

03076
1
2y.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONAL Y DE
POSGRADO DEL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
POSGRADO EN GEOFÍSICA

PROSPECCIÓN EN ZONAS DE FALLA
Y SITIOS ARQUEOLÓGICOS
MEDIANTE LA TÉCNICA DE RADAR
DE PENETRACIÓN SOMERA

T E S I S

PARA OPTAR AL GRADO DE MAESTRA EN EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

P R E S E N T A

DOLORES IBÁÑEZ GARDUÑO

Ciudad Universitaria

26/665 Junio, 1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	No. de Página
Resumen	3
1.- Introducción	5
1.1.- Generalidades del método de Georadar	5
1.2.- Trabajos previos	8
1.3.- Objetivos	9
2.- Principios Teóricos	10
2.1.- Propagación de la señal del radar	10
2.2.- Solución de la ecuación de onda	13
2.3.- Profundidad de penetración	15
2.4.- Reflexión y transmisión de la señal electromagnética	16
3.- Efectos de terreno y procesamiento de los datos	19
3.1.- Efectos que sufre la señal en el subsuelo	19
3.1.1.- Difracción	19
3.1.2.- Dufusión	20
3.1.3.- Múltiples	21
3.2.- Técnicas de procesamiento	21
3.2.1.- Corrección de deriva del tiempo cero o primer arribo	22
3.2.2.- Filtros temporales	24
3.2.3.- Migración	27
3.3.- Modelado a base del sistema de trazado de rayos	28
4.- Operación de Campo	31
4.1.- Descripción de los componentes del equipo de radar	31

4.1.1.- Resolución del equipo de radar	33
4.2.- Método de reflexión	34
4.2.1.- Parámetros que intervienen en la técnica de reflexión	35
4.3.- Método de sondeo de velocidades	37
5.- Aplicaciones	40
5.1.- Zona arqueológica de La Campana, Colima	40
5.1.1.- Antecedentes	43
5.1.2.- Trabajo de campo y procesamiento de datos	44
5.1.3.- Interpretación de resultados	44
5.1.4.- Conclusiones	47
5.2.- Zona arqueológica de Cuicuilco, Cd. de México	49
5.2.1.- Antecedentes	49
5.2.2.- Trabajo de campo y procesamiento de datos	53
5.2.3.- Interpretación de resultados	54
5.2.3.1.- Sondeos realizados al oriente de la pirámide	54
5.2.3.2.- Sondeos realizados al sur-oriente de la pirámide	59
5.2.4.- Conclusiones	62
5.3.- Fallas geológicas en la Ciudad de Morelia, Michoacán	63
5.3.1.- Antecedentes	63
5.3.2.- Trabajo de campo y procesamiento de datos	64
5.3.3.- Interpretación de resultados	65
5.3.4.- Conclusiones	69
6.- Conclusiones y Recomendaciones	70
7.- Bibliografía	73

RESUMEN

Este trabajo está enfocado a la prospección geofísica usando la técnica de Georadar. La técnica consiste en detectar las reflexiones que sufre un impulso electromagnético transmitido al subsuelo, reflexiones que son generadas en la interface entre dos medios con diferentes propiedades eléctricas, el objetivo es detectar elementos o estructuras de interés. Las lecturas con el equipo de radar se realizan en puntos equidistantes de un perfil sobre la superficie del terreno, obteniendo una sección bidimensional que representa la respuesta del subsuelo frente a la transmisión de la señal electromagnética y en donde es posible analizar las características de la zona en estudio.

En primer lugar se analizan las bases teóricas de la técnica, fundamentadas en las ecuaciones de Maxwell, las cuales describen el comportamiento de las ondas electromagnéticas y las propiedades eléctricas que intervienen durante su propagación en el subsuelo y que da origen a los diferentes efectos registrados en la superficie del terreno.

Previo a su interpretación los datos del radar requieren técnicas de procesamiento. En el capítulo 3 se analizan las técnicas de filtrado temporal, migración y modelado bidimensional, procesos que fueron aplicados a los datos obtenidos para este trabajo. El proceso de filtrado se aplicó con la finalidad de eliminar señales consideradas como ruido, para conservar en las secciones las reflexiones que proporcionaban información útil de las características del subsuelo. La migración es un proceso que se utilizó para eliminar efectos de difracción, originadas en cavidades y reflectores con pendientes pronunciadas. Finalmente se realizaron dos procesos de modelado bidimensional en base al trazado de rayos, lo cual fue útil para justificar la interpretación efectuada de las secciones resultantes.

En el capítulo 4 se describen los componentes que integran el equipo de radar empleado para este trabajo, así como los diferentes parámetros que intervienen en la operación del trabajo de campo. Uno de los parámetros principales que interviene es la frecuencia de operación de la señal electromagnética, la cual varía en un rango de 10 MHz. a 1 GHz. La frecuencia de operación influye en la profundidad de penetración de la señal transmitida al subsuelo, en general a mayor frecuencia empleada, la profundidad de penetración es menor y viceversa. Para conocer la operación del trabajo de campo, se describen las técnicas de reflexión de desplazamiento fijo y el método de sondeo de velocidades; la primera de ellas es aplicada para obtener un perfil bidimensional, en donde se registran las características del subsuelo; la segunda tiene como objetivo realizar un análisis de velocidades de la señal electromagnética en la zona de estudio, lo que permite efectuar estimaciones de profundidad de los reflectores registrados en las secciones.

En el último capítulo se presentan los resultados de tres aplicaciones realizadas con la técnica. La primera se realizó en La Campana, Colima, zona arqueológica afectada por material sedimentario. La segunda en Cuiculco, Cd. de México, zona arqueológica afectada por derrames basálticos provenientes del volcán Xitli. En ambos casos el objetivo fue de determinar la respuesta de elementos de interés arqueológico, es decir estructuras hechas por el hombre. La tercera aplicación tuvo como finalidad determinar la continuidad de eventos geológicos, a diferencia de las dos primeras aplicaciones, en este caso se enfocó al análisis de eventos naturales. Los resultados de esta última aplicación presentan anomalías que son interpretadas como la respuesta de planos de falla, discontinuidad de reflectores y colapsamiento de bloques, eventos típicos de fallas geológicas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1.- GENERALIDADES DEL MÉTODO DE GEORADAR.

El término **GEO-RADAR** es empleado a una técnica no destructiva de prospección geofísica, basada en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración, dirigidos hacia el subsuelo con el propósito de detectar estructuras y características de interés. 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 esta técnica 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 objetivo a investigar y determinar su posición y la distancia a la que se encuentran (Annan, 1996).

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 diversas técnicas experimentales para detectar las ondas en cuestión. Algunas fuentes de radiación electromagnética 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. (Holliday, et. al., 1982). Los impulsos electromagnéticos aplicados en la técnica de Georadar o Radar Penetración Terrestre (GPR) se encuentran en el intervalo de frecuencia de las ondas de radio (de 10 MHz a 1 GHz) y los principios básicos del método se fundamentan en las ecuaciones de Maxwell, que describen el comportamiento de dichas ondas en diferentes materiales.

El equipo de radar utilizado en esta técnica es un sistema biestático, 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 superficie. Los impulsos detectados se presentan en perfiles bidimensionales conocidos como radargramas, los cuales presentan las características del subsuelo debajo 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 tiempos dobles de viaje de la señal electromagnética a través del subsuelo (Annan, 1996).

La técnica de Georadar no es destructiva para el medio ambiente en donde se desarrolla el trabajo, presentando una gran rapidez de operación, además de que el personal necesario para el trabajo de campo es mínimo y los costos en los trabajos de operación son bajos con respecto a otras técnicas. Otra característica es que las profundidades de penetración que puede alcanzar la señal varían desde algunos centímetros hasta decenas de metros (100 m aproximadamente). Una limitación importante se presenta cuando el medio de propagación de la señal posee alta conductividad eléctrica, en particular cuando tiene alto contenido de humedad, especialmente donde existen materiales arcillosos ya que se produce una rápida atenuación en la señal (Annan, 1996).

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 de la señal será menor y viceversa (Stevens, et. al., 1995).

Por otro lado, la longitud de la 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 la técnica (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 sí es indispensable tomarlos en cuenta y saber identificar sus efectos en los registros para no confundirlos con las señales útiles (Annan, 1996).

1.2.- TRABAJOS PREVIOS.

La técnica de georadar tiene aplicaciones en diversos campos, considerándose una técnica poderosa dentro de la prospección geofísica y como complemento en otras áreas. Esta técnica inicia su aplicación en los años 70 con el fin de determinar espesores de hielo y glaciares, obteniendo resultados satisfactorios (Robin, et. al., 1969; Annan, et. al., 1976), a partir de entonces se han efectuado trabajos con éxito en diversas áreas de exploración.

En las obras de Ingeniería Civil (Ulriksen, 1982 y Lorenzo, 1994) los objetivos principales son: 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 como dilución en rocas de tipo cárstico. En esta área el método de georadar es una herramienta útil para evaluar el terreno sobre el cual se realizarán obras civiles. Así como para revelar las causas que originan daños en algunas obras. También se utiliza en estudios de menor escala, para localizar tuberías, gasoductos e incluso cables subterráneos (luz, teléfono).

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

La arqueología es otra área en donde se tiene una aplicación de gran valor para la 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 largos periodos de tiempo y altos costos. En este caso la profundidad

de prospección es somera y la técnica de radar permite el empleo de altas frecuencias, obteniendo una buena resolución de los elementos a investigar con relación a otras técnicas arqueológicas. Para efectuar trabajos de reconocimiento y preexcavación en sitios arqueológicos la técnica permite cubrir grandes áreas de estudio, limitando zonas de excavación en donde se detecten anomalías de interés, lo que implica reducción de tiempo y costo en los trabajos de excavación (Annan, 1996).

1.3.- OBJETIVOS.

Dentro de los objetivos de este trabajos se considera importante analizar las bases teóricas en las que se sustenta el método de georadar, así como el comportamiento de la señal en el subsuelo y los diversos factores que controlan este comportamiento para poder entender la respuesta que proporciona la aplicación del método.

Para mostrar los alcances que puede tener esta técnica y la resolución que proporciona, el método se aplica en dos sitios considerados como zonas arqueológicas; La Campana, Colima y Cuicuilco, Cd. de México, en los que existen vestigios arqueológicos que se encuentran ocultos por sedimentos y en el caso de Cuicuilco por derrames de lava. El objetivo de estas aplicaciones es detectar anomalías que representen estructuras como construcciones o monumentos determinando localizaciones y delimitando las zonas donde estas sean detectadas, ya que se tienen planeado efectuar excavaciones en corto plazo, principalmente en La Campana, de manera que esto facilite los trabajos de excavación.

Otra aplicación fue realizada con fines geológicos en la Ciudad de Morelia, Michoacán, en donde se han detectado fallas geológicas dentro de la zona urbana. El objetivo consistió en detectar la continuidad de estos eventos en los primeros 10 m. de profundidad en las zonas donde se tienen evidencias de estas fallas en superficie, para que estos resultados complementen los estudios geológicos ya realizados, mejorando las medidas de seguridad en las zonas de alto riesgo.

CAPÍTULO 2

PRINCIPIOS TEÓRICOS

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, describiéndose mediante la solución de la ecuación de onda en términos de campo eléctrico de Maxwell, por lo cual en este capítulo se describen las ecuaciones que rigen la propagación de dichas ondas.

2.1.- PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL DEL RADAR.

En la técnica de radar se produce un pulso corto (rango de ns.) 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). Considerando un medio lineal homogéneo e isotrópico, las ecuaciones constitutivas de Maxwell se representan de la siguiente manera:

$$\vec{B} = \mu\vec{H}$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E}$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E}$$

En donde:

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

\vec{D} = Densidad de Flujo o Inducción Eléctrica (C/m²)

\vec{H} = Intensidad de Campo Magnético (Wb/m)

\vec{B} = Densidad de Flujo Magnético o Inducción Magnética (Wb/m³)

σ = Conductividad Eléctrica (Siemens)

μ = Permeabilidad Magnética (Henry/m)

$\mu = \mu_r \mu_0$

μ_r = Permeabilidad relativa

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m = permeabilidad del vacío

ϵ = Constante Dieléctrica o Permitividad Eléctrica (Faraday/m)

$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

ϵ_r = permitividad relativa o constante dieléctrica del material

$\epsilon_0 = 8.84 \times 10^{-12}$ = F/m permitividad en el vacío.

Para analizar el desplazamiento de la energía electromagnética radiada mediante el radar es necesario considerar la ecuación de onda, armónica en el tiempo en términos del campo eléctrico (Greaves, et. al. 1996).

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

La cual es derivada de las ecuaciones de Maxwell, para un medio homogéneo e isotrópico ($\nabla \mu = 0$). Para resolverla es conveniente usar notación compleja:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{j\omega t} \quad (2.2)$$

en donde

$$j = \sqrt{-1}$$

$\omega = 2\pi f$ frecuencia angular (rad/s)

f = frecuencia de campo (Hz)

t = tiempo (s)

Introduciendo un ángulo de fase ϕ , el argumento de la exponencial de la ecuación 2.2 será (Nathan, et. al., 1992):

$$j(\omega t + \phi) \quad (2.3)$$

por lo que

$$e^{j(\omega t + \phi)} = e^{j\omega t} \cdot e^{j\phi} \quad (2.4)$$

entonces, la ecuación 2.2, se representa como:

$$\bar{E} = \bar{E}_0 e^{j\phi} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.5)$$

Aplicando la segunda derivada con respecto al tiempo y sustituyendo en 2.1, se obtiene la ecuación de onda en función del campo sinusoidal (Nathan, et. al., 1992).

$$\nabla^2 \bar{E} + \omega^2 \epsilon \bar{E} + j\omega \mu \sigma \bar{E} = 0 \quad (2.6)$$

En donde los parámetros eléctricos (μ , σ y ϵ) se consideran constantes. En esta ecuación el segundo término, representa a las corrientes de desplazamiento; mientras que el tercer término corresponde a las corrientes de conducción (Sauck, et. al. 1997). En medios de alta conductividad, las corrientes de desplazamiento son insignificantes comparadas con las corrientes de conducción y la ecuación anterior se reduce a una ecuación de difusión. En materiales con baja conductividad las corrientes de desplazamiento dominan sobre las corrientes de conducción (Greaves, et. al., 1996).

Si se considera que:

$$\gamma^2 = (j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon) \quad (2.7)$$

En donde, γ se conoce como el parámetro de propagación ó número de onda. La parte real $\beta = \omega^2\mu\epsilon$ (rad/m) se denomina factor de fase y la parte imaginaria $\alpha = j\omega\mu\sigma$ (db/m) es la constante de atenuación. El número de onda (γ) en términos del factor de fase y la constante de atenuación (α), es (Stevens, et. al. 1995).

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.8)$$

La constante de atenuación, α y el factor de cambio de cambio de fase β , están dadas por:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (2.9)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (2.10)$$

2.2.- SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ONDA.

Considerando una onda plana uniforme, característica de la forma de onda del radar, en donde las intensidades de campo eléctrico y magnético son constantes en magnitud y fase y con direcciones perpendiculares a la propagación (Stevens, et. al. 1995); la solución de la ecuación de onda (ecuación 2.6) es:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.11)$$

En donde $e^{\alpha z}$, es el término de atenuación y $e^{j(\omega t - \beta z)}$ es la propagación del movimiento armónico en la dirección de z (Ulriksen, 1982), con una velocidad de fase:

$$\frac{dz}{dt} = v = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.12)$$

En el espacio libre $\mu = \mu_0$ y $\epsilon = \epsilon_0$, por lo que la velocidad de fase (rapidez de propagación de las ondas electromagnéticas) es igual a la rapidez de la luz ($c = 0.3$ m/ns). En el caso del subsuelo, la velocidad de propagación es menor a c , ya que siempre $\epsilon_r \geq 1$; mientras que $\mu_r < 1$, (Greaves, et. al., 1996). La longitud de onda λ (m) la cual representa la distancia de viaje de la onda en un ciclo es:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2.13)$$

Sustituyendo la ecuación 2.10 en 2.12 y 2.13 da como resultado

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad (2.14)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad (2.15)$$

Considerando que $\sigma = 0$, $\epsilon_r = 1$ y $\mu_r = 1$ y sustituyendo estos valores en la ecuación 2.14, se tiene la relación entre c , ϵ_0 y μ_0 , en el vacío (Lorenzo, 1994).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.16)$$

Cuando $\sigma \ll \omega\epsilon$, las expresiones de β , v y λ , en las ecuaciones 2.10, 2.14 y 2.15 y haciendo uso de la ecuación 2.16, se tiene

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (2.17)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.18)$$

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.19)$$

De la ecuación 2.11, el término de atenuación ($e^{-\alpha z}$) define que la profundidad de penetración (δ) o distancia a la cual la amplitud del pulso electromagnético se atenúa mediante un factor de $1/e$, decreciendo exponencialmente de su amplitud original conforme aumenta en profundidad (Stevens, et. al., 1995).

