar principal.	59
Figura 31. Se presenta el primer altar analizado; el comportamiento es errático indicativo de cambios abruptos de material y de posibles indicios de material conductivo como pueden ser placas de hierro, cobre etc.....	59
Figura 32. Radargrama de muestreo en cavernas en el municipio de Huimilpan.	60
Figura 33. Ubicación del predio Chula Vista con respecto a la Cd. De Querétaro (círculo blanco).....	61
Figura 34. Interpretación de las discontinuidades laterales (líneas rojas punteadas) marcadas en los radargramas (líneas blancas). Las letras indican las diferentes zonas “anómalas”, coincidentes en gran medida con zonas de mínimos gravimétricos relativos.	62

Figura 35. Radargramas de los perfiles realizados en el predio de Chula Vista con el objeto de correlacionarlos con los resultados del estudio gravimétrico. Debido a que unos perfiles son más largos que otros fue necesario reducir la escala vertical para mostrarlos completos. 63

Figura 36. Segmentos centrales de los radargramas a lo largo de la carretera a Xichú (parte superior) y a lo largo del antiguo camino a Xichú..... 65

Figura 37. Segmentos sur de los radargramas realizados a lo largo de la carretera a Xichú. La estratigrafía de la Línea 1 muestra variaciones importantes que no se observan en la Línea 2..... 66

I. INTRODUCCIÓN

El contenido de este trabajo está encaminado a optimizar en tiempos y costos mediante técnicas geofísicas los procedimientos en los que actualmente se determina el tipo de suelo que nos encontramos en el lugar de estudio, las técnicas mencionadas nos sirven para inferir las propiedades físicas de los materiales con instrumentos de medición colocados por encima de la superficie. El objetivo primordial de la investigación geofísica del sitio es proporcionar una evaluación in situ de las condiciones y procesos de la superficie sin perforaciones o excavaciones. Las técnicas geofísicas tienen la capacidad para medir las mismas propiedades físicas y químicas en un amplio rango de escalas (desde centímetros hasta kilómetros) y proporciona un vínculo entre los diferentes modelos de escalas usadas por hidrogeólogos e ingenieros (Daniels, Roberts, 1994).

A continuación se exponen los resultados obtenidos a partir de sondeos (trazas), efectuados a lo largo de diferentes condiciones en el terreno, como son excavaciones para pilotes, cambios abruptos en la densidad de los materiales, fallas geológicas, cavernas naturales, entre otros; el alcance de la investigación logra establecer un intervalo de valores para la adquisición de resultados esperados, así como un criterio para la interpretación de los mismos de una manera más práctica, mediante la generación de un programa de procesamiento de imágenes simple.

En este documento en particular se encuentra el caso del Valle de Querétaro en donde se pueden observar asentamientos provocados por la extracción de agua, los cuales se presentan en forma de escalones, mismos que provocan daños estructurales en cualquier estructura que se encuentren a su paso, por otro lado se presentan casos donde existen excavaciones para la colocación de pilotes, cavernas naturales bajo construcciones, terrenos donde

existen cambios abruptos en la densidad de los materiales, entre otros. Lo interesante de este trabajo es que a partir de generar un programa de análisis de imágenes simple, con una calibración adecuada para las condiciones particulares y variando los parámetros de adquisición para la captura de datos, lograremos establecer un criterio para la interpretación de resultados que facilite la comprensión práctica del estudio.

Hipótesis

Por medio de un procesamiento de imágenes simple y a partir de radargramas obtenidos por medio del GPR, se puede establecer un criterio de interpretación de datos y distinguir en las señales obtenidas los diferentes estratos contenidos en el subsuelo, así como otras estructuras geológicas sepultadas de acuerdo al alcance del equipo.

Objetivos

Objetivo primario

Implementando el procesamiento de imágenes simple, establecer un criterio para la interpretación de radargramas obtenidos que facilite el análisis de resultados en la práctica, así como encontrar los intervalos de medición con los que trabajará el Radar de Penetración Terrestre (GPR).

Objetivos secundarios

- Analizar el comportamiento de contrastes litológicos a partir del GPR.
- Observar cuál es la respuesta ante el método utilizado para llevar a otros sitios.

- Encontrar un contraste de propiedades físicas como por ejemplo: densidad (Gravimetría), conductividad eléctrica, velocidad de propagación de ondas sísmicas, propiedades mecánicas, etc.
- Optimizar tiempo y recursos para establecer propiedades físicas que estructuralmente sean útiles para toma de decisiones orientadas a construcciones.

Descripción del problema

La técnica geofísica estudiada en este documento es la del GPR (Radar de Penetración Terrestre), el georadar presenta una elevada resolución en la detección de huecos y conductores en medio resistivo ($> 100 \text{ ohm} \cdot \text{m}$), en profundidades que dependen mucho de la conductividad de los suelos y/o rocas. Se debe tener especial atención pues el método no es recomendable para detección de cavidades en medio conductor o en presencia de una cubierta conductora, pues las ondas no se propagan por debajo de ella. Cuanto mayor es la frecuencia de la antena empleada mejor es la resolución pero la profundidad de penetración es menor, por ejemplo con antenas de baja frecuencia se pueden alcanzar más de 30 m., por lo que el georadar perseguirá objetivos más someros y mayores resoluciones. El compromiso entre ambos es difícil y por ello se emplean al mismo tiempo varias antenas de diversos rangos de frecuencia.

En muchas ocasiones la geofísica puede "fallar" debido a que se le exige como técnica resultados que sobrepasan sus capacidades. Por ello siempre es recomendable comprobar los resultados con técnicas de recuperación de materiales para la calibración del método empleado, perforaciones o ensayos de penetración.

En Geotecnia, de la misma manera se requiere de la combinación de técnicas de escáner de grandes superficies (técnicas 2D, pseudo- 3D y 3D) con

prospecciones puntuales. La geofísica debe de preceder a los sondeos y pozos a cielo abierto para ubicarlos más juiciosamente. La geofísica no representa una sección absoluta de la litología pero aporta información crucial para la correlación de los ensayos.

Justificación

La presente investigación es realizada con el motivo de establecer un criterio para la interpretación de resultados obtenidos mediante el método electromagnético a través del uso del radar de penetración terrestre, actualmente sin uso en el almacén del Laboratorio de Mecánica de Suelos, con la finalidad de interpretar fallas geológicas, detectar cavernas o cavidades, contactos en los estratos rocosos o bien cambios abruptos en la densidad de los materiales contenidos en el suelo. Lo anterior, se logrará a partir de realizar un programa de análisis de imágenes para obtener la información requerida de los diferentes radargramas.

Descripción temática del documento

El contenido de esta tesis consta de los siguientes apartados:

Capítulo 1. Introducción. Se presentan los objetivos principales y secundarios de la investigación, así como la hipótesis utilizada, la descripción del problema y su justificación.

Capítulo 2. Revisión de literatura. Este capítulo se encamina a la revisión y análisis del Estado del Arte que acerca del tema se tienen, así como una breve introducción acerca de cómo funciona el GPR.

Capítulo 3. Metodología. En este capítulo se muestra el procedimiento que se siguió para el desarrollo de la investigación, desde el arranque del equipo hasta la observación de resultados, pasando por los detalles que se presentaron en el transcurso del trabajo. Se presentan los resultados de los lugares visitados.

Capítulo 4. Resultados. Aquí se presentan los resultados finales del trabajo con su señalamiento correspondiente de donde se encuentran los contactos rocosos, fallas geológicas o cambios de densidad abrupta en los materiales contenidos en el suelo.

Capítulo 5. Conclusiones. En este capítulo se hacen observaciones de los resultados obtenidos, con lo que basados en la literatura revisada y con la experiencia adquirida, establecemos un criterio para la interpretación de resultados bajo condiciones del terreno observadas en los sitios visitados.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Principio GPR (Ground Penetrating Radar)

La testificación en sondeos mediante georadar se basa en los mismos principios que en la prospección superficial. En este caso se exploran los materiales circundantes del sondeo. Se emplean dos configuraciones básicas: modo reflexión, en el que el transmisor y receptor se encuentran en el mismo sondeo y modo tomografía, en el que transmisor y receptor se ubican en sondeos contiguos (Bordehore, 2005).

La prospección geofísica por radar se engloba dentro de los métodos electromagnéticos de alta frecuencia. Los reconocimientos mediante georadar se basan en el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en el subsuelo en un dominio de frecuencias que varían entre unas decenas de MHz hasta algunos GHz, son ondas emitidas como impulsos temporales de muy corta duración, desde una antena emisora (Tx) que se desplaza por la superficie del terreno. Cuando estas ondas se encuentran con un contraste dieléctrico, se reflejan hacia la superficie (Ley de Snell - Descartes) donde sus características son medidas por una antena receptora (Rx). La propagación de las ondas a través del terreno está regida por las ecuaciones de Maxwell y dependen en gran medida de las características del medio en el que se propagan, así como de las propiedades dieléctricas y espaciales de las heterogeneidades que "van encontrando" las ondas (Bordehore, 2005).

Los fundamentos del GPR se encuentran en la teoría electromagnética (teoría EM). La historia de este campo se extiende por más de dos siglos y es objeto de numerosos textos como Jackson (1962) y Smythe (1989). Este panorama somero describe los elementos básicos necesarios para trabajar cuantitativamente con el GPR.

Las ecuaciones de Maxwell describen matemáticamente la física de los campos EM, mientras que las relaciones constitutivas cuantifican las propiedades del material. La combinación de las dos ofrece las bases para describir cuantitativamente las señales de GPR (Annan, 2005).

Ecuaciones de Maxwell

En términos matemáticos, los campos EM y propiedades relacionadas se expresan como:

$$\nabla \times \vec{E} = -\dot{\vec{B}} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \dot{\vec{D}} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Donde:

\vec{E} : Vector de Intensidad de Campo Eléctrico (V/m)

ρ : Densidad de Carga Eléctrica (C/m³)

\vec{B} : Vector de Densidad de Flujo Magnético (T)

\vec{J} : Vector de Densidad de Corriente Eléctrica (A/m²)

\vec{D} : Vector de Desplazamiento Eléctrico (C/m²)

t : Tiempo (s)

\vec{H} : Intensidad del Campo Magnético (A/M)

∇ : Operador Nabla

Maxwell resumió sucintamente la labor de numerosos investigadores en esta forma compacta. De estas relaciones, todo el electromagnetismo clásico, inducción, las ondas de radio, la teoría de la resistividad del circuito, etc., pueden obtenerse cuando se combina con el formalismo al caracterizar las propiedades del material eléctrico.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

La conductividad eléctrica σ , describe cómo el flujo libre de cargas puede formar una corriente cuando un campo eléctrico está presente. La permisividad dieléctrica ϵ , describe cómo las cargas limitadas se encuentran desplazadas en respuesta a un campo eléctrico. La permeabilidad magnética μ se describe como la relación intrínseca de los momentos magnéticos, atómicos y moleculares que responden a un campo magnético (Annan, 2005).

Naturaleza de onda en campos EM

El GPR explota el carácter ondulatorio de las ondas EM. Maxwell, mediante la ecuación (1) y a través de la ecuación (4) logra describir un conjunto de campos eléctricos y magnéticos, cuando los campos varían con el tiempo (Annan, 2005).

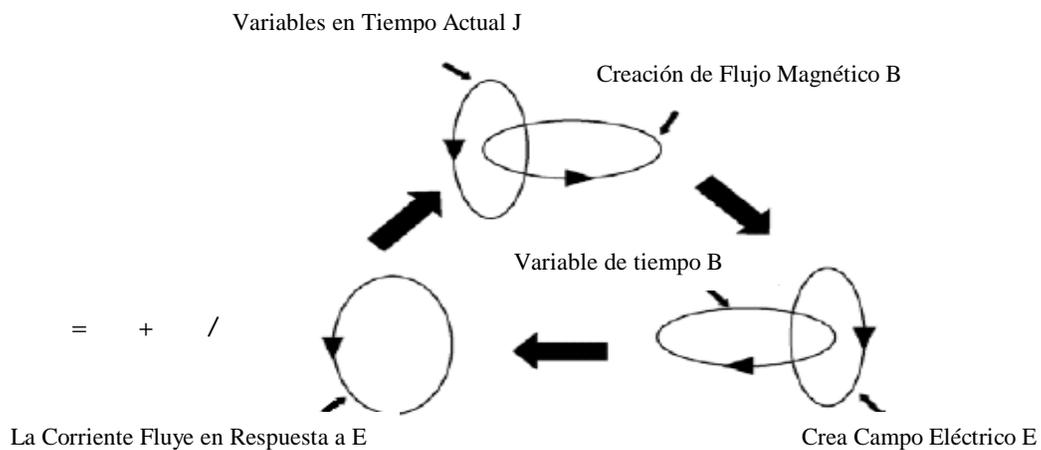


Figura 1. Las ecuaciones de Maxwell describen auto perpetúas secuencias de campo que se desarrollan en el espacio y el tiempo. Una carga en movimiento

o J corriente crea un campo magnético B, que induce un campo eléctrico E, que a su vez provoca carga eléctrica para desplazarse, y así sucesivamente.

El carácter de onda se hace evidente cuando las ecuaciones de Maxwell se reescriben para eliminar ya sea el campo eléctrico o magnético. El resultado es un vector de onda transversal, como lo muestra la ecuación:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} + \mu \mathbf{J} + \epsilon \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) = 0 \quad (8)$$

\uparrow
A

\uparrow
B

\uparrow
C

El GPR es eficaz en los materiales de baja pérdida en la que la disipación de energía, B, es pequeña en comparación con el almacenamiento de energía, C.

Las soluciones a la ecuación de onda transversal, ecuación (8), toman la forma representada en la Figura 2. El campo eléctrico y los vectores de campo magnético son ortogonales entre sí y en la dirección espacial de la circulación de campo \hat{k} .

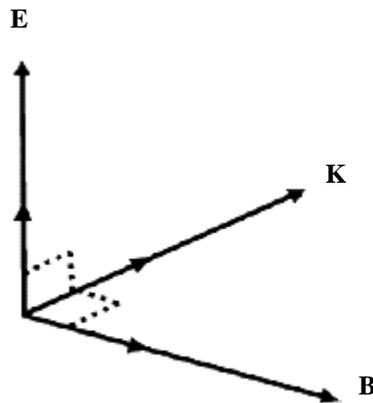


Figura 2. Las direcciones del campo eléctrico E, el campo magnético B, y la propagación de k, son ortogonales, u, w y k son vectores unitarios ortogonales.

