

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE HISTORIA
AREA DE ARQUEOLOGIA

“Prospección geofísica aplicada a la arqueología. El método de georadar como una alternativa en la investigación arqueológica”

TESIS

Presentada por:

MANUEL TRINIDAD HERNANDEZ TECU

Previo a conferírsele el Grado Académico de

LICENCIADO EN ARQUEOLOGIA

Nueva Guatemala de la Asunción,
Guatemala, C.A., noviembre de 2001

DL
14
T(370)

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE HISTORIA
AREA DE ARQUEOLOGIA**

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR: Ing. Agr. Efraín Medina Guerra
SECRETARIO: Dr. Mynor René Córdón y Córdón

AUTORIDADES DE LA ESCUELA DE HISTORIA

DIRECTOR: Lic. Gabriel Efraín Morales Castellanos
SECRETARIO: Mtro. Edgar Humberto Carpio Rezzio

CONSEJO DIRECTIVO

DIRECTOR:	Lic. Gabriel Efraín Morales Castellanos
SECRETARIO:	Mtro. Edgar Humberto Carpio Rezzio
VOCAL I	Lic. Oscar Rolando Gutiérrez
VOCAL II	Mtro. Carlos René García Escobar
VOCAL III	Est. Lilian Elizabeth Mayén de Méndez
VOCAL IV	Est. Luz Midilia Marroquín Franco
VOCAL V	Est. Enrique Sincal

COMITÉ DE TESIS

Maestro Edgar Humberto Carpio Rezzio
Licenciada Patricia Del Aguila Flores
Licenciado Alvaro Luis Jacobo González



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE HISTORIA
Dirección y Secretaría
Edificio S-1, Segundo Nivel
Ciudad Universitaria, Zona 12
Ciudad de Guatemala
Teléfono 4769854 – Telefax 4769866

Guatemala, 23 de octubre de 2001.

Señores
Consejo Directivo
Escuela de Historia
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Respetables señores:

En atención a lo especificado en el Punto TERCERO, Inciso 3.1 del Acta No. 33/2001, de la sesión celebrada por el Consejo Directivo el día 10 de octubre de 2001 y dando cumplimiento a lo que reza el Capítulo VI, Artículo 13o, Incisos a, b, c y d del Normativo para la elaboración de Tesis de Grado de la Escuela de Historia, rendimos dictamen favorable al trabajo de tesis titulado **“Prospección geofísica aplicada a la arqueología. El método de georadar como una alternativa en la investigación arqueológica”**, del estudiante **MANUEL TRINIDAD HERNANDEZ TECU**, Carné No. 61944.

Sin otro particular, respetuosamente nos suscribimos de ustedes,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Licda. Patricia Del Aguila Flores.

Lic. Alvaro Luis Jacobo González.

c.c. Expediente

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE HISTORIA
RECIBIDO
OCT. 23 2001



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

ESCUELA DE HISTORIA

Dirección y Secretaría

Edificio S-1, Segundo Nivel

Ciudad Universitaria, Zona 12

Ciudad de Guatemala

Teléfono 4769854 - Telefax 4769866

Guatemala 9 de octubre de 2001

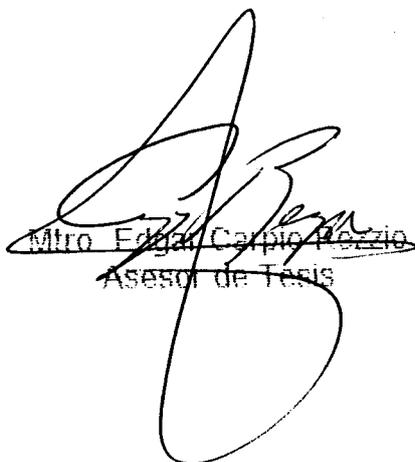
Señores Consejo Directivo
Escuela de Historia
USAC

Respetables Señores:

En atención a lo especificado en el punto Cuarto, inciso 4.8 del Acta No. 26/2000, de la sesión celebrada por el Consejo Directivo el día 6 de septiembre de 2000, y dando cumplimiento a lo que reza el Capítulo V. Artículo 11, incisos a,b,c,d,e del Normativo para la Elaboración de Tesis de Grado de la Escuela de Historia, rindo dictamen favorable al trabajo de tesis titulado: "Prospección geofísica aplicada a la arqueología. El método de Georadar como una alternativa en la investigación arqueológica", del estudiante Manuel Trinidad Hernández Tecú, carné no. 61944. Asimismo solicito que se nombre comité de tesis para continuar con los trámites correspondientes.

Sin otro particular me suscribo de ustedes, con las deferencias del caso.

Atentamente.


Mtro. Edgar Carpio Acosta
Asesor de Tesis

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE HISTORIA
RECIBIDO
OCT. 9 2001
F.  horas

TESIS QUE DEDICO

A:

DIOS

Con eterna gratitud a quien ilumina todos los caminos para que yo alcance mi ideal.

MIS PADRES:

Víctor Alejandro Hernández
Rosalina de Hernández

A quienes debo y agradezco infinitamente lo que soy.

MIS HERMANOS:

Víctor Gerardo, Gloria Marina, Luis Felipe, Blanca Noemí, Mario Abigaíl y Rosa Liliana

Con amor fraternal.

MIS SOBRINOS:

Jorge Eduardo, Víctor Armando, Mariana del Carmen, Luis Gerardo, Daniel, Manuel Alejandro, Alejandra, Nancy Liliana, Mario Alejandro y Luis Mario.

Con cariño.

A MI FAMILIA EN GENERAL

Con cariño y respeto.

**Los criterios vertidos en la presente tesis
son responsabilidad exclusiva del autor.**

**“Es necesario que nosotros (los arqueólogos) intentemos
alcanzar una medida de exactitud en un estudio que
trata de manera tan amplia con lo desconocido,
cambiante y lo ausente”.**

J. A. Wilson, 1942.

INDICE GENERAL

Contenido	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	3
1. MARCO GENERAL	3
1.1. Resumen histórico	3
1.2. Métodos de prospección geofísica aplicados a la arqueología	4
1.2.1. Resistividad eléctrica	7
1.2.2. Prospección magnética	9
1.2.3. Prospección electromagnética	12
1.3. Objetivos	14
1.4. El método de georadar	15
1.4.1. Generalidades del método de georadar	17
CAPITULO II	22
2 PRINCIPIOS TEORICOS	22
2.1. Propagación de la señal del radar	22
2.2. Profundidad de penetración	22
2.3. Reflexión y transmisión de la señal electromagnética	23
CAPITULO III	25
3. EFECTOS DE TERRENO Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	25
3.1. Efectos que sufre la señal en el subsuelo	25
3.1.1. Difracción	25

Contenido	Página
3.1.2. Difusión	27
3.1.3. Múltiples	27
3.2. Técnicas de procesamiento	28
3.2.1. Corrección de la deriva del tiempo cero o primer arribo	28
3.2.2. Filtros temporales	28
3.2.3. Migración	29
3.3. Modelado a base del sistema de trazado de rayos	29
CAPITULO IV	31
4. OPERACIÓN DE CAMPO	31
4.1. Descripción de los componentes del equipo de georadar	31
a. Unidad central o consola de control	31
b. Antenas	31
c. Transmisor y receptor electrónicos	32
d. Computadora portátil	32
4.2. Resolución del equipo de georadar	33
4.3. Técnica de reflexión de desplazamiento fijo	34
4.3.1. Parámetros que intervienen en la técnica de reflexión	35
a. Frecuencia de operación	36
b. Apilado	36
c. Ventana de tiempo	36
d. Intervalo de muestreo temporal	36
e. Intervalo de muestreo espacial	37

Contenido	Página
f. Separación de las antenas	38
4.4. Técnica de sondeo de velocidades	38
CAPITULO V	41
5. APLICACIONES DEL MÉTODO GEORADAR EN INVESTIGACIONES ARQUEOLÓGICAS EN MESOAMÉRICA Y OTRAS REGIONES.	41
5.1. Región Mesoamericana	41
5.1.1. Sitio arqueológico Ceren, San Salvador, El Salvador	42
5.1.2. Sitio arqueológico Cuicuilco, Cd. de México, México	45
5.1.3. Sitio arqueológico de La Campana, Colima, México	57
5.2. Otras regiones	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
ANEXO	68
BIBLIOGRAFIA	77

INDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1a. Ejemplo del efecto de difracción y eventos múltiples.	26
Figura 1b. Elemento a escala que provoca el efecto de difracción.	26
Figura 2. Elementos que integran el equipo de georadar Pulse EKKO IV.	32
Figura 3. Disposición del arreglo en la técnica de reflexión de desplazamiento fijo.	35
Figura 4. Configuración del arreglo en un sondeo de velocidades o Técnica de Punto Medio Común.	39
Figura 5a. Trayectoria de viaje de eventos generados en un sondeo de velocidades.	39
Figura 5b. Resultado de un sondeo de velocidades.	39
Figura 6. Pirámide y perfiles realizados al oriente de la estructura, sitio arqueológico de Cuicuilco, ciudad de México.	47
Figura 7. Columna estratigráfica, sitio arqueológico de Cuicuilco, ciudad de México.	48
Figura 8. Perfiles efectuados al sur de la pirámide, sitio arqueológico de Cuicuilco, ciudad de México.	50
Figura 9. Sondeo de velocidades, sitio arqueológico de Cuicuilco, frecuencia de 50 Mhz.	50
Figura 10. Perfil 1, realizado al oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.	52

Contenido	Página
Figura 11. Perfil 2, realizado al oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.	52
Figura 12. Perfil 3, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.	55
Figura 13. Perfil 4, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.	55
Figura 14. Perfil 5, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.	55
Figura 15. Perfil 6, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.	55
Figura 16. Perfil 7, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.	56
Figura 17. Continuidad de anomalías que dan origen a las respuestas en los radargramas de los perfiles trazados al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco.	56
Figura 18. Topografía y perfiles donde se realizaron los sondeos con radar, sitio arqueológico de La Campana, Colima, México.	58
Figura 19. Perfil 1, realizado con una frecuencia de 50 Mhz., sitio arqueológico de La Campana, Colima, México.	61
Figura 20. Perfil 2, realizado con una frecuencia de 50 Mhz., sitio arqueológico de La Campana, Colima, México.	61

Contenido

Página

Figura 21. Perfil 3, realizado con una frecuencia de 50 Mhz., sitio arqueológico de La Campana.

61

Figura 22. Perfil 4, sitio arqueológico de La Campana, frecuencia de 50 Mhz.

62

INDICE DE CUADROS

Contenido	Página
Cuadro 1. Valores de frecuencia para profundidades de penetración esperadas.	18
Cuadro 2. Valores de conductividad, constante dieléctrica, velocidad y atenuación para diversos materiales.	24
Cuadro 3. Frecuencia aplicada para algunas profundidades.	33
Cuadro 4. Resolución obtenida para profundidades de penetración.	34
Cuadro 5. Intervalo de muestreo, para la frecuencia seleccionada.	37

INTRODUCCION

Inicialmente, la Geofísica se ocupaba del estudio de la forma y estructura de la Tierra en su conjunto, pero a partir de 1920, se emplean cada vez más nuevas técnicas geofísicas en pequeña escala para la búsqueda de minerales, petróleo, aguas subterráneas, estructuras geológicas y en la investigación arqueológica.

Con el desarrollo de los métodos de prospección geofísica, de poco tiempo a esta parte, los arqueólogos ven en la geofísica una ciencia capaz de proporcionar, en muchos casos información sobre un sitio arqueológico de modo más efectivo y económico que un elevado número de excavaciones hechas al azar, aunque siempre es necesario apoyar el estudio geofísico con algunas excavaciones con objeto de verificar la interpretación. Esto le supone al arqueólogo, aunque probablemente nunca tenga que efectuar por si mismo una prospección geofísica, la necesidad de conocer cómo los estudios de este tipo pueden (o no pueden) ayudarle en determinadas circunstancias. Asimismo, el arqueólogo quien no es un especialista en geofísica, necesita tener cierto conocimiento de los métodos y técnicas de prospección geofísica aplicables a la investigación arqueológica para poder discutir con los geofísicos con conocimiento de causa los resultados obtenidos por éstos en una prospección.

El presente trabajo pretende dar a conocer en forma elemental un método novedoso de prospección geofísica aplicable a los estudios arqueológicos, como lo es el Georadar o Radar de Penetración al Suelo (GPR).

Esta investigación por ser de carácter descriptivo no cuenta con hipótesis, sino con objetivos explorados en base a un profundo y analítico estudio de fuentes bibliográficas y otras.

El estudio se divide en cinco capítulos. En primer lugar, trata del Marco General en donde se describen la historia de la geofísica, los métodos de prospección geofísica aplicados en estudios arqueológicos, los objetivos del trabajo y las generalidades del método del georadar.

En el capítulo 2 se analizan las bases teóricas del método.

En el tercer capítulo se describen las técnicas de procesamiento de los datos.

En el capítulo 4, se hace una descripción de los componentes que integran el equipo de georadar, así como los diferentes parámetros que intervienen en la operación del trabajo de campo.

En el último capítulo se presentan los resultados de las aplicaciones del método de georadar en investigaciones en sitios arqueológicos de Mesoamérica y otras regiones.

CAPITULO I

1. MARCO GENERAL

1.1 Resumen histórico

La geofísica trata de todos los fenómenos físicos del "Geo", siendo su campo de estudio el del planeta Tierra y espacio inmediato.

La geofísica aplicada orienta los estudios e investigaciones a una finalidad práctica. La prospección "Geofísica" es una rama reciente de la Geofísica Aplicada, desarrollada por cuantos dedican su actividad al estudio y reconocimiento del terreno con fines más o menos prácticos. La definimos como la ciencia y técnica que a partir de fenómenos físicos naturales o provocados trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades.

Cualquier fenómeno es utilizable, no sólo para deducir indirectamente la distribución de los materiales, su estado y sus accidentes, sino para, en el caso de ser abordables estudiar directamente sus características.

Es ciencia, por que se basa en fenómenos físicos científicamente establecidos; es técnica, por que utiliza equipos y métodos técnicos para estudiarlos en las zonas accesibles. La distribución de los materiales se deduce de observaciones superficiales y el terreno, en cada caso, se clasifica según su comportamiento ante el fenómeno empleado.

La probable existencia de estructuras geológicas muy variables e insospechadas, que pueden motivar análogas distribuciones superficiales del fenómeno estudiado, motiva

que la interpretación tenga un tanto de arte, precisando imaginación y rigurosidad por parte del que la practica, al que debe exigirse experiencia y formación amplia y multidisciplinaria.

La prospección geofísica pertenece al siglo recién pasado. Comenzó aplicándose principalmente a la investigación petrolífera y minera. Posteriormente, se abordaron los temas de la Geología Aplicada a la Ingeniería Civil (Geotécnica) y a la Hidrogeología, y más recientemente a la Investigación Arqueológica.

1.2 Métodos de prospección geofísica aplicados a la arqueología

De acuerdo con Thomas (1979), como ciencia la arqueología tiene desventajas que superar. Al ejecutar su más importante experimento, destruye su objeto. A diferencia de la mayoría de ciencias experimentales no tiene la posibilidad de repetir su "experimento"; cuenta con hipótesis y las corrobora, pero al precio de destruir su objeto de estudio. Es bien sabido que la arqueología, no sólo se interesa en objetos y artefactos, sino también en el estudio del contexto arqueológico; sin embargo durante su experimento más importante, la excavación, inevitablemente destruye el contexto bajo estudio.

Pero si la arqueología no puede evitar esta destrucción, sí puede buscar nuevas opciones para minimizarla. Una de estas opciones es la prospección geofísica. Del mismo modo que los cirujanos han desarrollado estudios preliminares antes de proceder a las intervenciones quirúrgicas; como por ejemplo, ultrasonidos, tomografías, etc., el arqueólogo debe de incluir una serie de estudios para hacer la excavación más eficiente y menos destructiva.

Los arqueólogos no deberían ejecutar excavaciones importantes sin la ayuda de una prospección preliminar, ya que la valiosa y única información contenida en el contexto puede perderse. En el futuro será práctica común el estudio de sitios arqueológicos utilizando métodos y técnicas de prospección, tanto de geofísica como de otras ciencias auxiliares a la arqueología, a fin de obtener información preliminar sobre las características del sitio antes de iniciar la excavación. La prospección maximizará la eficiencia en la excavación y la hará más rica en información; pues, permitirá la localización de estructuras y la interpretación de áreas de actividad asociadas desde la superficie.

En opinión de Linington (s.f., citado por Barba, 1990) el origen y desarrollo de los métodos y técnicas de prospección aplicados a la arqueología es debido principalmente a tres circunstancias:

- a. La alarmante velocidad a la que se destruye la evidencia arqueológica a consecuencia del desarrollo urbano y a la agricultura mecanizada. En especial en países con importante y larga tradición arqueológica, cada vez que se efectúa una excavación para instalar tubería, líneas eléctricas, de comunicación o para construir cimientos, existe una alta probabilidad de encontrar rasgos arqueológicos. Desafortunadamente, en muchos casos y para evitar costosos retrasos en los programas de construcción, se destruye la evidencia. Por otro lado, debido a que los tractores cada día son más grandes y potentes, muchas estructuras presentes en campos de cultivo, son arrasados durante el trabajo agrícola.

- b. El segundo factor es el incremento en los costos del trabajo arqueológico y la restricción de recursos para este tipo de investigación. Los problemas económicos en todo el mundo han afectado la investigación arqueológica haciendo cada vez más difícil obtener fondos para las excavaciones arqueológicas. Si la arqueología pretende continuar su desarrollo es urgente buscar otras alternativas para estudiar los sitios en menor tiempo, a menor costo y sin perder información.

- c. El último factor mencionado por Linington es el importante papel jugado por los buscadores de tesoros y los saqueadores en la completa destrucción tanto de objetos como del contexto arqueológico.

Existe además otro importante punto. Este es el moderno desarrollo científico y tecnológico que ha proporcionado a las ciencias de la tierra (geología, geofísica, etc.) de un equipo preciso y confiable para estudiar las propiedades del terreno. La arqueología puede fácilmente adaptar estas técnicas para sus fines.

En la mayoría de los casos sólo existe "poco tiempo entre el momento del descubrimiento de un sitio arqueológico y su total desaparición" (Aitken, 1974), y la arqueología necesita incluir en su repertorio, nuevas técnicas que ayuden a evitar riesgos innecesarios para el patrimonio arqueológico. Además, si se considera que cada día se desarrollan nuevas técnicas, en diversos campos, que pueden ser aplicadas a la arqueología, es inevitable el reto de incluir los métodos de prospección geofísica en el que hacer arqueológico tradicional.

En este apartado se hará una breve descripción de cada uno de los métodos geofísicos que más se han utilizado en la prospección en sitios arqueológicos:

1.2.1 Resistividad eléctrica:

Los métodos geofísicos se dividen en dos grupos: métodos pasivos que sólo miden la variación de las propiedades, y los métodos activos que producen alteración y miden el comportamiento del terreno en estas condiciones.