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (2.20)$$

2.3.- PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN.

Cuando la frecuencia de operación es muy alta, $\sigma^2/\omega^2\epsilon^2 \ll 1$ (ec. 2.6) la energía del radar se propaga con una velocidad independiente de la frecuencia (Stevens, et. al., 1995).

$$\delta = \frac{2}{\sigma} \left(\frac{\epsilon}{\mu} \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

Esta ecuación es aplicable en medios con muy baja conductividad. Tomando en cuenta la frecuencia, se tiene que a mayores frecuencias la profundidad de penetración decrece y viceversa, por lo que (Nathan, et. al., 1992)

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} \quad (2.22)$$

2.4.- 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). La reflexión requiere de un contraste en una o más de las tres propiedades electromagnéticas del medio a través de una interfase (σ , ϵ_r , μ_r). Los coeficientes de reflexión (R) y transmisión (T) se definen por:

$$R = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (2.23)$$

$$T = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (2.24)$$

En donde $-1 < R < +1$; η (1/ohm) es la impedancia eléctrica (intrínseca) del medio 1 y 2, la cual es la relación entre el campo eléctrico (\vec{E}) y el campo magnético (\vec{H}):

$$\eta = \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \quad (2.25)$$

La impedancia eléctrica es una cantidad compleja (Goodman, 1994) expresada por:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.26)$$

El coeficiente de reflexión (R) en términos de la constante dieléctrica, se expresa mediante la relación (Davis, et. al., 1989):

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (2.27)$$

En donde ϵ_1 y ϵ_2 son las constantes dieléctricas de los medios 1 y 2. El coeficiente de transmisión será:

$$T = 1 - R \quad (2.28)$$

Se concluye que 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.

Finalmente en la tabla (2.1) 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 y tipo de minerales y tipo de arcillas presentes en suelo, lo cual explica porqué la velocidad y atenuación de la señal del radar esta en función de estas propiedades (Davis, et. al., 1989).

CAPITULO 3

EFFECTOS DE TERRENO Y PROCESAMIENTO DE DATOS.

Una forma de presentar los resultados de la técnica de radar es mediante perfiles bidimensionales conocidos como radargramas, en donde se representa 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. En este capítulo se da una descripción de los procesos aplicados a los datos obtenidos para este trabajo y también se describen los efectos principales que sufre la señal electromagnética en su propagación.

3.1.- EFECTOS QUE SUFRE LA SEÑAL EN EL SUBSUELO.

Como se describió en el capítulo 2, 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 3.1a se presenta el efecto de difracción. Esta sección se realizó (Ibáñez, 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 3.1b). La respuesta de esta tubería es representada por la hipérbola de difracción marcada como A en la figura 3.1a, con su punto máximo en la posición de 10 m. y a una profundidad de 0.8 m.

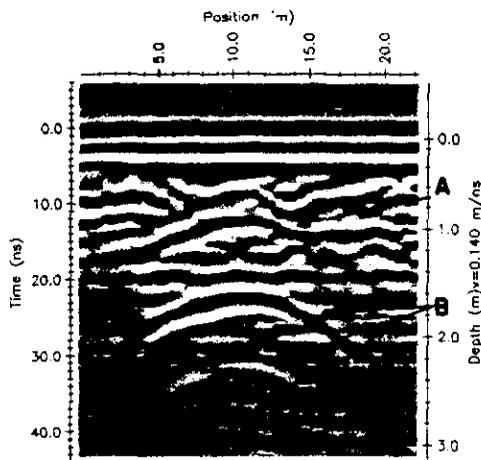


Figura 3.1a.- Ejemplo del efecto de difracción y eventos múltiples.

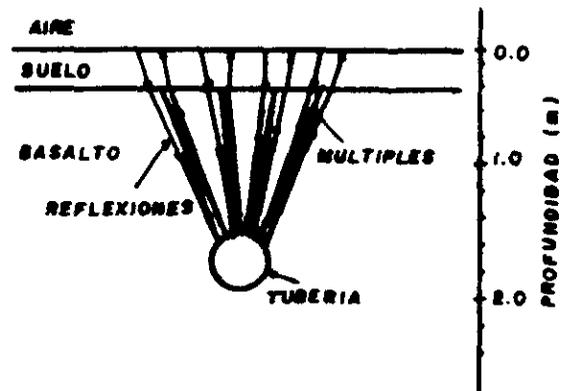


Figura 3.1b.- Elemento a escala que provoca el efecto de difracción.

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 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 3.1a 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 3.1b, entre la capa superficial del terreno y la superficie exterior de la tubería.

3.2.- TECNICAS DE PROCESAMIENTO.

Para realzar o eliminar características como las descritas anteriormente en los datos obtenidos con la técnica de radar, se aplican técnicas de procesado para efectuar una interpretación y evaluación final de los resultados. A continuación se describen los procesos aplicados a los datos obtenidos para este trabajo.

3.2.1.- Corrección de deriva del tiempo cero ó 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 (sección 4.2.1), 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 radar 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 defasamientos en sus primeros pulsos en la escala de tiempo cero. El primer paso del procesado 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). Una manera de encontrar el defasamiento del tiempo entre las señales, es mediante la función de cross-correlación, que proporciona el defasamiento relativo entre dos conjuntos de datos (Telford, et. al., 1974).

Supóngase dos trazas de un radargrama $y_1(t)$, e $y_2(t)$, y_1 e y_2 son sus amplitudes en función del tiempo t , la función de cross-correlación $\Phi(\tau)$, está dada por la relación:

$$\Phi_{y_1 y_2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y_1(t) y_2(t + \tau) dt \quad (3.1)$$

En donde τ es el tiempo de retraso de y_1 con respecto a y_2 . Obteniendo el defasamiento en el tiempo entre ambas funciones (Cantos, 1973).

La sección de la Figura 3.3a es un radargrama que contiene datos originales de campo, en donde se marca como A los puntos en donde se aprecia el defasamiento de los primeros arribos en las trazas. Después de aplicar la corrección de deriva de tiempo cero a los datos, resulta la sección mostrada en la Figura 3.3b, en donde se observa que los primeros quiebres de todas las trazas han sido alineadas al valor de tiempo cero.



Figura 3.3a.- Ejemplo de un radargrama en donde se presentan datos originales.

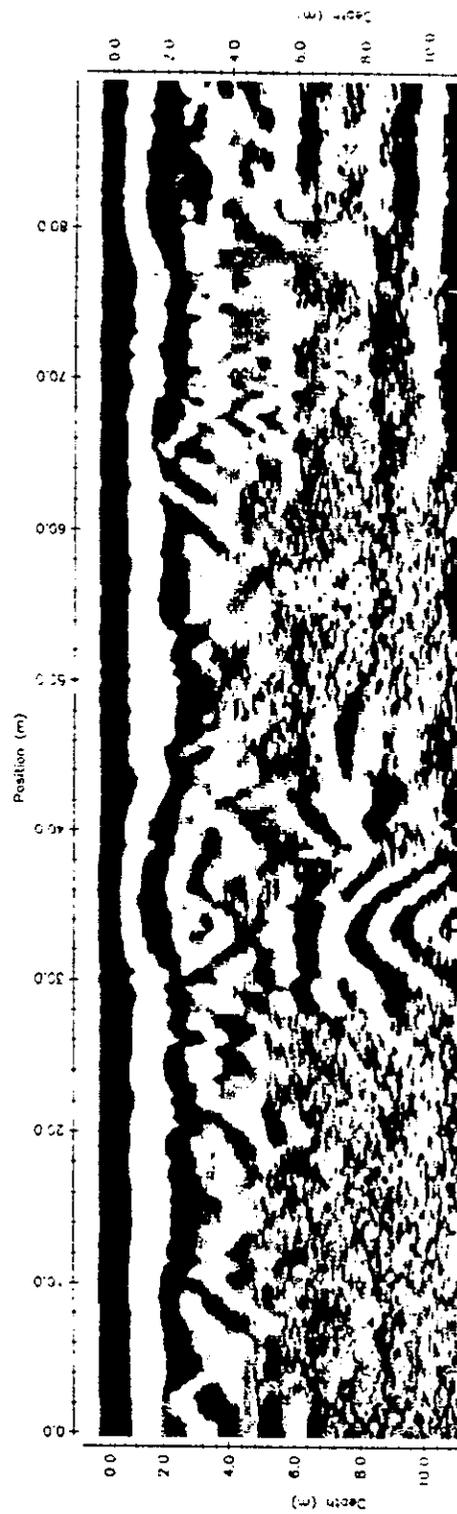


Figura 3.3b.- Corrección de tiempo cero o primer quiebre.

3.2.2.- Filtros temporales.

Los filtros son funciones que realzan o disminuyen características de una función. En el caso particular de este trabajo se aplicaron para seleccionar y eliminar las frecuencias que contenían las señales que generaban ruido en los registros. Los filtros temporales actúan en los datos del radar en la dirección del eje de tiempos (Annan, 1996).

El radar registra la amplitud de la señal como una función del tiempo (t). Este dato se puede considerar como la convolución de efectos invariantes en el tiempo (w), que se refiere a las características de propagación del terreno; efectos variantes en el tiempo ($p(t)$) que corresponden a la ondícula fuente y a la respuesta del sistema; y la reflectividad del terreno (r) (Turner, 1994).

$$t = w * p(t) * r \quad (3.2)$$

Como el efecto del filtrado varía con el tiempo (Turner, 1994), la respuesta de amplitud (A) del filtro de deconvolución en función del tiempo total de viaje, t y la frecuencia ω , considerando además un medio homogéneo, se tiene:

$$A(t, \omega) = e^{\alpha(\omega)v(\omega)t} G(t, \omega) \quad (3.3)$$

en donde $G(t, \omega)$ es un filtro Gaussiano, implementado para truncar el espectro del filtro y optimizar la resolución en el dominio del tiempo; α y v son la atenuación y velocidad del medio respectivamente. En el caso de los filtros recursivos pasa bajas y pasa altas, procesos diseñados para retener las bajas y altas frecuencias respectivamente de las señales del radar, la respuesta de amplitud del filtro está determinada por las relaciones (Annan, 1996):

$$A(\omega) = \frac{\tan\left(\frac{f_N}{2}\right)}{\tan\left(\frac{f_c}{2}\right) + \tan\left(\frac{f_N}{2}\right)} \quad (3.4)$$

$$A(\omega) = 1 - \frac{\tan\left(\frac{f_N}{2}\right)}{\tan\left(\frac{f_c}{2}\right) + \tan\left(\frac{f_N}{2}\right)} \quad (3.5)$$

en donde

f_N = frecuencia de Nyquist;

f_c = frecuencia de corte

La frecuencia de corte representa la frecuencia máxima de las señales que son conservadas en este tipo de proceso y es seleccionada entre el 10% y 90% de la frecuencia de Nyquist (Sensors and Software, 1993). La frecuencia de Nyquist, se define como:

$$f_N = \frac{1}{2 \times \text{intervalo de muestreo}} \quad (3.6)$$

El intervalo de muestreo es un parámetro utilizado en la adquisición de datos de campo que determina el intervalo de tiempo entre los puntos de un registro.

A los datos del radargrama que se presenta en la figura 3.1 se les aplicó un filtrado pasa bajas y pasa altas. Estos datos se adquirieron con antenas de 50 MHz. y un intervalo de muestreo de 1.6 ns. De acuerdo a la ecuación 3.8 la frecuencia de Nyquist (f_N) es de 312 MHz. Para aplicar los filtros pasa bajas y pasa altas, se seleccionó una frecuencia de corte (f_c) del 10% de la frecuencia de Nyquist, para conservar las frecuencias más bajas y más altas en los datos respectivamente y poder apreciar la diferencia entre ambos procesos. El radargrama de la figura 3.3c es el resultado del filtrado pasa bajas, donde se observa que las señales correspondientes a las bajas frecuencias han sido conservadas y eliminadas las de las altas frecuencias. Mientras que en la figura 3.3d es la sección resultante del filtrado pasa altas, en donde se aprecian las señales correspondientes a las altas frecuencias y donde han sido eliminados los eventos contenidos en las bajas frecuencias.



Figura 3.3c.- Sección que muestra los resultados de aplicar un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte de 31.2 MHz.

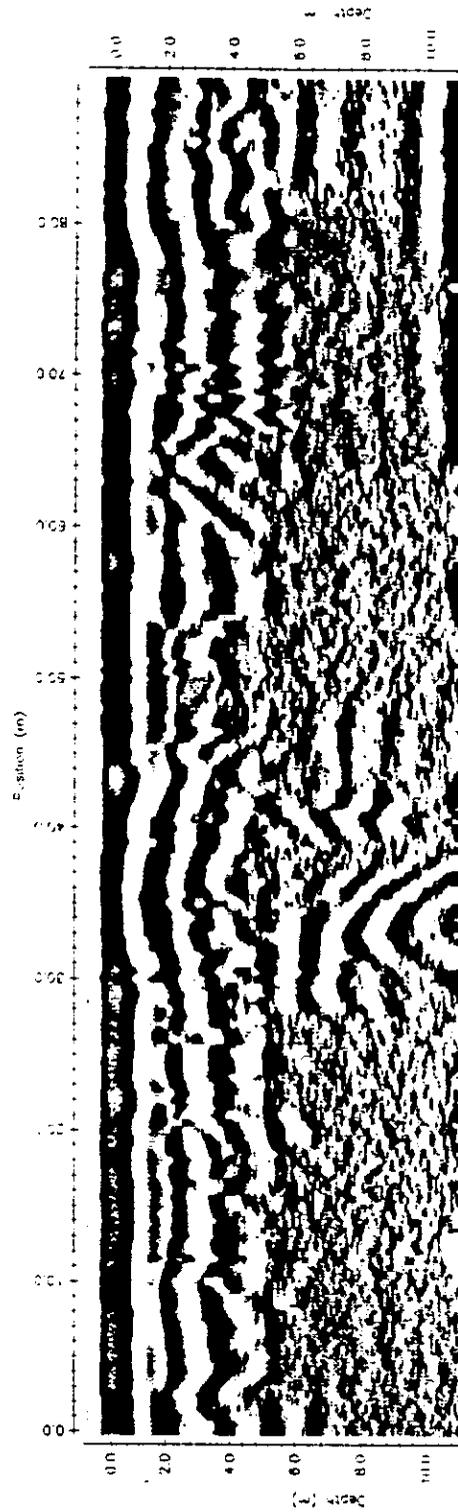


Figura 3.3d.- Sección que muestra los resultados de aplicar un filtro pasa altas con una frecuencia de corte de 31.2 MHz.

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). El programa de migración requiere de resolver la ecuación de onda, que expresa matemáticamente la propagación de la energía en el medio:

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} - \frac{1}{v^2(x,z)} = \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} \quad (3.7)$$

en donde \bar{E} es el campo de ondas vectorial propagado; x , z son las coordenadas horizontal y vertical respectivamente; $v^2(x,z)$ la velocidad de propagación; y t es el tiempo de viaje. El proceso de migración utilizado en este trabajo resuelve la ecuación de onda mediante la transformada de Fourier, usando una aproximación espacial F-K en el dominio de la frecuencia-número de onda, para producir la imagen migrada de una sección del radar. La sección de entrada de tiempo es $P(t,x)$, donde t es el tiempo y x la posición horizontal. Considerando que $P(x,t)$ contiene la difracción de un punto, al aplicar la transformada de Fourier, los datos del radar son transformados a un dominio complejo bidimensional de frecuencia temporal y espacial $P(\omega, k_x)$. Posteriormente efectuando la transformación de los

datos de frecuencia temporal (ω) al un número de onda vertical, mediante la solución F-K de la ecuación 3.7, se obtiene $P(k_z, k_x)$. Finalmente se realiza la transformación inversa de Fourier bidimensional de $P(k_z, k_x)$ al dominio espacial (z, x); donde z es la profundidad y x la posición horizontal. En este proceso la velocidad V de propagación se considera constante, calculando la velocidad promedio del área en estudio (Fisher, et. al., 1992).