Estas soluciones se conocen como plano de soluciones estacionarias de las ecuaciones de Maxwell. Con el GPR, el campo eléctrico es el campo normalmente medido. Tiene la forma:

$$\vec{E} = f(\vec{r} \cdot \vec{k}, t) \hat{u} \quad (10)$$

Donde \vec{r} es un vector que describe la posición espacial y \vec{k} , ω satisface la ecuación:

$$\nabla^2 (\vec{r}, t) - \frac{1}{v^2} (\vec{r}, t) - \alpha (\vec{r}, t) \equiv 0 \quad (11)$$

que es el escalar de amortiguamiento de la ecuación de onda. $\alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ es la distancia en la dirección de propagación. En condiciones de baja pérdida:

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt) e^{\mp \alpha \beta} \quad (12)$$

Donde:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad \alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (13)$$

son la velocidad y la atenuación respectivamente.

La naturaleza de onda se indica por el hecho de que la distribución espacial de los campos se traduce en la dirección β entre los tiempos de observación, como se muestra en la Figura 3.

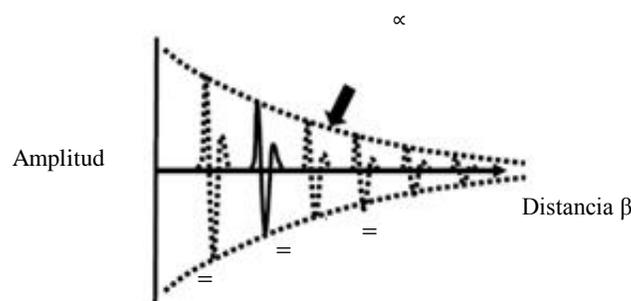


Figura 3. Campos electromagnéticos de baja pérdida en condiciones de movimiento a través del espacio a una velocidad finita y disminución de la amplitud de cómo se disipa la energía. Los tiempos secuencia t_1, t_2 y t_3 indican cómo se mueve el campo a través del espacio.

Propiedades de las ondas

Las respuestas del GPR indican las propiedades de onda de campo, es decir, velocidad de fase (v), atenuación (α), y la impedancia electromagnética (Z) (Annan, 2003). El comportamiento de las propiedades de onda para un medio simple con permitividad fija, conductividad y permeabilidad son más fáciles de expresar, si se supone una variación del tiempo sinusoidal. La variación de la v y α contra la frecuencia senoidal, f , se muestran en la Figura 4 (nota $\omega = 2\pi f$).

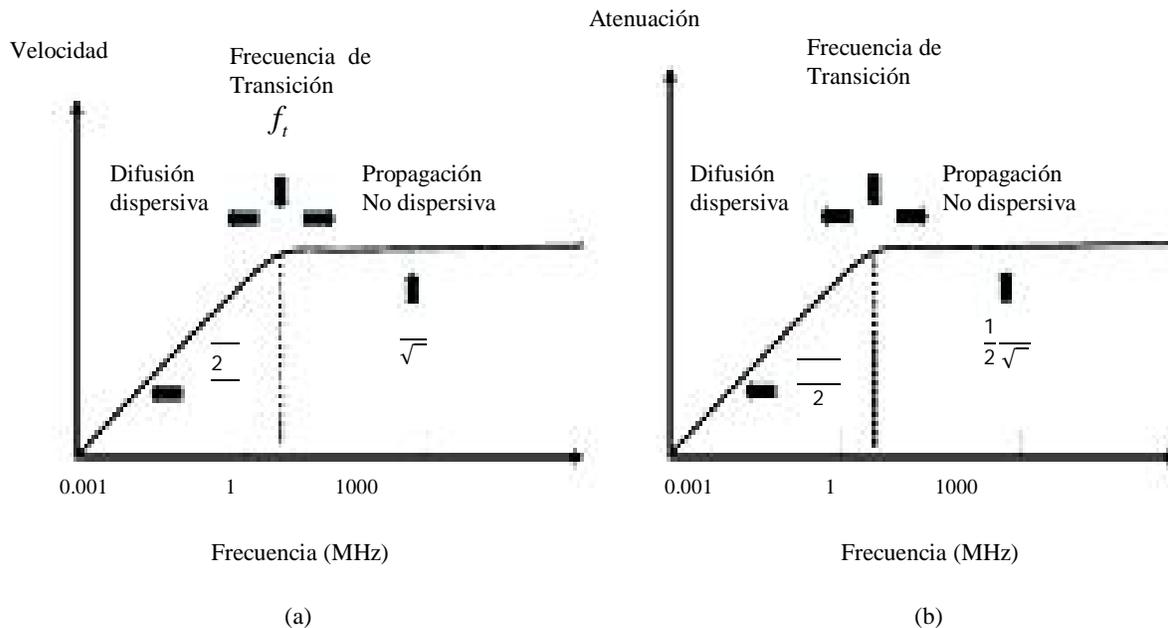


Figura 4. Variación de velocidad y atenuación en un medio simple con propiedades físicas no dispersivas, con c y ϵ_0 la velocidad y la impedancia de espacio libre (es decir, un vacío).

Las propiedades de todas las ondas muestran un comportamiento similar. A frecuencias bajas, todas las propiedades dependerán de $\sqrt{\omega}$, que son indicativos del comportamiento de campo difusivo. A altas frecuencias, las propiedades deben ser independientes de la frecuencia, si ϵ, μ, σ son constantes. El comportamiento de la alta frecuencia es la característica más importante en el plano de desarrollo. (Annan, 2005).

La transición de la difusión a la conducta de propagación se produce cuando la corriente eléctrica cambia por conducción (carga libre) dominante de desplazamiento (limitada) a carga de comportamiento dominante actual. Para un material simple, la frecuencia de transición se define como:

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi \cdot \epsilon} \quad (14)$$

Para el GPR, la permitividad dieléctrica es un parámetro importante. Más a menudo, los términos "Permitividad relativa" o "constante dieléctrica" son de uso común y se define como:

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (15)$$

ϵ_0 es la permitividad del vacío, $8,89 \times 10^{-12}$ F/m.

A altas frecuencias, todos los componentes de esta frecuencia viajan a la misma velocidad y sufren la misma atenuación. Una señal impulsada viaja con su forma intacta, es decir, su propagación no presenta dispersión.

En este caso, la velocidad, la atenuación, y la impedancia se puede expresar como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (16)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{\sigma}{2} = Z_0 \cdot \frac{\sigma}{2 \cdot \sqrt{k}} \quad (17)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{\epsilon_0}{k} \quad (18)$$

La expresión es válida cuando las variaciones en las propiedades magnéticas se suponen insignificantes, lo que hace $\mu = \mu_0$ donde $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6}$ H/m es el espacio libre de permeabilidad magnética. En lo anterior, c es la velocidad de la luz y z_0 es la impedancia del espacio libre.

$$z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \cdot \text{Ohms} \quad (19)$$

Reflexión, refracción y la transmisión en las interfaces

Los métodos GPR dependen de la detección de la señal reflejada o dispersa. Límites planos proporcionan el modelo más sencillo para la calificación de conducta. La reflexión de Fresnel (y de los coeficientes de transmisión) (Jackson, 1962; Nacido y Wolf, 1980) permite cuantificar las amplitudes de los campos electromagnéticos que varían a través de una interfaz entre dos materiales. Cuando una onda electromagnética incide sobre una frontera, la onda incidente, I , es parcialmente de transmisión, TI , y en parte se refleja, RI , como se muestra en la Figura 5.

También cambia la dirección de marcha (es decir, el frente de onda se refracta), de conformidad con el La ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen } \theta_2}{v_2} \quad (20)$$

Cuando $V_1 > V_2$, el medio 2 tiene un ángulo crítico más allá del cual la energía no se puede propagar del medio 1 al 2. El ángulo crítico se determina mediante el establecimiento de $\theta_c = 90^\circ$. (Este ángulo desempeña un papel importante en las respuestas de muchos GPR).

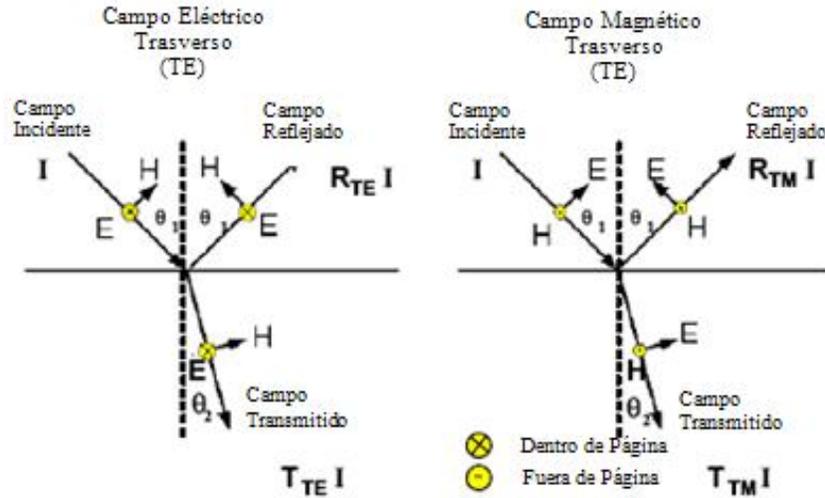


Figura 5. Ondas EM son vectores de onda transversal. Para cualquier dirección de propagación dado, existen dos campos independientes. Para las interfaces de plano, es tradicional discutir dos ondas, una con la campo eléctrico en el plano de interfaz, denominada transversal eléctrico (TE), y uno con el vector del campo magnético en el plano de la interfaz, denominada transversal magnética (TM).

El incidente se refleja y transmite la intensidad del campo y están relacionados por:

$$I = R \cdot I = T \cdot I \quad (21)$$

Donde Z_i y Y_i son las impedancias y admitancias ($Y_i = 1/Z_i$) del primer material respectivamente. El factor crítico es que una impedancia electromagnética contrastaría si existiese una respuesta asociada.

Cuando la onda EM es de incidencia vertical sobre la interfaz $Y_i = \frac{1}{z_1}$, sin distinción existente entre el TE y TM de onda, y el TE y TM tienen coeficientes de reflexión idénticos (para los componentes de campo).

Tenga en cuenta que cada vez se produce la reflectividad al aumentar el ángulo de incidencia, que el total de la reflexión se produce para ángulos de incidencia más allá del ángulo crítico cuando se está moviendo un material de baja a alta velocidad, y que las señales reflejadas pueden ser positivas o negativas, dependiendo de si aumenta o disminuye la impedancia.

GPR fuente cerca de una interfaz

Sólo formas muy simples de los campos EM se han discutido hasta este punto. En la práctica, fuentes de campos y cómo los campos de propagación de un tamaño finito del transmisor son cuestiones importantes.

Fuentes de GPR son normalmente desplegados cerca de la tierra. Las señales se extienden hacia fuera como muestra en la figura 6 (Annan, 2003). Cuando el frente de onda incide sobre el suelo, el campo en cualquier punto a lo largo de la interfaz de la tierra puede ser visualizado a nivel local como una onda plana que incide en la frontera en un ángulo de incidencia específica definida por la geometría (fuente de altura y la distancia lateral). Localmente la señal es reflejada y transmitida de acuerdo con la ley de Snell y los coeficientes de Fresnel.

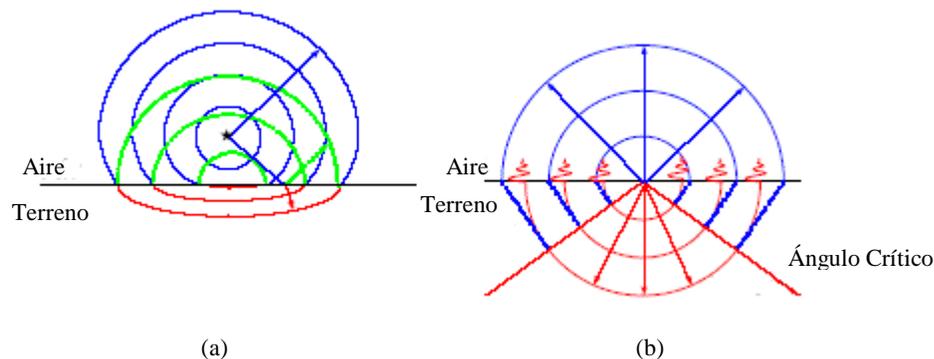


Figura 6. Frentes de onda que se extienden a partir de una fuente localizada. En (a), la fuente se encuentra por encima del suelo, con las líneas de puntos que indica la señal reflejada. En (b), la fuente se encuentra en la interfase

aire-tierra, con las líneas punteadas que indican las ondas refractadas. Las líneas oscilantes indican ondas evanescentes.

Para entender lo que está sucediendo en el terreno y cerca de la interfaz, el caso límite de la fuente derecha en la interfaz es informativa (véase la Figura 6b). El incidente y las ondas reflejadas en el aire se fusionan yendo en una onda esférica. En el suelo, la transmisión de la señal se divide en dos partes, una onda esférica y un frente de onda plana viajando en el ángulo crítico de vinculación directa de onda esférica de aire y la onda esférica de superficie. Cerca de la interfaz, la onda de superficie esférica se extiende en el aire como un campo evanescente.

Referencias, tales como Sommerfield (1949), Wait (1962), Brekhovskikh (1960), y Annan, (1973) ofrecen una discusión más detallada. Los diferentes campos de onda son claramente visibles en grandes distancias de la fuente y / o longitudes de onda muy corta. Para distancias cortas de la fuente o longitudes de onda larga, la separación de los acontecimientos se hace borrosa, pero los conceptos esenciales siguen siendo válidos.

Agua y GPR

Propiedades físicas.

Las propiedades físicas son muy importantes en GPR, ya que bajo condiciones de pérdidas eléctricas no prevalecen. Ambientes ricos en arcilla mineralógica o zonas de agua subterránea salina pueden crear condiciones en las que la penetración de la señal GPR es muy limitada.