La resistencia eléctrica es un método geofísico activo. Se basa en el contraste de las propiedades eléctricas del suelo. En este caso el contraste de propiedades entre los restos arqueológicos y su contexto depende de la naturaleza de los materiales involucrados, la profundidad y forma de los restos, la proximidad entre ellos y el contenido de humedad del suelo. Si este contraste es suficientemente grande los rasgos arqueológicos serán detectables. La primera vez que la medición de la resistencia eléctrica se aplicó a la arqueología fue en Inglaterra en 1946 por Atkinson (1952). Después de esto el método eléctrico se ha aplicado exitosamente en varios sitios, como Cerveteri y Tarquinia en Italia (Lericí, s.f.), y en La Ladrillera, Cuicuilco, México (Linares, *et. al*, 1992); por citar algunos ejemplos.

En las mediciones eléctricas la propiedad medida es la resistencia presentada por el suelo al paso de la corriente eléctrica. Debido a que esta resistencia es presentada por una porción específica del suelo, con dimensiones definidas, es necesario involucrar un factor dimensional. De esta forma la resistividad eléctrica puede ser definida como la resistencia ofrecida por un cubo de tierra de dimensiones unitarias. Hasta este momento se ha considerado que el material tratado es homogéneo, pero éste no es el caso en ningún terreno. Por ello se ha introducido el concepto de resistividad eléctrica aparente, para tratar con la resistividad eléctrica de un suelo que no es necesariamente homogéneo.

La forma más común de medir esta propiedad es utilizando electrodos que se colocan en el terreno en arreglos que dependerán de las necesidades específicas del estudio. Los arreglos más utilizados son: el de Wenner y el de Schlumberger. Estos arreglos introducen corriente eléctrica en el terreno utilizando dos electrodos que miden la diferencia de potencial producida por el flujo de la corriente a través del terreno con otro par de electrodos.

En el arreglo de Wenner cuatro electrodos metálicos se alinean simétricamente con respecto al centro del arreglo. Los electrodos externos introducen la corriente eléctrica, mientras que los internos miden el voltaje. En este arreglo la forma del campo eléctrico producido es similar a la mitad de una sandía, con los electrodos externos en sus extremos. La profundidad máxima es aproximadamente igual a la distancia entre los electrodos externos. La distancia entre electrodos es una de las mayores diferencias entre las aplicaciones geológicas y las arqueológicas, con la consecuente simplificación en la interpretación. En el trabajo arqueológico la distancia entre electrodos es pequeña pues los rasgos normalmente se encuentran cerca de la superficie.

1.2.2 Prospección magnética:

El reconocimiento magnético, después que el Georadar, es el método de prospección geofísica más ampliamente usado en arqueología en la actualidad, debido a su confiabilidad y fácil uso.

Este método se basa en la medición de pequeños cambios en la intensidad magnética del terreno. Está considerado como un método geofísico pasivo.

Aun cuando se hicieron algunas prospecciones magnéticas a principio del siglo recién pasado, no fue sino hasta 1958 que Aitken aplicó por primera vez el magnetómetro de protones a la arqueología (Aitken, 1958). En ese momento el objetivo de la aplicación era detectar el magnetismo termorremanente producidos por hornos, pero esos primeros experimentos mostraron nuevas posibilidades de aplicación en la detección de otros rasgos arqueológicos de menores diferencias en su susceptibilidad magnética.

La teoría que sustenta esta aplicación puede ser explicada en forma simple. El campo magnético total en cualquier punto de la superficie de la tierra consiste de la suma de las variaciones locales (características geológicas y arqueológicas) más las variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre. Esto significa que el campo magnético total es distinto para cada punto geográfico y puede ser medido con el equipo adecuado.

El equipo usado para medir estas variaciones en el campo magnético se llama magnetómetro. En arqueología los más comunes son los magnetómetros de protones. Estos equipos son capaces de medir pequeñas variaciones en la intensidad del campo magnético total en un lugar dado. Usando este equipo es posible recorrer un sitio arqueológico y registrar lecturas en distintos puntos del sitio. El recorrido sistemático de la superficie permitirá la interpretación de estos datos en términos arqueológicos.

Uno de los rasgos más fáciles de detectar a través del uso de magnetómetros de protones son los hornos. Esto es debido al gran cambio de propiedades magnéticas que el fuego produce por la combinación de temperatura, minerales de hierro presentes, tiempo y condiciones reductoras durante la combustión, lo que ocasiona transformaciones importantes en las partículas de hierro. Dichas partículas modifican su estructura atómica y adquieren fuertes propiedades magnéticas, alineando sus dipolos constituyentes en la dirección del campo magnético bajo el que están.

Estos tipos de rasgos son fácilmente reconocibles debido a que son concentrados, y el contraste magnético con sus alrededores es muy alto. Entre más veces ocurre la combustión, más intenso será el campo magnético remanente (Tite y Mullins, 1971).

Por otro lado, no todos los rasgos arqueológicos tienen magnetización remanente. Otra importante propiedad es la susceptibilidad magnética, que es característica de cada material, y que puede definirse como la capacidad de un material dado a magnetizarse. Atendiendo a esta propiedad es posible detectar rasgos enterrados midiendo las pequeñas diferencias en susceptibilidad magnética entre el rasgo arqueológico y su contexto. De nuevo, si el contraste magnético es suficientemente grande el rasgo será detectable (Linnington, s.f.).

Considerando las diferencias magnéticas se ha propuesto que hay tres tipos de contraste en sitios arqueológicos:

- a. Rasgos que tienen material con mayor susceptibilidad magnética que sus alrededores.
- b. Rasgos con material de menor susceptibilidad magnética que sus alrededores.

- c. Rasgos con material que tiene la misma susceptibilidad magnética que sus alrededores.

Obviamente, los rasgos del tercer caso son difícilmente detectables, ya que no existe contraste magnético. En el primer punto se incluyen los rasgos arqueológicos más comunes, tales como hoyos rellenos, trincheras, muros y hornos. En el segundo, los rasgos más comunes son las tumbas excavadas y las concentraciones de materiales no magnéticos, como las rocas calcáreas.

Normalmente estos rasgos se presentan en dos formas: como rasgos concentrados, donde se incluyen los hornos y los hoyos y, por otro lado, los rasgos lineales que incluyen los muros y las trincheras.

La interpretación de las anomalías magnéticas detectadas es quizá el paso más importante en la prospección magnética. Durante la interpretación es necesario considerar varias influencias perturbadoras. En general las anomalías magnéticas se desplazan un poco hacia el sur con respecto al origen de la anomalía, por tanto, en una curva de perfil normal, existen dos aspectos asociados: un valor magnético mínimo hacia el norte junto con un valor máximo hacia el sur.

Algunas fuentes de interferencia comunes en este tipo de prospección pueden causar problemas, entre ellas se encuentran: objetos metálicos que incluyen construcciones modernas, clavos, tornillos, tubería enterrada, cercas, herramientas de agricultura desechadas, líneas ferroviarias, hebillas de cinturones o cualquier fragmento de hierro en la superficie que cause interferencia.

Una interferencia significativa puede producirse por líneas ferroviarias, líneas de alta tensión, u otras líneas eléctricas o telefónicas. La más común de las interferencias

ocasionadas por la corriente directa es la presencia de trenes eléctricos. La corriente alterna producida por equipo eléctrico de grandes dimensiones también produce interferencia. Los efectos geológicos son raros, pero pueden aparecer cuando existe un fuerte contraste entre las propiedades magnéticas de materiales geológicos.

Las tormentas magnéticas están asociadas con la actividad intensa de manchas solares. Existen ocasiones en que la magnitud de las tormentas impide efectuar cualquier reconocimiento magnético. En estos casos es necesario esperar hasta que las condiciones climáticas mejoren, y en casos menos severos puede usarse un magnetómetro diferencial en lugar de un magnetómetro simple.

Debido a estos problemas, hasta el momento la experiencia de campo es tanto o más importante que el análisis teórico riguroso en la interpretación magnética, sin embargo son comunes los errores de interpretación.

1.2.3 Prospección electromagnética:

Este es un ejemplo de un método desarrollado con propósitos militares que encontró otras interesantes aplicaciones. En la arqueología se ha intentado usar como sustituto de los métodos eléctricos para evitar la tediosa actividad de insertar los electrodos en el terreno. Desafortunadamente los primeros experimentos mostraron que, aunque teóricamente posible, los resultados prácticos son, hasta el momento, pobres.

Debido a su capacidad para detectar metales conductores, su más importante aplicación ha sido la detección de monedas y otros artefactos metálicos. Sin embargo, dado que los metales en Mesoamérica son escasos es muy limitada su aplicación arqueológica en esta región.

Existe una cierta aversión para usar los detectores de metal en la arqueología, quizá debida a la asociación de este equipo con buscadores de tesoros, pero se considera que puede tener aplicaciones arqueológicas reales.

El uso propuesto (Barba, 1990) para los detectores de metal es el de una herramienta que minimiza las interferencias magnéticas causadas por la presencia de objetos metálicos próximos a la superficie. Así puede ser una ayuda para desechar anomalías indeseables y evitar errores de interpretación en la prospección magnética. Hasta hoy, su uso ha sido para sustituir equipo costoso, como los magnetómetros, o bien para evitar métodos tediosos, como la resistividad eléctrica. En el primer caso, aún cuando detectan cambios en la susceptibilidad magnética, tiene una penetración extremadamente limitada. En el segundo, estos equipos no son sensibles a pequeños cambios en la resistencia eléctrica.

El principio de operación de este equipo se basa en campos electromagnéticos que producen o reciben sus bobinas. Durante su operación normal la bobina de transmisión produce un campo electromagnético que penetra el suelo. Si un metal o cualquier conductor está presente allí el campo electromagnético genera corrientes parásitas, que a su vez producen un campo electromagnético secundario que emerge desde el suelo y que detecta la bobina de recepción. La señal se transforma en una indicación analógica o digital que permite las lecturas (Legal y Garret 1982, citado por Barba, 1990).

Otro método de prospección Geofísica aplicado a la Arqueología, es el Georadar, el cual por su importancia y por ser el tema principal de este trabajo, se describe más adelante.

1.3 Objetivos:

Con el presente trabajo se pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- a. Dar a conocer las bases teóricas en las que se sustentan el método de Georadar, sus ventajas y aplicaciones en Arqueología.
- b. Compilar y analizar información sobre el método de prospección de Georadar y proponerlo para una futura aplicación en los estudios arqueológicos en nuestro país, para obtener mejores resultados.
- c. Describir las generalidades del método de Georadar.
- d. Describir la operación del georadar en el campo.
- e. Describir los componentes del equipo a utilizar en una investigación arqueológica utilizando el método de Georadar.
- f. Contribuir al conocimiento de nuevos métodos y técnicas de prospección arqueológicas.
- g. Dar a conocer un método de prospección arqueológica más efectivo y eficaz en comparación a los otros, lo que conlleva el ahorro de tiempo y dinero en el estudio y rescate de los elementos arqueológicos.

1.4 El método de georadar

Georadar, es el nombre con que se conoce a un método no destructivo de prospección geofísica, basado en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración, dirigidos al subsuelo con el propósito de detectar estructuras y características de interés arqueológico.

Este método inicia su aplicación en los años 70' del siglo recién pasado, con el fin de determinar espesores de hielo y glaciares, obteniendo resultados satisfactorios (Robin, *et. al.*, 1969; Annan, *et. al.*, 1976; citados por Ibañez, 1998), a partir de entonces se han efectuado trabajos con éxito en diversas áreas de exploración.

El método de georadar tiene aplicaciones en diversos campos, considerándose una herramienta auxiliar poderosa dentro de la prospección geofísica y como complemento en otras áreas de investigación como la geología, ingeniería civil, geohidrología, arqueología, etc.

Dentro de ingeniería civil, los objetivos principales del método de georadar son: detectar la presencia de fallas, fracturas, zonas de erosión y cavidades. Estas últimas se deben a la actividad minera en épocas pasadas o a procesos naturales de dilución en rocas de tipo cárstico. En esta área el georadar es una herramienta muy útil para evaluar el terreno sobre el cual se construirán obras civiles, así como para revelar las causas que originan daños en algunas obras. También, es utilizado en estudios de menor escala, para la localización de tuberías, gasoductos e incluso cables subterráneos (luz y teléfono) (Ulriksen, 1982 y Lorenzo, 1994).

Annan (1988), demostró que dentro del campo minero el método de georadar, es una herramienta eficiente para definir la geología alrededor de las estructuras de carácter económico. En el aspecto geológico dicho método permite determinar la historia de depósitos geológicos, relacionar formaciones estratigráficas, localización de fracturas y fallas, apoyando los estudios de exploración geológica (Doolittle, *et. al.*, 1992; Fisher *et. al.*, 1992; Stevens, *et. al.*, 1995). En el área hidrogeológica se pueden determinar mantos freáticos. Además, se pueden efectuar estudios de contaminación del subsuelo (Brewster 1994).

La arqueología, es otra área en donde se puede aplicar con éxito el método de georadar, pues puede ser utilizado en la búsqueda y determinación de objetos, estructuras, tumbas y construcciones de interés arqueológico (Sauck, *et. al.*, 1984; Vaughan, 1986; Butler, *et. al.*, 1994; Lorenzo 1996). Generalmente los trabajos de excavación para recuperar los restos arqueológicos implican trabajos de intensa labor ya que es necesario cubrir áreas muy extensas para explorar y descubrir los elementos de interés, además de altos costos económicos y largos períodos de tiempo. En este caso la profundidad de prospección es somera y el método de georadar permite el empleo de altas frecuencias, obteniendo una buena resolución de los elementos y objetos a investigar con relación a otras técnicas o métodos arqueológicos. Para efectuar trabajos de reconocimiento y preexcavación en sitios arqueológicos este método permite cubrir grandes áreas de estudio, limitando zonas de excavación en donde se detecten anomalías de interés, lo que implica reducción del costo económico y del tiempo en los trabajos de excavación (Annan, 1996).

1.4.1 Generalidades del método de georadar

Georadar, es un método no destructivo de prospección geofísica, que se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (rango de nanosegundos), dirigidos hacia el subsuelo, con el propósito de detectar estructuras y características físicas de interés como dimensiones y profundidad. En este término las siglas **Geos** significa Tierra; y **Radar** (Radio Detection And Ranging) que significa Detección y Alcance por Radio, lo que implica que este método de prospección utiliza ondas de radio emitidas desde la superficie y transmitidas a través del subsuelo, para tratar de detectar contrastes en la permitividad eléctrica de los objetos a investigar para poder así determinar la posición y distancia a la que se encuentran de la superficie (Annan, 1996).

El método de georadar también llamado Radar de Penetración Terrestre (GPR), se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell que describen el comportamiento de las ondas electromagnéticas en diferentes materiales. La forma en la que el campo electromagnético interactúa con el medio de propagación determina el comportamiento de la señal presentando efectos de transmisión, reflexión, refracción, atenuación y dispersión. Los parámetros eléctricos (constante dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad) de los materiales del subsuelo son los que controlan la propagación de la señal. Al encontrar un contraste en las propiedades eléctricas de los materiales, la señal transmitida se refleja y es detectada en la superficie, generando perfiles bidimensionales conocidos como **Radargramas** en donde se representan las características del subsuelo bajo las líneas de estudio. El eje horizontal de estas secciones representa las distancias entre los puntos de lectura y el eje vertical es la escala de tiempos dobles de viaje de la señal. (Annan, 1996).

Los impulsos electromagnéticos usados en el método de Georadar o Radar de Penetración Terrestre (GPR) se encuentran en intervalos de frecuencia de 10 Mhz a 1 Ghz (ondas de radio). La frecuencia es uno de los factores que determina la profundidad de penetración del impulso electromagnético en el subsuelo. El cuadro 1, contiene una relación de la frecuencia recomendada para algunas profundidades esperadas, analizando estos valores se establece que a mayor frecuencia, la penetración de la señal es menor con relación a las bajas frecuencias (Annan, 1996).

Profundidad (m)	Frecuencia Central (Mhz)
0.5	1000
1.0	500
2.0	200
7.0	100
10.0	50
30.0	25
50.0	10

Cuadro 1. Valores de frecuencia para profundidades de penetración esperadas.

En el espectro electromagnético todas las ondas tienen la misma naturaleza y velocidad de propagación en el vacío ($v = 0.3 \text{ m/ns}$) pero difieren en su frecuencia y longitud de onda. Este espectro se divide en diferentes regiones, clasificación que se basa en las diferentes técnicas experimentales para detectar las ondas en cuestión. Algunas fuentes de radiación electromagnéticas son el sol, la región de las microondas de sistemas de telefonía, ondas electromagnéticas de equipos de rayos X, materiales radiactivos de la tierra, señales de radio y Tv, etc. (Halliday y Resnick, 1982).

La frecuencia es un parámetro que juega un papel importante, siendo uno de los factores que determina la profundidad de penetración del impulso electromagnético transmitido en el subsuelo. Elegir la frecuencia adecuada en los trabajos de prospección puede ser determinante para obtener resultados satisfactorios. La relación $\delta = \sqrt{2/\sigma\mu\omega}$ establece que la profundidad de penetración (δ) del impulso electromagnético, es inversamente proporcional a la frecuencia aplicada, en donde la amplitud del impulso se atenúa en una razón de $1/e$ conforme avanza en profundidad. En esta relación también se establece que a mayor permeabilidad (μ) o conductividad (σ), la profundidad de penetración es menor. Deduciendo que a mayor frecuencia aplicada, la profundidad de penetración será menor y viceversa (Stevens, *et. al.*, 1995).

Por otro lado la longitud de onda electromagnética (λ) es directamente proporcional a su velocidad (v) de propagación e inversamente proporcional a la frecuencia (f) utilizada ($\lambda = v/f$). De acuerdo al rango de frecuencias bajo las que opera el método (1 Ghz a 10 Mhz) la longitud de onda varía desde 0.3 m., para las altas frecuencias, hasta 30 m., para las frecuencias más bajas. Lo cual significa que la resolución en cuanto a capacidad de detección de las anomalías a detectar, está en función entre otros factores de la frecuencia de operación y de las dimensiones del objetivo.

Es indispensable elegir adecuadamente los parámetros que caracterizan el arreglo a utilizar. Es importante definir los rangos de profundidad dentro de los cuales se localiza el objetivo de interés y considerar sus dimensiones, para elegir la frecuencia a utilizar. Debido a que las propiedades eléctricas (constante dieléctrica, conductividad) determinan el comportamiento de la señal electromagnética, es recomendable que sean evaluadas ya

que el objetivo a investigar debe presentar un contraste en estas propiedades con respecto al material que lo rodea para que exista una anomalía observable. El equipo de radar es sensible a la presencia de estructuras metálicas extensas, líneas de alta tensión y fuentes de frecuencias electromagnéticas de radio, ya que pueden interferir con las señales recibidas por el equipo generando efectos importantes. En ocasiones no es posible evitar estos elementos pero si es indispensable tomarlos en cuenta y saber identificar sus efectos en los registros para no confundirlos con las señales útiles (Annan, 1996).