3.3.- MODELADO A BASE DEL SISTEMA DE TRAZADO DE RAYOS.

El modelado es un proceso que consiste en comparar los resultados del radar con la respuesta de modelos propuestos del subsuelo. Estos modelos permiten dar una explicación de las observaciones principales, como de 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 en este trabajo, es su aplicación para al simulación e interpretación cuantitativa de los datos de campo.

El proceso utilizado en este trabajo es el modelado a base de rayos, usando un algoritmo que calcula la respuesta de modelos bidimensionales del terreno compuestos de capas, cada una con 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). Los rayos parten de puntos equiespaciados a lo largo de cada reflector y sus caminos de viaje son en línea recta en las diferentes capas y refractados en cada interface de acuerdo con la ley de Snell $\text{sen } i/V_i = \text{sen } r/V_r$, donde, i y r son los ángulos incidente y refractado; V_i y V_r las velocidades de las capas en donde el rayo incide y donde es reflejado. El tiempo total de viaje t , de cada rayo es la integración de tiempos de todos los segmentos de rayos.

$$t = \sum_{j=1}^{ns} \ell_j V_j^{-1} \quad (3.8)$$

donde ℓ_j y V_j son la longitud y la velocidad correspondiente a cada uno de los ns segmentos del rayo, el número de rayos depende de la geometría del estudio. La amplitud total A asociada con cada rayo (una vez reflejada) será:

$$A = \frac{SD_S D_R R}{G_i G_o} \prod_j T_j e^{-\alpha_j \ell_j} \quad (3.9)$$

En donde S es la amplitud efectiva de la fuente; D_S y D_R son los términos de directividad de la fuente y receptor, que indican el patrón de radiación de la fuente al reflector y del reflector al receptor, respectivamente en función del ángulo de propagación; G_i y G_o es la dispersión geométrica en el plano y fuera del plano; T y R son los coeficientes de reflexión y transmisión de la onda; ℓ_j y α_j , son los coeficientes de las longitudes de los segmentos de rayo y atenuación para el j_{esimo} segmento de rayo respectivamente (Cai, et. al., 1995).

Los coeficientes de reflexión R_y y transmisión T_y de la onda del radar, incidentes del medio j al medio i , con números de onda k_j y k_i , con un ángulo incidente θ son:

$$R_y = \frac{\cos\theta - \left[\left(k_j/k_i \right)^2 - \sin^2\theta \right]^{1/2}}{\cos\theta + \left[\left(k_j/k_i \right)^2 - \sin^2\theta \right]^{1/2}} \quad (3.10)$$

$$T_y = 1 - R_y \quad (3.11)$$

El modelado es un proceso iterativo, el procedimiento consiste en construir un modelo del subsuelo, estimando la geometría del medio y asignando valores de velocidad v

y atenuación α de la señal en cada una de las estructuras sugeridas. El procedimiento de cómputo de este algoritmo involucra el cálculo de la respuesta del modelo para ondas incidentes, efectuando un trazado de rayos, cálculo de amplitud, construcción del radargrama y graficado. Una vez obtenidos los resultados de este proceso, se comparan con los datos de campo, en función de esta comparación se efectúan cambios en los parámetros que intervienen en el modelo sugerido, hasta obtener la aproximación buscada. Una limitación importante es que la aproximación a base de rayos solo simula reflexiones y no incluye efectos de difracciones y reflexiones fuera del plano, tampoco las ondas directa y de terreno (Cai, et. al., 1995).

CAPÍTULO 4

OPERACIÓN DE CAMPO

En este capítulo se describen las técnicas de campo que se utilizaron en la adquisición de los datos para este trabajo. También se describe el equipo de radar 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 RADAR

Las aplicaciones de campo desarrolladas para este trabajo fueron realizadas con un sistema biestático Pulse EKKO IV. El equipo es mostrado en la Figura 4.1 y sus elementos se comunican entre si por cables de fibra óptica. Todo el sistema es alimentado por una batería de 12 V. Estos componentes se describen a continuación.

* **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.

* **Antenas.** El equipo consta de una antena transmisora y una receptora y están diseñadas para radiar la mitad de la longitud de onda (λ) de la señal transmitida, en un cono tridimensional de 45° aproximadamente. La longitud de las antenas también es un medio de la longitud de onda de la señal transmitida de acuerdo a los objetivos del estudio.

* **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 4.1. El transmisor electrónico, tiene la función de emitir un pulso de alto voltaje de corta duración

en el rango de ns. hacia la antena transmisora. Mientras que el receptor electrónico se encarga de recibir la señal reflejada como una función de tiempo.

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

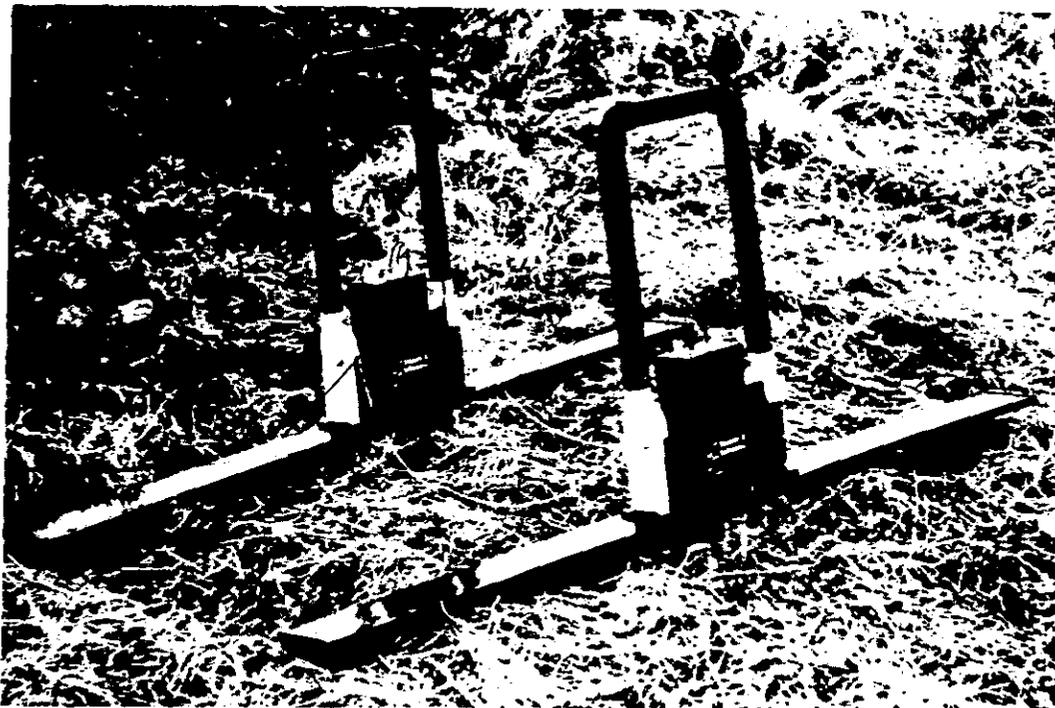


Figura 4.1.- Elementos que integran el equipo de radar

4.1.1.- Resolución del equipo de radar

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 2.22 ($\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$) establece que mientras mayor es la profundidad (δ) del objetivo a investigar, la frecuencia (f) utilizada debe ser menor y viceversa. La tabla 4.1 contiene la frecuencia central recomendada para algunas profundidades, estos valores son 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

Tabla 4.1.- Frecuencia aplicada para algunas profundidades (Annan, 1996).

Las frecuencias usadas en la técnica de radar están en un rango de 10 a 1000 MHz, correspondientes a longitudes de onda ($\lambda = v/f$) de 30 a 0.3 m. 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).

$$\Delta r \approx \frac{d_{max}}{100} \quad (4.1)$$

En donde d_{max} es la profundidad máxima de penetración para la frecuencia utilizada. De acuerdo a la ecuación 4.1, la resolución de los objetivos a investigar será alta

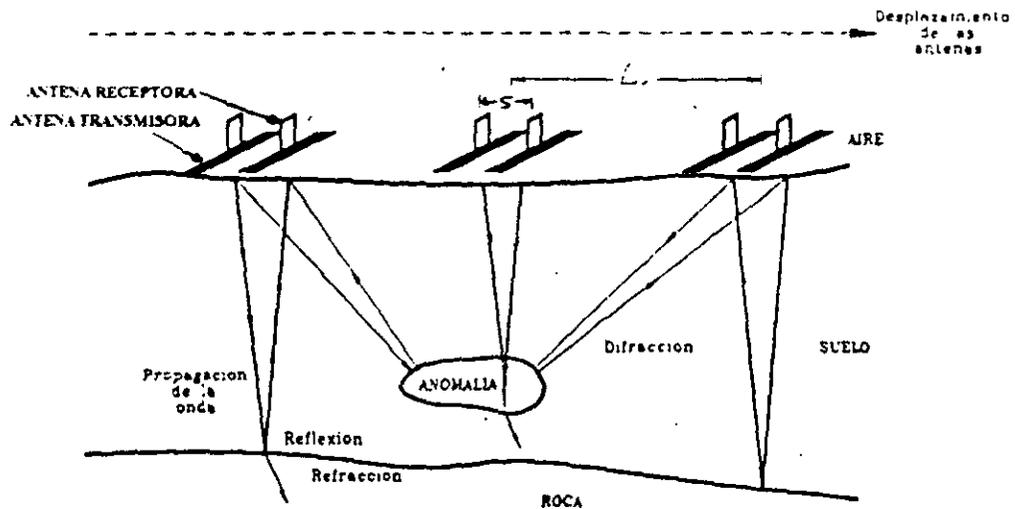
para profundidades someras y viceversa. La tabla 4.2 da la resolución para algunas profundidades de penetración (Annan, 1996).

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

Tabla 4.2.- Resolución obtenida para profundidades de penetración (Annan, 1996).

4.2. - MÉTODO DE REFLEXIÓN.

El método de reflexión de desplazamiento fijo es la técnica más común de operación para un trabajo de exploración con radar. En este método 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 4.2. 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). Los radargramas obtenidos para este trabajo se presentan 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.



S = SEPARACIÓN ENTRE ANTENAS

ΔX = DISTANCIA ENTRE PUNTOS DE LECTURA SOBRE EL PERFIL.

Figura 4.2.- Disposición del arreglo en la técnica de Reflexión de desplazamiento fijo.

4.2.1.- 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.

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 la tabla 1 (Annan, 1996).

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).

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:

$$W = 1.3 \frac{2h}{v} \quad (4.2)$$

Intervalo de muestreo temporal. Este valor es el intervalo de tiempo en que se registra cada punto de la traza. La tabla 4.3 (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:

$$\tau = \frac{1000}{6f_c} \quad (4.3)$$

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

Tabla 4.3- Intervalo de muestreo, para la frecuencia seleccionada (Annan, 1996).

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

$$\#puntos = \frac{W}{\tau} \quad (4.4)$$

Intervalo de muestreo espacial. Este parámetro corresponde al espaciamiento entre los puntos lectura sobre el perfil en estudio. En la figura 4.2 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:

$$\Delta x = \frac{c}{4f_c\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{75}{f_c\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m}) \quad (4.5)$$

Separación de las antenas. La separación mínima entre 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 4.2 y se determina por la profundidad esperada h (m) la permitividad del medio ϵ , mediante la relación:

$$S = \frac{2h}{\sqrt{\epsilon - 1}} \quad (4.6)$$

4.3.- MÉTODO DE SONDEO DE VELOCIDADES.

La técnica utilizada para calcular la velocidad de la señal electromagnética en el subsuelo se denomina Método de 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 4.3, 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 O en pasos de $x/2$, obteniendo lecturas en cada posición (Annan, 1996).

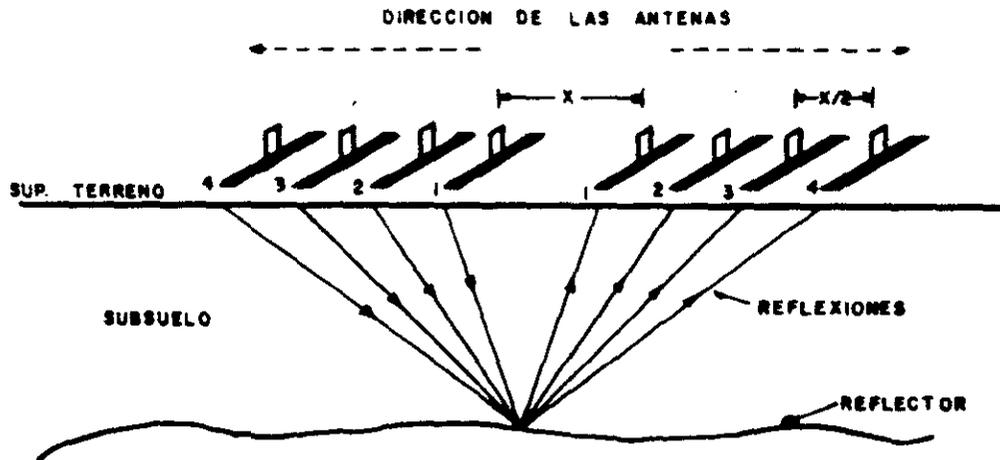


Figura 4.3.- Configuración del arreglo en un Sondeo de Velocidades o técnica de Punto Medio Común.

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 4.2. Después de estos dos eventos se registran las reflexiones generadas en el subsuelo (Anann, 1996). Las trayectorias de viaje de los diferentes eventos se representan en la Figura 4.4a. El radargrama de la figura 4.4b es el resultado de un sondeo de velocidades, marcando los diferentes eventos obtenidos para ser analizados. El sondeo fue realizado en la zona arqueológica de Cuiculco, Cd. de México.

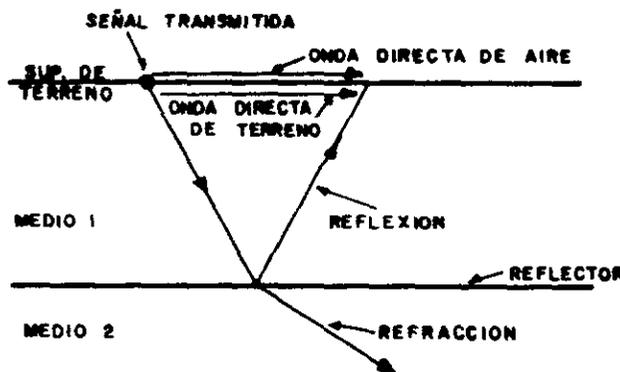


Figura 4.4a.- Trayectorias de viaje de eventos generados en un sondeo de velocidades

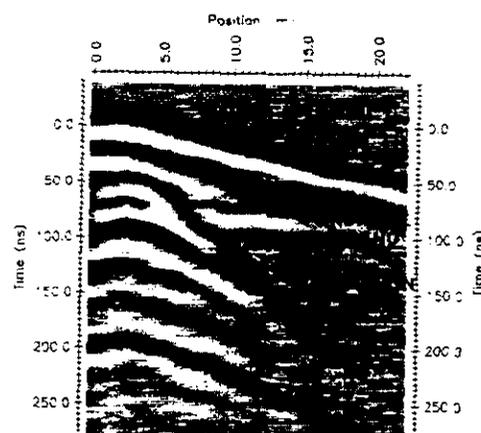


Figura 4.4b- Resultado de un Sondeo de Velocidades.

El análisis de datos obtenidos en un sondeo de velocidades se basa en la suposición que los tiempos 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:

$$t^2 = \frac{x^2}{v^2} + \frac{4h^2}{v^2} \quad (4.7)$$

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:

$$v_m = \sqrt{\frac{l}{m}} \quad (4.8)$$

La profundidad de la capa reflectora está dada por

$$h = \frac{v_m t_0}{2} \quad (4.9)$$

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

CAPITULO 5

APLICACIONES

En este capítulo se presentan los resultados de tres trabajos realizados en los sitios marcados en el mapa de la figura 5.1. La Campana, Colima es un sitio arqueológico cubierto por sedimentos y material de avalancha, proveniente del volcán de Fuego de Colima. La zona arqueológica de Cuicuilco, Ciudad de México, afectada por espesores de lava producto de la actividad del volcán Xitli. En los dos sitios la aplicación de la técnica tuvo como objetivo determinar la respuesta de elementos de interés arqueológico, como construcciones o monumentos hechos por el hombre y a profundidades de 1 a 10 m. de la superficie del terreno. Mientras que en la Ciudad de Morelia, Michoacán el trabajo se enfocó a determinar la continuidad de fallas geológicas, a diferencia de las dos primeras aplicaciones, en este caso el objetivo fue determinar procesos naturales que pueden prolongarse algunas decenas de metros de profundidad.