Las propiedades eléctricas (ϵ, μ, σ) de los materiales son un tema de amplio alcance. Pueden encontrarse bases en Olhoeft (1981, 1987) y Santamarina et al

(2001). Este documento se limita a las cuestiones fundamentales relativas al plan de desarrollo y aplicaciones hidrogeológicas.

Los materiales de la Tierra son invariablemente compuestos de muchos otros materiales o componentes. El agua y el hielo representan los pocos casos en que sólo un único componente está presente. Comprender las propiedades físicas de las mezclas es un factor clave en la interpretación de una respuesta GPR.

Propiedades de las mezclas de los materiales.

La litología terrestre es siempre compleja y mezcla de muchos componentes. La Tabla 1 ilustra algunos de los materiales ideales que se pueden encontrar. La arena de cuarzo simple puede ser visualizada como una mezcla de granos de suelo, el aire, el agua y los iones disueltos en el agua. Los granos de suelo normalmente ocupan entre el 60 y el 80% del volumen disponible.

Tabla 1. Ejemplos de Materiales Compuestos

Arena de Cuarzo	Arena Contaminada	Concreto
Granos de Cuarzo	Granos de Cuarzo	Agregado
Aire	Aire	Cemento Hidratado
Agua	Agua	Cemento Parcialmente Hidratado
Iones disueltos	Iones disueltos Hidrocarburos Líquidos Biodegradación de Productos Vapor de Hidrocarburos	Aire Agua Iones disueltos

Una arena de cuarzo con hidrocarburos contaminados, además, contendrá hidrocarburos tanto en forma líquida y vapor y, si el tiempo ha pasado, también los derivados por la biodegradación de hidrocarburos.

El tercer ejemplo es el hormigón, que consta de cemento y agregados. El cemento es utilizado comúnmente para crear barreras de lechada para modificar

el flujo de las aguas subterráneas. El agregado es normalmente grava de variable mineralogía. El cemento puede ser completamente o parcialmente hidratado. Una combinación óptima tendrá muy poco espacio poroso que contiene agua y / o aire, una combinación menos óptima tendrá espacio poroso sustancial, que puede ser conectado o desconectado, y que puede contener el aire y / o agua.

Las mezclas de materiales rara vez exhiben propiedades directamente proporcionales para la fracción de volumen que constituyen los componentes. En muchos aspectos, esta complejidad puede hacer un análisis cuantitativo de datos GPR imposible sin información auxiliar.

Si bien el tema de las mezclas es complejo, la gran perspectiva de la imagen GPR es más simple. En la gama de frecuencias 10-1000 MHz, la presencia o ausencia de agua en el material domina el comportamiento (Annan, 2005).

Los minerales a granel y los agregados en las mezclas en general son buenos aisladores dieléctricos. Generalmente tienen una permitividad en el rango de 3 a 8 (dependiendo de la mineralogía y la compactación) y suelen ser material aislante, con prácticamente cero de conductividad (Annan, 2005).

Suelos, rocas y materiales de construcción como el cemento y el asfalto tienen espacios vacíos entre los granos (espacio poroso) disponibles para ser llenado con aire, agua, u otros materiales.

El agua es con mucho el material natural más polarizada (en otras palabras, tiene una alta permisividad con $k=80$), (Annan, 2005).

El agua en el espacio de los poros normalmente contiene iones y la conductividad eléctrica del agua relacionada con la movilidad de iones es el factor

dominante en la determinación de la conductividad eléctrica de materiales a granel.

Dado que invariablemente el agua está siempre presente en el espacio poroso de materiales naturales (geológicos), excepto en situaciones tan únicas como el secado al vacío o algún otro mecanismo asegura la ausencia total de agua, tiene un efecto dominante sobre las propiedades eléctricas.

Las formas derivadas empíricamente tales como la relación Topp (Topp et al., 1980) y las variaciones de la ley de Archie (Archie, 1942) han demostrado desde hace tiempo la relación entre permisividad, conductividad eléctrica y el contenido volumétrico de agua de los suelos.

La relación Topp expresa la permisividad relativa aparente, κ_a , en función de la fracción de volumen de contenido de agua, θ_v :

$$\kappa_a = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.6\theta_v^3 \quad (22)$$

La ley de Archie, aunque derivada de las bajas frecuencias, es cualitativamente útil en frecuencias de GPR y se refiere a volumen de la conductividad eléctrica en poros de agua:

$$\sigma = a\varphi^{m_s} s^n \sigma_{1W} + \sigma_c \quad (23)$$

Donde:

- : Porosidad
- a: Constante de 0.4 a 2
- n: Constante alrededor de 2
- : Conductividad Eléctrica de superficie de grano de suelo
- m: Constante de 1.3 a 2.5
- s: Fracción de poro saturado
- : Conductividad Eléctrica del poro de agua

Cuando el suelo tiene un contenido volumétrico de agua que está en el rango de 3 a 4 la permisividad es cero, y la conductividad eléctrica es muy pequeña. Como el agua se agrega a la mezcla, la permisividad y la conductividad del agua suben hasta que ya no puede ser comprimida en el espacio poroso disponible.

Obviamente, la porosidad del material determina el límite máximo para el volumen de agua que se puede colocar en el material y finalmente, que a su vez determina la máxima permisividad y la conductividad (para una determinada conductividad del agua de los poros) de la mezcla.

Otra fórmula de mezcla heurística comúnmente usada es el complejo modelo del índice de refracción (CRIM) (Wharton et al., 1980) que expresa una mezcla de relación de permisividad en función de la fracción de volumen y la raíz cuadrada del complejo de la permisividad de los componentes con:

$$\sqrt{\kappa_{mix}} = \sum_i \sqrt{\kappa_i \theta_i} \quad (24)$$

donde κ_i y θ_i : son respectivamente los componentes permisivos y las fracciones de volumen. Esta formulación puede ser muy útil para un análisis de primer orden de un problema. La relación más avanzada es la Bruggeman-Hanai-Sen, o el modelo de BHS, (Sen et al., 1981) que utiliza la teoría de los medios eficaces para obtener una propiedad de material compuesto.

Metodología del sondeo GPR.

Los datos obtenidos por el GPR se dividen en dos categorías, la reflexión y la transiluminación, como muestra en la Figura 8. Sondeos con un solo transmisor y un receptor único son los más comunes, aunque la fuente de múltiples configuraciones y receptores están empezando a aparecer para aplicaciones especializadas. Detalles del diseño del sondeo se pueden encontrar en Annan, y

Cosway (1992) mientras que los detalles instrumentales se discuten por Annan (2003) y selección de frecuencia es dirigida por Annan y Cosway (1994).

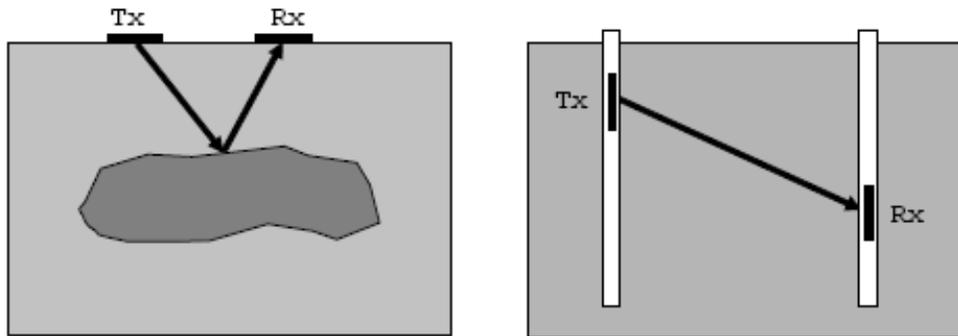


Figura 7. Ejemplo de una medición de la transiluminación de la perforación

Compensación de estudios comunes de reflexión.

Con los estudios de reflexión, el objetivo es trazar un mapa de reflectividad del subsuelo del territorio frente a la posición. Las variaciones en la amplitud de la reflexión y el tiempo de retardo para indicar las variaciones en V , α , y Z . Los estudios de reflexión GPR se realizan tradicionalmente en la línea "recta" del sondeo, y los sistemas están diseñados para funcionar principalmente en esta forma. El área de cobertura con más frecuencia implica la adquisición de datos en una rejilla rectilínea de las líneas que cubren el área, tales como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Un área de estudio generado por una serie de líneas de prueba. La respuesta del suelo se mide en puntos discretos a lo largo de la línea del sondeo. Si bien la práctica de campo puede ser más errática, los datos de este formato son la clave para la mayoría de los sistemas de datos de procesamiento y visualización.

Comúnmente las pruebas de compensación por lo general despliegan un solo transmisor y receptor, con un fijo desplazamiento o distancia entre las unidades en cada punto de medición. Las antenas de transmisión y receptoras tienen un carácter específico para la polarización del campo generado y detectado. Las antenas se colocan en una geometría fija y las mediciones realizadas en intervalos regulares de la estación fija, como se muestra en la Figura 9. Los datos sobre mallas regulares con un espaciado fijo es normalmente necesario si se van a aplicar técnicas avanzadas de visualización y procesamiento de datos.

Figura 9. Representación esquemática común de la compensación de un solo perfil a lo largo de una línea que muestra los principales parámetros de especificación de la prueba.

Los parámetros que definen una prueba común de compensación son la frecuencia central GPR, la ventana de tiempo de grabación, el tiempo de intervalo de muestreo, la distancia a la estación, la distancia entre las antenas, la distancia entre la línea de separación, y la orientación de la antena.

Geología del Valle de Querétaro.

El Valle de Querétaro se localiza dentro del graben complejo del mismo nombre formado por la intersección de los sistemas de fallas regionales Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) y el sistema Chapala-Tula (Aguirre-Díaz et al., 2000 y 2005). Los límites Oriente y Poniente del graben de Querétaro están bien definidos: al poniente la falla San Bartolomé (No. 58, N10°W), al oriente la falla Querétaro Norte (No. 67, N5°W), Querétaro Sur (No. 68, N25°W) y Huimilpan Norte (No. 69, N26°W). Los límites norte y sur del graben no están claramente definidos, al norte el volcán la Joya es considerado el fin del sistema de falla Taxco-San Miguel de Allende (Valdez-Moreno et al., 1998), por lo que puede ser considerado el límite norte del graben de Querétaro. Al sur se presentan una serie de fallas normales con rumbo (ENE-WSW) con echados generalmente hacia el norte, por ejemplo las fallas No. 42,43 y 44.

Dentro del graben de Querétaro se encuentra una depresión, fosa o graben secundario, que para fines de referencia le llamaremos fosa Querétaro. Esta fosa es definida en su hombro poniente por las falla Tlacote (No. 61, N19°W), y en la parte oriente por la falla 5 de Febrero (No. 65-66, N12°W); al norte lo limita la falla Jurica (No. 5, N85°W) y al sur la Falla Lourdes (No. 44, N65°W). La fosa está rellena con sedimentos granulares de origen aluvial y lacustre no consolidados con intercalaciones de derrames de lava de espesores variables. Sobre la fosa se ubica la parte poniente del Valle de Querétaro y es donde se ha registrado el fenómeno de subsidencia y la generación de agrietamientos (Estrella, 2012).

Todas las fallas se presentan en la superficie como altos topográficos, con excepción de la falla 5 de Febrero en la parte central del valle entre las fallas No. 14 y 45, donde está sepultada por los rellenos granulares (figura 12). Justo sobre el escarpe de la falla sepultada se ha observado un fallamiento superficial, lo cual apoya la hipótesis de que el mecanismo de generación de los agrietamientos es

por hundimientos diferenciales causados por la variación del espesor de sedimentos.

Alaniz-Álvarez et al. (2001), con base en los estratos cortados por las fallas y el grado de erosión de los escarpes, infieren que el periodo durante el cual se registró la mayor actividad de las fallas que forman el graben ocurrió hace 5.3 a 10 millones de años. El sistema de fallas que delimita la fosa Querétaro no ha presentado actividad sísmica en años recientes, sin embargo en la zona de Sanfandila, aproximadamente 20 km al Sur-Este de la ciudad de Querétaro, se registró actividad sísmica en 1998, consistente en una secuencia de eventos sísmicos cuyo evento mayor fue de magnitud $M_w=3.4$ (Aguirre-Díaz et al., 2000 y 2005, Zúñiga et al., 2003). Esta actividad sísmica no ha sido relacionada con la subsidencia si no a la reactivación de fallas corticales, lo cual refuerza la hipótesis de que los hundimientos y agrietamientos son efecto de la pérdida de sustentación hidráulica en el sistema acuífero por causa del abatimiento en el nivel piezométrico.

Son de interés las propiedades geomecánicas de las diferentes unidades geológicas (densidad y relación esfuerzo deformación principalmente). Las edades de las diferentes unidades, lo mismo que las características mineralógicas de las diferentes rocas no son trascendentales para los fines de la modelación de los datos gravimétricos y la simulación numérica de la subsidencia, lo que permite hacer una simplificación de la geología y de la columna estratigráfica de la zona de estudio, tomando como referencia propiedades tales como densidades promedio similares y rangos de comportamiento esfuerzo-deformación parecidos.

La figura 10 muestra la columna estratigráfica reportada por Carreón-Freyre et al. (2005) y la columna simplificada para los fines de la modelación de datos gravimétricos y de la simulación numérica. La secuencia estratigráfica en el

valle de Querétaro fue descrita por CNA (2000) Alaniz-Álvarez et al. (2001), Arroyo et al. (2002) y Carreón-Freyre et al. (2005).

La unidad más antigua está formada por lutitas y areniscas del Mesozoico sobre las cuales yace una unidad de rocas calizas del Cretácico inferior (Ki Cz Ar). La edad de esta unidad es de 100 a 110 millones de años (Chiodi et al. 1988). Esta unidad se considera el basamento pre-volcánico del valle de Querétaro debido a que no se conoce qué espesor tiene y qué tipo de roca hay bajo de ella. La caliza aflora en el norte del valle (figura 11), y aunque los pozos perforados en el valle no la cortan, a través de sondeos Magnetotelúricos (MT) se ha inferido esta unidad de caliza a una profundidad aproximada de dos km en el centro del mismo.

(a)

(b)

Figura 10. (a) Columna estratigráfica reportada para el valle de Querétaro por Carreón-Freyre et al. (2005). (b) simplificación de la columna geológica para fines del modelado de datos gravimétricos y de simulación de la subsidencia del valle.