El equipo de radar utilizado en este método es un sistema bistático, que consiste en un par de antenas colocadas en la superficie del terreno, una de ellas funciona como antena transmisora, enviando un impulso electromagnético que viaja a través del subsuelo. La forma en la que el campo electromagnético interactúa con los diferentes materiales determina el comportamiento de la señal, presentando los efectos de propagación, reflexión, refracción, atenuación y dispersión. Estos efectos son detectados en superficie por la antena receptora después de un tiempo, durante el cual la onda viaja en el medio. Los parámetros que controlan la propagación de la señal transmitida en el subsuelo son la permeabilidad magnética, la constante dieléctrica y la conductividad eléctrica (parámetros eléctricos) del medio. Los materiales a través de los que se propaga la señal deberán presentar un contraste en estas propiedades eléctricas para que el impulso transmitido se refleje y sea detectado en la superficie. Los impulsos detectados se presentan en perfiles bidimensionales conocidos como radargramas, los cuales presentan las características del subsuelo de bajo de las líneas sobre las que se efectuaron las mediciones; en una sección de este tipo el eje horizontal representa las

distancias sobre el perfil en donde se efectuaron las lecturas y el eje vertical representa la escala de tiempo dobles de viaje de la señal electromagnética a través del subsuelo (Annan, 1996).

CAPITULO II

2. PRINCIPIOS TEORICOS.

El comportamiento de la señal electromagnética del radar está en función de las propiedades eléctricas de los materiales a través de los cuales se propaga, ya que el contraste en estas propiedades de los materiales del medio de propagación, da origen a los diversos efectos que sufre la señal. El comportamiento de esta señal basa su análisis en la teoría electromagnética.

2.1 Propagación de la señal del radar

En el método de Georadar se produce un pulso corto (rango de nanosegundos) de energía electromagnética de alta frecuencia (10 Mhz a 2 Ghz), radiado hacia el interior del terreno, los efectos de este impulso dependen de las propiedades eléctricas de los materiales del medio de propagación (Benson, 1995).

2.2 Profundidad de penetración

Cuando la frecuencia de operación es muy alta, la energía del radar se propaga con una velocidad independiente de la frecuencia (Stevens, *et. al.*, 1995).

Tomando en cuenta la frecuencia, se tiene que a mayores frecuencias la profundidad de penetración decrece y viceversa (Nathan, *et. al.*, 1992)

2.3 Reflexión y transmisión de la señal electromagnética

Cuando la energía emitida al terreno encuentra una inhomogeneidad en las propiedades eléctricas del medio de propagación, parte de la energía se refleja y es detectada en superficie por la antena del radar y parte es transmitida hacia el interior del medio (Davis, *et. al.*, 1989).

Las propiedades eléctricas (μ , σ y ϵ) de los materiales geológicos a través de los cuales se transmite la señal electromagnética y las impedancias eléctricas del medio de transmisión, van a determinar los diversos efectos que sufre el impulso en su propagación. Efectos como reflexión, transmisión, atenuación, etc., registrados en la superficie del terreno y mediante los cuales es posible efectuar un análisis para determinar las características de los objetivos a investigar.

En el cuadro 2 se representan los valores de conductividad σ , constante dieléctrica relativa ϵ_r , velocidad v , y atenuación α , de la señal electromagnética para diversos materiales. Nótese que para el agua $\epsilon_r = 80$ y que la mayoría de los materiales está en el rango de 4-8. En general las propiedades eléctricas de los materiales geológicos son gobernadas por el contenido y calidad del agua, disolución, tipo de minerales y tipo de arcillas presentes en el suelo, lo cual explica porqué la velocidad y atenuación de la señal del radar está en función de estas propiedades (Davis, *et. al.*, 1989).

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD (ohm / m)	CONSTANTE DIELECTRICA	VELOCIDAD (m / ns)	ATENUACION (dB / m)
Aire	0	1	0.3	0.0
hielo de agua dulce	0.1 - 0.01	4 - 8	0.13	0.84 - 0.006
Concreto	0.015	6 - 9	0.122	0.01
Asfalto	0.0001 - 0.001	3 - 8	0.17 - 0.1	0.0001 - 0.0006
suelo cemento	0.01 - 0.1	16	0.075	0.004 - 0.04
suelo arenoso	0.0001 - 0.001	3 - 25	0.17 - 0.06	0.0001 - 0.0038
suelo limoso	0.0001 - 0.01	2.5 - 19	0.19 - 0.068	0.0001 - 0.0043
suelo arcilloso	0.0001 - 0.01	2.4 - 15	0.2 - 0.07	0.0001 - 0.0043
barro, arcilla, adobe	0.01 - 0.02	2.5 - 19	0.19 - 0.68	0.01 - 0.00775
grava cemento	0.01 - 0.1	13	0.08	0.0046 - 0.046
Conglomerado	0.025	18	0.07	0.01
Caliche	0.012	4.6	0.13 - 0.15	0.01
Granito	0.01 - 1.5	5 - 7	0.13	0.0075 - 1
Caliza	0.5 - 2	4 - 8	0.12	0.4 - 1
Arenisca	10^{-8} - 0.01	6 - 8	0.12 - 0.1	6.9×10^{-9} - 0.006
arena seca	0.01	4 - 6	0.15	0.008 - 0.007
arena saturada	0.08 - 1	20 - 30	0.06	0.03 - 0.3
arcilla seca	1.3	5	0.13	1
arcilla saturada	1000	40	0.04	300
Esquisto	1.3 - 230	5 - 15	0.09	1 - 100
basalto húmedo	0.01	8	0.1	0.006
Cantera	0.0015	6.2	0.12	0.001
Limo	1.8 - 180	10	0.07	1 - 100
Sal	0.013 - 1.32	5	0.13	0.01 - 1
Turba	0.022	14	0.08	0.01
agua salada	30000	80	0.01	5000
agua dulce	0.5	80	0.033	0.1
Agua destilada	0.01	80	0.033	0.002

Cuadro 2. Valores de conductividad σ , constante dieléctrica relativa ϵ_r , velocidad v , y atenuación α para diversos materiales, (Ulriksen, 1982; Davis, et. al., 1989; y Lorenzo, 1994).

CAPITULO III

3. EFECTOS DE TERRENO Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Una forma de presentar los resultados del método de radar es mediante perfiles bidimensionales conocidos como radargramas, en donde se presenta la respuesta del subsuelo frente a la transmisión de una señal electromagnética. El eje vertical de estos perfiles corresponde a los tiempos dobles de viaje de la señal y el eje horizontal representa el desplazamiento de las antenas sobre el perfil en estudio (Annan, 1996). Previo a su interpretación los datos de radar requieren de un procesamiento.

3.1 Efectos que sufre la señal en el subsuelo

El contraste en las propiedades eléctricas de los materiales del subsuelo determinan la reflexión, transmisión y atenuación de la señal durante su recorrido. En general la señal viaja en función del tiempo y se atenúa en función de la distancia. Además, existen otros factores relacionados con características físicas, como la geometría del medio, inclinación, rugosidad de los reflectores, etc, que afectan la transmisión de la señal. A continuación se describen estos efectos y sus causas.

3.1.1 Difracción

Las reflexiones captadas por el radar son señales que forman un ángulo recto con las superficies de incidencia de las estructuras ubicadas dentro de la radiación de la antena del radar. Considerando que la radiación forma un cono tridimensional aproximadamente de 45° , el efecto de las estructuras del subsuelo se registran en las trazas de un radargrama antes y después que el receptor se localice sobre la posición real

del reflector. Este efecto de difracción se aprecia en una sección cuando la señal incide en cavidades, anomalías con cambio brusco de pendiente y cuando el radio de curvatura de la anomalía es comparable o más pequeño que la longitud de onda de la señal. El ejemplo clásico de la difracción se observa como una "U" invertida con una amplitud máxima en algún punto a lo largo de la línea del perfil y decrece rápidamente conforme se aleja de ese punto (Cantos, 1973).

En el radargrama de la figura 1a se presenta el efecto de difracción. Esta sección se realizó (Ibañez, 1996) con el fin de detectar la respuesta de una tubería de 0.3 m de diámetro y a 0.8 m de la superficie del terreno aproximadamente (figura 1b). La respuesta de esta tubería es representada por la hipérbola de difracción marcada como A en la figura 1a, con su punto máximo en la posición de 10 m y a una profundidad de 0.8 m.

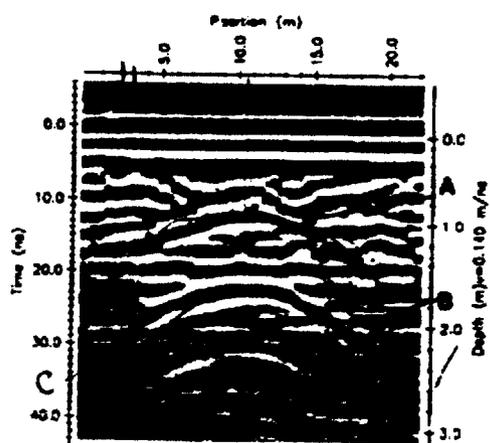


Figura 1a.
Ejemplo del efecto de difracción y eventos múltiples

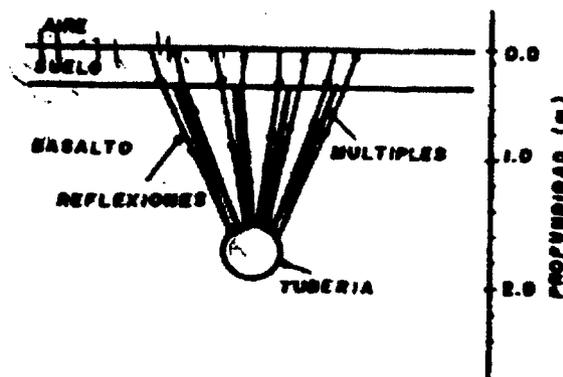


Figura 1b.
Elemento a escala que provoca el efecto de difracción

3.1.2 Difusión

El fenómeno de difusión se caracteriza por la formación de pequeñas ondas que propagan la energía en todas direcciones. La difusión se produce cuando el impulso electromagnético choca con objetos pequeños comparados con su longitud de onda (Cantos, 1973). Parte de lo que se considera ruido en una sección puede deberse a este fenómeno ya que la difusión produce energía distribuida al azar en la superficie.

3.1.3 Múltiples

Cuando la señal electromagnética encuentra un contraste de impedancias eléctricas entre dos interfaces, parte de la energía se refleja varias veces dentro del medio hasta atenuarse. Si el contraste de impedancias entre dos interfaces muy cercanas es intenso, parte de la energía reflejada dentro de esas interfaces puede llegar al receptor por más de una ocasión, originando eventos repetidos a lo largo del barrido. El análisis de este tipo de eventos se efectúa considerando la tendencia de los eventos, ya que las características de los múltiples son similares a las de los eventos directos, además de los tiempos de arribo o diferencia de tiempos de arribo entre eventos (Telford, *et. al.*, 1974).

En el radargrama de la figura 1a en donde se registra como **A** la hipérbola de difracción originada por una tubería, se observan otros dos eventos **B** y **C**. Analizando los tres reflectores se deduce que **A** es un evento directo y **B** y **C**, eventos múltiples. Esto se determina al analizar que los reflectores **B** y **C** tienen tiempos de arribo doble y triple respectivamente con relación al evento **A**, además de que los tres presentan la misma tendencia. La trayectoria de las reflexiones múltiples se representa por flechas en la figura 1b, entre la capa superficial del terreno y la superficie exterior de la tubería.

3.2 Técnicas de procesamiento

Para realzar o eliminar características como las descritas anteriormente en los datos obtenidos con el método de georadar, se aplican técnicas de procesamiento para efectuar una interpretación y evaluación final de los resultados.

3.2.1 Corrección de deriva del tiempo cero o primer arribo

Las trazas de un radargrama se componen de puntos $P(x, y)$ donde x es el intervalo de tiempo de registro (ns) y y es la amplitud del impulso (μV). El primer pulso de la traza que llega al receptor se denomina primer arribo o tiempo cero. El número de puntos que contiene una traza está determinado por una ventana de tiempo y el intervalo de tiempo en que se registra cada dato. Durante la adquisición de datos los elementos del equipo del georadar sufren variaciones de temperatura, provocando que los primeros arribos tengan variaciones unos con otros con respecto al tiempo de llegada, originando que las trazas de un radargrama presenten desfases en sus primeros pulsos en la escala de tiempo cero. El primer paso del procesamiento de datos es aplicar la "corrección de deriva de tiempo cero", que consiste en desplazar los primeros arribos de las trazas a una línea de tiempo cero (Sensors and Software Inc., 1993).

3.2.2 Filtros temporales

Los filtros son funciones que realzan o disminuyen características de una función. Se aplican para seleccionar y eliminar las frecuencias que contienen las señales que generan ruido en los registros. Los filtros temporales actúan en los datos del radar en la dirección de eje de tiempos (Annan, 1996).

3.2.3 Migración

La migración es un proceso mediante el cual es posible eliminar los efectos de difracción, distorsión e interferencia que se observan en un radargrama. El propósito de la migración es enfocar la energía dispersa de los reflectores y difractores a su posición original, determinando su forma y localización en el subsuelo (Fisher, *et. al.*, 1992).

Las reflexiones registradas en un radargrama corresponden a señales que inciden perpendicularmente al plano de reflectores localizados dentro del cono de radiación de la antena. El radargrama es una sección de tiempos en donde cada reflexión es representada por los tiempos dobles de viaje de la señal (ida y vuelta) al reflector. La información de tiempo es registrada en un plano vertical, sin tomar en cuenta el desplazamiento lateral del reflector a profundidad, causando el efecto de difracción. Este efecto es eliminado mediante la migración, calculando el desplazamiento de la vertical (señal registrada) al plano normal (posición real) del elemento reflejante y produciendo una reconstrucción original del campo de onda en el espacio, con el fin de determinar la forma y localización de los reflectores a profundidad (Stanislav, 1984).

3.3 Modelado a base del sistema de trazado de rayos

El modelado es un proceso que consiste en comparar los resultados del georadar con la respuesta de modelos propuestos del subsuelo. Estos modelos permiten dar una explicación de las observaciones principales, como la geometría del medio y los parámetros eléctricos de las anomalías, proporcionando información para la interpretación de los resultados, o bien evaluar los parámetros mencionados, antes de realizar un

estudio. La justificación de utilizar el proceso de modelado es su aplicación para la simulación e interpretación cuantitativa de los datos de campo.

El proceso del modelado a base de rayos usando un algoritmo que calcula la respuesta de modelos bidimensionales del terreno compuestos de capas, cada una con una velocidad v y atenuación α constante. El proceso efectúa un trazado de rayos, obteniendo tiempos de reflexión y cálculos de amplitud mediante la teoría de rayos asintóticos, la cual supone que el frente de ondas curvas y las interfaces curvas suaves son reemplazadas por planos tangenciales en los puntos de incidencia, evaluando la partición de energía como si la onda chocara en una interface plana (Smith, et. al., 1977; May, et. al., 1978; Cai, et. al., 1995).

CAPITULO IV

4. OPERACIÓN DE CAMPO.

En este apartado se describe el equipo de Georadar y la función de cada uno de los componentes que lo integran, así como los parámetros que intervienen y la metodología que se sigue.

4.1 Descripción de los componentes del equipo de georadar

El equipo utilizado en este método es un sistema biestático llamado Pulse EKKO IV. El equipo es mostrado en la figura 2, sus elementos se comunican entre si a través de cables de fibra óptica que tienen la función de eliminar señales falsas. Todo el sistema es alimentado por una batería de 12 voltios. Sus componentes se describen a continuación.

a. Unidad central o consola de control

Es el elemento principal del equipo, tiene la función de controlar la generación de la señal electromagnética y de recibir las reflexiones del subsuelo en función del tiempo así como la operación de los componentes electrónicos transmisor y receptor.

b. Antenas

El sistema consta de un par de antenas, seleccionadas en función de la frecuencia requerida para los objetivos del estudio. Una de las antenas funciona como transmisora enviando un impulso electromagnético hacia el subsuelo. Los diferentes efectos que sufre la señal (reflexión, atenuación, propagación, dispersión) son detectados por la otra antena que es la receptora.

c. Transmisor y receptor electrónicos

Son dos elementos idénticos en apariencia, se conectan en la parte superior de las antenas como se aprecia en la figura 2. El transmisor electrónico, tiene la función de emitir un pulso de alto voltaje de corta duración en el rango de nanosegundos (ns) hacia la antena transmisora. Mientras que el receptor electrónico se encarga de recibir la señal reflejada como una función de tiempo después de que la transmisión ha iniciado.

d. Computadora portátil

Todo el sistema del equipo de georadar es controlado mediante una computadora portátil, en donde se efectúa la adquisición digital de datos, almacenamiento, edición y despliegue del gráfico final.

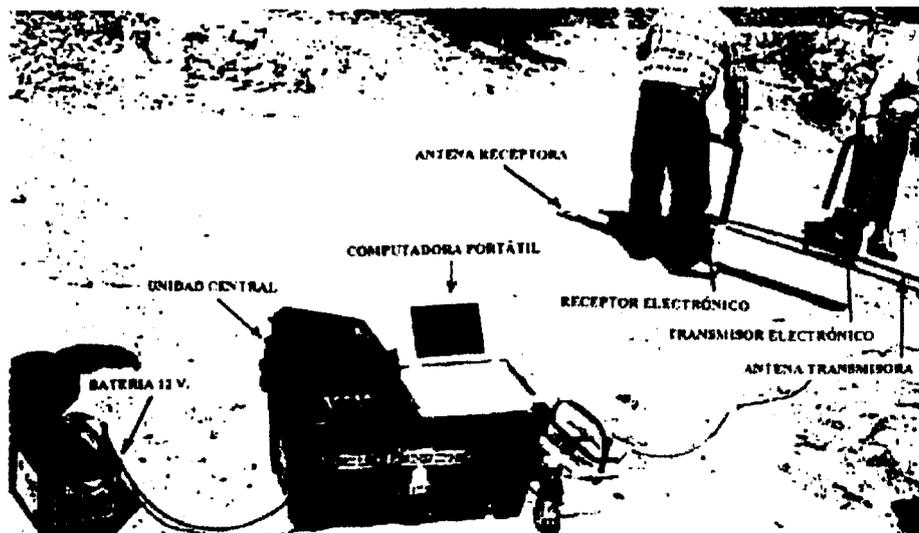


Figura 2.
Elementos que integran el equipo de Georadar Pulse EKKO IV.

4.2 Resolución del equipo de georadar

La frecuencia de operación es uno de los factores que determina la resolución de los objetivos a investigar en un estudio con radar. La ecuación $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$ establece que mientras mayor es la profundidad (δ) del objetivo a investigar, la frecuencia (f) utilizada debe ser menor y viceversa. El cuadro 3 contiene la frecuencia central recomendada para algunas profundidades, estos valores fueron obtenidos experimentalmente por Annan, (1996).

Profundidad (m)	Frecuencia Central (Mhz)
0.5	1000
1.0	500
2.0	200
7.0	100
10.0	50
30.0	25
50.0	10

Cuadro 3. Frecuencia aplicada para algunas profundidades (Annan, 1996).

Las frecuencias usadas en el método de radar están en un rango de 10 a 1000 Mhz, correspondientes a longitudes de onda ($\lambda = v/f$) de 30 a 0.3 metros respectivamente (valores en el vacío). Detectando estructuras con dimensiones desde algunos centímetros hasta decenas de metros. Y la resolución Δr , de los objetivos a investigar esta determinada por la siguiente relación (Annan, 1996).

$$\Delta r \approx \frac{d_{\max}}{100}$$

En donde d_{\max} es la profundidad máxima de penetración para la frecuencia utilizada. De acuerdo a la anterior relación, la resolución de los objetivos a investigar será alta para profundidades someras y viceversa. El cuadro 4 muestra la resolución para algunas profundidades de penetración (Annan, 1996).