5.1.- ZONA ARQUEOLÓGICA DE LA CAMPANA, COLIMA.

La Campana es un sitio arqueológico localizado en el Municipio de Villa de Álvarez, al noroeste de la zona conurbada 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 5.2. La aplicación la técnica de radar en este sitio tuvo como finalidad localizar y dar la ubicación de anomalías consideradas como la respuesta de estructuras o elementos de interés arqueológico, teniendo como antecedente que el resultado de excavaciones recientes realizadas por antropólogos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), al poniente de la zona fueron tres pirámides o adoratorios de gran importancia.

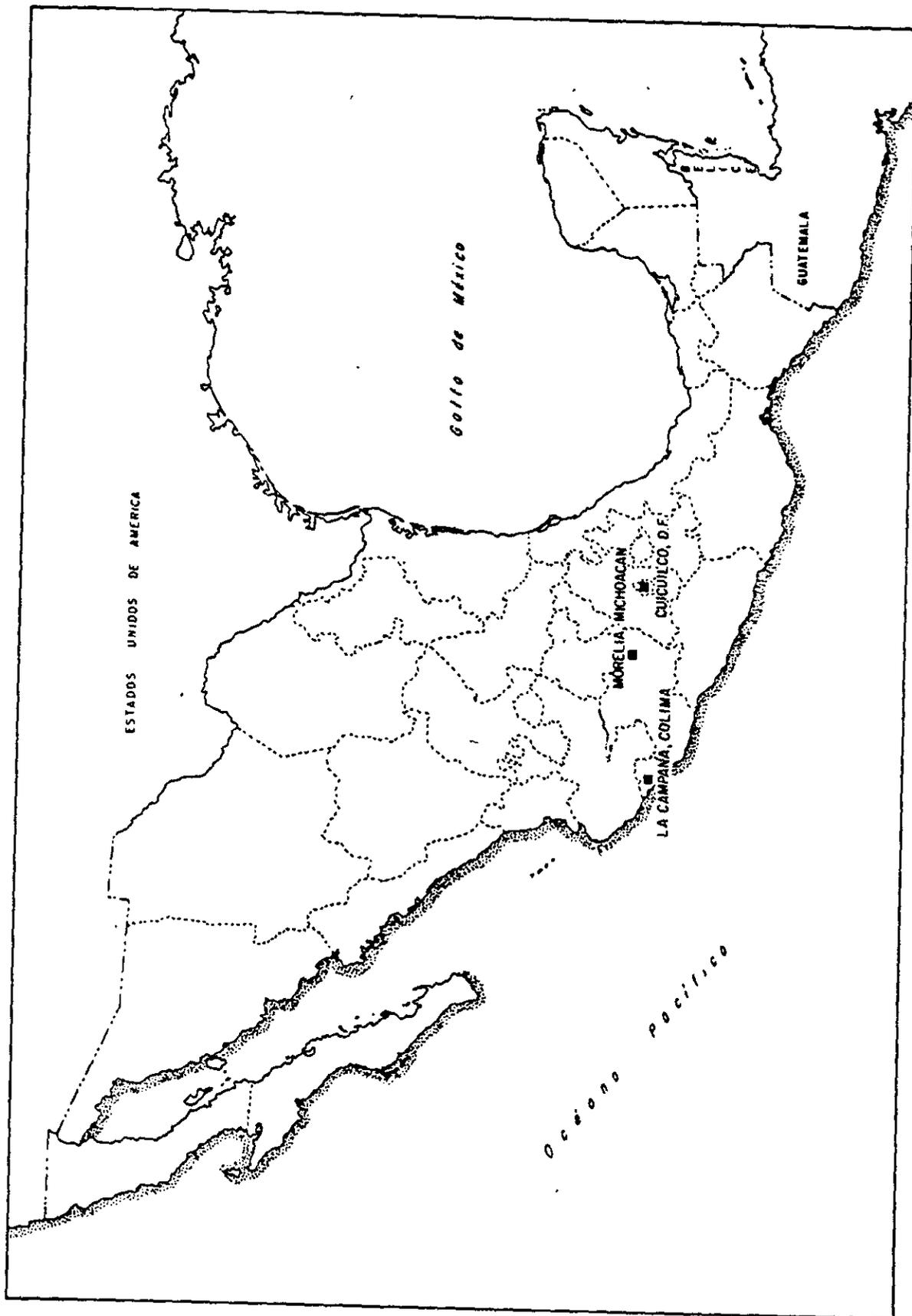


Figura 5.1.- Localización de los sitios de aplicación de la técnica de radar.

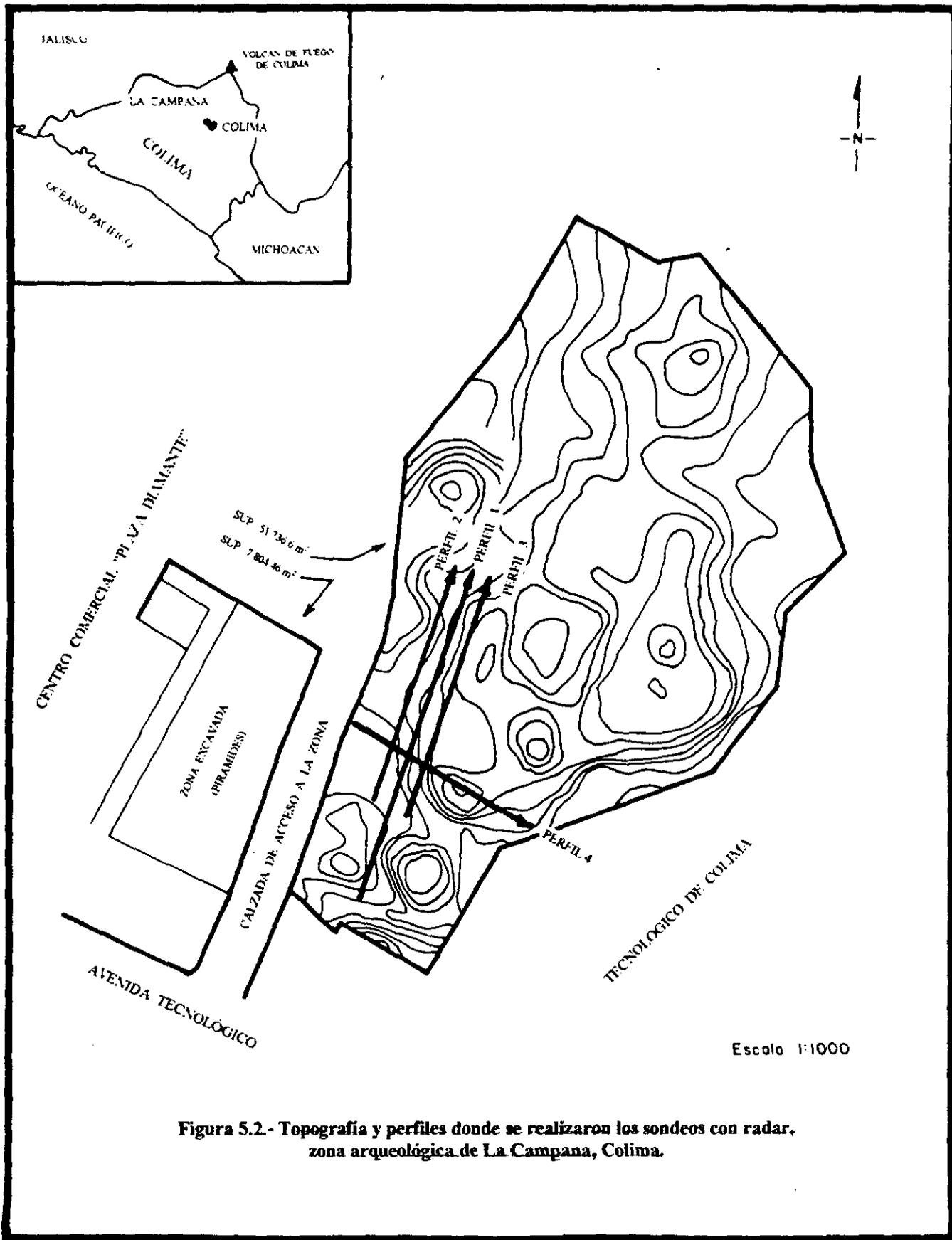


Figura 5.2.- Topografía y perfiles donde se realizaron los sondeos con radar, zona arqueológica de La Campana, Colima.

5.1.1.- Antecedentes.

La Campana es considerada como el mayor centro arqueológico de occidente del país debido a la existencia de un gran asentamiento cultural de origen Náhuatl, de 1500 años de antigüedad (Jarquín, 1996, comunicación personal). 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 5.2 en la región marcada como "zona excavada" y se aprecian en la fotografía de la figura 5.3 con una vista oriente-poniente.



Figura 5.3.- Resultado de excavaciones realizadas al poniente de la zona arqueológica de La Campana.

La geología de la zona 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 zona se componen de caliche, producto probable de alteración y lixiviación del material subyacente.

5.1.2.- Trabajo de campo y procesamiento de datos.

Los sondeos con radar en La Campana fueron realizados en el mes de marzo de 1996 en los perfiles representados en el croquis de la figura 5.2. 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 NE-SW, 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 los antecedentes (sección 5.1.1). De acuerdo a la tabla 2.1, 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.

5.1.3.- Interpretación de resultados.

Los radargramas obtenidos en los perfiles 1, 2, 3 y 4 son representados en las figuras 5.4 a 5.7 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.

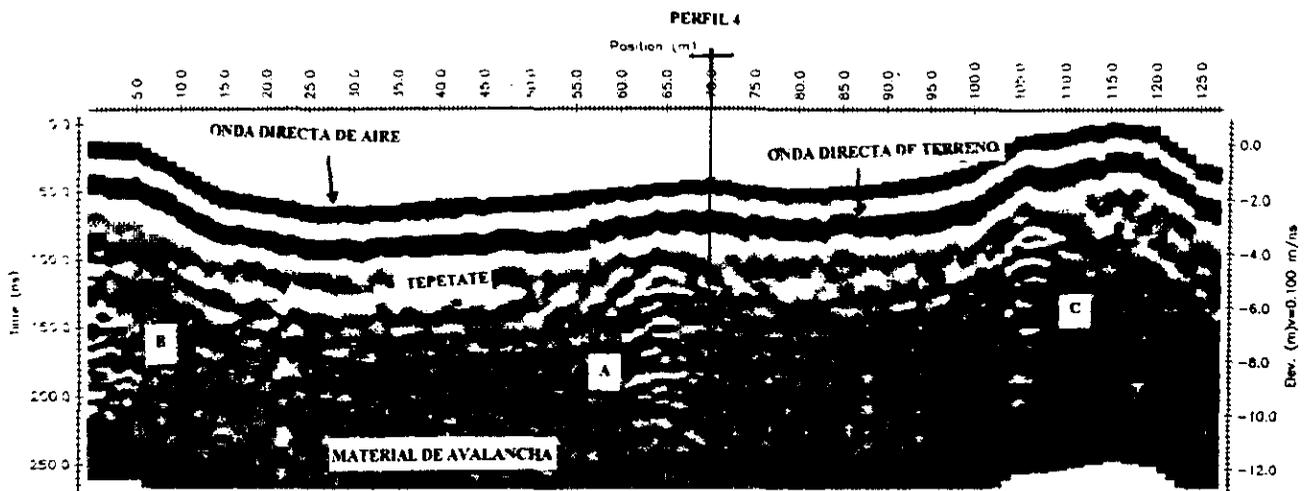


Figura 5.4.- Perfil 1, realizado con una frecuencia de 50 MHz. Zona arqueológica de La Campana.

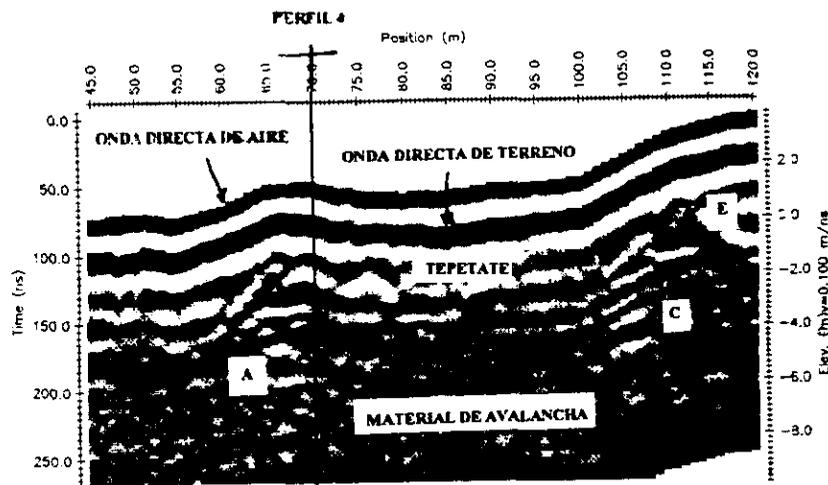


Figura 5.5.- Perfil 2 realizado con una frecuencia de 50 MHz. Zona arqueológica de La Campana.

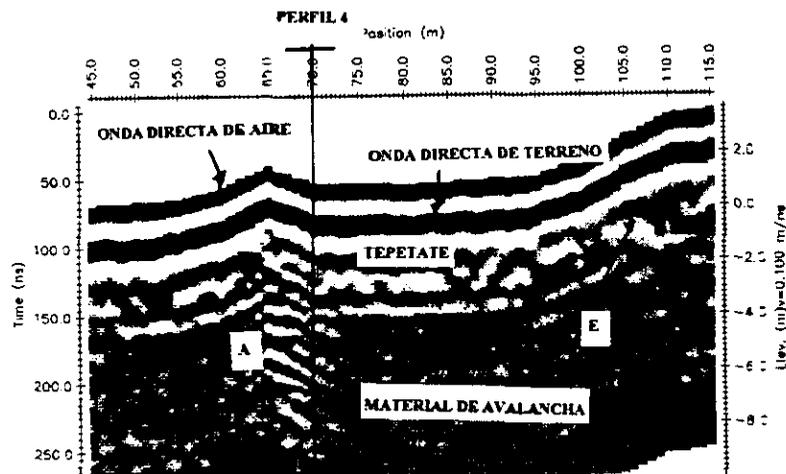


Figura 5.6.- Perfil 3 realizado con una frecuencia de 50 MHz. Zona arqueológica de La Campana.

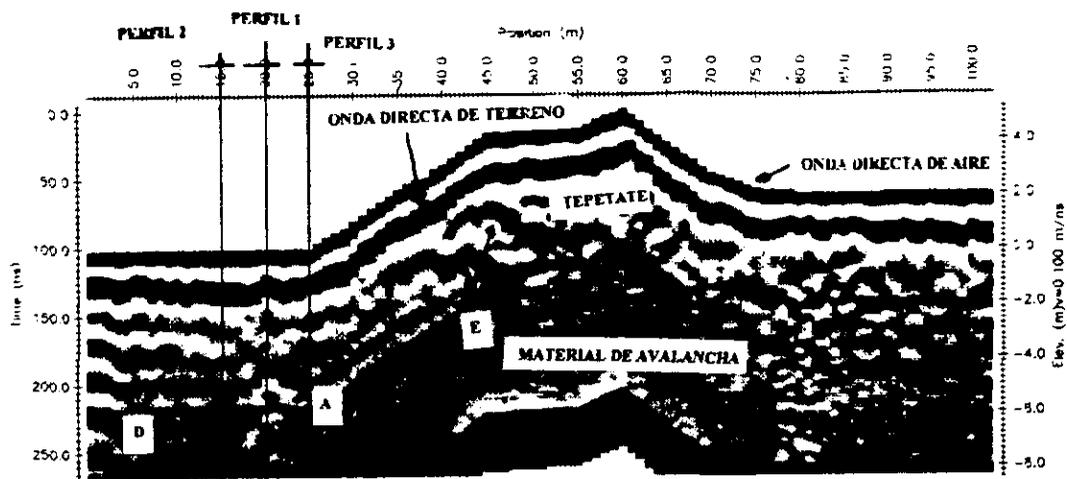


Figura 5.7.- Perfil 4, zona arqueológica de La Campana, frecuencia de 50 MHz.

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 102 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. Las anomalías registradas se interpretan como la respuesta de paredes o muros de construcciones, como pirámides, edificados a base de piedra de río, de acuerdo a los antecedentes de la zona.