Es posible hacer una simplificación de la columna estratigráfica reportada por Carreón-Freyre et al. (2005) agrupando la litología en seis unidades que yacen sobre el basamento calcáreo. La primera unidad es un paquete de

sedimentos continentales del Eoceno (Te Cg Ar), que yacen sobre el basamento Mesozoico y está formado por areniscas y conglomerados intercalados con derrames de basalto e ignimbrita. La segunda unidad corresponde a una secuencia de rocas volcánicas del Oligoceno al Mioceno, principalmente derrames de andesita y basalto (To-Tm AB) con intercalaciones de toba y presencia de ignimbrita hacia la base de la unidad. Sobre este paquete se encuentra la tercera unidad litoestratigráfica conformada por una secuencia de sedimentos lacustres y piroclastos del Oligoceno y del Mioceno (To-Tm Py Lac) medianamente consolidados; en esta unidad se presentan principalmente horizontes de conglomerado y arenisca con intercalaciones de toba de caída y material piroclástico retrabajado (Alaniz-Álvarez et al., 2001). Estos sedimentos están alternados con derrames de basalto. El espesor de esta unidad puede alcanzar los 450 metros en el centro del valle (CNA, 2000). La cuarta unidad está constituida por derrames de lava de composición basáltica y andesítica (Tmt AB). A esta unidad se le conoce como “Basalto Querétaro” y ha sido encontrada en casi todo el Valle de Querétaro en afloramientos en los límites del valle o en estratos de diversos espesores en las perforaciones de pozos. El Basalto Querétaro yace sobre los depósitos del Oligoceno-Mioceno y su espesor observado en el valle por medio de los registros de pozos varía desde unos pocos metros hasta 210 metros. El espesor mayor observado para esta unidad es de 400 metros en un pozo perforado en el valle de Obrajuelo.

Carreón-Freyre et al. (2005) identificó este estrato como la secuencia volcánica que divide las dos principales secuencias fluvio-lacustres terciarias del Valle de Querétaro. El basalto se intercala con capas de material lacustre, aluvial y piroclásticos. Esta unidad geológica es considerada el basamento hidrológico del acuífero somero, y para este trabajo se considera el límite de la masa de material que se está deformando.

El acuífero superficial está formado por la quinta y sexta unidades geológicas que consisten en una secuencia de origen aluvial y lacustre de material granular del Cuaternario (Q Al), integrado por un paquete compuesto por arcilla, limo y arena fina que se presenta en espesores variables de hasta 50 metros en la parte central del valle. Bajo de los rellenos del Cuaternario se encuentra una secuencia de depósitos fluviales, aluviales, lacustres y piroclastos no consolidados (TpPy Lac), compuesta por arcilla, arena, grava, toba y otros piroclastos no consolidados intercalados con conglomerados. Carreón-Freyre et al. (2005) asignan una antigüedad del Plioceno a este paquete de sedimentos.

El cuerpo del acuífero granular superficial está formado por estos dos paquetes de sedimentos (CNA, 2000 y Arroyo et al., 2002) de donde se ha drenado la mayor parte del agua que se ha extraído del acuífero del valle (Álvarez-Manilla, 1999).

Los registros de pozos muestran que los espesores del paquete de sedimentos granulares pueden sobrepasar los 120 metros, y de acuerdo con sondeos MT puede alcanzar los 300 metros en la parte central del valle.

Por otra parte la CNA reportó 18 pruebas de bombeo para caracterizar el acuífero, dieciséis de las cuales resultaron representativas de un acuífero libre y dos de un acuífero semiconfinado. Las pruebas de bombeo revelaron también que el basamento hidrológico es un acuífero en medio fracturado (CNA, 2000). La geología simplificada del Valle de Querétaro se muestra en la figura 11.

Figura 11. Carta geológica simplificada del Valle de Querétaro. Tomada y adaptada de Arroyo et al., 2002. La nomenclatura de fallas es la usada por Aguirre-Díaz et al. (2005).

La simulación del proceso de subsidencia del valle de Querétaro se hizo mediante una discretización en prismas rectangulares del volumen de sedimentos deformables. Se calculó la deformación longitudinal de cada columna definida por

una sección de 50x50 metros y la altura que le correspondió a cada una con base a su posición. La altura total de la columna se compone por el espesor de las unidades Q Al y TpPy Lac, dichos espesores varían de acuerdo a la posición de la columna dentro del valle. Se analizó únicamente el hundimiento que experimenta el acuífero superficial conformado por las unidades Q Al y TpPy Lac, debido a que la unidad Tmt AB que les subyace a las primeras, es el lecho rocoso que modifica el campo de deformaciones de la masa de suelo que se está drenando.

A continuación se muestra la localización geográfica de los sitios en donde se realizaron los sondeos:

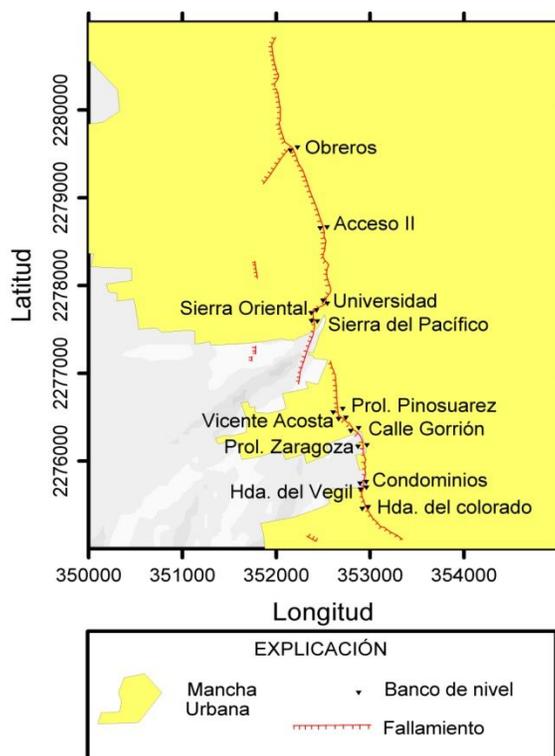


Figura 12. Ubicación la zona de análisis de la falla “5 de Febrero”. El nombre de los sitios corresponde al nombre de la calle donde se ubican.



Figura 13. Ubicación de la zona de análisis del lugar donde se encuentran estratos rocosos cerca de la carretera a Tlacote.

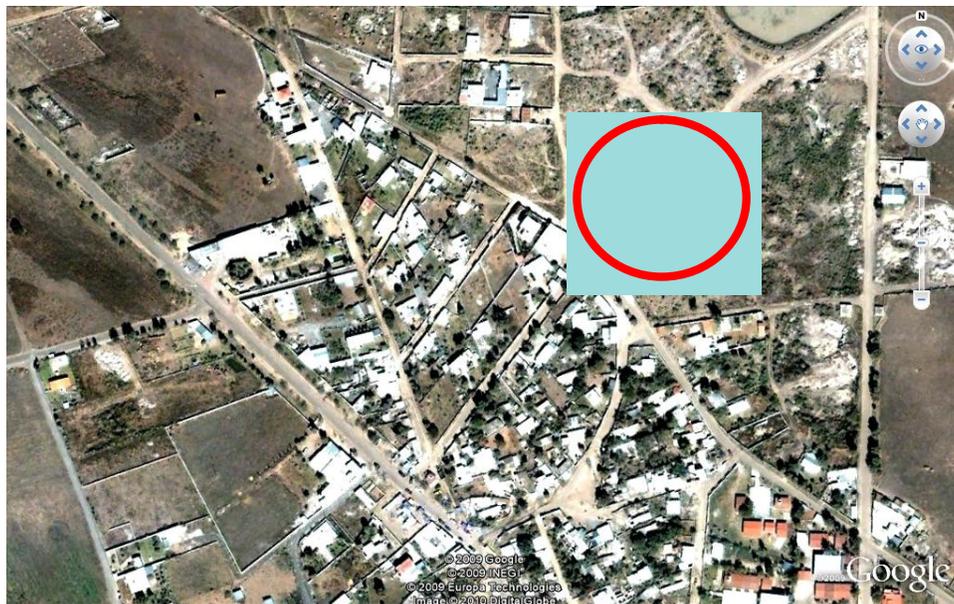


Figura 14. Zona de análisis en Huimilpan donde se localiza el lugar con cavernas debajo del acceso a un observatorio.

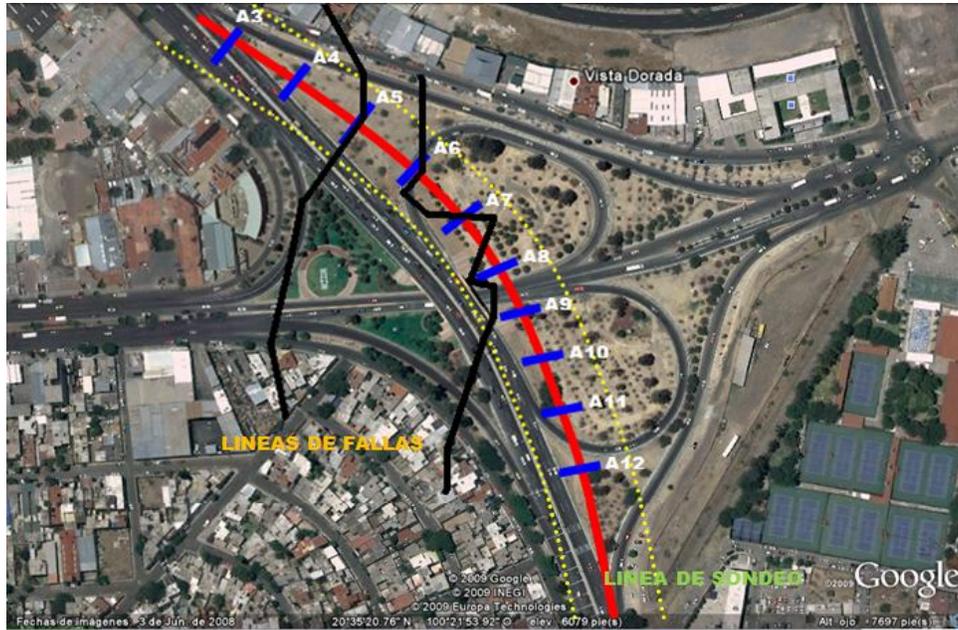


Figura 15. Localización de la zona de análisis en la intersección del Boulevard Bernardo Quintana y la avenida Constituyentes.

III. METODOLOGÍA

Los sondeos realizados, que llamaremos trazas, están localizados dentro del Estado de Querétaro, en la conocida como falla geológica de 5 de Febrero; en un banco de material ubicado aproximadamente a 1 km de la intersección de la carretera Querétaro-Tlacote y el libramiento que une el poblado de Santa Rosa con la carretera Querétaro-Celaya; en el municipio de Huimilpan se estudió el caso de la existencia de cavernas bajo la construcción del acceso a un observatorio, y por último se estudió el terreno localizado a un costado del puente del Boulevard Bernardo Quintana que cruza la avenida Constituyentes.

Materiales

Para realizar esta investigación se utilizó un equipo conocido como RAMAC/GPR fabricado por MALA GeoScience (Foto 1), combinando tres tipos de antenas mono estáticas Shielded de 100 MHz, 250 MHz y 500 MHz. El equipo consta básicamente de un ordenador que permite almacenar los resultados, una antena emisora-receptora de ondas electromagnéticas, baterías recargables, una rueda de medición, cables de conexión y accesorios para el desarrollo del sondeo.



Foto 1. Equipo RAMAC/GPR utilizado para el estudio.

Método

Durante el desarrollo de las pruebas presentadas en este documento se tuvieron algunos contratiempos con el equipo ya que no se conocía del todo el funcionamiento del mismo, por lo que se desarrollo una guía rápida de arranque, de manera que el lector pudiese ver de manera clara y breve la forma de poner en marcha el equipo. La guía realizada se presenta a continuación:

Guía rápida de funcionamiento del GPR.

1. Se verifica que las baterías se encuentren suficientemente cargadas.
2. Compruebe que las conexiones y los cables se encuentren en perfectas condiciones.
3. Verifique que el software RAMAC GroundVision, se encuentre instalado en la computadora.
4. Efectúe las conexiones correspondientes con la precaución necesaria para no ocasionar algún daño al equipo y a los accesorios.
5. Una vez conectada la computadora, encienda la misma.
6. Mantenga presionado el botón de encendido del GPR, durante 2 segundos para encenderlo. (1 seg. para apagar y 5 seg. para reiniciar).
7. Inicie el programa RAMAC de la computadora y espere a que el botón de encendido en el GPR comience a parpadear; en la pantalla principal de RAMAC deberá mostrar el icono F9 y F5 disponibles para usar.
8. Con el botón de encendido parpadeando puede comenzar a tomar lecturas de prueba para comprobar que esté funcionando

correctamente, arrastrando el equipo sobre una línea recta y verificando que se obtenga información en el radargrama.

9. Deberá tener el manual de RAMAC impreso para consultar algunos posibles detalles presentados durante el funcionamiento del programa, así como para el ajuste de los parámetros de adquisición de datos.

La metodología empleada para el estudio en las zonas antes mencionadas consistió en:

1. Seleccionar y marcar un camino que no tenga a su paso obstáculos que generen posibles errores o incertidumbre en la traza, así como realizar las observaciones correspondientes de las condiciones visuales del terreno. (de ser necesario se tendrá que hacer una ligera limpieza del camino)



Foto 2. Selección del camino óptimo para el estudio.

2. Para la recopilación de datos se utilizaron las antenas ya mencionadas anteriormente, una seguida de la otra, pasando por el mismo trayecto recorrido con la primera antena para generar una comparación de datos correcta, esto con diferentes intervalos de valores aplicados a los parámetros de adquisición, para observar que comportamiento presenta cada antena, ya que cada una de ellas alcanza distinta profundidad con buena resolución; cabe mencionar que esto es parte de una calibración que se realizó para el completo dominio del equipo.



Foto 3. Antena de 250 MHz y 500 MHz

3. Se toman muestras alteradas del suelo presente en el terreno para su estudio en laboratorio (sabiendo que los sitios estudiados en este trabajo cuentan con la facilidad para ello sin excavar).



Foto 4. Muestras alteradas sin excavación en el terreno.