Profundidad Máxima (m)	Resolución
0.1	1.0
1.0	0.1
10	0.01
100	0.001

Cuadro 4. Resolución obtenida para profundidades de penetración (Annan, 1996).

4.3 Técnica de reflexión de desplazamiento fijo

Es la técnica más común de operación para un trabajo de exploración con radar. En esta técnica se establece una geometría fija para las antenas, colocándolas paralelamente, su separación mínima es la mitad de la longitud de onda de la frecuencia central. Este arreglo se desplaza sobre un perfil, tomando lecturas en puntos equidistantes para obtener el radargrama que proporciona la información del subsuelo. La disposición de este arreglo se ilustra en la figura 3. El despliegue de datos de un radargrama puede efectuarse en un formato denominado **color**, en donde a cada punto de las trazas se le asigna un color en función de una escala lineal de amplitudes, obteniendo un registro continuo de las reflexiones del subsuelo basado en la escala de colores (Annan, 1996). En el presente trabajo los radargramas son representados en el formato **color** en tonos de grises. Todas las secciones presentan en los primeros metros de profundidad dos reflexiones intensas continuas a lo largo del registro, generadas por

señales directas en el tiempo que el transmisor envía el impulso al terreno. La reflexión más superficial se conoce como "onda directa de aire", es una señal que viaja del transmisor al receptor sobre la superficie del terreno a la velocidad de la luz. La segunda reflexión se conoce como "onda directa de terreno", es una señal que viaja a través de la capa más superficial del terreno, del transmisor al receptor.

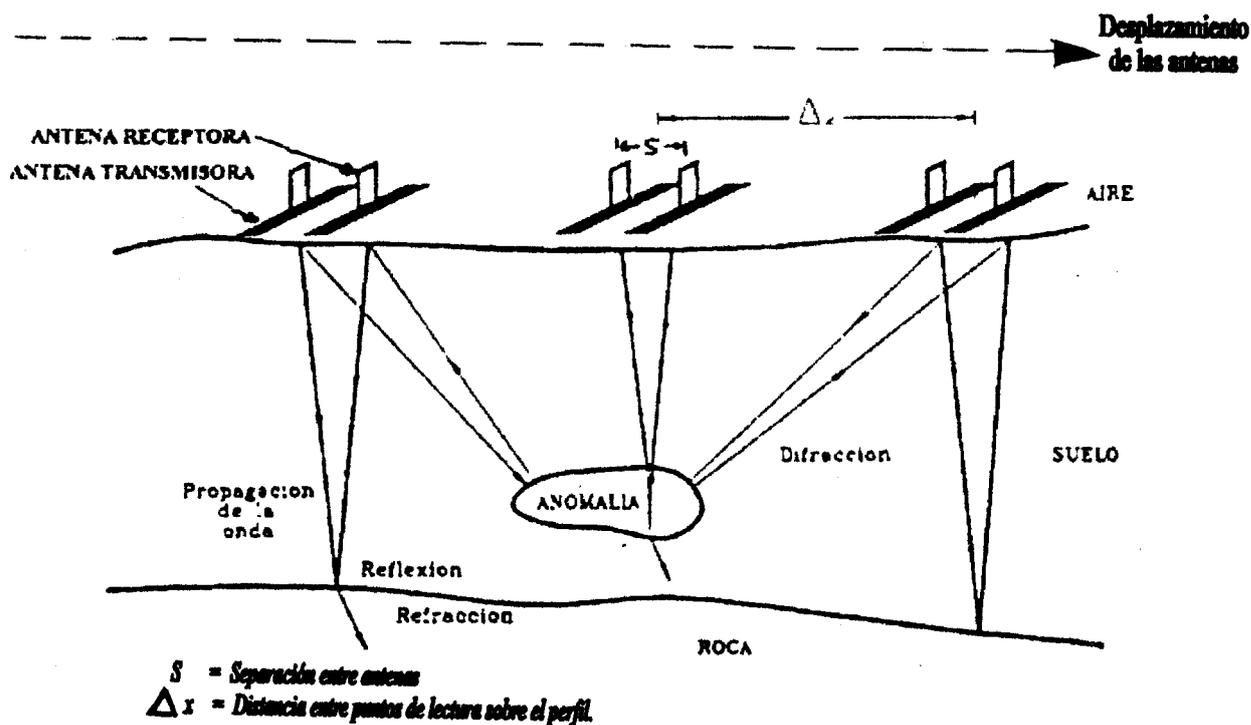


Figura 3.
Disposición del arreglo en la técnica de reflexión de desplazamiento fijo.

4.3.1 Parámetros que intervienen en la técnica de reflexión

En la técnica de reflexión de desplazamiento fijo, los parámetros que intervienen deben ser elegidos adecuadamente durante la planeación del trabajo de campo para obtener resultados óptimos del estudio. Estos parámetros se describen a continuación.

a. Frecuencia de operación

La frecuencia a utilizar en un trabajo de prospección con radar, se elige de acuerdo a las dimensiones y profundidad de los objetivos a investigar. Si el objetivo se localiza dentro del rango de detección de la técnica, la frecuencia se selecciona de acuerdo a los rangos establecidos en el cuadro 1. (Annan, 1996).

b. Apilado

El apilado es un proceso que consiste en promediar las señales enviadas al terreno en un mismo punto de lectura para obtener la traza final desplegada. La selección del apilado en el equipo utilizado tiene variaciones del orden de 2^n trazas, donde n es un entero positivo (Annan, 1996).

c. Ventana de tiempo

Este parámetro corresponde a la ventana de despliegue de datos. Para determinar la ventana de tiempos W (ns) se considera la profundidad máxima h (m) de penetración esperada y la velocidad mínima de propagación v (m/ns) en el medio a investigar (Annan, 1996) mediante la relación:

$$W = 1.3 \frac{2h}{v}$$

d. Intervalo de muestreo temporal

Este valor es el intervalo de tiempo en que se registra cada punto de la traza. El cuadro 5 (Annan, 1996) da los intervalos máximos de muestreo para las frecuencias más

comúnmente usadas. Este valor se determina en función de la frecuencia central f_c (Mhz) por la relación:

$$t = \frac{1000}{6f_c}$$

Frecuencia central de la antena (Mhz)	Intervalo máximo de muestreo (ns)
10	16.70
20	8.30
50	3.30
100	1.67
200	0.83
500	0.33
1000	0.17

Cuadro 5. Intervalo de muestreo, para la frecuencia seleccionada (Annan, 1996)

La relación entre la ventana de tiempo W y el intervalo de muestreo t , determina el número de puntos registrados en una traza.

$$\# \text{ puntos} = \frac{W}{t}$$

e. Intervalo de muestreo espacial

Este parámetro corresponde al espaciamiento entre los puntos de lectura sobre el perfil en estudio. En la figura 3 se representa como Δx y se determina por la frecuencia central f_c , la permitividad relativa del material en superficie ϵ_r , y la velocidad de propagación de la señal en el vacío c , mediante la relación:

$$\Delta x = \frac{c}{4f_c \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{75}{f_c \sqrt{\epsilon_r}} (m)$$

f. Separación de las antenas

La separación mínima entre las antenas debe ser la mitad de la longitud de onda de la frecuencia central, para evitar que se presente el efecto de saturación de la señal. Este efecto se origina cuando el transmisor está muy próximo al receptor, captando señales directas intensas durante el intervalo de tiempo de transmisión del impulso, enmascarando las señales de reflectores cercanos al tiempo de transmisión. (Annan, 1996). Este parámetro se representa por S en la figura 3 y se determina por la profundidad esperada h (m), la permitividad del medio ϵ , mediante la relación:

$$S = \frac{2h}{\sqrt{\epsilon - 1}}$$

4.4 Técnica de sondeo de velocidades

La técnica utilizada para calcular la velocidad de la señal electromagnética en el subsuelo se denomina Sondeo de velocidades o Punto medio común (CMP). Su aplicación tiene la finalidad de efectuar estimaciones de profundidad de los reflectores obtenidos en el radargrama. La configuración del arreglo se ilustra en la figura 4, consiste en que las antenas están separadas inicialmente una distancia x y perpendiculares a la dirección del perfil. Cada antena se separa a partir del punto central 0 en pasos de $x/2$, obteniendo lecturas en cada posición (Annan, 1996).

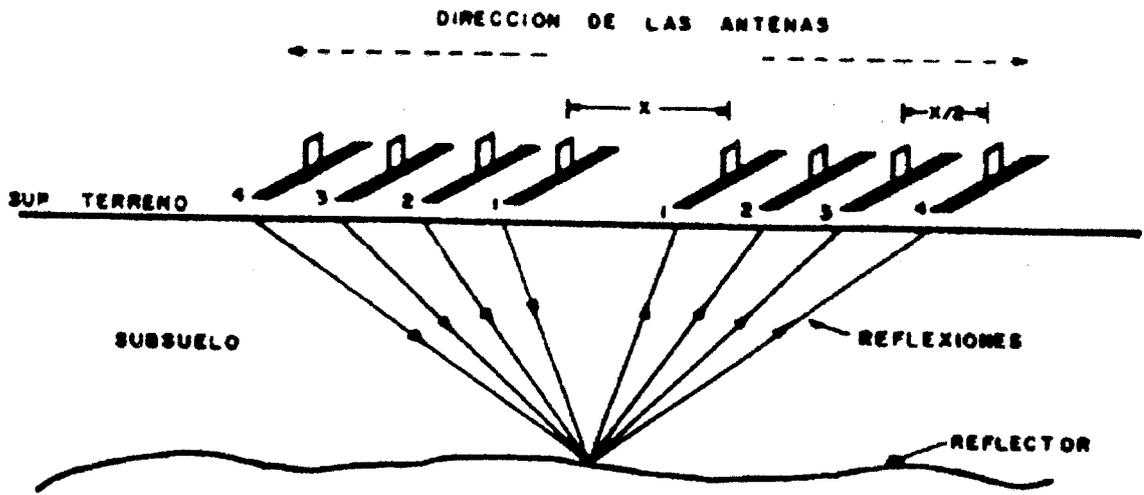


Figura 4.
Configuración del arreglo de un Sondeo de Velocidades o técnica de Punto Medio Común

En un sondeo de velocidades las dos primeras señales registradas son la onda directa de aire y de terreno, similar que en el método de reflexión de punto fijo como se explica en la sección 4.3 o Técnica de Reflexión. Después de estos dos eventos se registran las reflexiones generadas en el subsuelo (Annan, 1996). Las trayectorias de viaje de los diferentes eventos se presentan en la figura 5a. El radargrama de la figura 5b es el resultado de un sondeo de velocidades, marcando los diferentes eventos obtenidos para ser analizados.

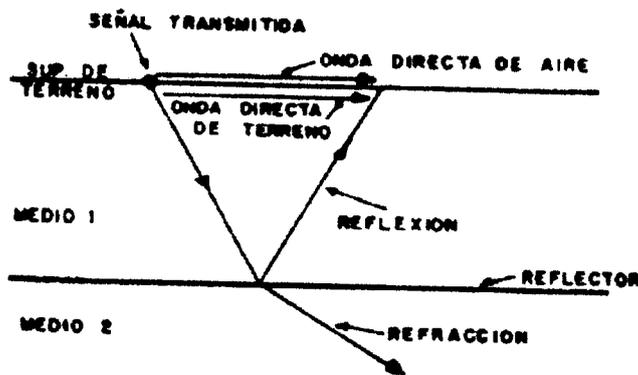


Figura 5a.
Trayectorias de viajes de eventos generados en un sondeo de velocidades

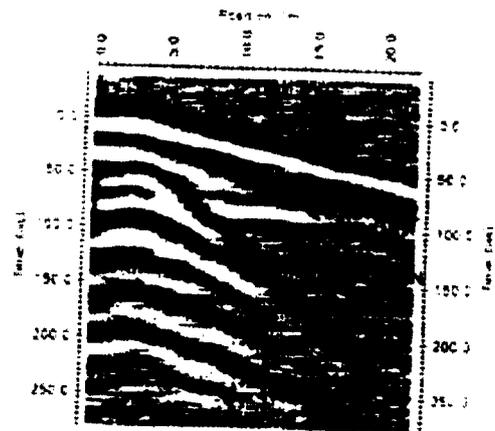


Figura 5b.
Resultado de un sondeo de velocidades

El análisis de datos obtenidos en un sondeo de velocidades se basa en la suposición que los tiempo de arribo t (ns) de la señal reflejada varía hiperbólicamente conforme se separan las antenas x (m) (Tillard, 1995). La expresión de la función hiperbólica es:

$$t^2 = \frac{x^2}{v^2} + \frac{4h^2}{v^2}.$$

Donde h (m) es la profundidad del reflector y v (m/ns) la velocidad de propagación.

Para efectuar la interpretación se grafican los valores (x^2, t^2) correspondientes a cada reflector (Cantos, 1973). Considerando que esta relación es lineal se calcula la pendiente de la recta m y la velocidad media se determina por:

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{m}}$$

La profundidad de la capa reflectora esta dada por:

$$h = \frac{v_m t_0}{2}$$

El procedimiento se realiza para la señal reflejada, estimando la v_m para la primera capa y la profundidad, h al primer reflector.

CAPITULO V

5. APLICACIONES DEL METODO GEORADAR EN INVESTIGACIONES ARQUEOLOGICAS EN MESOAMERICA Y OTRAS REGIONES

En este capítulo se presentan los resultados de las aplicaciones con GPR en diferentes sitios arqueológicos de la región Mesoamericana y otras regiones.

5.1 Región Mesoamericana

Los sitios arqueológicos de Mesoamérica en los que se ha aplicado este método a la fecha, son los siguientes:

Joya de Ceren, El Salvador, San Salvador; es un sitio arqueológico enterrado por desechos piroclásticos lanzados por un volcán cercano.

Cuicuilco, ciudad de México, es un sitio arqueológico afectado por espesores de lava producto de la actividad del volcán Xitle.

La Campana, Colima, México, sitio arqueológico cubierto por sedimentos y material de avalancha, proveniente del volcán de Fuego de Colima.

En todos estos sitios, la aplicación del método tuvo como fin determinar la respuesta de elementos de interés arqueológico, como construcciones o monumentos hechos por el hombre y a poca profundidad de la superficie del terreno.

5.1.1 Sitio arqueológico Joya de Ceren, San Salvador, El Salvador

El sitio arqueológico Joya de Ceren está formado de un pueblo prehistórico agrícola de más de treinta edificios, enterrados por material piroclástico hace aproximadamente 1,400 años (Sheets, 1992). Está localizado aproximadamente a 25 kilómetros al noreste de la ciudad de San Salvador, en el valle de Zapotitan. Las erupciones volcánicas que enterraron el sitio dejaron extraordinariamente bien preservado casi todo el material cultural, incluyendo edificios y sus contenidos, así como plantaciones, las cuales crecieron en los campos agrícolas circundantes y huertos.

Se han excavado cuatro áreas a la fecha, las cuales han descubierto total o parcialmente 16 estructuras, campos agrícolas y jardines. Cada una de las excavaciones revelan a través de pequeñas "ventanas" excavadas en los depósitos piroclásticos, una serie casi completa de artefactos y ecofactos, lo cual dice mucho acerca de la civilización que habitó en el siglo sexto el sitio Joya de Ceren, El Salvador.

Todos los edificios excavados fueron construidos de adobe con techo de paja (Kievit, 1994). Las casas consistían de estructuras múltiples de varios usos, agrupadas en unidades en donde vivían familias extensas. Cada grupo de casas estaba separado de los otros por medio de jardines y campos agrícolas y se conectaban por sendas. Las principales estructuras prehistóricas de Joya de Ceren se encuentran localizadas en levantamientos topográficos naturales las cuales fueron levantadas sobre un cimiento de barro cocido (Kievit, 1994). Los edificios domiciliarios y casas para almacenamiento (bodegas) tienen columnas de tierra fundida en sus cuatro esquinas con paredes de "bajareque" entre las columnas. Otros edificios cívicos o comunales son más sólidos con paredes terrizas espesas con plataformas y bancos interiores.

Se han encontrado en muchas excavaciones campos agrícolas, huertos y jardines. Se encontró maíz, numerosos árboles y otras plantas en cavidades huecas, las cuales se llenaron con yeso dental para preservar los moldes.

La riqueza de los datos arqueológicos de las excavaciones se enfrentan con completos contrastes por la falta de conocimientos acerca del ambiente y el paisaje anterior a la erupción. El mapeo detallado del paisaje y los rasgos culturales usando GPR indican que al menos 22 estructuras anteriormente desconocidas están presentes en el área que no ha sido aun excavada. La porción circundante no expuesta del sitio arqueológico, la cual aún no ha sido explorada geofísicamente, parece cubrir más de diez hectáreas.

Se registraron datos de más de 7,800 metros con el uso del radar de penetración al suelo del hexacentenario sitio arqueológico enterrado de Joya de Ceren en El Salvador. Los datos se usaron para explorar estructuras enterradas y trazar un mapa de la paleotopografía a través de más de cinco metros de sedimentos volcánicos.

Los perfiles del radar de penetración al suelo fueron procesados en computadora para eliminar el ruido del interior del suelo y se corrigió la profundidad de tiempo para identificar la reflexión que representa la antigua superficie del suelo. Esta superficie enterrada, y las estructuras construidas en él fueron computarizadas en dos dimensiones para facilitar la identificación e interpretación. Veintiséis estructuras enterradas fueron identificadas en los perfiles de GPR y se reconstruyó una precisa representación del paisaje y ambiente, tal como era antes de la erupción.

El uso de GPR en el sitio La Joya de Ceren en 1,979 (Loker, 1983; Sheets *et. al.*, 1985) fue una de las primeras aplicaciones arqueológicas de este método. Un sistema de radar de interface en el subsuelo (SIR-7) con una sola antena de 80 Mhz, elevada aproximadamente 10 centímetros sobre la superficie, se ató a una carreta tirada por dos bueyes. El estudio se realizó a principios de junio, después de casi siete meses con pequeñas o ninguna lluvia para que la tierra estuviera completamente seca. Se efectuaron un total de 40 líneas paralelas espaciadas cada 5 metros, para crear un cuadrante de menos de 1 hectárea de superficie estudiada. Los datos de reflexión de radar fueron impresos en el papel con un registrador gráfico y grabados en la cinta magnetofónica de FM (Loker, 1983). Una anomalía se descubrió en las copias de papel de los datos de la reflexión, la que se excavó posteriormente encontrándose que se trataba de una estructura enterrada (Loker, 1983).

*** Estratigrafía del sitio**

La unidad estratigráfica más vieja expuesta en La Joya de Ceren es una arcilla rojiza-castaña oscura. Esta unidad de arcilla es la porción superior de una capa de materiales volcánicos que fueron arrojados por el volcán Caldera Coatepeque distante 30 kilómetros al suroeste de La Joya de Ceren, hace aproximadamente 10,000 y 40,000 años (Sheets, 1983). Directamente por la especie, esta arcilla es una capa de la ceniza volcánica de grano fino blanco conocida como "Tierra Blanca Joven" o TBJ (Hart and Steen-McIntyre, 1983). La ceniza de TBJ proviene de una erupción del volcán Ilopango al este de la ciudad de San Salvador, alrededor de los años 114 a 260 D.C.