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.

Las fotografías de las figuras 5.8a y 5.8b presentan una vista poniente-orienté, del sitio donde se realizaron los sondeos. La fotografía 5.8a fue tomada en la fecha que se realizaron los sondeos (marzo del 96), observándose algunos montículos cubiertos por vegetación. La fotografía 5.8b, presenta los elementos descubiertos una vez que se habían concluido las excavaciones en el sitio (noviembre del 96). Aquí se observa una plaza central y tres pirámides; una de ellas al fondo y otra a la izquierda de 5 a 7 m. de altura, y la tercera al centro de la plaza de 2 m. de altura. En ambas fotografías la referencia es un árbol marcado por **R**. Estas excavaciones hicieron posible comparar los elementos descubiertos con la interpretación de los sondeos. Los monumentos arquitectónicos están edificados con piedra de río, unidas con lodo. En la fotografía 5.8b se marcan los elementos que dieron origen a las anomalías con la misma simbología usada en los radargramas. Las anomalías **A**, **B**, **C** y **D** fueron la respuesta de rampas de construcciones edificadas con piedra de río unida con lodo; los reflectores identificados como **E** son la respuesta de piedras de río alineadas horizontalmente para formar pisos de terrazas.

5.1.4.- Conclusiones.

La interpretación de los sondeos efectuados en la zona de La Campana quedaron satisfactoriamente correlacionados con los resultados de las excavaciones, comprobando que las principales anomalías registradas en los radargramas fueron producidas por rampas de construcciones de 2 a 5 m. de altura y por pisos de los mismos edificios arquitectónicos, edificados con piedra de río unidas con lodo. En base a la interpretación y a los resultados de las excavaciones, se puede suponer que los montículos existentes en toda la zona, pueden representar elementos arquitectónicos cubiertos por sedimentos y vegetación.



Figura 5.8a.- Vista poniente-oriental de la zona donde se realizaron los sondeos con radar (marzo de 1996), zona arqueológica de La Campa, Colima.

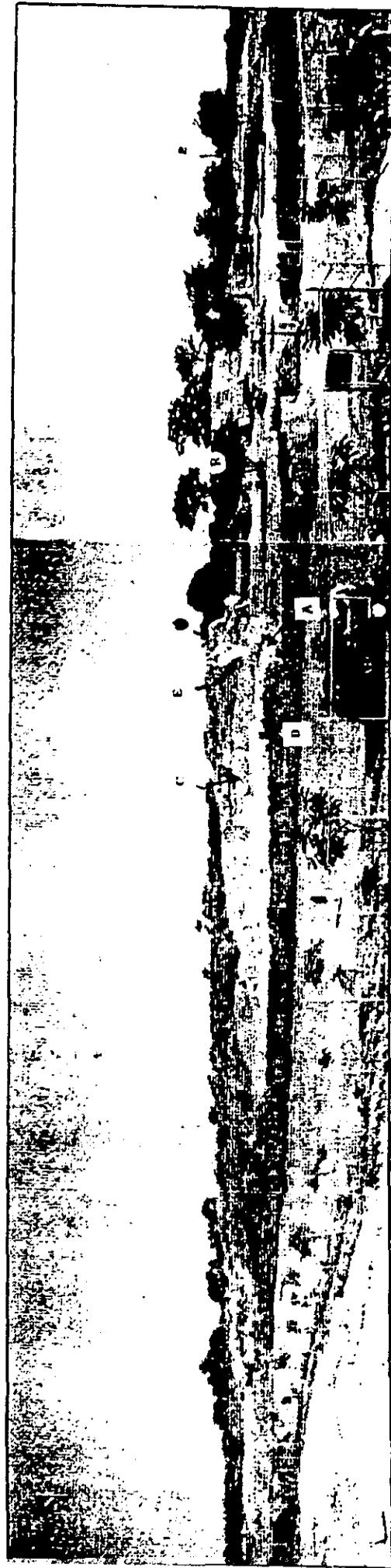


Figura 5.8b.- Mismo toma que la fotografía anterior. Resultado de excavaciones en el sur de la zona arqueológica La Campana, (Noviembre de 1996).

5.2.- ZONA ARQUEOLÓGICA DE CUICUILCO, CIUDAD DE MÉXICO.

La zona arqueológica de Cuicuilco localizada al sur de la Ciudad de México, entre la Avenida de los Insurgentes y Periférico Sur, está afectada por espesores de lava producto de la erupción del volcán Xitli, hace 2000 años. Romper los espesores de lava para recuperar los restos arqueológicos de la zona representa trabajos difíciles y costosos. El objetivo de aplicar la técnica de radar fue para identificar posibles elementos arqueológicos, proporcionando localización, dimensiones y delimitando áreas para futuras excavaciones.

5.2.1.- Antecedentes.

La zona arqueológica 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 Xitli, cráter localizado en la pendiente norte del Ajusco a 10 Km. aproximadamente de la zona de arqueológica (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). Esta construcción es representada en la figura 5.9.

La estratigrafía de la zona se obtuvo de un pozo al oriente de la pirámide marcado en la figura 5.9. La columna estratigráfica se representa en la figura 5.10 (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 un espesor tepetate con arcillas.

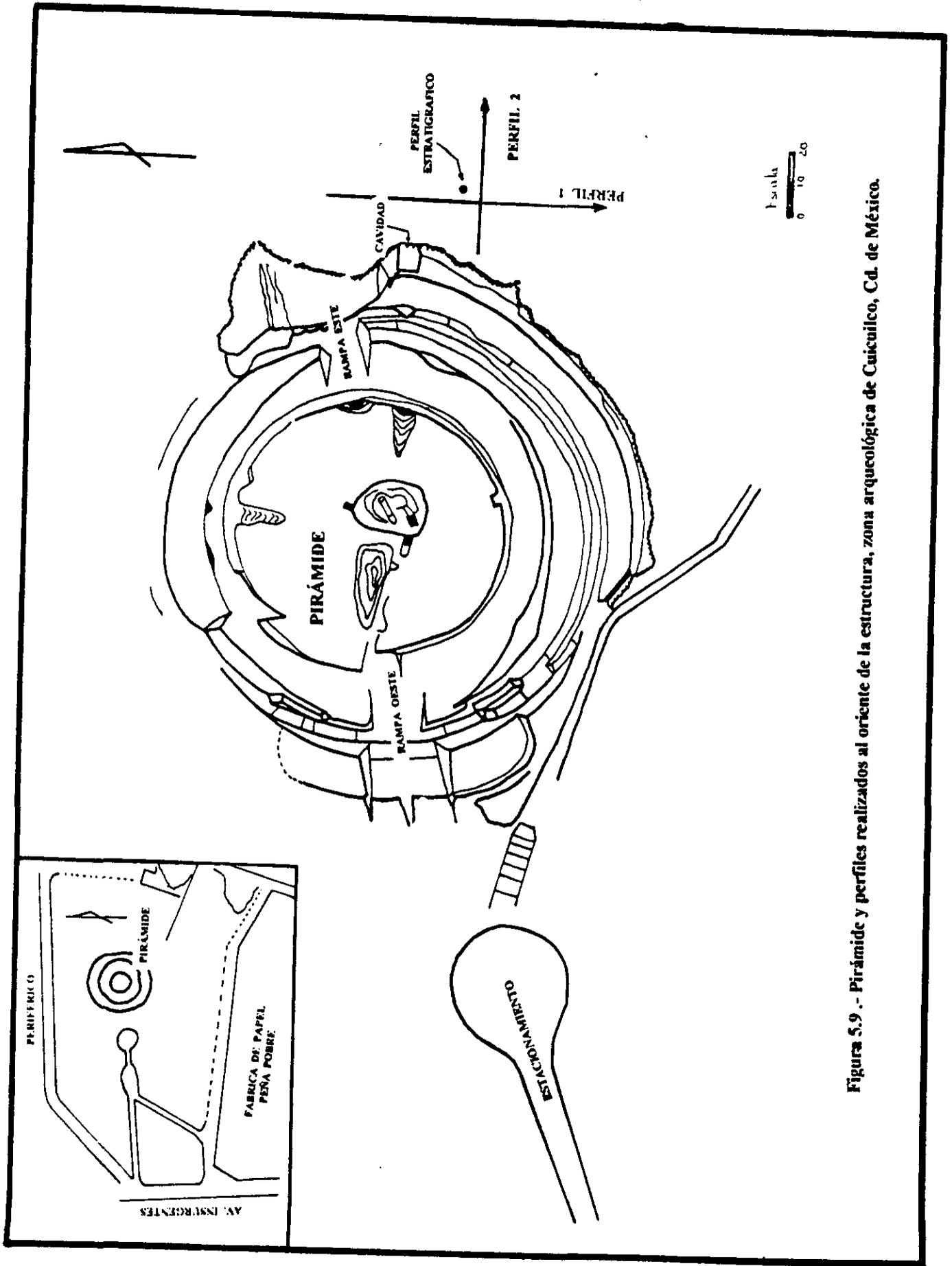


Figura 5.9.- Pirámide y perfiles realizados al oriente de la estructura, zona arqueológica de Cuicuilco, Cd. de México.

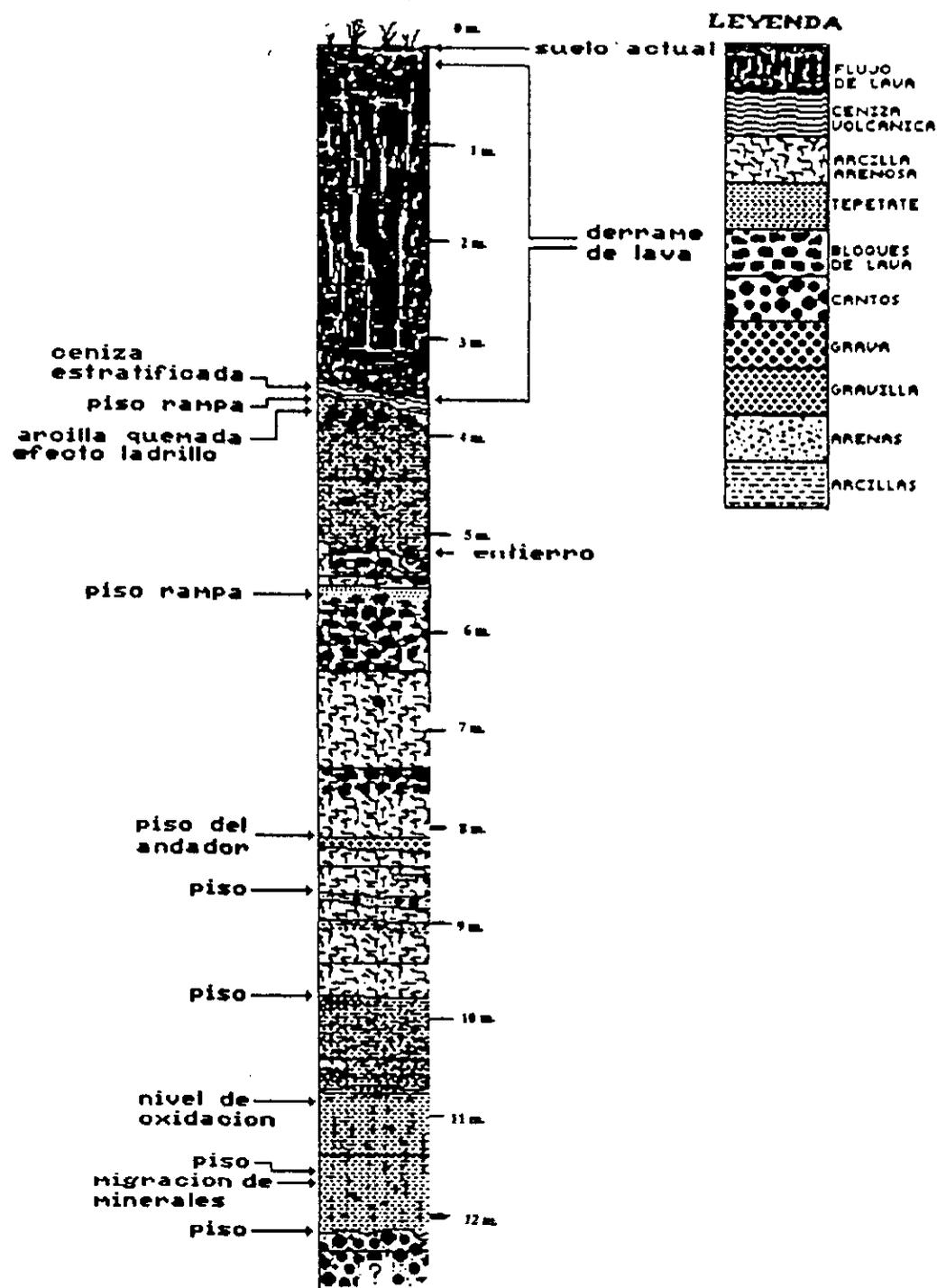


Figura 5.10.- Columna estratigráfica, zona arqueológica de Cuicuilco, Cd. de México (Pastrana, 1996).

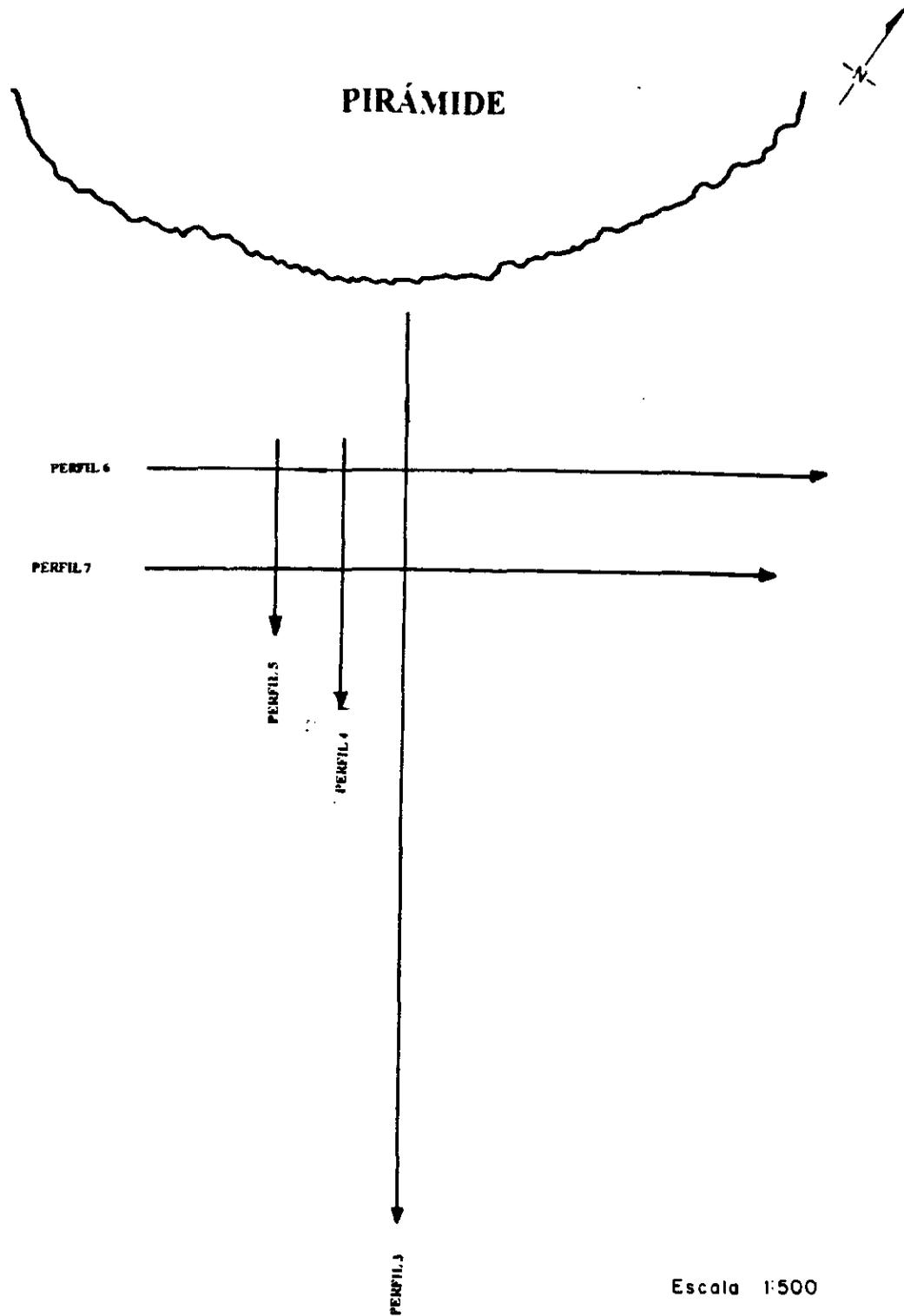


Figura 5.11.- Perfiles efectuados al sur de la pirámide, zona arqueológica de Cuicuilco, Cd. de México.