4. Se tomaran fotografías del lugar para generar una idea clara del caso estudiado, así como para facilitar la comparación entre los resultados obtenidos y lo existente del terreno.



Foto 5. Contacto entre estratos rocosos.

5. Los datos obtenidos se analizan aplicándoles algunos de los filtros disponibles, así como también una paleta de colores para distinguir entre materiales, con la finalidad de mejorar su calidad a manera de que se puedan observar con mayor facilidad los resultados, los filtros

se aplicaran dependiendo de las condiciones en se realizó el estudio y a la conveniencia del operador.

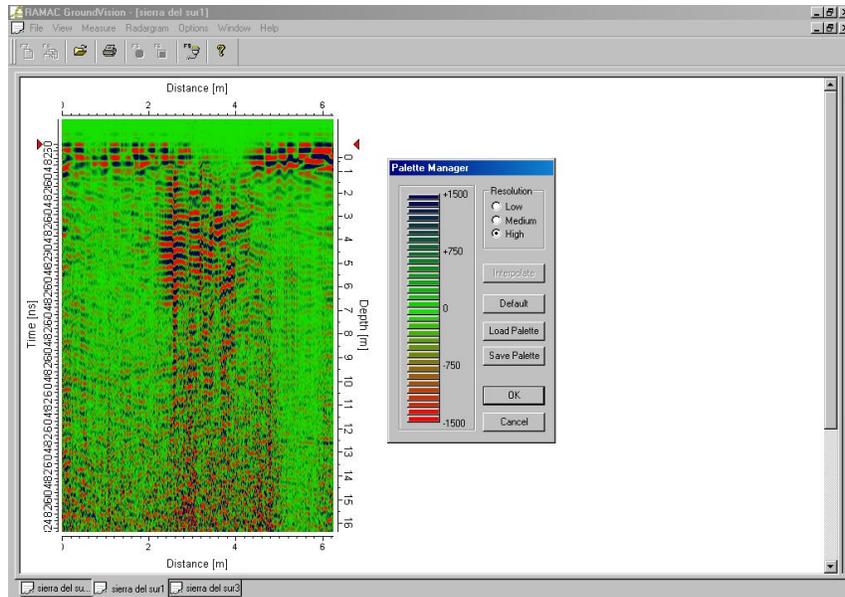


Figura 16. Vista de resultados con una paleta de colores generado por el usuario.

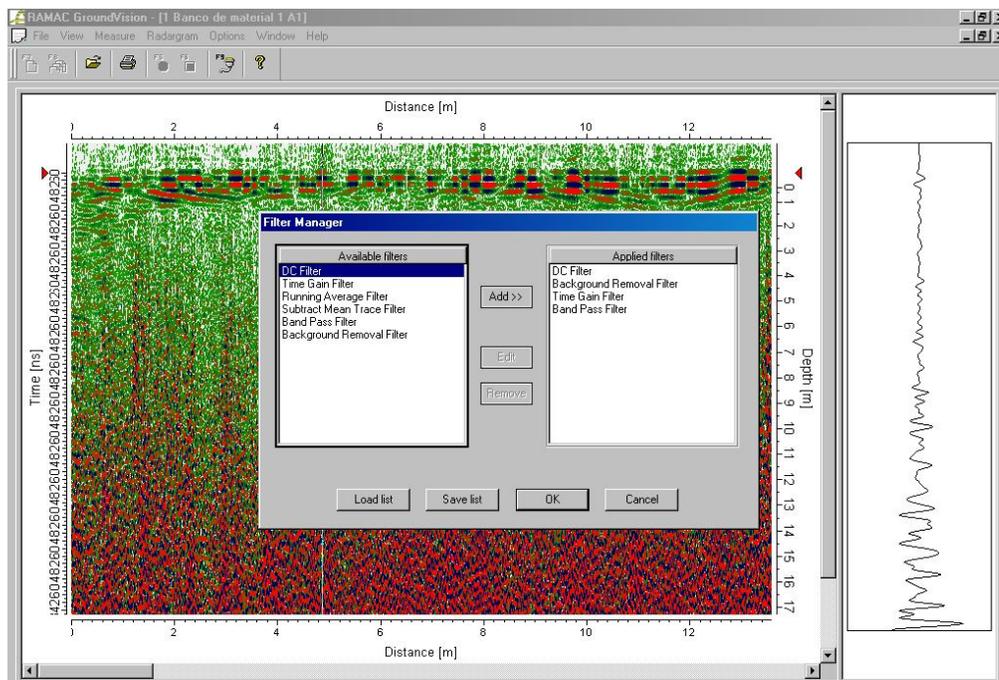


Figura 17. Vista filtros disponibles para mejorar la calidad de los resultados.

6. Para mejorar la fácil interpretación de resultados y presentación de los mismos se recomienda el tratamiento de los radargramas mediante un software especializado en edición de imágenes, debido a que por lo potencial del método en cuestión de información adquirida, se presentan datos que pudieran distorsionar la imagen respecto a lo que se está buscando. El autor propone el programa generado por el mismo, que consiste en un procesamiento de imágenes simple, el cual fue utilizado en particular para los resultados presentados en este documento; adicionalmente se mencionan algunos los parámetros utilizados para el procesamiento del radargrama.

A continuación se describe el programa generado en el entorno del software llamado "Matlab" Versión 5.1:

```
clear all;
close all;
clc;
img1 = imread('VicenteAcosta3.jpg');
img1 = im2double(img1); % cambia a formato de doble precisi?n
% Para mayor resoluci?n
% %closepreview(obj); % cierra la adquisici?n inicial
figure
subplot(2,3,1),imshow(img1)
xlabel('original')
%tong = (img1(:,:,1)+img1(:,:,2)+img1(:,:,3))/3; % saca tonos de gris
tong = rgb2gray(img1); % esto hace lo mismo que la f?rmula anterior
subplot(2,3,2), imhist(tong);
title('Hist de tonos de gris')

%Umbral de gris habiendo calculado el tono de gris

nivel_gris=graythresh(tong);
bin_nivel_gris=im2bw(tong,nivel_gris);
subplot(2,3,3),imshow(bin_nivel_gris)
xlabel('tonos de gris en b/w')

% Escoge el color verde
img1a=img1(:,:,2);
subplot(2,3,4),imshow(img1a);
```

```
xlabel('rojo')
subplot(2,3,5), imhist(img1a);
title('Hist de verde')
nivel_verde=graythresh(img1a);
%bin_nivel_verde=im2bw(img1a,0.25);
bin_nivel_verde=im2bw(img1a,nivel_verde);
subplot(2,3,6),imshow(1-bin_nivel_verde) % INVIERTE LOS VALORES
xlabel('compl de verde en b/w')
```

```
% Seleccion de un rango del histograma para diferenciar objetos
[ax,ay]=size(img1a);
```

```
for m=1:ax
for n=1:ay
if (img1a(m,n)>0.8 & img1a(m,n)<0.9)
img1a2(m,n)= 0;
else
img1a2(m,n)= 1;
end
end
end
```

```
figure, imshow(img1a2);
xlabel('Imagen con nivel seleccionado')
```

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se muestran los radargramas más relevantes, así como fotos e imágenes auxiliares empleados en algunos de los muestreos realizados.

Se tiene el primer resultado obtenido de un banco de material ubicado en la carretera a Tlacote.

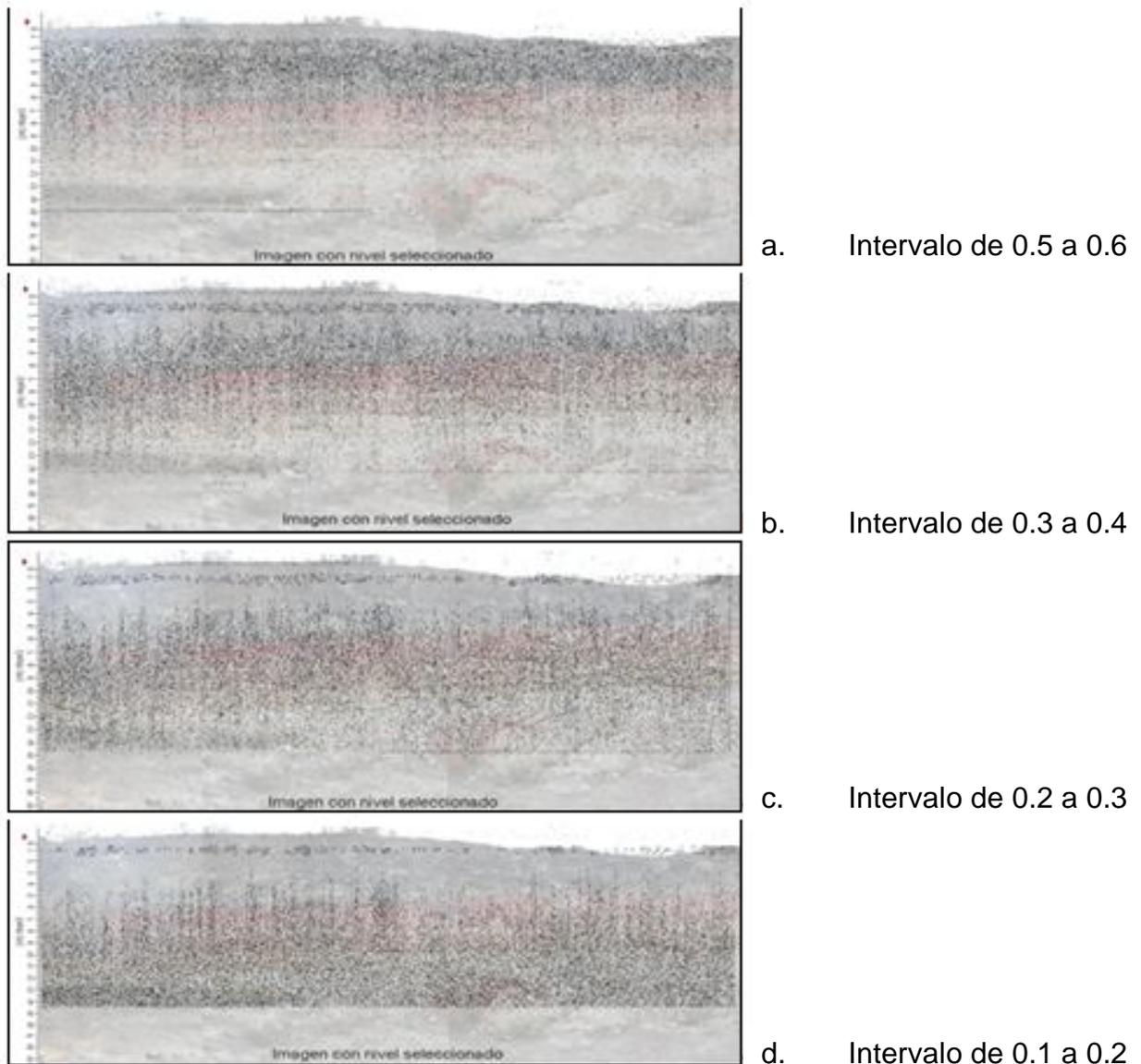


Figura 18. Superposición de radargramas en distintos intervalos de saturación con fotografía del perfil estratigráfico del banco.

En la figura 18 se pueden observar claramente los diferentes estratos que componen el banco de material, para este caso en particular contamos con un corte expuesto del banco, lo que nos permitió obtener el perfil estratigráfico, y de esta manera al realizar nuestro muestreo logramos comprobar que los resultados son confiables.

Se realizó un muestreo en asentamientos visibles de vialidades en distintas colonias de la ciudad de Querétaro.

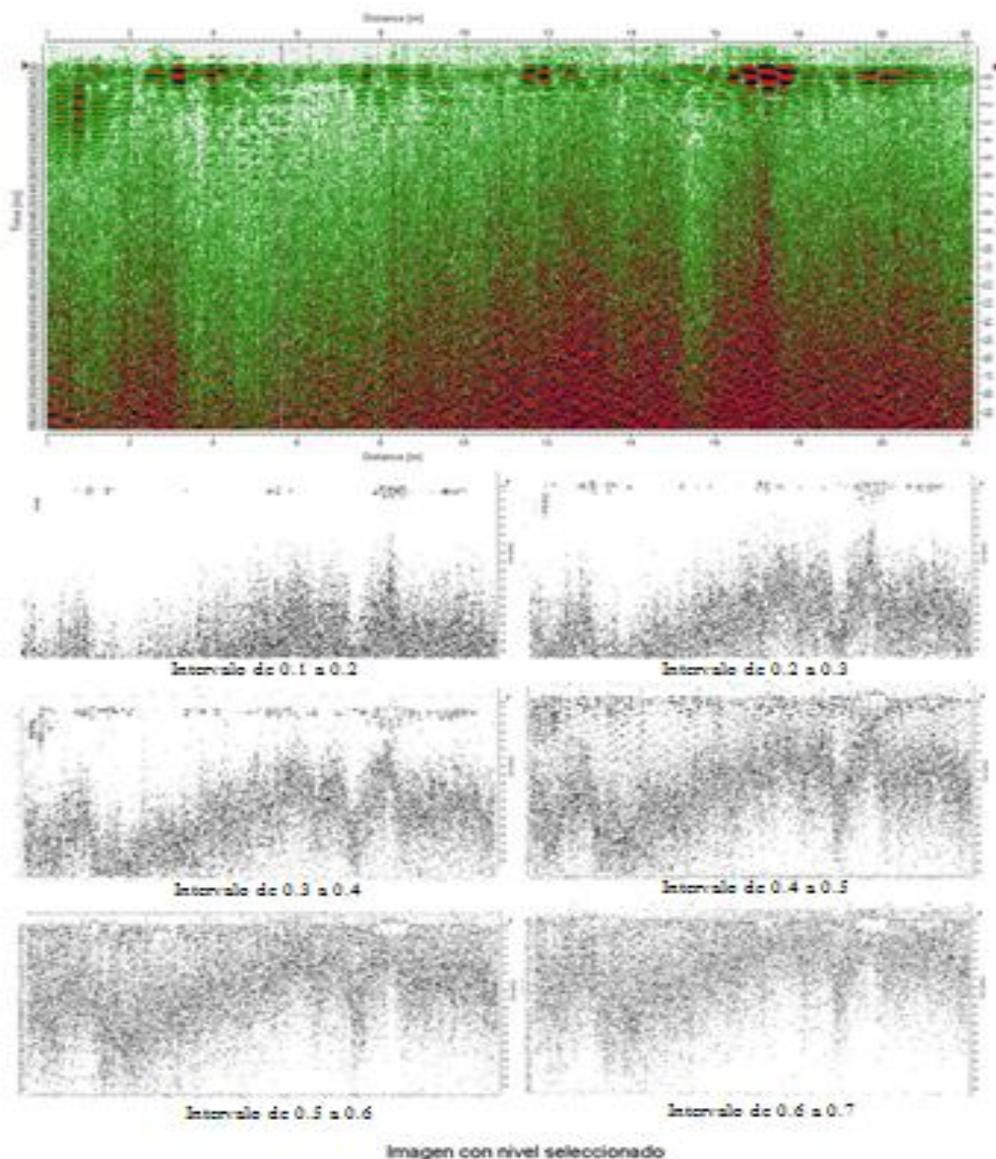


Figura 19. Asentamiento presentado en la Calle Vicente Acosta en la colonia Villa las Arboledas.