El antiguo pueblo de La Joya de Ceren fue construido sobre la superficie formada de material TBJ. Hay evidencia abundante de cultivos en forma de surcos dentro de los campos agrícolas en la porción superior de la ceniza. La arcilla subyacente se usó como material de construcción para edificios, plazas y patios (Kievit, 1994) y se mezclaba con el TBJ en algunos campos agrícolas (Zier, 1983).

La erupción que enterró al pueblo antiguo de La Joya de Ceren ocurrió aproximadamente entre los años 90 a 590 D.C. (Sheets, 1983), sepultando el pueblo bajo un espesor de más de 6 metros de tefra (Miller, 1989, 1990, 1992, 1993). Una serie de unidades piroclásticas de esta erupción, forman la secuencia estratigráfica de La Joya de Ceren sobre la superficie de TBJ, o la arcilla subyacente donde el TBJ estaba erosionado. En general, la secuencia de La Joya de Ceren consiste en una sucesión alterna de depósitos de materiales piroclásticos, lapillis y bloques volcánicos (Miller, 1989). La fuente para estas unidades se ha localizado aproximadamente a 600 metros al norte del sitio lo que es ahora una estructura geológica muy erosionada llamada Loma Caldera (Miller, 1992).

5.1.2 Sitio arqueológico de Cuicuilco, ciudad de México, México.

El sitio Arqueológico de Cuicuilco se localiza al sur de la ciudad de México, entre la Avenida de los Insurgentes y Periférico Sur, está afectado por espesores de lava producto de la erupción del volcán Xitle, hace 2000 años. Romper los espesores de lava para recuperar los restos arqueológicos del sitio representa trabajos difíciles y costosos. La finalidad de aplicar el método de radar fue para identificar posibles elementos arqueológicos, proporcionando localización, dimensiones y delimitando áreas para futuras excavaciones.

*** Antecedentes:**

El sitio arqueológico de Cuicuilco ha revelado evidencias del asentamiento de las culturas más antiguas de América consideradas de la época arcaica, quedando los vestigios de esta civilización que dominó el Valle de México cubiertos por espesores de 4 a 15 m de lava provenientes del Xitle, cráter localizado en la pendiente norte del Ajusco a 10 km aproximadamente del sitio arqueológico (Pérez, et. al., 1995). En Cuicuilco sobresalen los restos de una construcción cónica con un ángulo promedio en sus taludes de 45°, presentando tres etapas constructivas. Este basamento tiene un diámetro de 132 m en su base y una altura de 25 m y está edificado por fragmentos de roca volcánica sin mortero (Cummings, 1933). Ver figura No. 6.

La estratigrafía del sitio se obtuvo de un pozo al oriente de la pirámide marcado en la figura No. 6 . La columna estratigráfica se representa en la figura No. 7 (Pastrana, 1996). En el corte el "piso del andador" representa la base de la pirámide. La diferencia de nivel entre el piso actual y piso del andador se debe a una pared separada 4 m aproximadamente, en la parte norte y este de la pirámide. Las unidades principales representadas en el corte son: De 0 a 3.5 m, por un espesor de derrame basáltico, con desarrollo de fracturas semicolumnares; de 3.5 a 5.2 m, un paquete de tepetate con arcillas arenosas y cantos; de 5.2 a 9.8 m, una unidad de arcilla con cantos en su parte superior y media y estratos delgados de gravilla y arenas; finalmente de 9.8 a 12 m, un espesor de tepetate con arcillas.

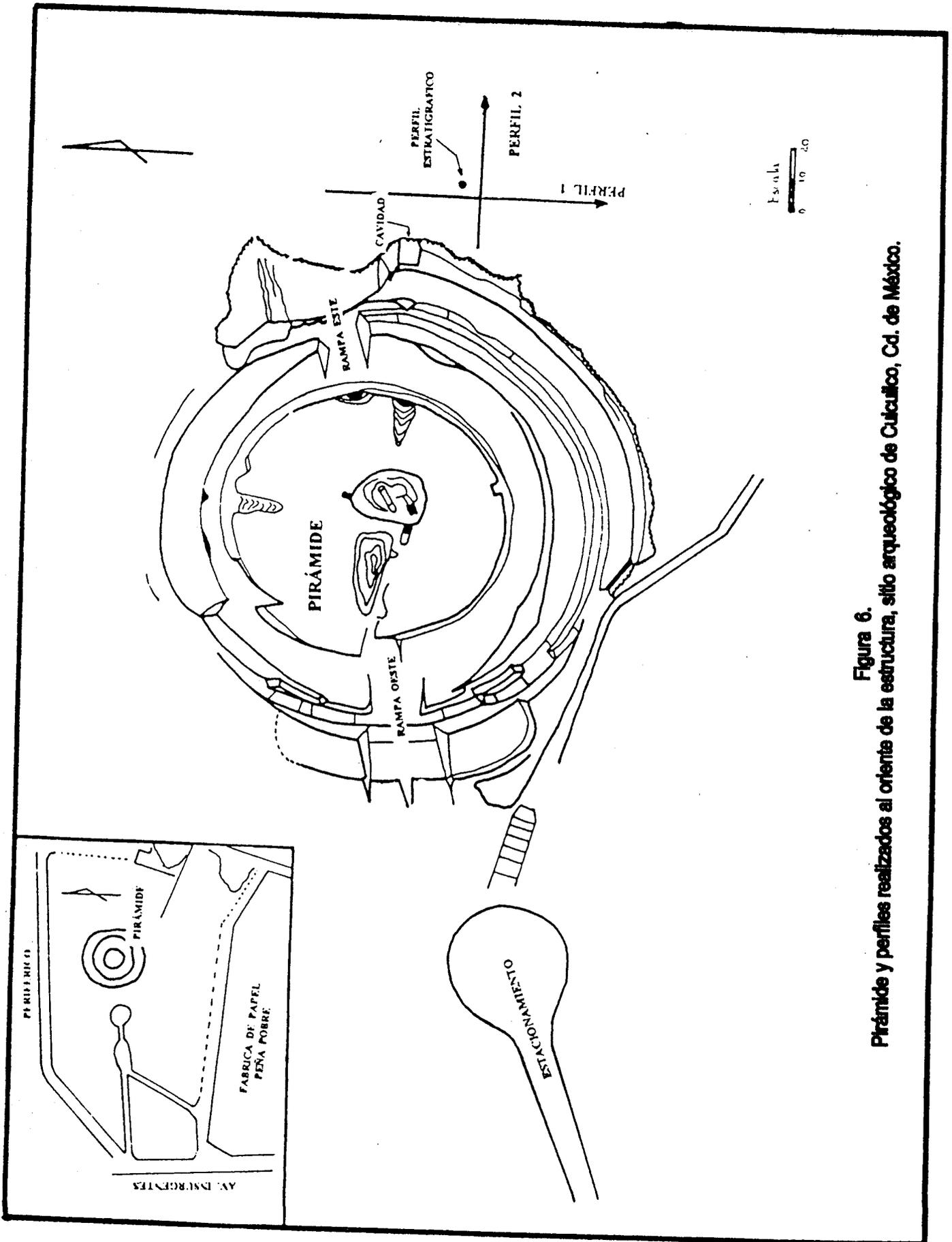


Figura 6. Pirámide y perfiles realizados al oriente de la estructura, sitio arqueológico de Culcualco, Cd. de México.

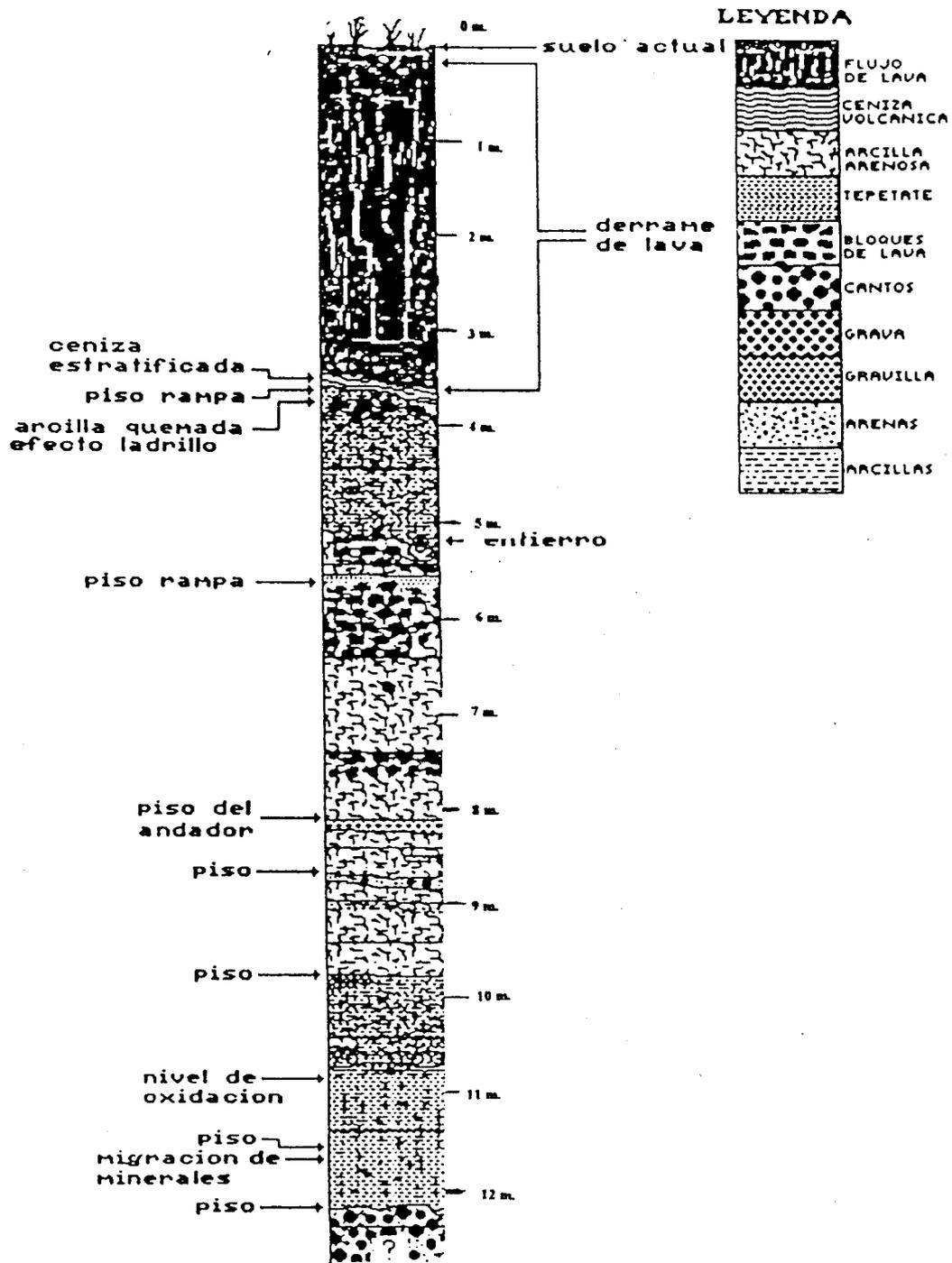


Figura 7.
Columna estratigráfica sitio arqueológico de Cuicuilco, Cd. México.

*** Trabajo de campo y procesamiento de datos:**

El trabajo de campo en el sitio arqueológico de Cuicuilco se realizó en 7 perfiles; los perfiles 1 y 2 son representados en la figura No. 6, al oriente de la pirámide; los perfiles 3 a 7 realizados al suroriente de la pirámide forman una malla representada en la figura No. 8. Para realizar los sondeos en estos perfiles se emplea una frecuencia de 50 Mhz, usando los siguientes parámetros: $\Delta x = 0.5$ m, en los perfiles 1 y 2, y $\Delta x = 1$ m, en los perfiles 3 a 7; $s = 1$ m, $w = 220$ ns, y un apilado de 64 trazas para todos los perfiles.

El proceso efectuado a los datos de campo fue un filtrado temporal pasa bajas. Después de haber probado diversas frecuencias de corte, se eligió un valor de 93.5 Mhz, que corresponde al 30% de la frecuencia de Nyquist. Con esta frecuencia se eliminaron componentes de alta frecuencia o ruido en las secciones, conservando las señales representativas en las secciones.

En esta zona se realizó un sondeo para determinación de velocidades (CMP) con una frecuencia de 50 Mhz, tomando lecturas en pasos de $x/2 = 0.5$ m. El radargrama obtenido en este sondeo se muestra en la figura No. 9, en donde se aprecian las ondas directas de aire y de terreno, y el reflector generado en la primera interface del medio.

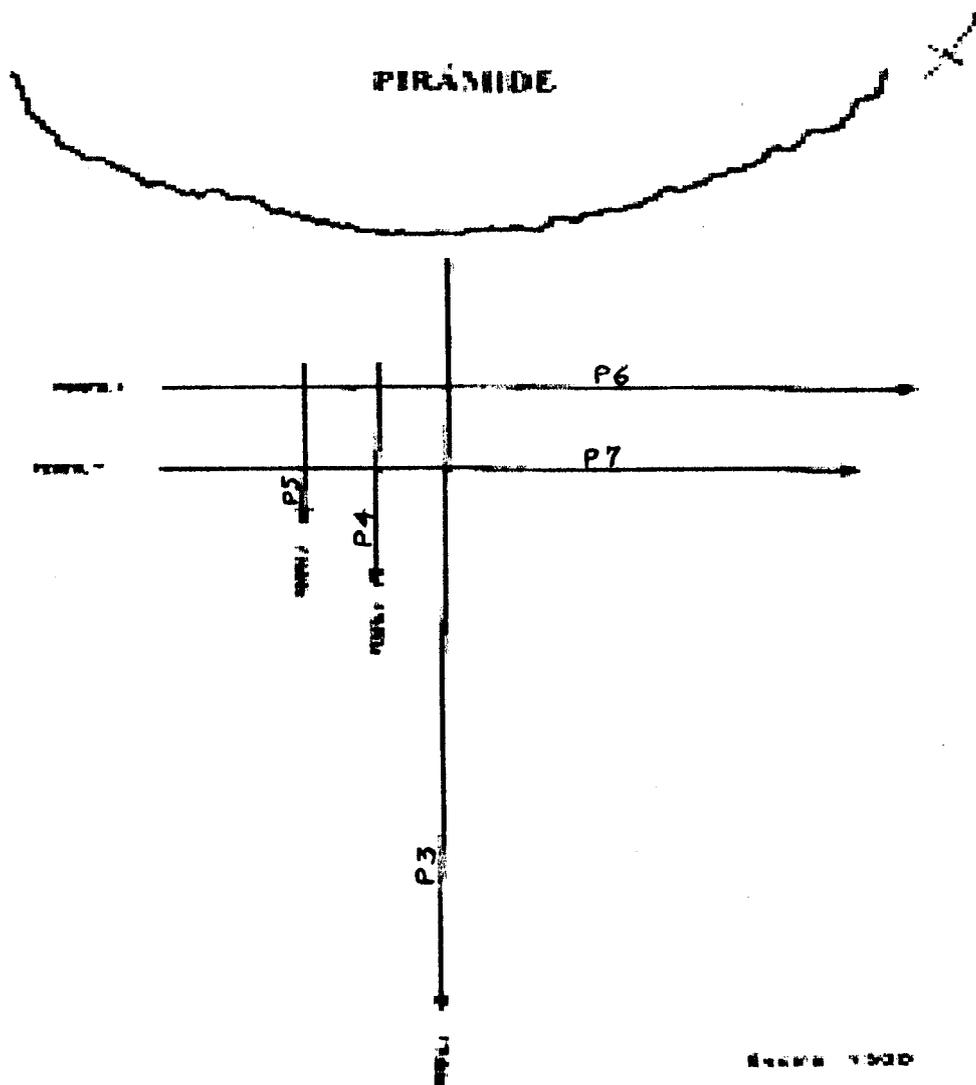


Figura 8.
Perfiles efectuados al sur de la pirámide, zona arqueológica Culculco, Cd. de México.

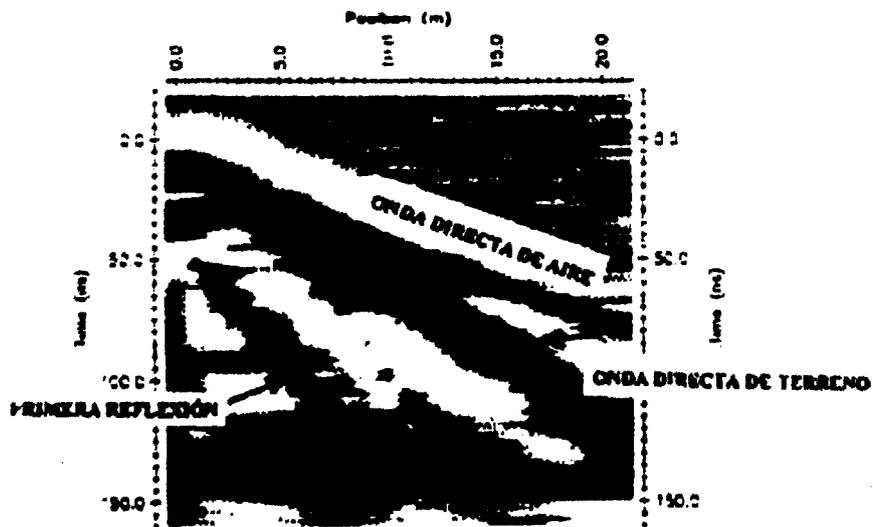


Figura 9.
Sondeo de velocidades, zona arqueológica de Culculco, frecuencia de 50 Mhz.

*** Interpretación de resultados**

Debido a que los sondeos en esta zona se efectuaron en dos sitios alrededor de la pirámide, su interpretación se realiza en dos partes de acuerdo a la ubicación de los perfiles.

*** Sondeos realizados al oriente de la pirámide**

Los radargramas obtenidos en los perfiles 1 y 2 trazados al oriente de la pirámide, son representados en las figuras 10 y 11 respectivamente. El perfil 1 se realizó con la finalidad de detectar la respuesta de la cavidad representada en la figura 6 al oriente de la pirámide; tiene 3 m de ancho y 2.5 m de altura aproximadamente, su techo es el límite inferior del derrame basáltico y su entrada se encuentra en el corte localizado frente a la pirámide. El perfil 1 tiene dirección N – S y es perpendicular a la cavidad localizada entre las posiciones de 33 a 37 m del perfil, a una profundidad de 5.5 m. El perfil 2 tiene dirección W – E e intersecta en su posición de 0 m con el perfil 1 en su posición de 50 m.

En las figuras 10 y 11 que representan radargramas se aprecia un medio entre 3 a 6 m de profundidad, de acuerdo a la estratigrafía de la zona, corresponde a un espesor de basalto. Dentro de esta zona se aprecian reflectores inclinados, interpretándolos como la respuesta de fracturas originadas dentro del derrame basáltico. En el radargrama de la figura 10, entre 70 a 75 m de posición, el espesor de basalto alcanza una profundidad de 6 m, lo que sugiere la presencia de una depresión en esta zona antes de la erupción del Xitle. En el radargrama de la figura 11 se registran dos anomalías verticales dentro del espesor de basalto, entre 7.5 a 10.3 m y entre 24.3 y 26 metros de posición, estos eventos se interpretan como la respuesta de estructuras verticales, posiblemente muros o columnas de alguna construcción.