5.2.2.- Trabajo de campo y procesamiento de datos.

El trabajo de campo en la zona arqueológica de Cuicuilco se realizó en 7 perfiles; los perfiles 1 y 2 son representados en la figura 5.9 al oriente de la pirámide; los perfiles 3 a 7 realizados la sur-oriente de la pirámide forman una malla representada en la figura 5.11. 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, 2 y 9, y $\Delta x=1$ m. en los perfiles 3 a 8; $S=1$ 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 5.12, en donde se aprecian las ondas directas de aire y de terreno, y el reflector generado en la primera interface del medio.

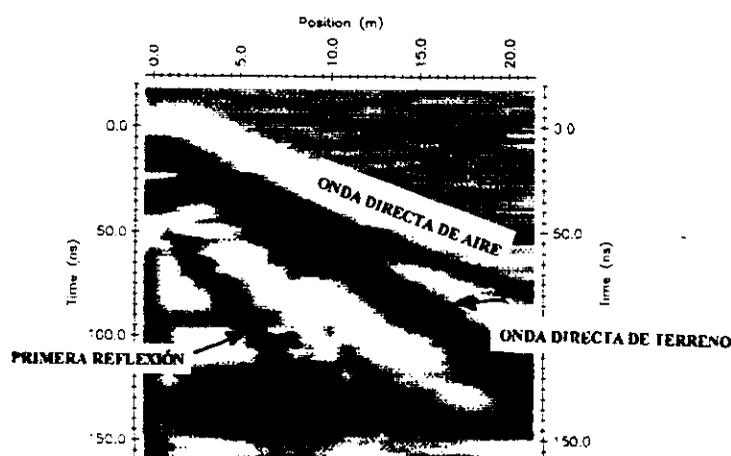


Figura 5.12.- Sondeo de velocidades, zona arqueológica de Cuicuilco, frecuencia de 50 MHz.

La gráfica $(x^2 - t^2)$ del evento reflejado se representa en la figura 5.13; en donde x representa la posición de las antenas (en m.) y t es el tiempo doble de viaje de cada señal. La línea punteada es la curva $(x^2 - t^2)$ y la línea continua es la recta que ajusta estos valores mediante la relación $y = mx + b$. La velocidad de propagación de la señal electromagnética en esta zona, calculada mediante la ecuación 4.8, fue de 0.09 m/ns. Integrando esta valor a los datos de los sondeos.

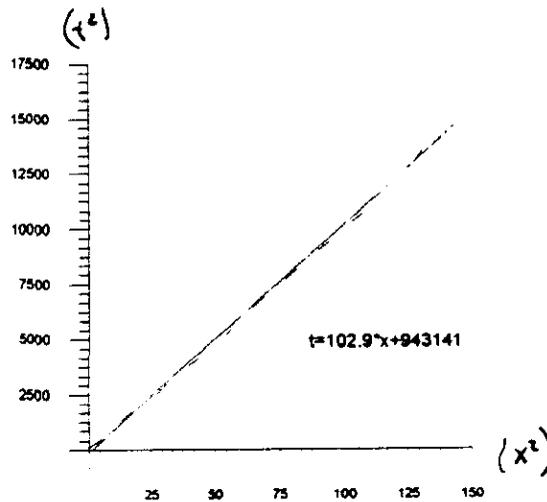


Figura 5.13.- Gráfico $(x^2 - t^2)$ del reflector C. La línea continua corresponde a los valores $(x^2 - t^2)$ y la línea punteada es la recta que ajusta la curva.

5.2.3.- 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.

5.2.3.1.- 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 5.14 y 5.15 respectivamente. El perfil 1 se realizó con la finalidad de detectar la respuesta de la cavidad representada en la figura 5.9 al oriente de la pirámide; tiene de 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 los radargramas 1 y 2 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 1, 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 Xitli. En el radargrama 2 se registran dos anomalías verticales dentro del espesor de basalto, entre 7.5 a 10.3 m y entre 24.3 a 26 m. de posición, estos eventos se interpretan como la respuesta de estructuras verticales, posiblemente muros o columnas de alguna construcción.

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 el espesor de tepetate y con el de arcillas.

En el radargrama 1 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 esta a una profundidad de 8 m. y es considerado un evento múltiple. Finalmente se observa entre las posiciones de 40 a 48 m. cuatro reflectores pequeños a diferentes profundidades, se consideran la respuesta de una zona de fracturas.

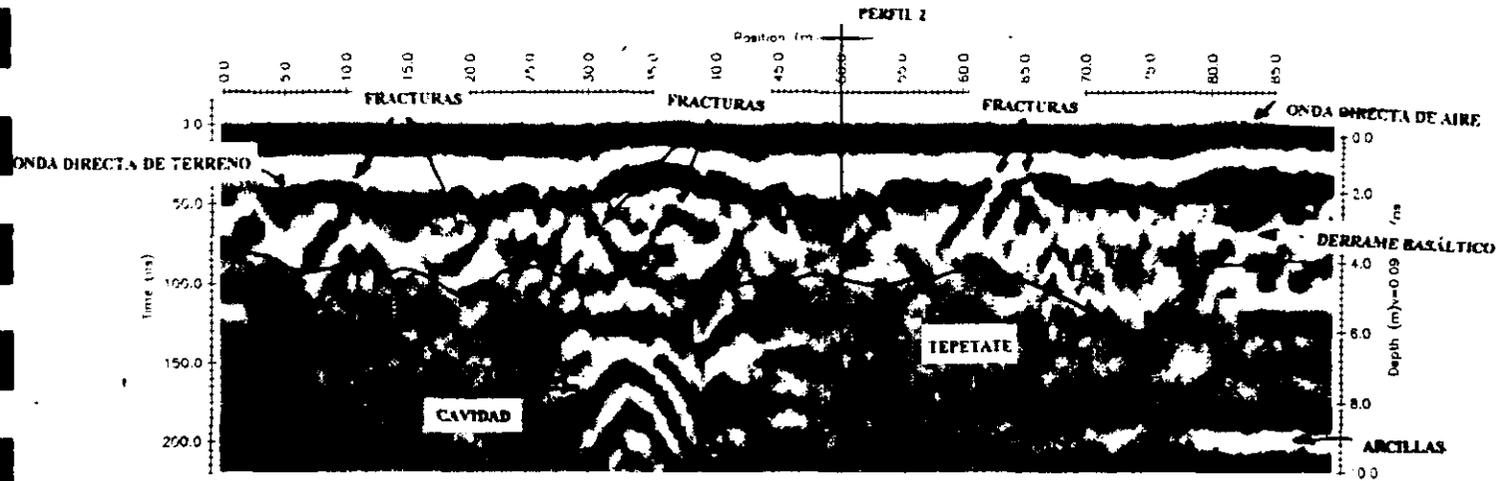


Figura 5.14.- Perfil 1, realizado al oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 MHz.

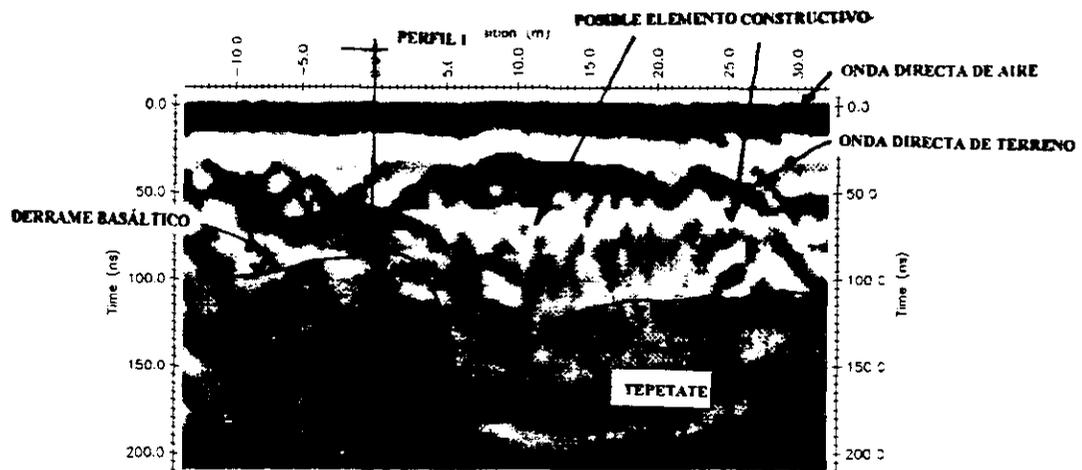


Figura 5.15.- Perfil 2, realizado al oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 MHz.

Para reducir el efecto de difracción del radargrama 1, se aplicó un proceso de migración a los datos de este perfil, considerando un valor de 0.09 m/ns como velocidad media de la zona. El resultado de este proceso se presenta en la figura 5.16., resultando un colapsamiento de la hipérbola y obteniendo una imagen con dimensiones más cercanas a las que en realidad tiene la cavidad. También se elimina el efecto del evento múltiple observado en la figura 5.14, mediante este proceso.

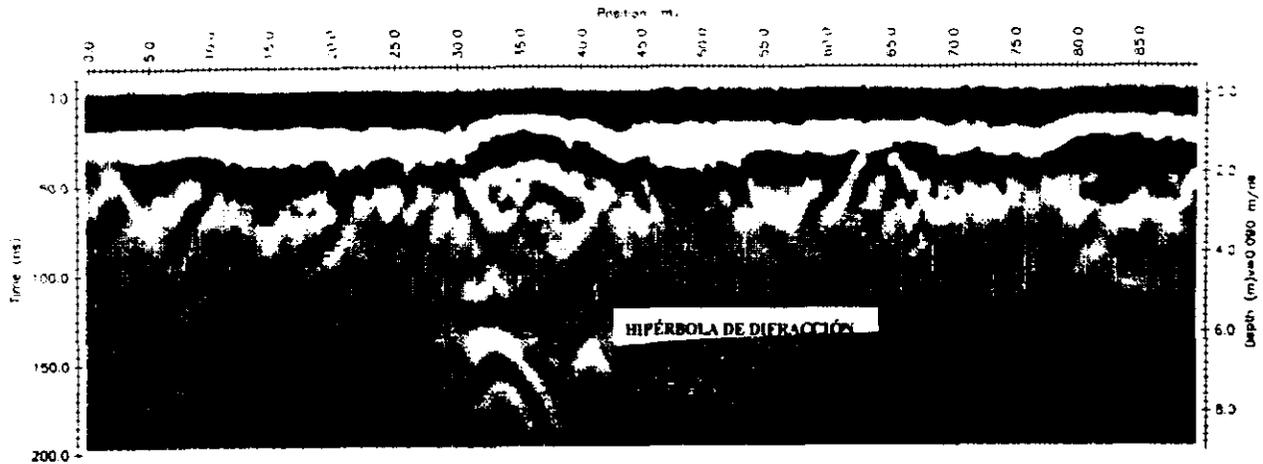


Figura 5.16.- Resultado del proceso de migración aplicado a los datos del perfil 1.

Para apoyar la interpretación efectuada, específicamente para el radargrama 1, se efectuó un proceso de modelado usando el método de trazado de rayos. El modelo se aprecia en la figura 5.17. Aquí se sugiere un espesor de basalto de 4.5 m. aproximadamente con una $v = 0.2m/ns$ y $\alpha = 0.01 dB/m$; bajo este espesor se considera un medio compuesto por tepetate (cliche) con una $v = 0.13m/ns$ y $\alpha = 0.01 dB/m$. y debajo del límite del espesor de basalto se propone una cavidad con una $v = 0.03m/ns$ y $\alpha = 0.001dB/m$

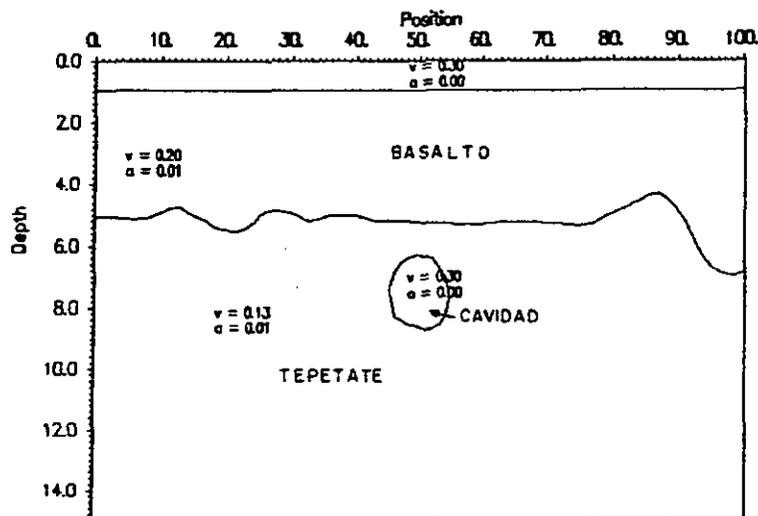


Figura 5.17.- Modelo propuesto para el radargrama 1, cada medio con v y α constantes.

La respuesta del modelo es el radargrama de la figura 5.18. En esta sección se aprecia un reflector localizado entre 4 y 5 m. de profundidad que corresponde a la interface basalto-tepetate. Entre las posiciones de 40 a 60 m. se registra una hipérbola de difracción, respuesta de la cavidad presentada en el modelo de la figura 5.17. Cabe recordar que los radargramas obtenidos en el proceso de modelado, no incluye las señales directas de aire y de terreno, únicamente las reflexiones generadas en el subsuelo.

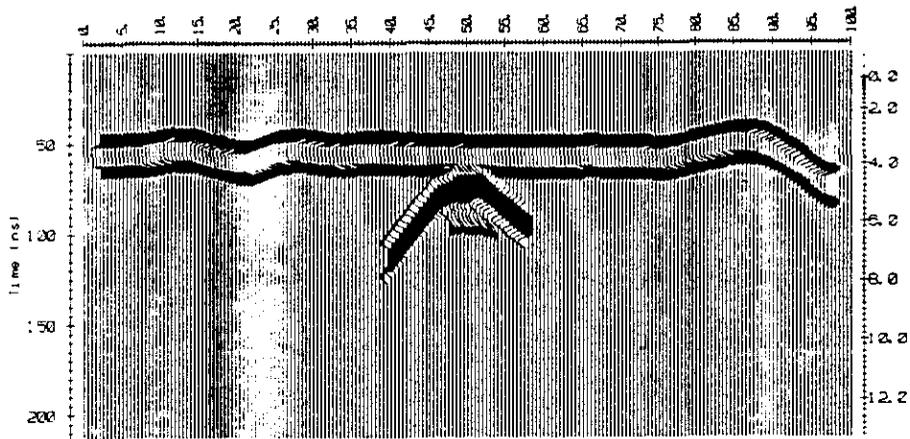


Figura 5.18.- Radargrama resultante del proceso de modelado bidimensional a base de rayos.

Analizando el radargrama de la figura 5.18, se observa que la cavidad propuesta en el modelo de la figura 5.17, da origen a una hipérbola de difracción, al igual que la observada en el radargrama de la figura 5.14. También se aprecia un reflector generado por la interface tepetate-arcillas. La respuesta del modelo 5.18 justifica la interpretación realizada de los radargramas 5.14 y 5.15. También nos ayuda a considerar que los valores posibles de velocidad y atenuación para los medios considerados son; para el basalto $v = 0.2m/ns$ y $\alpha = 0.01 dB/m$; para el tepetate (cliche) $v = 0.13m/ns$ y $\alpha = 0.01 dB/m$; y dentro de la cavidad $v = 0.03m/ns$ y $\alpha = 0.001dB/m$.

5.2.3.2.- Sondeos realizados al sur-oriente de la pirámide.