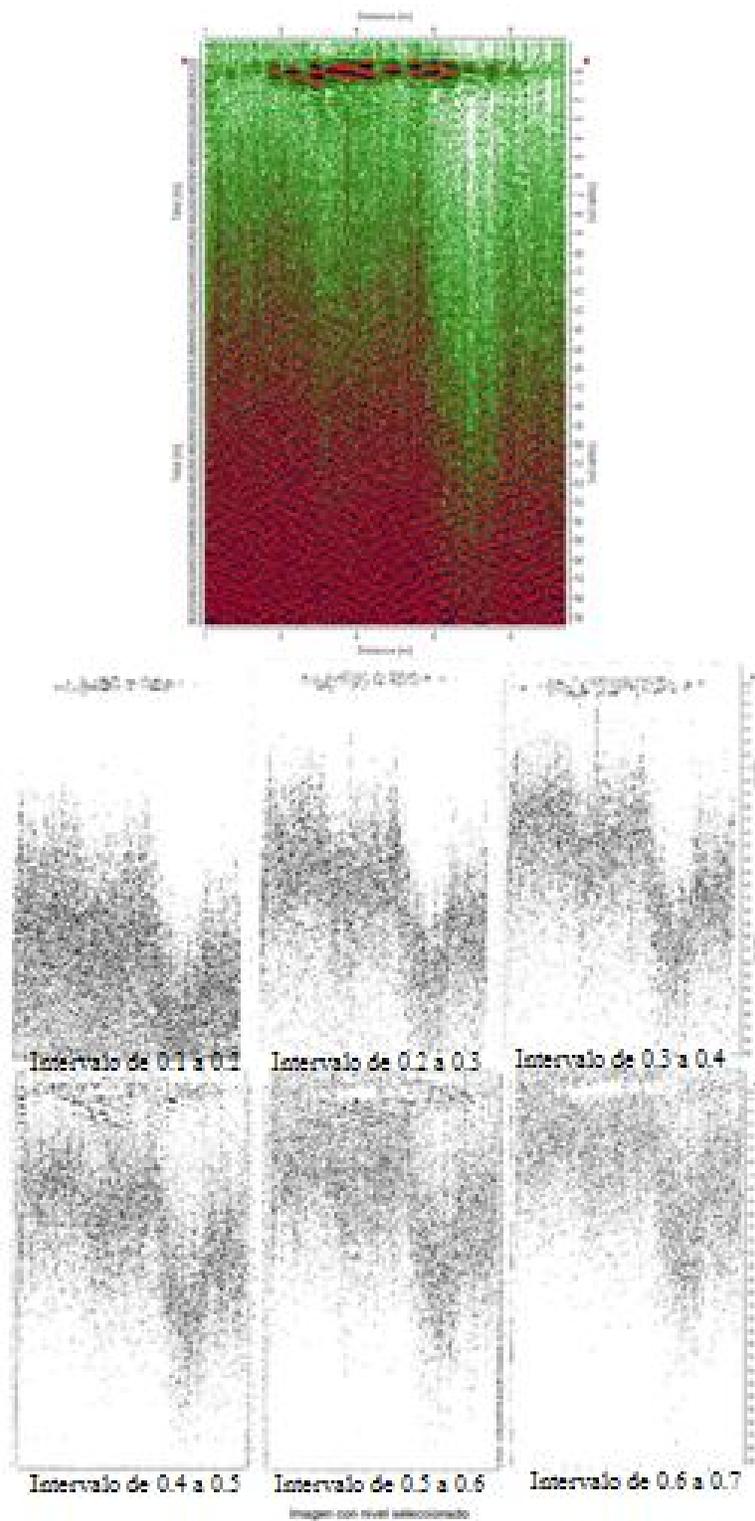


Figura 20. Asentamiento presentado en la Calle Federico Samaniego en la colonia Villa las Arboledas.

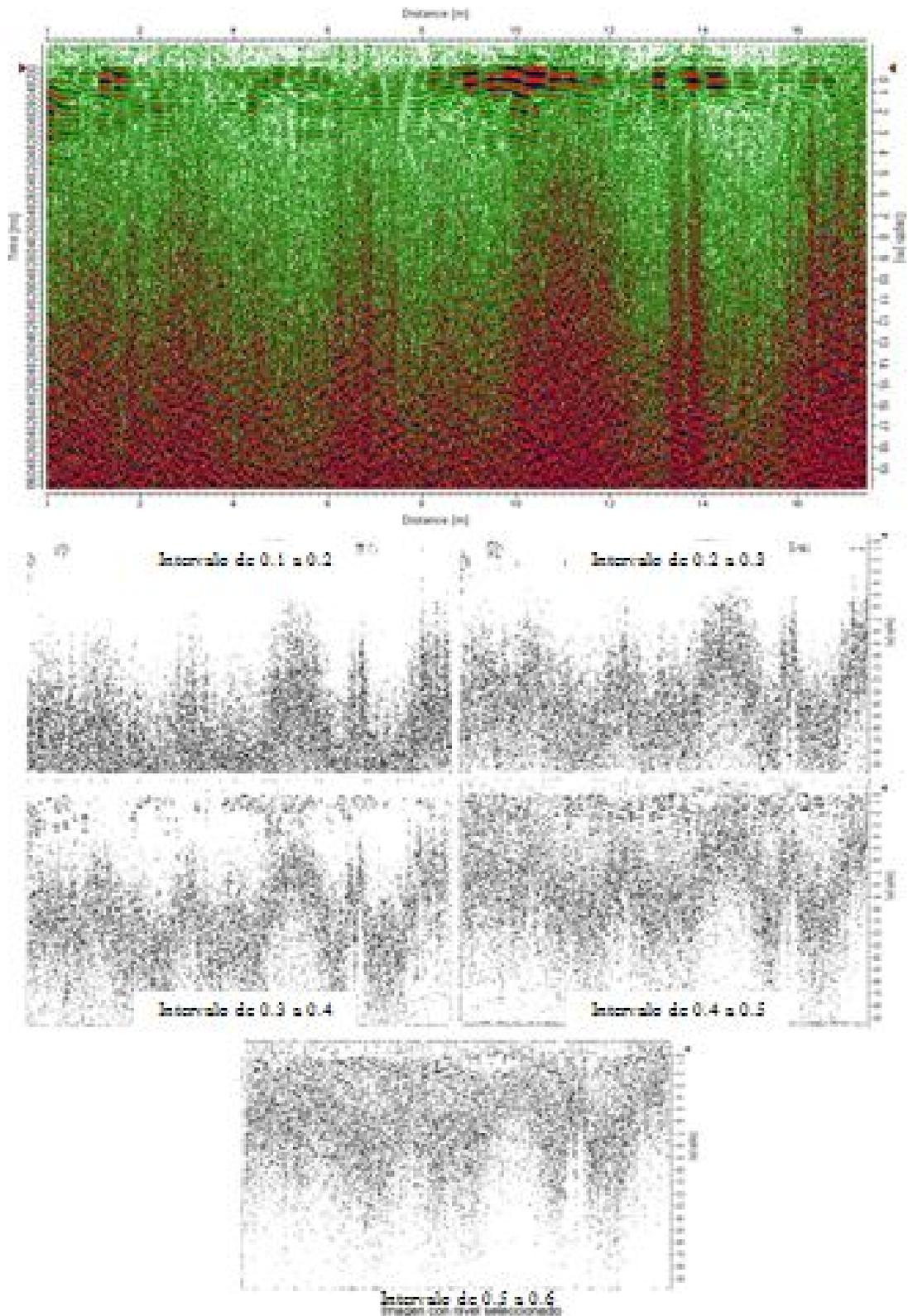


Figura 21. Asentamiento presentado en la Calle Paseo del Gorrion en la colonia Villa las Arboledas.

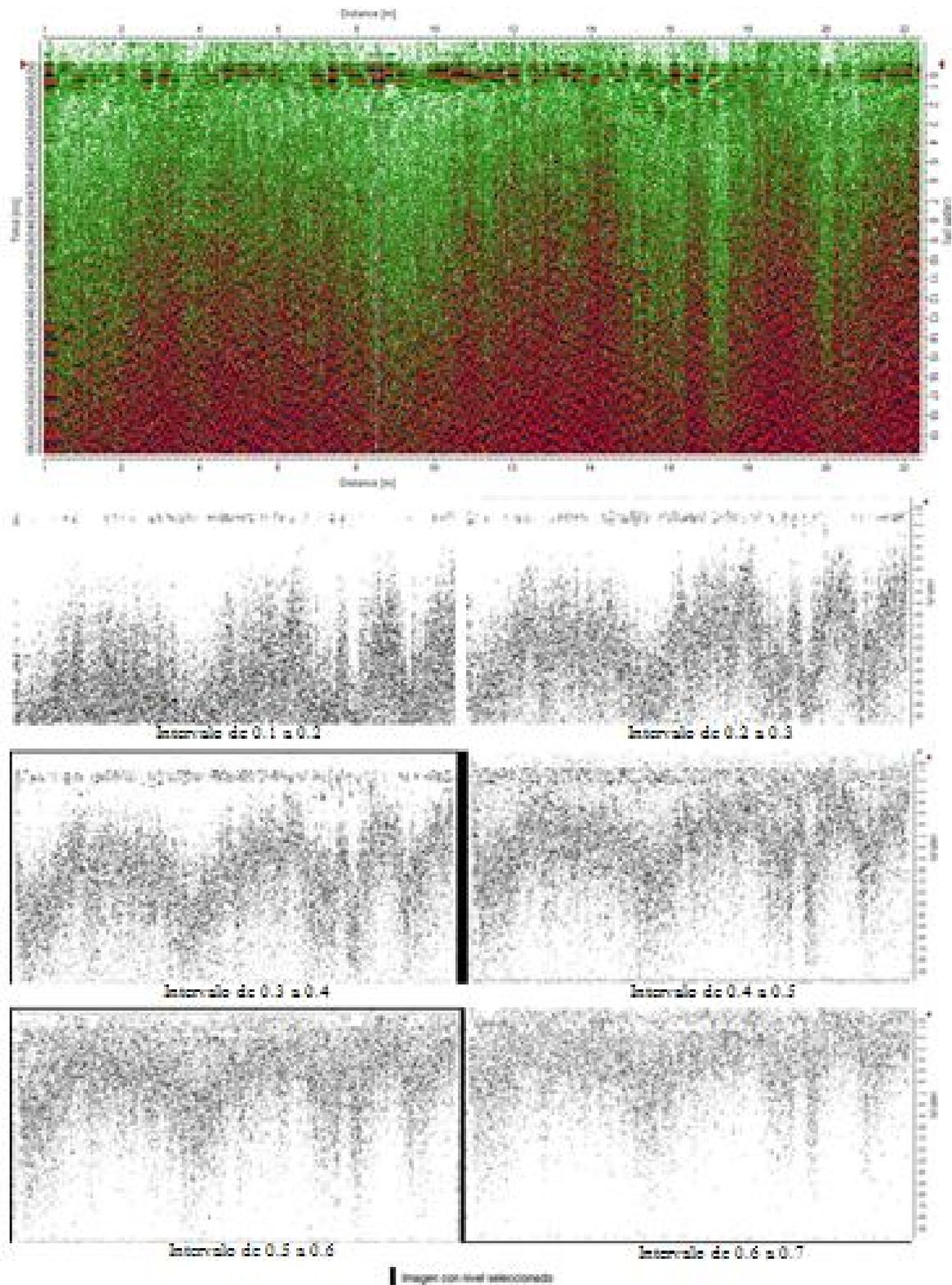


Figura 22. Asentamiento presentado en la Calle Sierra del Sur en la colonia la Sierrita.

Como se puede observar en los diferentes muestreos realizados, existe un “escalón” formado por los asentamientos, que permanece constante en cada uno de los intervalos de análisis durante el proceso del radargrama, así como en cada estrato que se refleja; cabe mencionar que dicho asentamientos son apreciables sobre el nivel de piso terminado.

Un muestreo referente al Distribuidor Vial Bicentenario, donde la comparación de resultados se hizo con un estudio de Gravimetría haciendo énfasis en donde la principal preocupación era la sospecha de fallas geológicas y/o cambios abruptos en la densidad de los materiales del subsuelo coincidentes con elementos estructurales de apoyo del mismo.