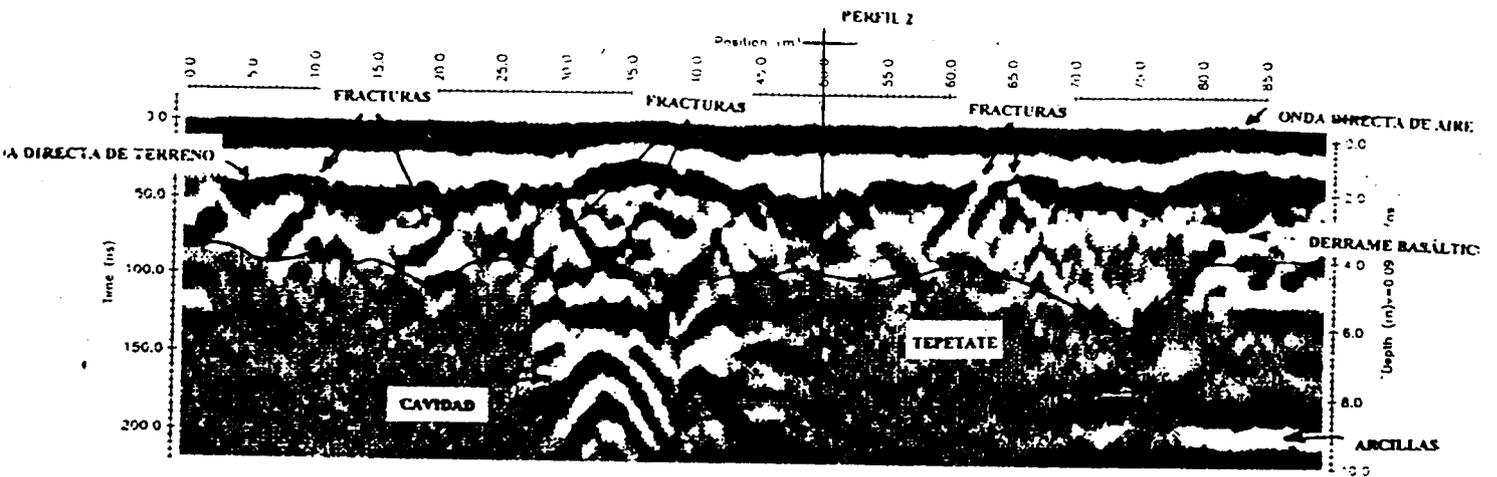


Figura 10.
 Perfil 1, realizado al oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.

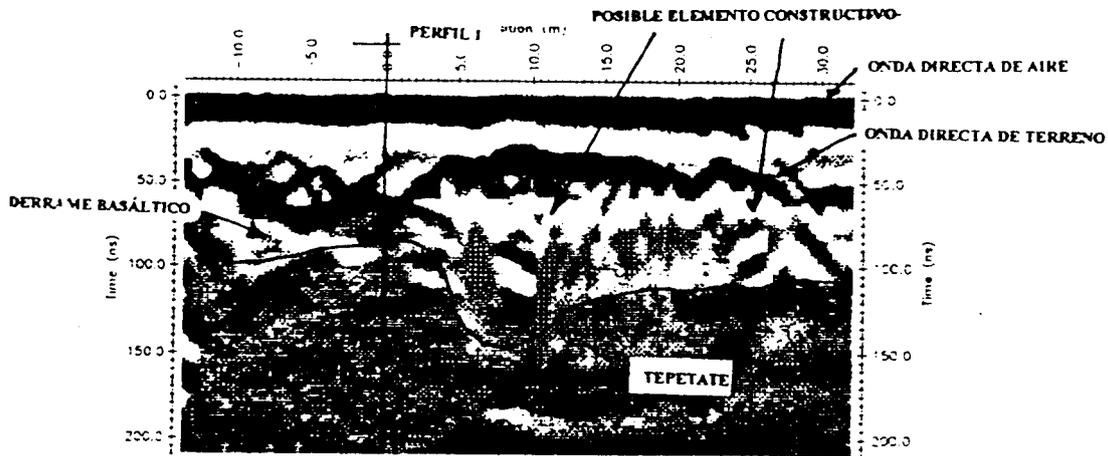


Figura 11.
 Perfil 2, realizado al oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.

El límite inferior del derrame basáltico es representado mediante una línea en las dos secciones. Debajo se identifica un medio con características uniformes en las dos secciones, corresponde a un espesor de tepetate. En la sección 1 el reflector localizado entre las posiciones de 65 a 80 m y a una profundidad de 9.5 m puede ser la interface del espesor de tepetate con el de arcillas.

En la figura 10 se aprecia entre las posiciones de 30 a 38 m, una hipérbola de difracción con su punto máximo a 6 m de profundidad. Este efecto es producido por la cavidad localizada bajo las posiciones antes mencionadas, registrándose con dimensiones mayores que la estructura original. Bajo la hipérbola de difracción se aprecia un evento con la misma tendencia, su punto máximo está a una profundidad de 8 m y es considerado un evento múltiple. Finalmente se observa entre las posiciones de 30 a 48 m cuatro reflectores pequeños a diferentes profundidades, se consideran la respuesta de una zona de fracturas.

*** Sondeos realizados al suroriente de la pirámide**

Al suroriente de la pirámide se realizaron cinco sondeos en los perfiles representados en la figura 8. Los perfiles 3, 4 y 5, paralelos entre si, tienen dirección NW-SE y los radargramas correspondientes se presentan en las figuras 12, 13 y 14 respectivamente. Los perfiles 6 y 7 perpendiculares a los tres anteriores, tienen dirección SW-NE y se presentan en las figuras 15 y 16 respectivamente.

En los cinco perfiles se registra el límite inferior del espesor basáltico de 3 a 6 m de profundidad. Debajo de este espesor y de acuerdo a la columna litológica (Pastrana, 1996) se localiza un espesor de tepetate. La interface basalto-tepetate se representa en

las secciones mediante una línea. Se aprecia también un reflector a profundidades de 7 a 8 m considerado como el contacto entre los espesores de tepetate y de arcilla.

En las cinco secciones se observan anomalías verticales dentro del derrame basáltico con profundidades hasta de 6 m. Estos eventos se identifican con características similares en los radargramas y son interpretados como la respuesta de elementos constructivos, posibles muros o rampas de alguna pequeña pirámide, los cuales pueden estar edificados con bloques basálticos sin morteros en sus uniones. En el perfil 7, las anomalías registradas no se presentan con la misma claridad y de tener continuidad con los eventos registrados en el perfil 6, es posible que en la zona en donde se obtuvo este último sondeo, los elementos constructivos se encuentren semidestruidos.

En las secciones las anomalías registradas dentro del espesor basáltico se identifican como la respuesta de cuatro elementos diferentes A, B, C y D, de acuerdo a la continuidad registrada en los radargramas. La posible continuidad de las estructuras que dan origen a estas anomalías se representa con la misma simbología en la figura 17. Observando que estas estructuras tienen direcciones N-S y E-W. El proceso de modelado permite sugerir que los parámetros de velocidad y atenuación para el basalto es de $v = 0.2 \text{ m / ns}$ y para el tepetate (cliche) es de $v = 0.13 \text{ m / ns}$ y $\alpha = 0.01 \text{ dB / m}$.

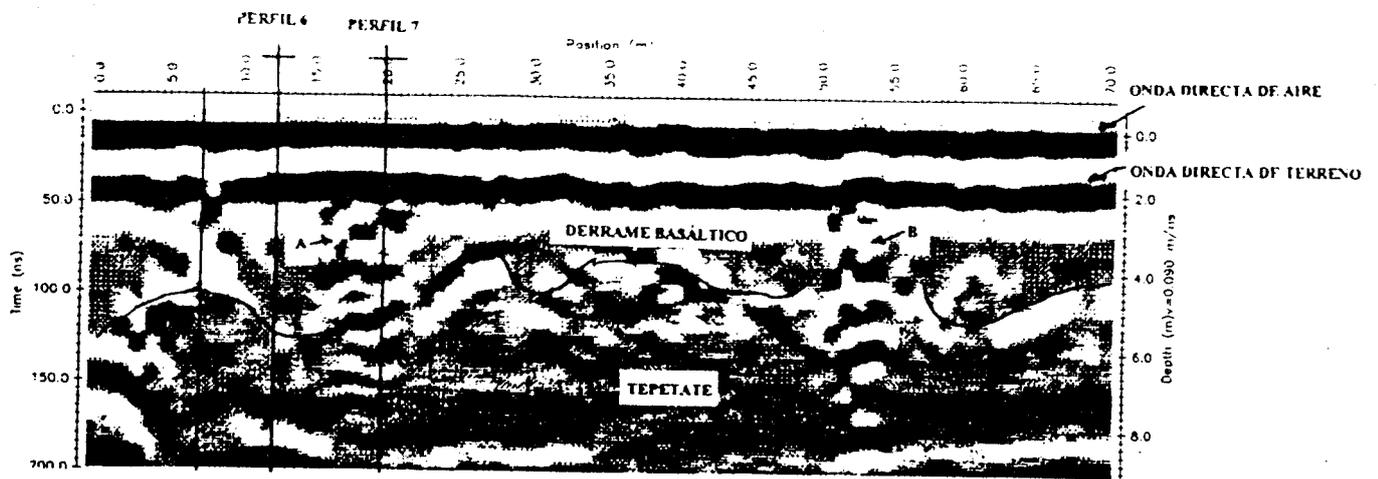


Figura 12.
Perfil 3, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.

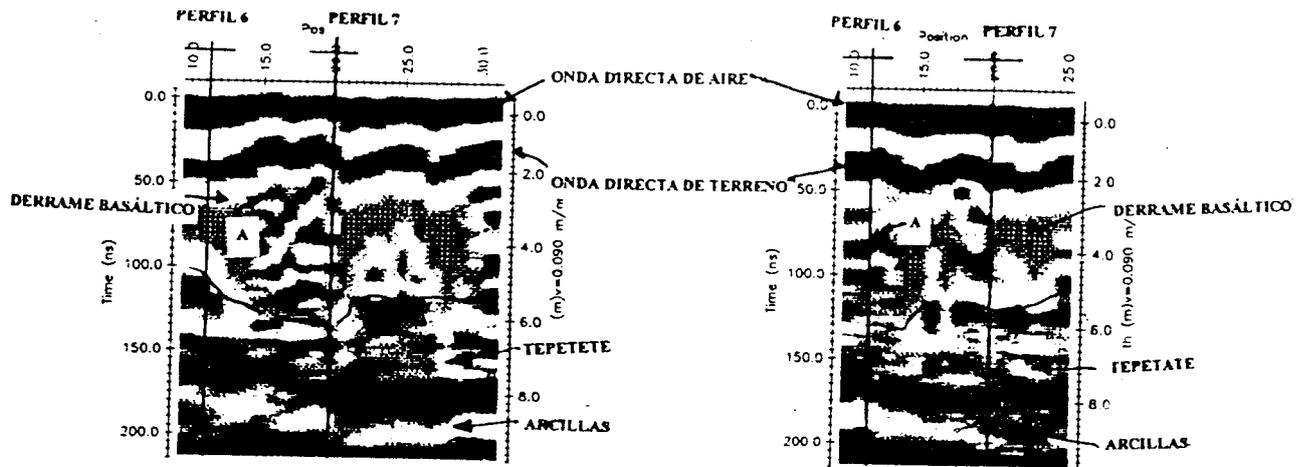


Figura 13. Perfil 4.

Figura 14. Perfil 5.

Realizados al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.

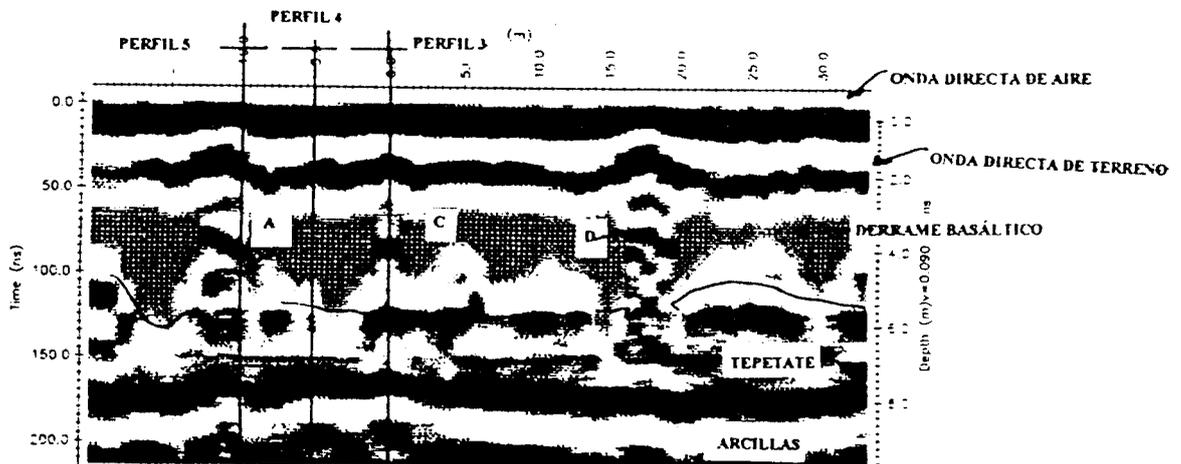


Figura 15.
Perfil 6, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.

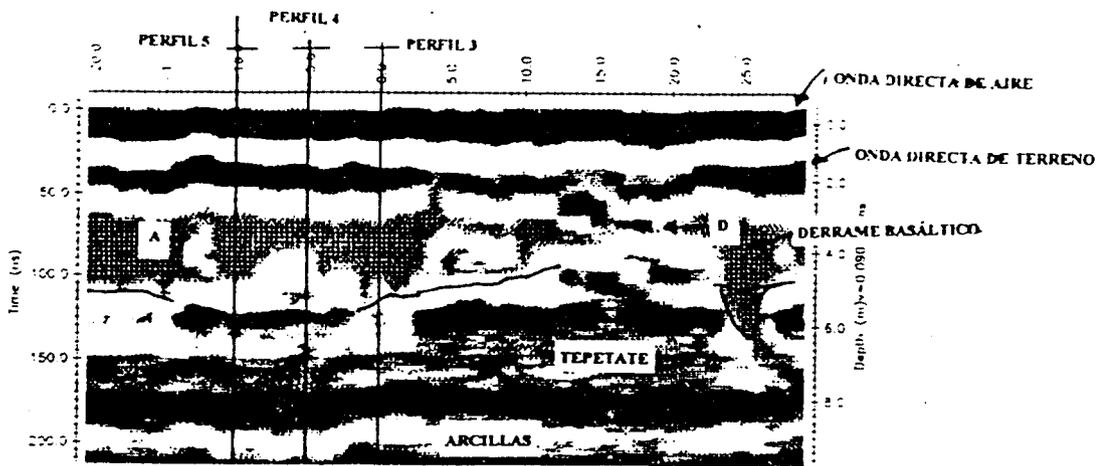


Figura 16.
Perfil 7, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 Mhz.

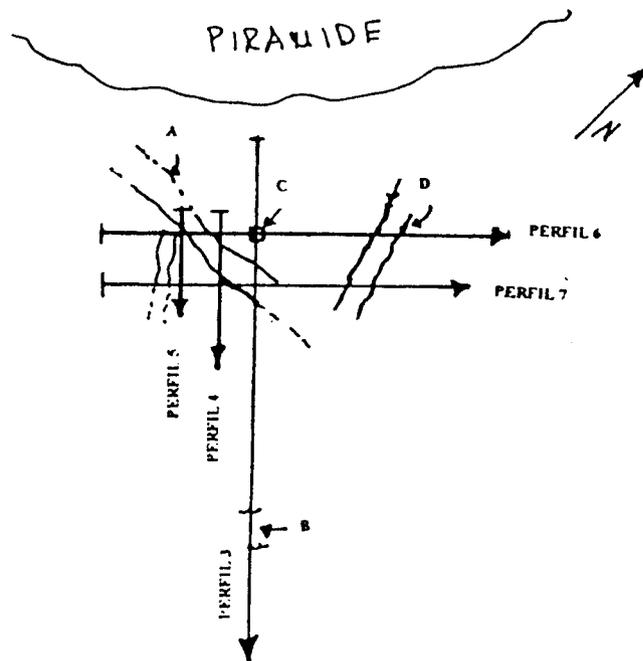


Figura 17.
Continuidad de anomalías que dan origen a las respuestas en los radargramas de los perfiles trazados al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco.

5.1.3 Sitio arqueológico de La Campana, Colima, México.

La Campana es un sitio arqueológico localizado en el municipio de Villa de Alvarez, al noroeste de la zona urbana de la ciudad de Colima, con un área aproximada de 60 hectáreas. Esta zona y su topografía se representan en el croquis de la figura 18. La aplicación del método de georadar en este sitio tuvo como objetivo localizar y dar la ubicación de las anomalías consideradas como la respuesta de estructuras o elementos de interés arqueológico, teniendo como antecedente el resultado de excavaciones recientes realizadas por arqueólogos del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México (INAH), al poniente del sitio fueron tres pirámides o adoratorios de gran importancia.

*** Antecedentes:**

La Campana es considerada como el mayor centro arqueológico del occidente de la república de México debido a la existencia de un gran asentamiento cultural de origen Náhuatl, de 1500 años de antigüedad. En los últimos años el sitio estuvo cubierto por sedimentos, producto de erosión y por la destrucción de las mismas construcciones y se vio afectado por el crecimiento de la ciudad de Colima. Los resultados de excavaciones realizadas al poniente de la zona en noviembre de 1995, son tres pirámides o adoratorios que presentan dos etapas constructivas, edificadas con piedra de río y material limo arcilloso (lodo) como cementante. Estos elementos arquitectónicos se ubican en el croquis de la figura 18 en la región marcada como "zona excavada".