Al sur-oriente de la pirámide se efectuaron 5 sondeos en los perfiles representados en la figura 5.11. Los perfiles 3, 4 y 5, paralelos entre si, tienen dirección NW-SE y los radargramas correspondientes se presentan en las figuras 5.19 a 5.21 respectivamente. Los perfiles 6 y 7 perpendiculares a los tres anteriores, tienen dirección SW-NE y se presentan en las figuras 5.22 y 5.23 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 interfase 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 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 mortero en sus uniones. En el perfil 7, las anomalías registradas eventos 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 donde se obtuvo este ultimo 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 5.24. 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 basalto es de $v = 0.2m / ns$; y para el tepetate (cliche) de $v = 0.13m / ns$ y $\alpha = 0.01 dB / m$.

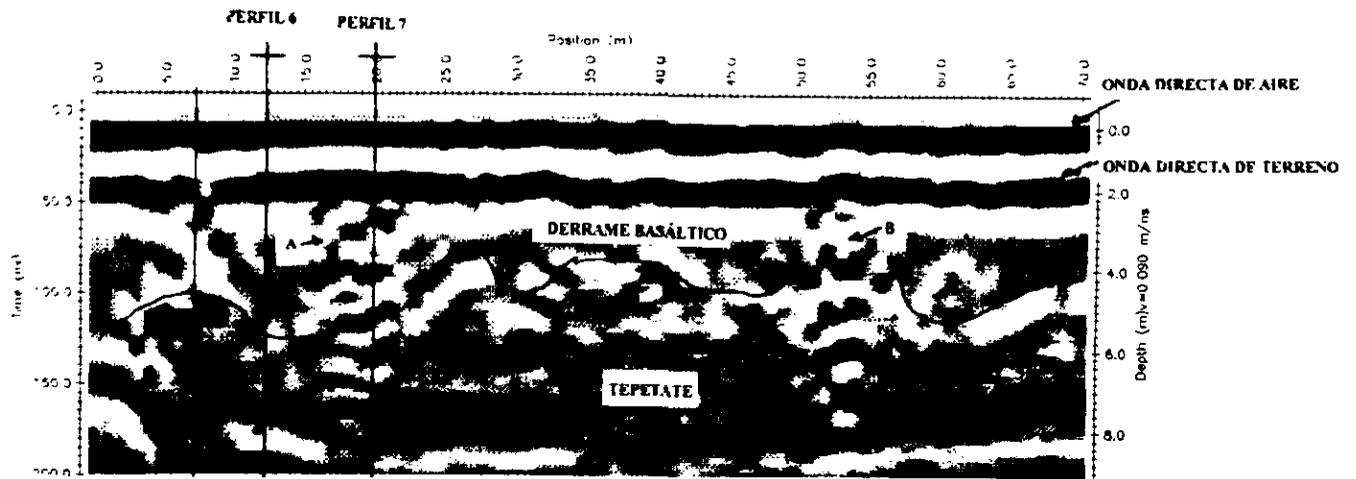


Figura 5.19.- Perfil 3, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 MHz.

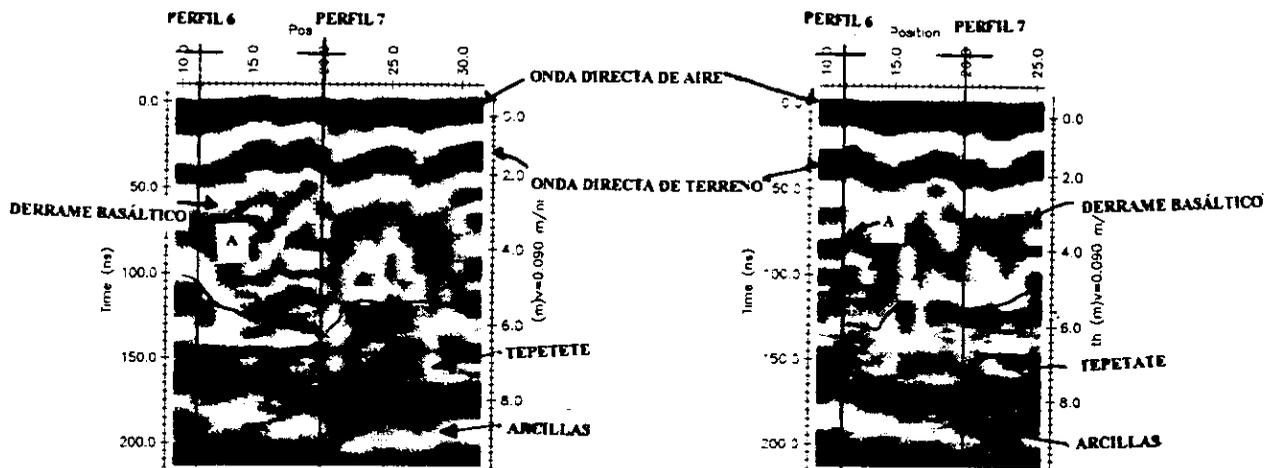


Figura 5.20.- Perfil 4.

Figura 5.21.- Perfil 5.

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

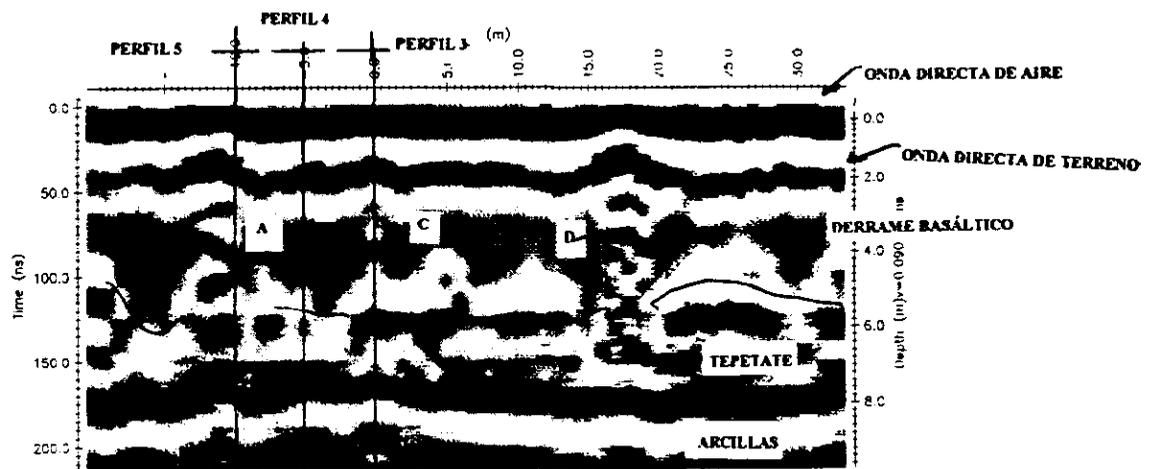


Figura 5.22.- Perfil 6, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuicuilco, con frecuencia de 50 MHz.

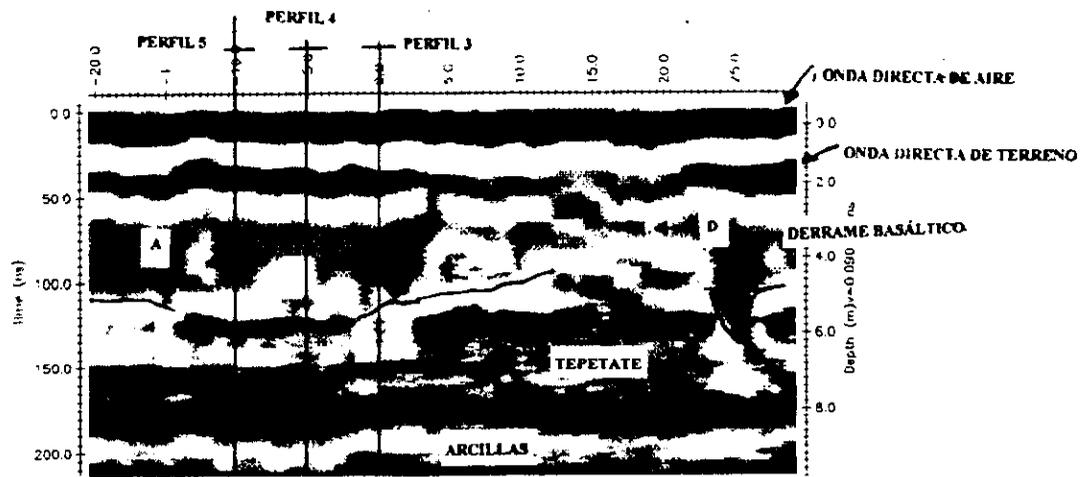


Figura 5.23.- Perfil 7, realizado al sur-oriente de la pirámide de Cuiculco, con frecuencia de 50 MHz.

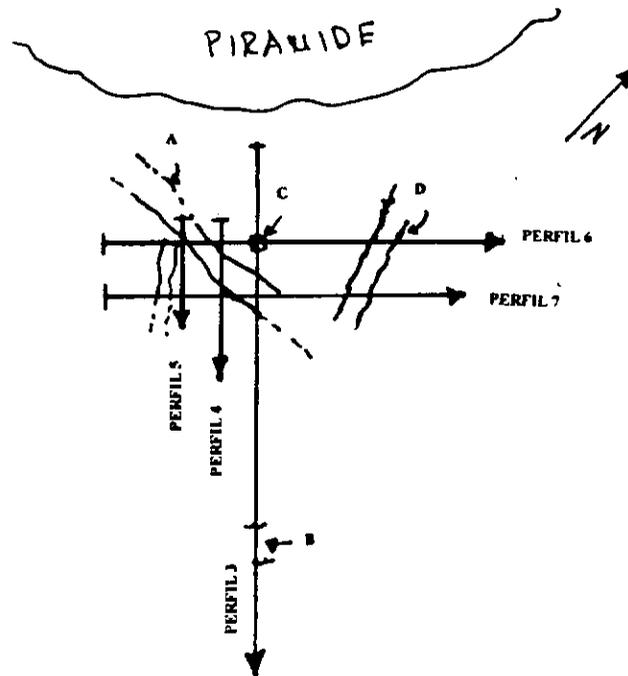


Figura 5.24.- Continuidad de anomalías que dan origen a las respuestas en los radargramas de los perfiles trazados al sur-oriente de la pirámide de Cuiculco.

5.2.4.- Conclusiones.

En este trabajo la interpretación de los sondeos obtenidos se realizó considerando la estratigrafía de la zona (Pastrana, 1996) y en base a un corte localizado enfrente de la pirámide en su parte norte y este en donde se observa la litología en un espesor de 7 m. aproximadamente. El modelo bidimensional realizado en base al sistema de trazado de rayos, permitió justificar la interpretación de las observaciones principales en el sondeo obtenido del perfil 1. Los sondeos efectuados hacia el sur-oriente de la pirámide, presentan varias anomalías que se asocian con estructuras o construcciones pertenecientes a las culturas que habitaron esta región hace más de 2000 años. Con la información que se presentó es posible dar localizaciones para realizar excavaciones. Considerando el sitio para futuros estudios con la técnica de radar. Los resultados del modelado permiten sugerir los parámetros de velocidad y atenuación para

5.3.- FALLAS GEOLÓGICAS EN CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN.

La Ciudad de Morelia, Michoacán presenta evidencias de un sistema de cuatro fallas geológicas, considerándose estos eventos como fallas activas. La evidencia de estos eventos se manifiesta en daños en el pavimento con hundimiento de bloque, daños causados en las obras civiles, provocando agrietamiento y hundimiento de las mismas. Se encuentran también bajo el riesgo de esta actividad, drenajes, tuberías de agua y cableado subterráneo, entre otros (Garduño, 1996). El objetivo de aplicar la técnica de radar en este tipo de eventos geológicos fue aportar información de su comportamiento en los primeros 10 m. de profundidad en las zonas donde existen evidencias de las fallas en superficie. Los resultados de este trabajo se integrarán a la información geológica existente para considerar la magnitud del riesgo que representan estos eventos geológicos, realizando una evaluación en las obras civiles y analizar su evolución, planteando posibles soluciones al problema para evitar daños posteriores.

5.3.1.- Antecedentes.

Desde hace aproximadamente 13 años se han detectado dentro de la Ciudad de Morelia evidencias de un sistema de cuatro fallas geológicas, paralelas entre sí y aisladas en diversos puntos dentro de la ciudad, y con una orientación NE-SW, misma orientación que tiene el sistema de fallas regionales. El sistema de fallas registradas suman 15 Km. lineales aproximadamente. Las primeras evidencias de la actividad de estos eventos geológicos se registraron en 1983 con un periodo crítico hasta 1988, de entonces la actividad ha sido menor pero constante (Informes proporcionados por Garduño, 1996). El sistema de fallas es representado en el mapa de la figura 5.25.

La columna litológica generalizada en Morelia esta compuesta en los primeros 6 m. por suelos arcillosos. Subyaciendo espesores de 5 a 20 m de sedimentos lacustres. Bajo estos espesores se tienen ignimbritas (cantera de Morelia) y debajo espesores de andesitas (Información proporcionada por Garduño).

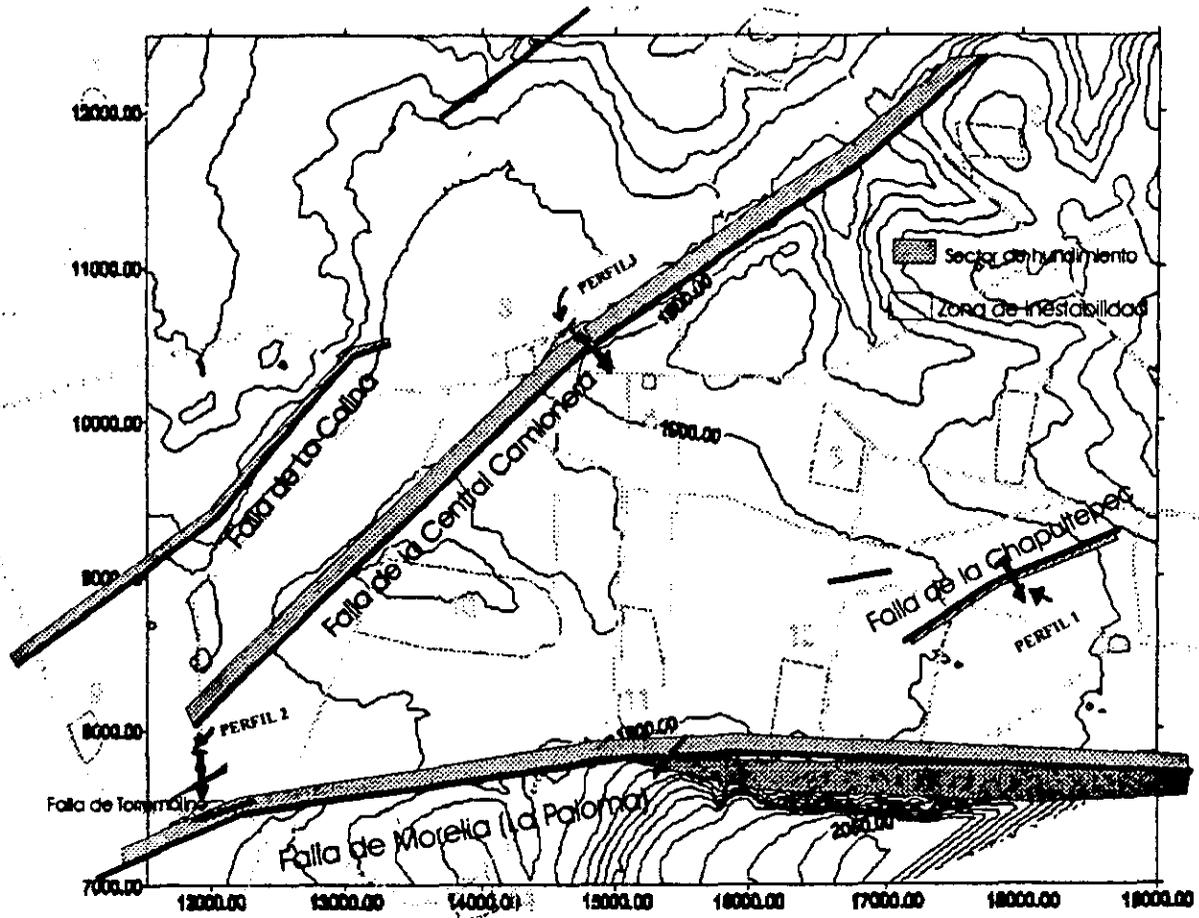


Figura 5.25.- Principales fallas geológicas en la Ciudad de Morelia, Michoacán (Arreygue et. al., 1997) y perfiles trazados para sondeos con radar.

5.3.2.- Trabajo de campo y procesamiento de datos.