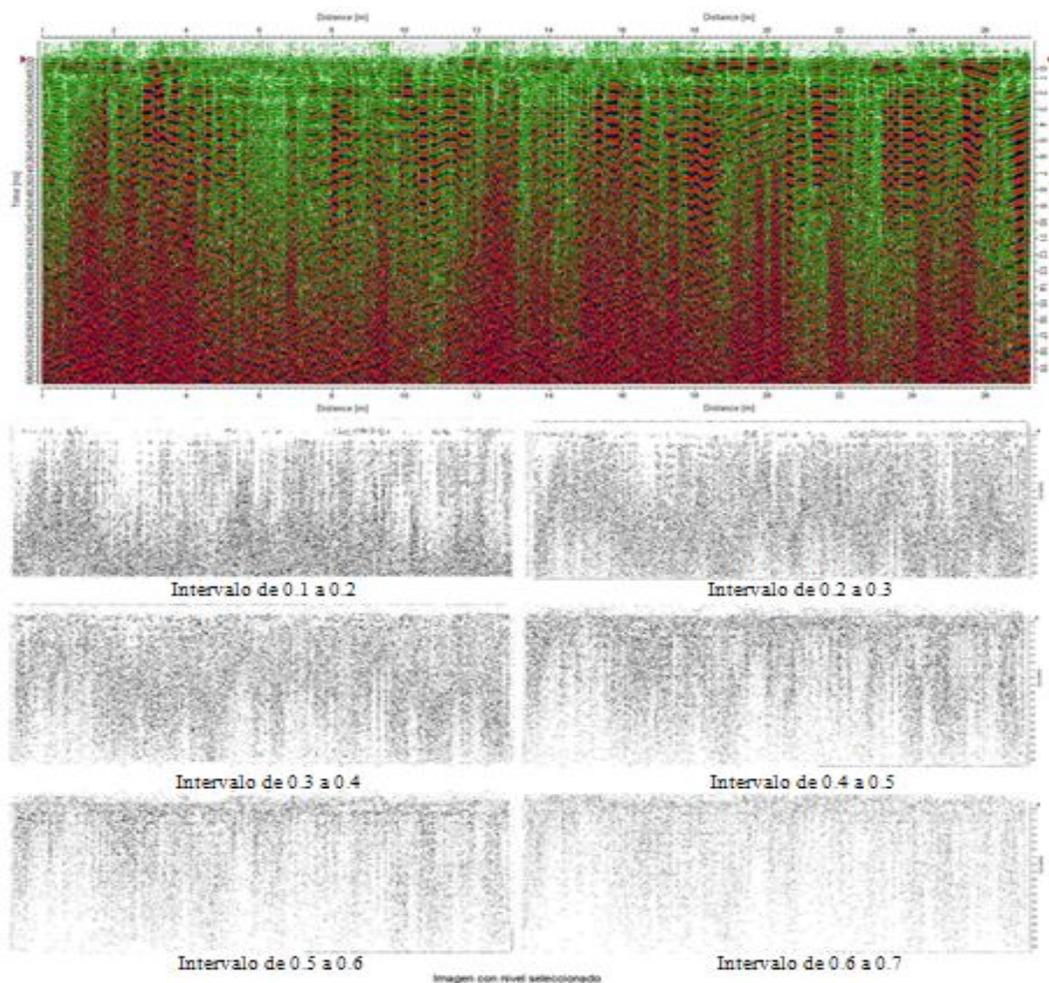


Figura 23. Traza efectuada sobre el Apoyo 5 del Distribuidor Vial Bicentenario.

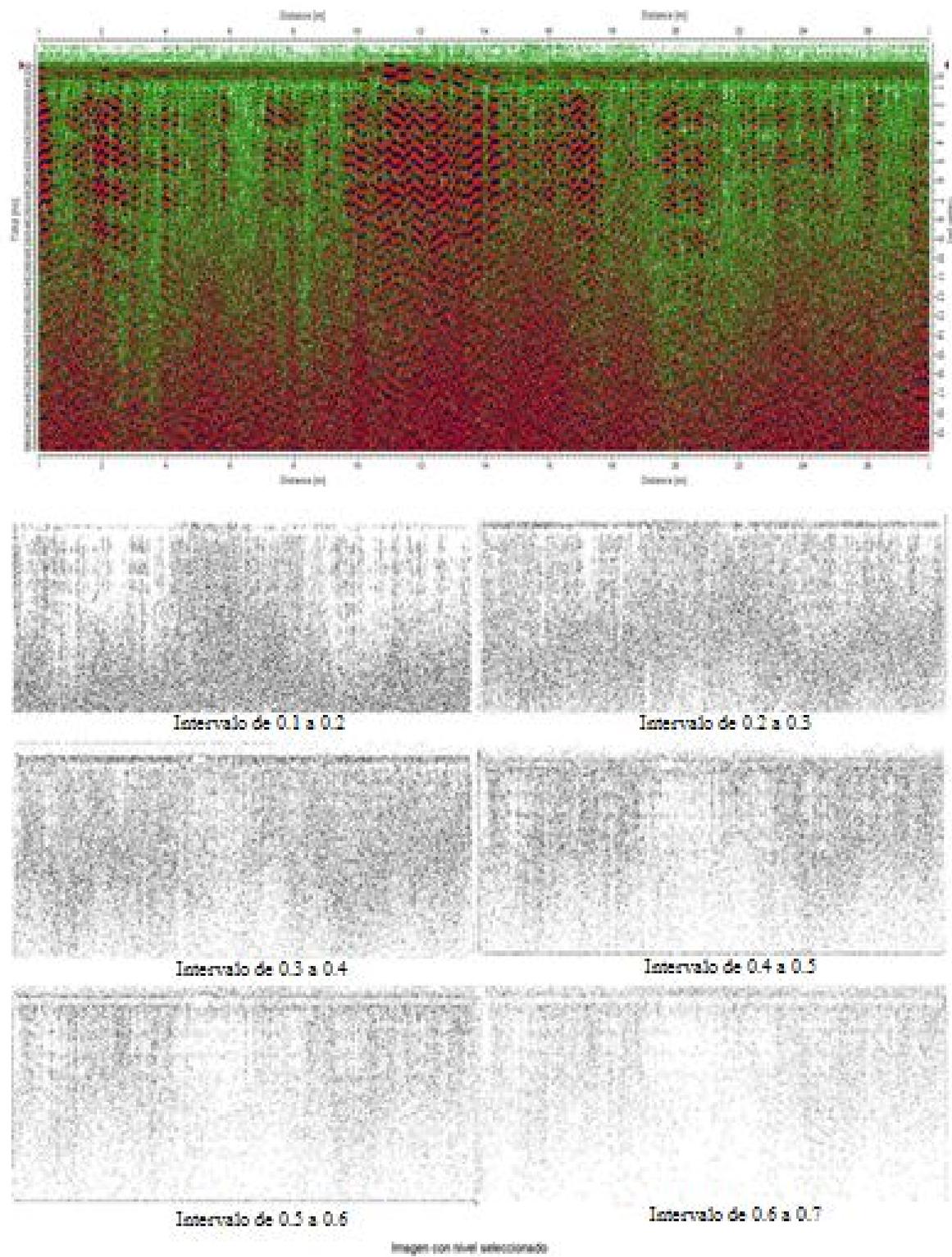


Figura 24. Trazo efectuada sobre el Apoyo 7 del Distribuidor Vial Bicentenario.

El siguiente resultado es producto del muestreo sobre la excavación existente para un pilote, donde la finalidad inicial era determinar el volumen necesario de concreto para la fabricación del mismo.

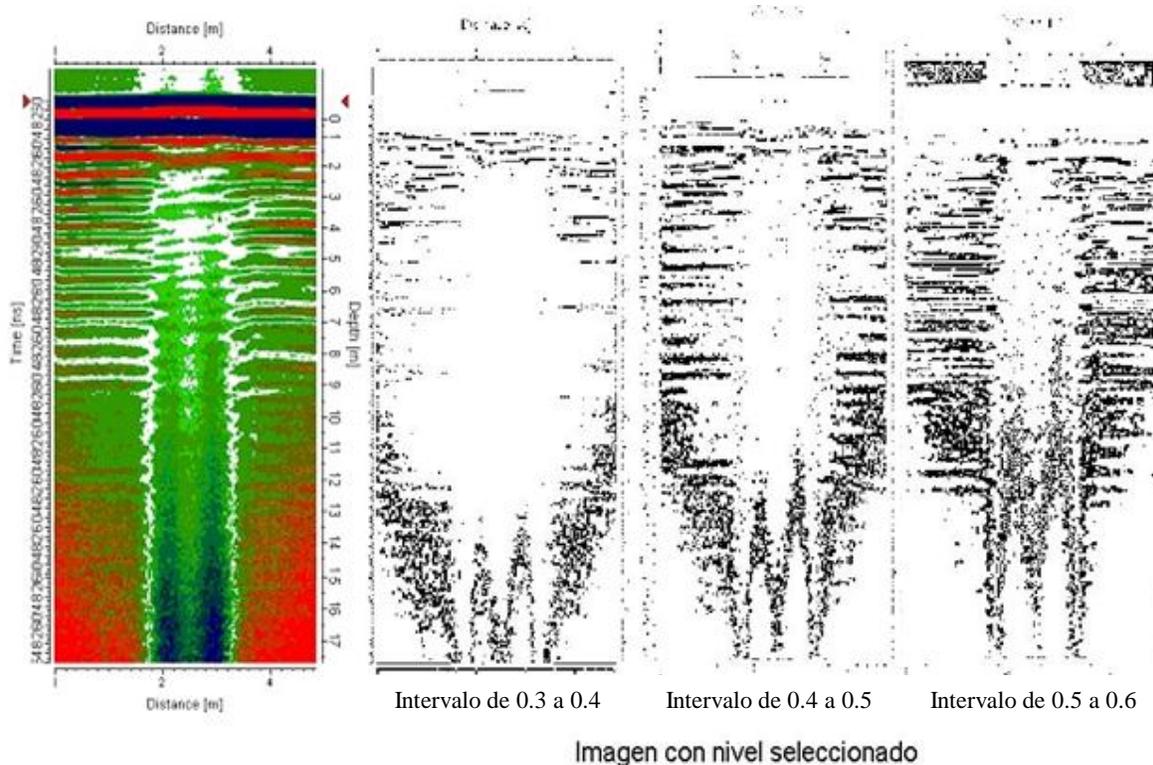


Figura 25. Descomposición de la saturación de radargrama referente a la excavación para pilotes del Distribuidor Vial Bicentenario.

No obstante en el radargrama de la figura 25 donde se observa la excavación definida para el pilote con los detalles que se generan debido a la rotación de la broca, al procesar la imagen con el programa empleado por el autor, se logra intuir que se trata de material semejante en la parte media de la excavación, lo anterior se verificó de manera cualitativa en el sitio.

La figura 26 corresponde a una de las aplicaciones del Georradar en la carretera a Xichú, donde se realizó un estudio geofísico para determinar las condiciones del subsuelo.

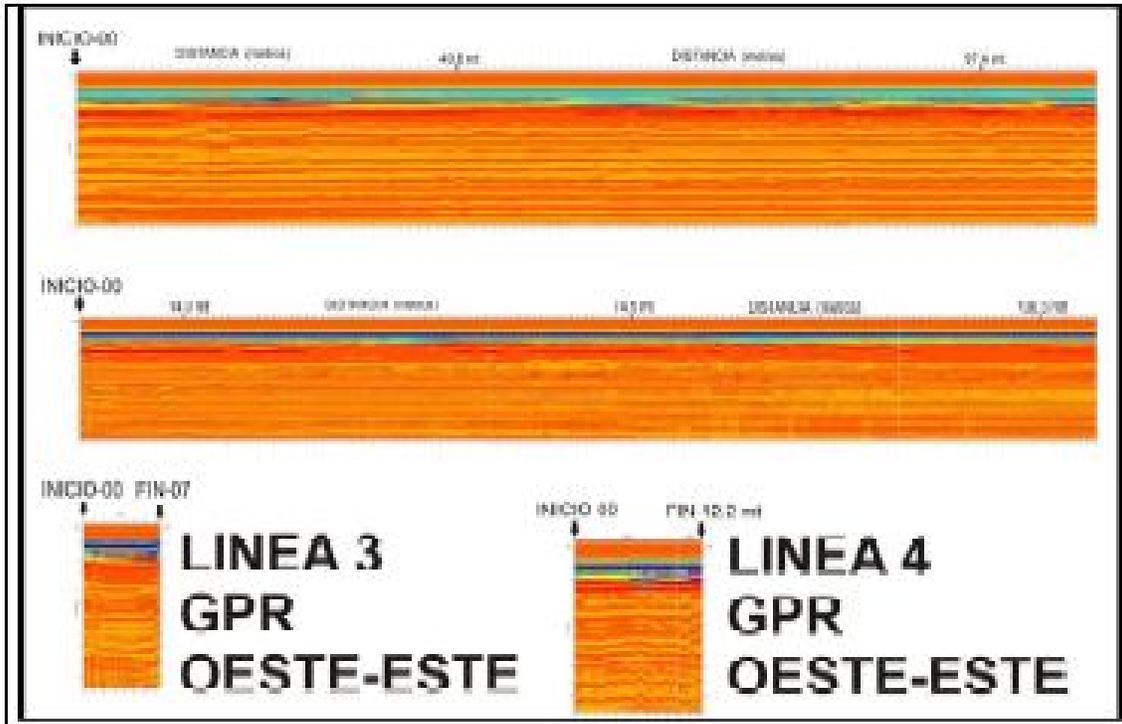


Figura 26. Fragmentos de radargramas adquiridos en la carretera a Xichú, Gto. Presentados en el Estudio geofísico para la evaluación de las condiciones del subsuelo, (Arzate, 2010).

IV. CONCLUSIONES

Se logró establecer el criterio de interpretación de resultados por medio de un procesamiento de imágenes simple (con el programa que se describe en este documento) de los radargramas obtenidos por medio del GPR, lo que permite diferenciar los estratos contenidos en el subsuelo y algunas estructuras geológicas sepultadas.

Con el procesamiento simple de imágenes y variando los parámetros de adquisición para determinar tanto la profundidad como la frecuencia del muestreo, el radargrama muestra de manera clara los diferentes estratos contenidos en el subsuelo; cabe mencionar que todos los resultados son consistentes en la información obtenida, ya que es posible observarlas diferentes condiciones estudiadas *in situ*.

El comportamiento de los contrastes litológicos resulta sencillo de analizar después de procesar las imágenes mediante el programa propuesto, en una forma certera y definida con buena resolución.

Para las diferentes condiciones estudiadas de los sitios ya mencionados, se observa que la respuesta del método es aceptable, empleando los parámetros adecuados para cada necesidad en particular.

Durante el periodo de muestreo para esta investigación se encontraron contrastes en las propiedades físicas de los materiales, por ejemplo en la densidad auxiliándonos de la gravimetría, para las propiedades mecánicas se efectuaron pruebas en laboratorio y se realizó una clasificación geológica, mientras que para la conductividad eléctrica, velocidad de propagación sísmica,

etc., se encontraron ciertas limitantes respecto al acceso de los equipos especializados que miden estos valores.