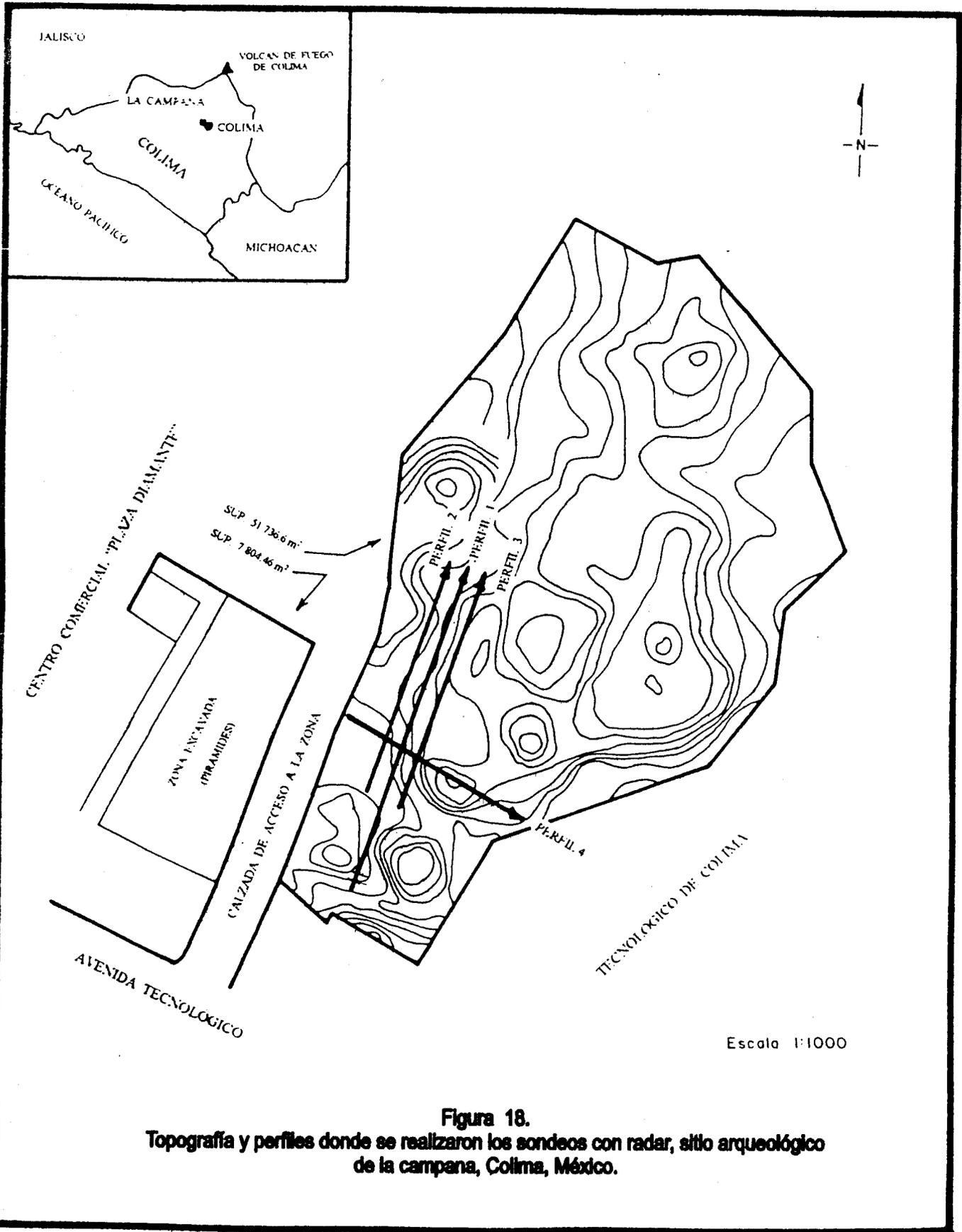


Figura 18.
Topografía y perfiles donde se realizaron los sondeos con radar, sitio arqueológico de la campana, Colima, México.

La geología del sitio se compone por depósitos caóticos de material volcánico no consolidado producto del colapso de una parte del flanco meridional del Volcán de Fuego de Colima. Sus características son las de una avalancha de escombros, con arrastre de bloques andesíticos angulosos y subangulosos (20 a 50 cm) en una matriz de guijarros, ceniza volcánica y arena (conglomerado), con espesores promedio de 20 m. La base de esta unidad son espesores de 40 cm en promedio de arena fina y gruesa (Rodríguez, 1991 y Luhr, 1990). Los suelos de esta área se componen de caliche, producto probable de la alteración y lixiviación del material subyacente.

*** Trabajo de campo y procesamiento de datos**

Los sondeos con Georadar en La Campana fueron realizados en el mes de marzo de 1996, en los perfiles representados en el croquis de la figura 18. Los perfiles 1, 2 y 3 paralelos entre si, tienen dirección SW-NE y cruzan perpendicularmente en sus posiciones de 70 m con el cuarto perfil. El perfil 4 tiene dirección NW-SE, intercepta en las posiciones de 25, 20 y 30 m con los perfiles 1, 2 y 3, respectivamente. Los sondeos se realizaron con una frecuencia de 50 Mhz y los parámetros de campo fueron; $s = 1 \text{ m}$; $\Delta x = 1 \text{ m}$; $w = 250 \text{ ns}$; y un apilado de 64 trazas. La topografía de los perfiles es integrada en las secciones.

El procesado efectuado a los datos obtenidos en campo, fue un filtrado temporal pasa bajas. Después de haber probado con diversas frecuencias de corte, se eligió un valor de 124.8 Mhz, que representa el 40% de la frecuencia de Nyquist (312 Mhz). Con esta frecuencia se eliminaron componentes de alta frecuencia o ruido, conservando las señales representativas en las secciones.

El valor de la velocidad de propagación de la señal electromagnética en la zona de estudio se determinó considerando la estratigrafía que se describe en la parte de antecedentes. De acuerdo a la tabla 2, el espesor de caliche tiene un valor de 0.13 m/ns y el espesor de avalancha, de 0,07 m / ns. La velocidad media de propagación de la señal para la zona es de 0.1 m / ns, valor aplicado a los datos obtenidos para este trabajo.

*** Interpretación de resultados**

Los radargramas obtenidos en los perfiles 1, 2, 3 y 4 son representados en las figuras 19, 20, 21 y 22, respectivamente. En las cuatro secciones se registran dos reflectores en los primeros 2 m de profundidad, que corresponden a la onda directa de aire y de terreno.

En los radargramas se representa como A una anomalía vertical con características similares en las cuatro secciones; en los perfiles 1, 2 y 3 se localiza entre las posiciones de 60 a 70 m y en el perfil 4, entre las posiciones 18 a 23 m. Esta anomalía se considera la respuesta de la misma estructura, ya que se registra en la intersección de los cuatro perfiles. Otros eventos identificados con características similares a la anomalía A, se representan como B, C y D. El evento B se registra en el perfil 1, entre las posiciones de 0 a 5 m; C entre las posiciones de 100 a 105 m en los perfiles 1 y 2, lo que sugiere que en ambas secciones se tiene la respuesta de la misma anomalía; finalmente el evento D, en el perfil 4 entre las posiciones de 0 a 5 m.

Los eventos A, B, C y D tienen una tendencia vertical y con características similares, registradas en sitios donde se presenta una elevación topográfica.

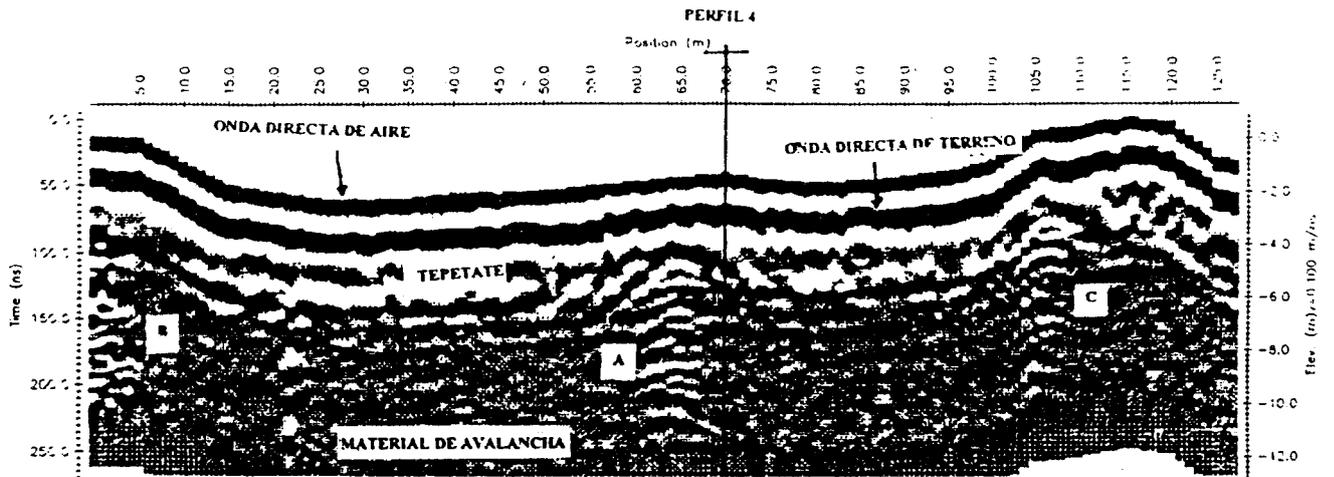


Figura 19. Perfil 1, realizado con una frecuencia de 50 Mhz, sitio arqueológico de La Campana.

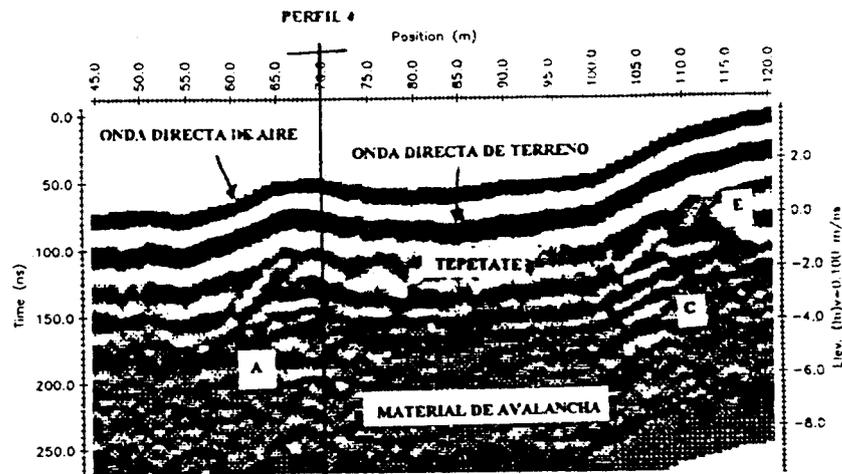


Figura 20. Perfil 2, realizado con una frecuencia de 50 Mhz, sitio arqueológico de La Campana.

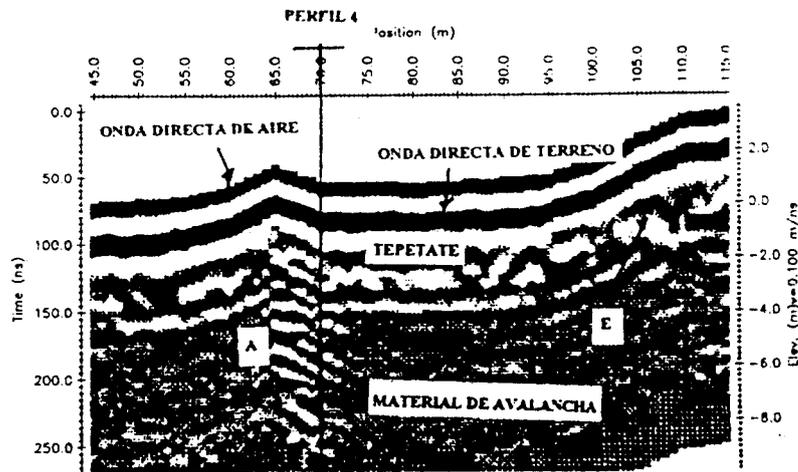


Figura 21. Perfil 3, realizado con una frecuencia de 50 Mhz, sitio arqueológico de La Campana.

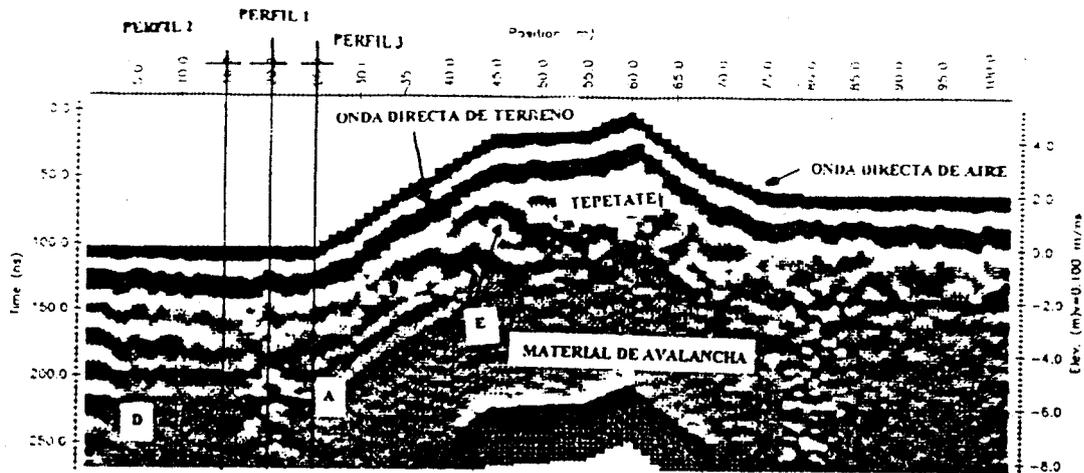


Figura 22.
Perfil 4, zona arqueológica de La Campana, frecuencia de 50 Mhz.

Las anomalías registradas se interpretan como la respuesta de paredes o muros de construcciones, como pirámides, edificadas a base de piedra de río, de acuerdo a los antecedentes del sitio.

Los reflectores identificados en las secciones como E en los perfiles 2, 3 y 4 tienen una tendencia horizontal. En el perfil 2 se identifican entre las posiciones 105 a 115 m; en el perfil 3 entre las posiciones de 88 a 98 m; y en el perfil 4 de 35 a 55 m de posición. En los tres casos los eventos se localizan a 2 m de profundidad, interpretándose como la respuesta de pisos de construcciones.

5.2 Otras regiones

Una de las primeras aplicaciones del GPR en exploración arqueológica se condujo en el cañón Chaco, Nuevo México (Vickers y Dolphin, 1975). Estos exámenes fueron exitosos en el descubrimiento de la localización de muros enterrados bajo suelos secos arenosos a profundidades que oscilaban de 1 a 2 pies.

Otro de los primeros logros del Método de Penetración por Radar (GPR) incluyó el descubrimiento de paredes de graneros enterrados y sótanos de almacenamiento en Pensylvania (Bevan y Kenyon, 1975; Kenyon, 1977) y muros derrumbados en Chipre (Fisher *et al*, 1980).

Durante 1982 y 1983 se realizaron pruebas con GPR en el sitio arqueológico Red Bay, Labrador en Canadá en un intento por localizar tumbas, artefactos enterrados y muros de casas de la aldea Vasca Whaling del siglo dieciséis (Vaughan, 1986) Se descubrieron anomalías con el GPR, por lo que más tarde se excavó y se encontró presente suelo disturbado alrededor de las tumbas y las paredes hechas de guijarros de playa.

Otra aplicación del mapeo de capas de tiempo creadas por georadar, se efectuó en los montículos de los entierros en el sitio arqueológico de Nutubaru en Kyushu, Japón. El objetivo de esta investigación fue detectar tumbas que han sido sepultadas por materiales producto de erupciones volcánicas en el sitio. Las tumbas pertenecen al período Kofun Temprano del Japón (300 – 700 D.C.).

Actualmente estos entierros se encuentran intactos subyaciendo a las tierras cultivadas. En muchos casos no hay evidencia en la superficie de Nutubaru que un entierro o tumba pudiera haber existido en el sitio, porque la parte superior del montículo ha sido removido debido a trabajos agrícolas en la zona. En algunos casos, se han encontrado accidentalmente por los pesados tractores que están siendo usados en la agroindustria en Japón, las cámaras donde los muertos están sepultados dentro de los montículos.

En el estudio que se realizó en Nutubaru, se utilizó una antena de radar con una frecuencia de 300 Mhz. Las capas de tiempo fueron generadas cada 8 ns comenzando desde la superficie del terreno.

Otra exitosa aplicación de las capas de tiempo por georadar se efectuó en el sitio arqueológico Matsuzaki en Chiba, Japón. El sitio fue estudiado usando una antena de 300 Mhz de frecuencia y una ventana de tiempo de 80 ns para registrar las reflexiones del radar. El área fue excavada previamente a lo largo de dos trincheras de prueba de 2 m de ancho y 35 cm de profundidad aproximadamente. La excavación se realizó en 1983, y una vez terminada la investigación, fueron rellenadas las trincheras. Dos entierros pertenecientes al Período Jomon (200 D. C.) fueron encontrados.

El propósito de usar el GPR en este trabajo, fue el de probar si este método podría reflejar con precisión estructuras enterradas, conocidas previamente para verdaderas comparaciones; además, para descubrir otras estructuras arqueológicas que pudieran existir en el sitio.

Se planeó una intensiva excavación del sitio Matsuzaki inmediatamente después de la prueba del georadar, la cual podría proveer una buena oportunidad para verdaderas comparaciones del terreno.

Entre otros sitios arqueológicos en donde se ha aplicado con gran éxito el método de radar de penetración terrestre, GPR; como una alternativa de ayuda a la investigación arqueológica se pueden mencionar: Spiro, Oklahoma, USA y en la gran pirámide de Keops, Egipto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El GPR es una excelente herramienta geofísica con la cual se reconstruyen paisajes enterrados y mapas de rasgos culturales, debido a su capacidad de resolver con precisión rasgos del interior del suelo en tres dimensiones. El georadar es un método no destructivo para el medio ambiente y de gran rapidez de operación.

En este trabajo se analizaron los aspectos teóricos y prácticos del método de prospección geofísica de georadar. Conociéndose los diferentes fenómenos que intervienen durante la operación de la señal electromagnética en el medio de transmisión (terreno). Se analizó la importancia que representa la frecuencia de operación del radar, ya que este parámetro es uno de los que controlan la profundidad de penetración de la señal electromagnética.

Entre las limitaciones que presenta un estudio con georadar están los suelos con alto contenido de humedad, en general en medios con conductividad mayor a 0.1 ohms/m, limitando la penetración de la señal en el terreno, especialmente en suelos arcillosos. Otro fenómeno que puede presentarse en la operación de campo son los efectos que causan los elementos como estructuras metálicas extensas que pueden provocar ruido en los registros; las fuentes o transmisores de frecuencias de radio y líneas eléctricas de alta tensión ocasionan saturación en el receptor del radar.

La interpretación de los sondeos realizados en cada uno de los sitios arqueológicos donde se aplicó el Georadar, quedaron satisfactoriamente correlacionados con los resultados de las excavaciones, comprobando que las principales anomalías registradas en los radargramas fueron producidas por elementos de interés arqueológico presentes en cada lugar.

Tomando como base tanto las interpretaciones como los resultados de las excavaciones efectuadas en estos sitios, se puede suponer que los montículos existentes en ellos, pueden representar elementos arquitectónicos cubiertos por sedimento y vegetación.

Se recomienda implementar este tipo de prospección geofísica en los trabajos de investigación arqueológica a realizar en nuestro país; ya que el uso del método de georadar como una alternativa en los estudios arqueológicos, proporciona resultados en tiempos relativamente cortos, lo que representa un ahorro en tiempo y costos para el proyecto.

Es recomendable la aplicación de este método en nuestro país exclusivamente en época seca.

Actualmente el equipo no está disponible en nuestro país, por lo que es necesario adquirirlo en el extranjero, es factible su alquiler con un valor aproximado de \$200.00 diarios.

Finalmente, es importante mencionar que en nuestro país ya se experimentó la aplicabilidad de este método en dos sitios arqueológicos a saber: en la zona nuclear de Cotzumalguapa, Escuintla y en el proyecto Kaminaljuyu-Miraflores, Guatemala. En el primero con el patrocinio de la National Geographic Society en los años 1997 y 1998; sin embargo, no se obtuvieron los resultados esperados debido a que no se llenaron las condiciones ideales (Chinchilla, 1999).