Resulta adecuado emplear el método bajo distintas condiciones, ya que por ser un procedimiento no invasivo ni destructivo permite optimizar tiempos y recursos de obra.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Díaz, G. J., Zúñiga Dávila Madrid, R., Pacheco Alvarado, F.J., Guzmán Speziale, M., y Nieto Obregón, J., 2000; El graben de Querétaro, Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo: Geos, boletín de la Unión Geofísica Mexicana, v. 20, p. 2-7.
- Aguirre-Díaz G. J., Nieto-Obregón y Zúñiga F. R., 2005; Seismogenic Basis and Range and intra-arc normal faulting in the central Mexican Belt, Querétaro, México: Geological Journal, 40: 215-243.
- Alaniz-Álvarez S. A, Nieto-Samaniego A. F., Reyes-Zaragoza M. A., Orozco-Esquivel M. T., Ojeda-García A. C. y Vassallo F. L., 2001; Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de allende-Querétaro, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. V. 18, n. 2, p. 129-148.
- Álvarez-Manilla A., 1999; Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro. Tesis de Maestría en Ciencias (Mecánica de Suelos), Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Arroyo M., Arzate J., Yutsis V., Martínez J., 2002; Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro, área de geofísica, geología y geotecnia. Reporte Comisión Estatal de Agua (CEA), Querétaro, México.
- Annan, A.P., Ground penetrating radar: Principles, procedures, & applications, Sensors & Software Inc. Technical Paper, 2003.
- Annan, A.P., and S.W. Cosway, Ground penetrating radar survey design, Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP'92, Oakbrook, Illinois, pp. 329–351, April 26–29, 1992.
- Annan, Gpr Methods For Hydrogeological Studies Hydrogeophysics, 185–213. 2005 Springer. Printed in the Netherlands.
- Archie, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, 146, 54–62, 1942.
- Arlandi, M. (2005): "Geofísica Aplicada a la obra civil. Método geoeléctrico y sísmica de refracción. Casos prácticos". XII Curso de Geotecnia Aplicada. Universidad de Jaén 2005, 64 pp.
- Bordehore, L. (2005). Subsuelo y Obra urbana, 16, 34-43.
- Born, M., and E. Wolf, Principles of Optics, 6th Edition, Pergamon Press, 1980.

- Brekhovskikh, L.M., *Waves in Layered Media*, New York, Academic Press, 1960.
- Bristow, C.S., and H.M. Jol, *Ground Penetrating Radar in Sediments*, Geological Society, London, Special Publications, 211, 2002.
- Carreón-Freyre D., Cerca M., Luna-González L. y Gámez-González F. J., 2005; Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro: *Revista Mexicana de ciencias Geológicas*, v. 22, num 1, p. 1-18.
- Cataldi, A. et al.: "método borehole radar" documento 8 pp. www.trx-consulting.com
- Chiodi, M., Monod, O., Busnardo, R., Gaspar, D., Sanchez, A., Yta, M., 1988, Une discordance ante Albien nedatée par une faune d'ammonites et de braquiopodes de type Téthysien au Mexique Central: *Geobios*, 21, 125-135.
- CNA, 2000; Determinación de la disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Querétaro, Estado de Querétaro: Comisión Nacional del Agua, Subdirección general técnica, Gerencia de Aguas subterráneas.
- Estrella, G. (2012): "Monitoreo y Predicción de Agrietamientos por Subsidencia en la falla 5 de Febrero", Universidad Autónoma de Querétaro.
- Green, A., K. Holliger, H. Horstmeyer, H. Maurer, J. Tronicke, and J. van der Kruk, 3-D acquisition, processing and imaging of ground penetrating radar data, Tutorial 2 Notes, Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2002), Santa Barbara, California, April 29–May 2, 2002.
- Irving, J.D. and R.J. Knight, Removal of wavelet dispersion from ground-penetrating radar data, *Geophysics*, 68(3), 960–970, 2003.
- Jackson, J.D., *Classical Electrodynamics*, John Wiley and Sons, 1962.
- JORDA, L, (2005): "Geofísica somera aplicada a informes geotécnicos de pequeña escala: detección de cavidades por tomografía eléctrica". *INGEOPRES* nº 139, pp. 20 – 24
- JORDA, L, (2005): "Técnicas geofísicas de reconocimiento del subsuelo: Georadar y tomografía eléctrica. Casos prácticos." Rudnik Ingenieros Consultores. Art. Rudnik pp. 34 – 43.

- Lehmann, F. and A.G. Green, Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions, *Geophysics*, 64(3), 719–731, 1999.
- Lehmann, F., and A.G. Green, Topographic migration of georadar data: Implications for acquisition and processing, *Geophysics*, 65(3), 836–848, 2000.
- López-Blanco, M., Marzo, M. y Muñoz, J.A. (2003). *Basin Research*, 15-1, 73-96.
- Olhoeft, G.R., Electrical properties of rocks, In: *Physical Properties of Rocks and Minerals*, Vol. II, Y.S. Touloukian, W.R. Judd, and R.F. Roy, eds., McGraw-Hill, 1981.
- Olhoeft, G.R., Electrical properties from 10⁻³ to 10⁺⁹ Hz—Physics and chemistry, *Proceedings of the 2nd. International Symposium on the Physics and Chemistry of Porous Media*, 154, American Institute of Physics Conference Proceedings, pp. 281–298, 1987.
- Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2000)*, Goldcoast, Australia, May 23–26, 2000, SPIE 4084.
- Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2002)*, Santa Barbara, California, April 29–May 2, 2002.
- Roberts, R.L. and J.J. Daniels, Analysis of GPR polarization phenomena, *JEEG*, 1(2), 139–157, 1994.
- Romero Castellano Luis Fernando, Jáuregui Eslava Pedro, Ramón Valencia Jacipt Alexander, Aplicación de una técnica Geofísica (Georadar) para el estudio de Biomasa Subterránea en Ecosistemas Costeros, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, junio, año/vol. 18, número 001, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, pp 5-16.
- Santamarina, J.C., K. Klein, and A. Fam, *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, John Wiley & Sons, 2001.
- Sihvola, A.H., How strict are theoretical bounds for dielectric properties of mixtures?, *IEEE Trans. On Geoscience & Remote Sensing*, 40, 880–886, 2002.
- Smythe, W.R., *Static & Dynamic Electricity*, Taylor & Francis, A SUMMA Book, 1989.
- Sommerfeld, *Partial Differential Equations in Physics*, New York, Academic Press, 1949.

- Szerbiak, R.B., McMechan, G. A., Corbeanu, R., Forster, C. y Snelgrove. S. H. (2001). *Geophysics*, 66, 4, 1026-1037.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16(3), 574–582, 1980.
- Valdéz-Moreno G., Aguirre-Díaz G. y López-Martínez M., 1998; El volcán La Joya, Estados de Querétaro y Guanajuato – Un estrato volcán miocénico del cinturón volcánico mexicano: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.15, No. 2, 181-197
- VV.AA. (2004): "Detection de cavités souterraines par méthodes géophysiques. Guide technique. Ed. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris. 170 pp.
- Wait, J.R., *Electromagnetic Waves in Stratified Media*, 2nd edition: New York, Macmillan, 1962.
- Y. Rubin and S. S. Hubbard (eds.), *Hydrogeophysics*, 185–213. Springer. Printed in the Netherlands, 2005.
- Yilmaz, O., *Seismic data analysis—Processing, inversion, and interpretation of seismic data*, Society of Exploration Geophysicists J., 2027, 2000.
- Zúñiga F. R., Pacheco J. F., Guzmán-Speziale M., Aguirre-Díaz G. J., Espindola V. H., Nava E., 2003; The Sanfandila earthquake sequence of 1998, Querétaro, México: activation of an undocumented fault in the northern edge of central Trans-Mexican Belt: *Tectonophysics* 361, 229-238.

ANEXO 1

SALAMANCA

Se realizó el estudio con la finalidad de localizar la profundidad de la cimentación del templo ya que se proyecta realizar una serie de remodelaciones, mismas que podrían causar daños estructurales si los cortes no se hacen adecuadamente.

Se llevaron a cabo 15 mediciones sobre la superficie del recinto, principalmente a un costado de los muros. Las mediciones consistieron en realizar perfiles en promedio de 10 metros de longitud en sentido paralelo a los muros laterales con el objeto de encontrar rastros de la cimentación de la misma.

Los resultados obtenidos muestran que se en el área estudiada, se tiene una cimentación en muros laterales a los alteres de la izquierda y derecha con respecto al recinto principal, mismo que presentan modificaciones ya que cuentan con un escalón para tener una mayor elevación con respecto a nivel de piso.

En el sitio donde está colocado el escalón del altar se observa que existen inclusiones de materiales diferentes a las del sondeo realizado, esto determinado por comparación, el cual le proporciona estabilidad al escalón ya mencionado, por otro lado en el altar de la derecha se realizó un pozo de exploración de donde se sospecha que no cuenta con una correcta cimentación por lo que se tendría que recimentar para obtener resultados satisfactorios en las remodelaciones proyectadas sin generar algún daño estructural.

Los cambios en la susceptibilidad magnética se presentan, en general, a partir de 2.00 m de profundidad, esto puede ser un síntoma de cambio de material de forma gradual, cambios en los contenidos de agua u otros, esto no se pudo determinar debido a la falta de muestras que nos pudieran dar una comprensión más adecuada de este fenómeno.

En general no se encontraron indicios de cambios abruptos en la conformación de las columnas que nos pudiera indicar una zona de cimentación establecida debajo de los sondeos realizados, sin embargo, sí se presentaron zonas con posibles cavidades –tal vez catacumbas o criptas cercanas a los altares.

El relleno superficial es cercano a 2.00 m de espesor, debajo del mismo se observa un cambio en la susceptibilidad magnética, pero al no tener un levantamiento geológico descriptivo, es difícil decir qué tipo de material se encuentra en ésta zona. (Chávez, 2010)

A continuación se presentan los radargramas registrados y las observaciones que de ellos se derivan:

Figura 27. Se presentan dos configuraciones inversas (flechas negras), las cuales nos indican una posible cavidad inmediatamente debajo de esta profundidad o un cambio abrupto de material.

Figura 28. Los primeros 2 m se realizaron cercanos al muro principal, se observa un comportamiento de material homogéneo hasta 2.00 m de profundidad (círculo amarillo), después de ésta zona se observa la excavación realizada en la zona con una profundidad de entre 1.20 y 1.50 m.

Figura 29. Capilla de exposición al Santísimo, se observa una estructura posiblemente relacionada con alguna cavidad enterrada entre 1 y 1.50 m.

Figura 30. Comportamiento de material homogéneo con estratificaciones paralelas, sala posterior al altar principal.

Figura 31. Se presenta el primer altar analizado; el comportamiento es errático indicativo de cambios abruptos de material y de posibles indicios de material conductivo como pueden ser placas de hierro, cobre etc.

HUMILPAN

Se realizó un muestreo de manera experimental en un predio ubicado en el municipio de Huimilpan, donde se presentan cavernas naturales debajo de la construcción de un observatorio.

En el radargrama mas representativo que se muestra a continuación, se observa claramente la presencia de las oquedades.

Figura 32. Radargrama de muestreo en cavernas en el municipio de Huimilpan.

CHULAVISTA

Se proyecta la construcción de un mercado en predio denominado “Chulavista”, se realizaron PCA's, no obstante se determinó la necesidad de complementar la información con estudios de geofísica para definir con precisión la extensión de posibles zonas de riesgo potencial asociadas a la presencia de suelos de baja calidad para soportar carga. Por esta razón, se llevó a cabo un estudio gravimétrico con el objeto de establecer límites precisos de las áreas afectadas por la presencia de vertederos y/o antiguos bancos de material que aparentemente existieron en el predio de interés.

Figura 33. Ubicación del predio Chula Vista con respecto a la Cd. De Querétaro (círculo blanco).

Figura 34. Interpretación de las discontinuidades laterales (líneas rojas punteadas) marcadas en los radargramas (líneas blancas). Las letras indican las diferentes zonas “anómalas”, coincidentes en gran medida con zonas de mínimos gravimétricos relativos.

Figura 35. Radargramas de los perfiles realizados en el predio de Chula Vista con el objeto de correlacionarlos con los resultados del estudio gravimétrico. Debido a que unos perfiles son más largos que otros fue necesario reducir la escala vertical para mostrarlos completos.

La aportación al estudio con el GPR se menciona a continuación:

“El material de la zona norte del predio, muestra cierta homogeneidad, y ha sido identificado como material compacto de origen volcánico que no presenta mayores complicaciones para la construcción pues presenta características adecuadas para el desplante de construcciones. Sin embargo, uno de los mínimos gravimétricos locales, también identificado como una discontinuidad lateral por el GPR, se identifica como un relleno antropogénico.”(Arzate, 2010).

XICHÚ

La finalidad del estudio fue llevar a cabo un trabajo de prospección geofísica utilizando mediciones de gravimetría de precisión y perfiles de Georadar (100 MHz), para evaluar las condiciones del terreno a lo largo de la carretera a Xichú en el entorno del km 63+100 de la carretera San Luis de La Paz-Xichú, en el Edo. de Guanajuato, con énfasis en la presencia de una posible falla geológica.

La zona de estudio está ubicada en el entorno del km 63+100 de la carretera San Luis de la Paz a Xichú, Gto. (FIGURA 1). El área se caracteriza por contar con una topografía accidentada, asociada a un pasado de intenso tectonismo y drenada por múltiples arroyos que se encausan en su mayor parte hacia el N-NW y S-SE. Fisiográficamente la zona se encuentra en los límites de las Provincias de la Sierra Madre Oriental y de la Mesa Central.

Figura 36. Segmentos centrales de los radargramas a lo largo de la carretera a Xichú (parte superior) y a lo largo del antiguo camino a Xichú.

Figura 37. Segmentos sur de los radargramas realizados a lo largo de la carretera a Xichú. La estratigrafía de la Línea 1 muestra variaciones importantes que no se observan en la Línea 2.

De los resultados se concluyó que las variaciones en la Línea 1 de GPR indican que esta zona de la carretera se encuentra más afectada por posibles desplazamientos de suelo e irregularidades en el subsuelo, probablemente anteriores a la construcción de la carretera a Xichú (Arzate, 2010).