En el segundo sitio con la colaboración de la Universidad de Yale, USA., en la década de los noventa del siglo recién pasado; pero, también con resultados infructuosos debido a la presencia de arcillas con alto contenido de humedad en el terreno (Hacht, c.p.; Barrientos, 1997).

ANEXO

GLOSARIO

Algoritmo:

Método y notación en las distintas formas del cálculo.

Anomalías:

Perturbaciones o irregularidades del campo de fuerza presentes en el subsuelo.

Asíntota:

Línea recta que, prolongada indefinidamente, se acerca de continuo a una curva, sin llegar nunca a encontrarla.

Bajareque:

Pared de palos entretrejidos con cañas y barro.

Caliche:

Depósito calcáreo que se forma en los suelos de las regiones áridas. El agua portadora de bicarbonato cálcico asciende por capilaridad hasta la superficie en épocas de sequía; al evaporarse aquélla, queda depositado el bicarbonato sódico en masas estratiformes.

Decibel o decibelio (dB):

Unidad de potencia sonora equivalente a la décima parte del belio, que sirve para expresar la relativa intensidad de los sonidos.

Ecofactos:

Término aplicado a todos los datos no artefactuales culturalmente relevantes; es decir, todos aquellos elementos que representan o informan acerca de los puntos de articulación entre sistemas culturales y que deben ser muestreados. La clase general de ecofactos puede ser disgregada en muchas subclases representando diferentes poblaciones, como polen, suelos, huesos de animales, etc.

Electromagnetismo:

Parte de la Física, que estudia las acciones y reacciones de las corrientes eléctricas sobre los imanes.

Espectro:

Resultado de la dispersión de un conjunto de radiaciones.

Estratigrafía:

Parte de la geología que se ocupa de la disposición de los estratos y de los fósiles y elementos que contiene, así como de las rocas depositadas.

Fósil:

Se aplica a organismos y substancias orgánicas que se han petrificado por haber permanecido enterradas durante períodos de tiempo muy largos.

Frecuencia:

Número de ondulaciones de un movimiento vibratorio en la unidad del tiempo.

Frecuencia de Nyquist:

Frecuencia de corte que equivale a 312 Mhz. Se utiliza para el procesado de datos de campo actuando como un filtro temporal.

Geología:

Ciencia que estudia la formación del globo terrestre, su estructura, su naturaleza y los cambios y alteraciones que ha experimentado desde su origen.

Geofísica:

En sentido estricto, es la ciencia que estudia la física de la parte sólida de la Tierra; comprende la geofísica general que estudia las propiedades físicas de la Tierra, y la geofísica práctica o aplicada, que tiene por objeto la búsqueda de yacimientos y estructuras y el conocimiento de la estructuración geológica de la Tierra; para ello se sirve de mediciones gravimétricas, magnéticas, térmicas, sísmicas y eléctricas.

Gigahertz (Ghz):

Mil millones de hertz ($10^9 = 1,000,000,000$).

Guijarros:

Cantos rodados o fragmentos de roca que, como consecuencia de haber sido arrastrados durante largo tiempo por el agua corriente (fluvial o marina), han adquirido forma redondeada.

Hertz, Heinrich (1857 – 1894):

Físico alemán que descubrió las ondas de radio (Hertz) en 1890. Las unidades de frecuencia son ciclos/segundos, o sea, Hertz (Hz).

Hertziano:

Perteneiente a las teorías del físico alemán Hertz.

Hipérbola:

Curva simétrica respecto de dos ejes perpendiculares entre sí, compuesta de dos porciones abiertas, dirigidas en opuesto sentido. En ella se verifica que la diferencia de las distancias de uno cualquiera de sus puntos a otros dos fijos, llamados focos, es constante.

Impedancia:

Resistencia total aparente que ofrece un circuito complejo al paso de las corrientes alternas.

Karst (carst):

Conjunto de formas originadas en el relieve calcáreo por efecto de corrosión de rocas fácilmente solubles (calizas y yesos); recibe su nombre de una región yugoslava situada al noroeste de la península balcánica.

Lapilli:

Bomba volcánica de pequeño tamaño. Magma violentamente expulsado por la erupción del volcán que se solidifica en su caída tomando forma de huso, cordada o espiral.

Lixiviación:

Disolución de sustancias solubles de roca (especialmente la sal y el calcio). A veces origina en la superficie terrestre la formación de cavidades cerradas.

Manto freático (agua freática):

El agua subterránea de la capa más cercana a la superficie. Dícese del agua acumulada en el subsuelo sobre una capa impermeable y que puede aprovecharse por medio de pozos.

Maxwell, James Clerk (1831 – 1879):

Expresó las leyes del electromagnetismo. Estas leyes, llamadas Ecuaciones de Maxwell, desempeñan en el electromagnetismo el mismo papel que las leyes de Newton del movimiento y la gravitación en la mecánica.

Megahertz (Mhz):

Un millón de hertz ($10^6 = 1,000,000$).

Nanosegundo (ns):

Unidad de tiempo equivalente a la mil millonésima parte de un segundo. Se utiliza en electrónica y en estudios de vida media de corpúsculos atómicos.

Pasa bajas:

Componentes de baja frecuencia que resultan luego de efectuar el procesamiento de datos a través de un filtrado temporal. Son las señales representativas en las secciones.

Perfil:

Figura que representa un cuerpo cortado por un plano vertical.

Prospección:

Exploración de un terreno en busca de yacimientos de minerales valiosos, petrolíferos, aguas subterráneas, estructuras, fallas geológicas y/o elementos arqueológicos, etc.

Prospección geofísica:

Consiste esencialmente en la medición de constantes físicas (densidad, características magnéticas, eléctricas, rigidez, etc) de las rocas del subsuelo. Va precedida de un estudio geológico encaminado a conocer datos relativos a la constitución estratigráfica y petrográfica del terreno.

Reflexión:

Acción de reflejar o hacer cambiar de dirección la luz, el calor, el sonido o algún cuerpo elástico, oponiéndoles una superficie lisa.

Refracción:

Acción de refractar o hacer que cambie de dirección el rayo de luz que pasa oblicuamente de un medio a otro de diferente densidad.

Rocas piroclásticas:

Son rocas fragmentadas lanzadas al aire durante una erupción volcánica, se precipitan a diversas distancias del foco de erupción, según su tamaño y la altura durante la cual inician su descenso. Comprenden: bombas, bloques de escorias, piedra pómez, lapilli, arenas, cenizas y polvo.

Tefra:

Roca basáltica oscura perteneciente a los basaltos alcalinos; está compuesta por los siguientes minerales: piroxeno, plagioclasa y nefelina.

Tepetate (Cliche):

Término regional usado en México para designar a la ceniza volcánica sedimentada o al material sólido más fino arrojado por los volcanes; lo componen magma desmenuzado y material rocoso pulverizado, ya sedimentado.

EL ALFABETO GRIEGO

Alfa	A	α
Beta	B	β
Gamma	Γ	γ
Delta	Δ	δ
Epsilon	E	ϵ
Zeta	Z	ζ
Eta	H	η
Theta	θ	θ
Iota	I	ι
Kappa	K	κ
Lambda	Λ	λ
Mu	M	μ
Nu	N	ν
Xi	Ξ	ξ
Omicron	θ	\omicron
Pi	Π	π
Rho	P	ρ
Sigma	Σ	σ
Tau	T	τ
Ipsilon	Υ	υ
Phi	Φ	ϕ, φ
Chi	X	χ
Psi	Ψ	ψ
Omega	Ω	ω

BIBLIOGRAFÍA:

- Aitken, M.J.
1961, **PHYSICS AND ARCHAEOLOGY**, Interscience Publishers Inc., New York.
- Atkinson, R.C.J.
1952, "METODES ELECTRIQUES DE PROSPECTION EN ARCHEOLOGIE"
La Découverte du Passé, Picard, Paris.
- Annan, A.P.
1996. "GROUND PENETRATING RADAR, WORKSHOPS NOTES", Sensor and Software.
- Annan, A.P., Davis, J.L., Gendzwill, D.
1988. "RADAR SOUNDING IN POTASH SASKATCHEWAN, CANADA", **Geophysics**, vol. 53, No. 12.
- Barba, Luis.
1990, **RADIOGRAFIA DE UN SITIO ARQUEOLÓGICO**, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Primera Edición, México.
- Barrientos, Q., Tomás José
1997. **DESARROLLO EVOLUTIVO DEL SISTEMA DE CANALES HIDRAULICOS EN KAMINALJUYU**, Tesis Universidad del Valle de Guatemala, Facultad de CCSS, Depto. de Arqueología.
- Benson, A. K.
1995, "APPLICATIONS OF GROUND PENETRATING RADAR IN ASSESSING SOME GEOLOGICAL HAZARDS: EXAMPLES OF GROUNDWATER CONTAMINATION, FAULTS, CAVITIES", **Journal of Applied Geophysics**, vol. 33.
- Brewster, M.L., and Annan, A.P.
1994. "GROUND-PENETRATING RADAR MONITORING OF A CONTROLLED DNAPL RELEASE; 200 MHZ RADAR", **Geophysics** vol. 59, No. 8.
- Butler, D.K., Simms, J.E., and Cook, D.S.
1994. "ARCHEOLOGICAL GEOPHYSICS INVESTIGATIONS OF THE WRIGHT BROTHERS 1910 HANGAR SITE". **Geoarchaeology, An. International Journal**, vol. 9, No. 6.
- Cai, J., McMechan, G. A.
1995, **RAY-BASED SYNTETIC OF BIESTATIC GROUND-PENETRATING RADAR PROFILES**", **Geophysics**, vol. 60, No. 1.

Cantos, F.J.

1973, **TRATADO DE GEOFÍSICA APLICADA**, LITOPRINT, México.

Chinchilla, M. Oswaldo

1999. **INVESTIGACIONES POR MEDIO DE RADAR DE PENETRACION AL SUELO (GPR) EN LA ZONA NUCLEAR DE COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**, XIII Simposio de Arqueología de Guatemala, Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

Conyers, Lawrence B.

1995, "THE USE OF GROUND-PENETRATING RADAR TO MAP THE BURIED STRUCTURES AND LANDSCAPE OF THE CEREN SITE, EL SALVADOR", **Geoarchaeology: An International Journal**, vol. 10, No. 4.

Cummings, B.

1933, "CUICUILCO AND THE ARCHAIC CULTURE OF MÉXICO", **University of Arizona Bulletin, Social Science Bulletin**, vol. IV, No. 8., E.U.A.

Davis, J.L., and Annan, A.P.

1989. "GROUND-PENETRATING RADAR FOR HIGH-RESOLUTION MAPPING OF SOIL AND ROCK STRATIGRAPHY", **Geophysical prospecting**, vol. 37.

Diccionarios Rioduero.

1974, **GEOLOGIA Y MINERALOGIA**, Editorial Católica, S.A., Madrid, España.

Doolite, J. A. and Asmussen, L. E.

1992, **TEN YEARS OF APLICATIONS OF GROUND PENETRATING RADAR BY THE UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE**, Rovaniemi, Finland, Geol. Surv.

Dobrin, Milton B.

1976. **INTRODUCTION TO GEOPHYSICAL PROSPECTING**, McGRAW-HILL, Book Company, Third Edition, E.U.A.

Fisher, E., McMechan, G.A., Annan, P., Cosway, S.W.

1992. **EXAMPLES OF REVERSE-TIME MIGRATION OF SINGLE-CHANNEL, GROUND PENETRATING RADAR PROFILES**, vol. 57, No. 4.

Fisher, E., McMechan, G.A., Annan, A.P.

1992. "ACQUISITION AND PROCESSING OF WIDE-APERTURE GROUND-PENETRATING RADAR DATA", **Geophysics**, vol. 57.

Goodman, D.

1994, "GROUND-PENETRATING RADAR SIMULATION IN ENGINEERING AND ARCHAEOLOGY", **Geophysics**, vol. 59, No. 2.

Goodman, D., Nishimura, Y. and J.D. Rogers,

1995, "GPR TIME SLICES IN ARCHAEOLOGICAL PROSPECTION", **Archaeological Prospection**, vol 2.

- Griffiths, D.H. y R.F. King.
1972, **GEOFISICA APLICADA PARA INGENIEROS Y GEOLOGOS**, Editorial Paraninfo, Madrid, España.
- Halliday, David., Resnick, Robert.
1982, **FISICA, PARTE 2**, Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V., México.
- Hart, W.J.E., and Steen-McIntyre, V.
1983, "TIERRA BLANCA JOVEN TEPHRA FROM THE AD 260 ERUPTION OF ILOPANGO CALDERA", **Archaeology and Volcanism in Central América**, University of Texas Press.
- Holden, Constance.
1987, "A QUEST FOR ANCIENT EGYPTIAN AIR", **News & Comment, Science**, vol. 236.
- Ibañez Garduño., Dolores.
1998, **PROSPECCIÓN EN ZONAS DE FALLA Y SITIOS ARQUEOLÓGICOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE RADAR DE PENETRACIÓN SOMERA**, Tesis Maestría, Instituto De Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Kenyon, J.L.
1977, "GROUND-PENETRATING RADAR AND ITS APPLICATION TO A HISTORICAL ARCHAEOLOGICAL SITE", **Historical Archaeology** 11.
- Kievit, K.A.
1994, "JEWEL OF CEREN: FORM AND FUNCTION COMPARISONS FOR THE EARTHEN STRUCTURES OF JOYA DE CEREN, EI SALVADOR", **Ancient Mesoamerica** 5.
- Linares, Eliceo; Barba, L; Mejía, E y Pérez, G.
1992. "PROSPECCION GEOFISICA Y QUIMICA EN LA LADRILLERA, CUICUILCO, MÉXICO". **Antropología y Técnica**. Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM. No. 5, México.
- Lerici, C.M.
s.f., "A GREAT ADVENTURE OF ITALIAN ARCHAEOLOGY", **1955/1965 Ten Years of Archaeological Prospecting**, Fondazione Lerici, Roma.
- Loker, W.A.
1983, "RECENT GEOPHYSICAL EXPLORATIONS AT CEREN", **Archaeology and volcanism in Central América**, University of Texas Press.
- Lorenzo, H., C.
1994, **PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DE ALTA RESOLUCIÓN MEDIANTE GEO-RADAR APLICACIÓN A OBRAS CIVILES**, Tesis Doctoral, Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica 1, Universidad Complutense de Madrid, España.

Lorenzo, H. C., Hernández, M. C.

1996, "LA ALAMBRA Y NUMANCIA: DOS EJEMPLOS DE UTILIZACION DEL GEO-RADAR EN ESPAÑA", **Actes du college de périgueux, Suplement a la Revue d' Archéometrie.**

Luhr, J. F., y Carmichael, I.S.E.

1990. "GEOLOGY OF VOLCAN DE COLIMA", **Boletín 107**, UNAM, Instituto de Geología.

May, B.T., Hron, F.

1978, "SINTETIC SEISMIC SECTIONS OF TYPICAL PETROLEUM TRAPS", **Geophysics** vol. 43, No. 6.

Miller, C.D.

1993, "SUMMARY OF 1993 GEOLOGICAL INVESTIGATIONS AT JOYA DE CEREN", **Ceren Project 1993 Preliminary Report**, Department of Anthropology, University of Colorado.

Monastersky, Richard.

1987, "HEIRS TO ANCIENT AIR", **Science News**, vol. 132, No. 11.

Nathan, I. J., Bastos, P.A.

1992, **ELECTROMAGNETICS AND CALCULATION OF FIELDS**, Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois, USA.

Pastrana, A.

1996. **ESTRATIGRAFIA DE LA RAMPA ESTE: CORTE Y POZO.**

Pérez, C.M., Pastrana, C.A., Gómez, R.H.

1995, **INVESTIGACION Y CONSERVACION DE CUICUILCO, DICPA-INAH .**

Rodríguez, E.S.R.

1990. **GEOLOGIA DEL VOLCAN DE COLIMA, ESTADOS DE JALISCO Y COLIMA**, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la UNAM.

Sauck, W.A., Desmond, L.G., Callaghan, J.M., Muehlhausen, J., Zschomler, K.

1984, "A RECONNAISSANCE GPR INVESTIGATION AL CHICHEN ITZA, YUCATAN, MÉXICO", **Environmental and Geophysical Society.**

Sauck, W.A., Desmond, L.G.

1997, **APPLYING GROUND PENETRATING RADAR TO ARCHAEOLOGY**, A short course for Archaeologists, Geophysicists and other Scientists.

Sensor and Software Inc.

1993. **PULSE EKKO, BASIC PLOTING & EDITING SOFTWARE USER'S GUIDE**, Technical Manual, Versión 4.0, Mississauga, Ontario, Canadá.

- Sheets, P.D.
1992, THE CEREN SITE: A PREHISTORIC VILLAGE BURIED BY VOLCANIC ASH IN CENTRAL AMÉRICA, Fort Worth: Harcourt Brace Jovanovich.
- Smith, Peter, J.
1975, TEMAS DE GEOFISICA, Editorial Reverté, S.A., España.
- Smith, S.G.
1977, "A REFLECTION PROFILE MODELLING SYSTEM", *Geophysics*, vol. 49.
- Spiegler, J.E.
1984. GLOSARIO DE TÉRMINOS USADOS EN EL ESTUDIO DE LA CIENCIA DEL SUELO. MAGA, Guatemala.
- Stanislav, M.
1984. INTRODUCTION TO APPLIED GEOPHYSICS,, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Bonston, Lancaster.
- Stevens, K.M., Lodha, A.L., and Soonawala, N.M.
1995, "THE APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR FOR MAPPING FRACTURES IN PLUTONIC ROCKS WITHIN THE WHITESHELL RESEACH AREA, PINAWA, MANITOBA, CANADA", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33.
- Telford, W.M., Sheriff, R.E., Geldart, L.P. and Keys, D.A.
1994, APPLIED GEOPHYSICS, Cambridge University Press., Capítulo 4.
- Thomas, D.H.
1979, ARCHAEOLOGY, N. Y. Holt, Rinehart and Winston.
- Tillard, S., Jean-Claude Dubois.
1994. "ANALYSIS OF GPR DATA: WAVE PROPAGATION VELOCITY DETERMINATION", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33.
- Tite, M.S. y C. Mullins,
1971, "ENHANCEMENT OF THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SOILS IN ARCHAEOLOGICAL SITES", *ARCHAEOOMETRY* 13.
- Ulriksen, C.P.
1982, APPLICATION OF IMPULSE RADAR TO CIVIL ENGINEERING; Ph. D. Thesis, Department of engineering Geology, Lund University of Technology.
- Vaughan, C.J.
1985. "GROUND PENETRATING RADAR SURVEYS USED IN ARCHAEOLOGICAL INVESTIGATIONS", *Geophysics*, vol 51, No. 3.
- Wilson, J.A.
1942. "ARCHAEOLOGY AS A TOOL IN HUMANISTIC AND SOCIAL STUDIES". *Journal of Near Eastern Studies*.

Zier, C.J.

1983, "THE CEREN SITE: A CLASSIC PERIOD MAYA RESIDENCE AND
AGRICULTURAL FIELD IN THE ZAPOTITAN VALLEY OF EL SALVADOR",
Archaeology and Volcanism in Central América, University of Texas Press.