El trabajo de campo en Morelia consistió en trazar perfiles perpendiculares a la dirección de las estructuras geológicas manifestadas en superficie. En estos sondeos se aplica una frecuencia de 50 MHz. usando los siguientes parámetros: $S=1$ m., $\Delta x=0.5$ m., $W=250$ ns. y una apilado de 64 trazas.

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, correspondiente al 30% de la frecuencia de Nyquist, este valor permitió eliminar componentes de alta frecuencia o ruido, conservando las señales representativas.

La velocidad de propagación de la señal electromagnética, se determinó considerando la estratigrafía de la zona (sección 5.3.1). De acuerdo a la tabla 2.1, para las arcillas la velocidad es 0.1m/ns., y en los sedimentos lacustres de 0.06 m/ns. La velocidad media en la zona es de 0.08 m/ns., valor aplicado a los datos de este trabajo.

5.3.3.- Interpretación de resultados.

Los sondeos efectuados en la Ciudad de Morelia tienen una dirección perpendicular la dirección de las fallas geológicas manifestadas en superficie. Los perfiles de donde se obtuvieron los sondeos se representan en el mapa de la figura 5.25.

El radargrama resultante del perfil 1 se representa en la figura 5.26 y es realizado en la Falla Chapultepec, Colonia Chapultepec. Esta falla tiene una longitud de 1300 m. y dirección NE-SW con un desnivel de 40 cm. al SE. Las evidencias de la falla en superficie se registran de 3 a 5 m. del perfil. En el radargrama se observa un reflector inclinado, con su punto más superficial directamente debajo de donde se tienen daños en superficie, este reflector se interpreta como un plano de falla. El reflector localizado entre 4 y 6 m. de profundidad es considerado como la interface entre el espesor de arcillas con el de sedimentos lacustres.

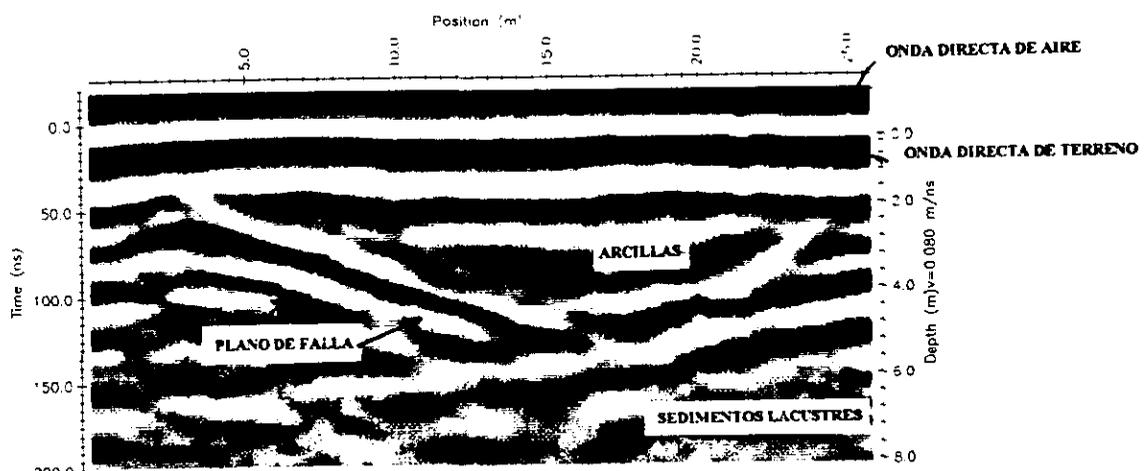


Figura 5.26.- Perfil 1, realizado en la falla Chapultepec, con frecuencia de 50 MHz.
Morelia, Michoacán.

El perfil 2 se realizó en la Avenida Periodismo, Colonia Torre Molino con una dirección N-S, el radargrama resultante se presenta en la figura 5.27. La falla registrada en esta zona se denomina Torre Molino y registra una caída de bloque hacia el N. Las evidencias de la falla en superficie se localizan entre las posiciones 15 a 17 m. del perfil. En el radargrama correspondiente se observan dos reflectores inclinados formando una zona de depresión entre las posiciones de 14 a 23 m., este colapso del material coincide con las evidencias de la falla en superficie.

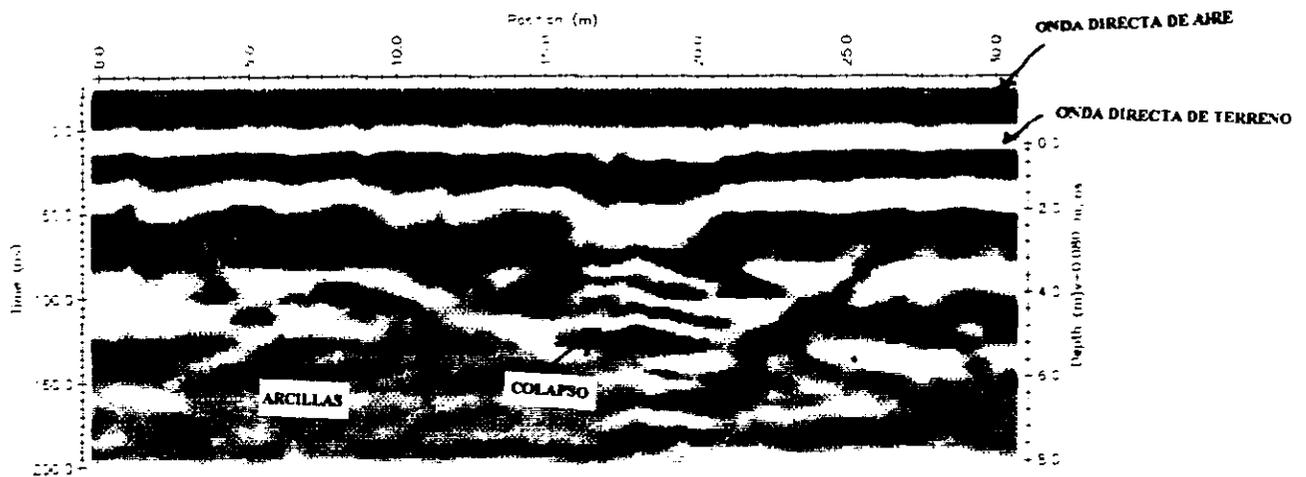


Figura 5.27.- Perfil 2, realizado en Av. Periodismo, con frecuencia de 50 MHz., Col. Torre Molino, Morelia, Michoacán.

El perfil 3 tiene dirección N-S y se realizó en la falla de La Colina, en la calle Retorno de Ma. Manuela Molina, Fraccionamiento de Agua Clara, el radargrama resultante se presenta en la figura 5.28. Esta falla presenta un hundimiento de bloque hacia el NW con un relieve morfológico de 4 m. aproximadamente. Las evidencias de la falla en superficie se registran en la posición de 11 m. del perfil. En el radargrama 5.28 se observan algunos reflectores que pierden continuidad entre las posiciones de 9 a 10 m., registrando una inclinación a partir de esa posición y corresponde a la zona donde se manifiestan daños en superficie. Otro evento representativo es el reflector inclinado, que se marca como posible plano de falla.

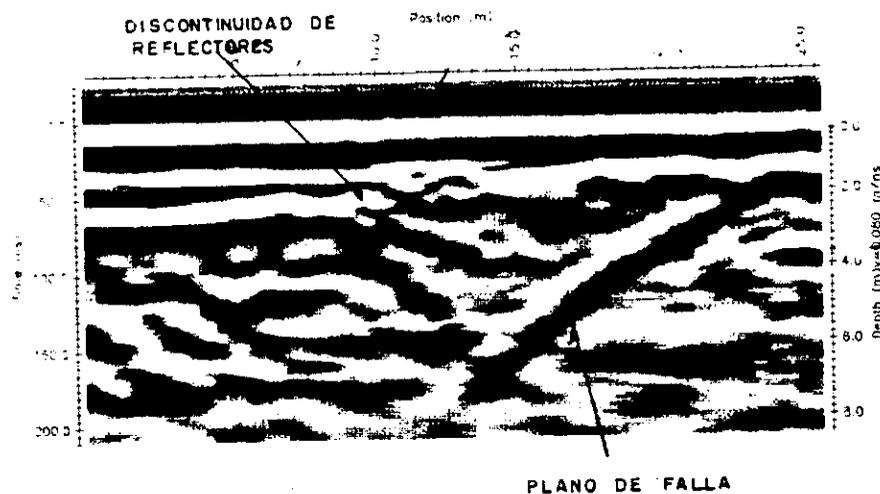


Figura 5.28.- Perfil 3, efectuado en la calle Ma. Manuela Molina, con frecuencia de 50 MHz., Morelia, Michoacán.

Con la finalidad de apoyar la interpretación realizada del radargrama 1, obtenido en la falla Chapultepec, se efectuó un modelado bidimensional usando el método de trazado de rayos. El modelo propuesto se presenta en la figura 5.29 y está compuesto por tres capas; la capa más superficial es un espesor de 1 m. de asfalto, con parámetros eléctricos de $v = 0.13m/ns$ y $\alpha = 0.001dB/m$; debajo un espesor de arcillas con $v = 0.01m/ns$ y $\alpha = 1dB/m$; subyaciendo se tienen sedimentos lacustre con $v = 0.06m/ns$ y $\alpha = 0.001dB/m$. En el modelo se sugiere una falla afectando ambos espesores, el material alrededor de este plano de falla es menos compacto y con probable acumulación de agua, lo que origina que los parámetros eléctricos en esta zona sean diferentes; para la arcilla se tiene $v = 0.06m/ns$ y $\alpha = 200dB/m$; para los sedimentos lacustres la $v = 0.1m/ns$ y $\alpha = 1dB/m$. Los parámetros eléctricos se obtuvieron de la tabla 2.1. Este modelo se construyó considerando las condiciones que se presentan en la zona afectada por la falla de la Chapultepec.

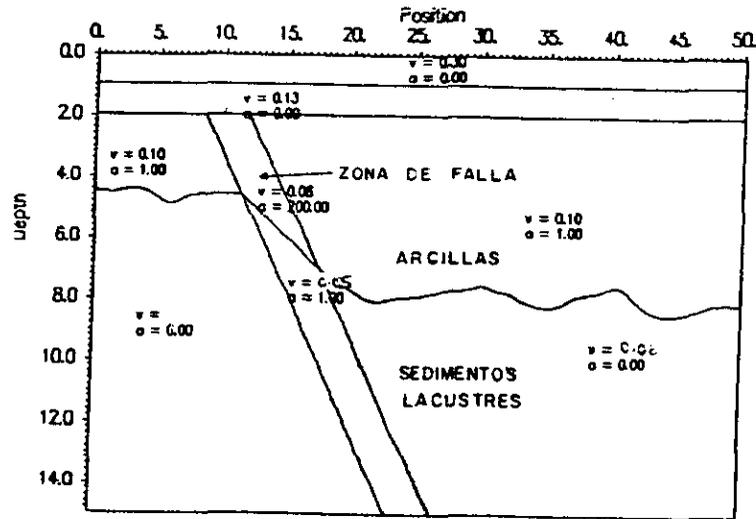


Figura 5.29.- Modelo propuesto, cada capa con velocidad v y atenuación α constante.

La respuesta de este modelo es el radargrama de la figura 5.30. En esta sección se observa un reflector en los primeros 2 m. de profundidad que corresponde a la interface asfalto-arcillas; el reflector inclinado corresponde al plano de la falla; finalmente se observa un reflector a la izquierda del plano de la falla entre 2 y 3 m. de profundidad y hacia la derecha del plano de falla, el reflector varía entre 3 y 7 m. de profundidad, representando la interface arcilla-sedimentos lacustres.

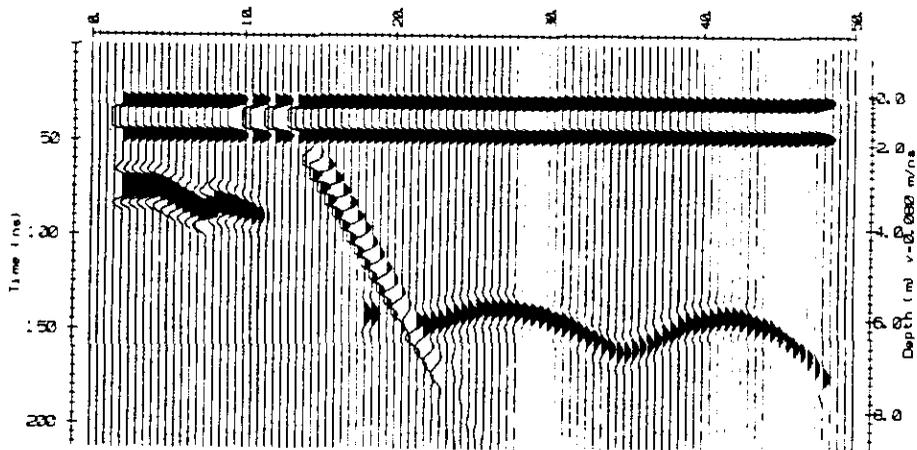


Figura 5.30.- Radargrama resultante del proceso de modelado bidimensional a base de rayos

Comparando los resultados del modelo bidimensional con el radargrama de la figura 5.26, se observa que los eventos obtenidos en el radargrama 5.30 se ajustan a los de la sección 5.26. Esto permite justificar la interpretación efectuada para los datos obtenidos del perfil realizado en la falla Chapultepec, además de que ayuda a considerar los valores posibles de velocidad y atenuación en el medio y la geometría del medio.

Los resultados de este modelado permiten confiar en la interpretación efectuada de las secciones obtenidas en la falla Torre Molino y la falla de La Colina. Considerando que las condiciones geológicas de la ciudad de Morelia son similares. Los eventos geológicos interpretados, son planos de falla que se registran a profundidades de 8 m. y pueden tener continuidad a mayores profundidades.

5.3.4.- Conclusiones.

Los resultados de los sondeos realizados con radar en la Ciudad de Morelia, prueban que los eventos geológicos manifestados en superficie tienen continuidad al menos a 8 m. de profundidad, con la seguridad de que pueden extenderse a profundidades mayores. La presencia de estos eventos se manifiesta en las secciones por reflectores inclinados que sugieren planos de falla y por la discontinuidad de reflectores.

El resultado del modelado bidimensional sugiere la geometría del medio y los parámetros eléctricos correspondientes de atenuación α y velocidad v de la señal electromagnética para la zona en donde se efectuó el perfil 1, justificando las observaciones principales. Dado que se puede generalizar la geología de la ciudad de Morelia, los resultados de este modelado permiten confiar en la interpretación realizada en las otras dos secciones obtenidas. Confiando que estos resultados permitan tomar precauciones de los riesgos que presentan las fallas geológicas y dar posibles soluciones al problema en los sitios de mayor afectación por estos eventos.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se analizaron los aspectos teóricos y prácticos de la técnica de prospección geofísica de georadar. El análisis de la teoría que rige el método tuvo como objetivo conocer los diferentes fenómenos que intervienen durante la propagación de la señal electromagnética en el medio de transmisión. Enfocándonos principalmente en los parámetros electromagnéticos (constante dieléctrica, conductividad y permeabilidad magnética) que controlan los efectos de transmisión, reflexión, refracción y atenuación de una señal que viaja en el medio de propagación. También se analizó la importancia que representa la frecuencia de operación del radar, haciendo notar que este parámetro es uno de los que controla la profundidad de penetración de la señal electromagnética.

Es importante mencionar que algunas limitaciones que presenta un estudio con radar son los suelos con alto contenido de humedad, en general en medios con conductividad mayor a 0.1 mohms/m, limitando la penetración de la señal en el terreno. Esta situación se presenta espacialmente 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 de alta tensión, que ocasionan saturación en el receptor del radar. Por otro lado, la técnica presenta una gran variedad de aplicaciones como se hizo mención en la parte de Introducción (sección 1.2), además de que la técnica es no destructiva para el medio ambiente y con una gran rapidez de operación.

Las aplicaciones presentadas en el capítulo 5 son un ejemplo de los alcances que tiene la técnica de radar. El objetivo de las dos primeras aplicaciones fue determinar

estructuras de interés arqueológico, o estructuras hechas por el hombre en épocas pasadas, delimitando los sitios en donde se registren anomalías representativas para realizar futuras excavaciones. Las dos zonas presentan diferentes condiciones geológicas. En la Campana, Colima la zona estaba afectada por material sedimentario; mientras que en la zona de Cuicuilco, Cd. de México, está afectada por derrames basálticos.

En la zona de La Campana los radargramas registraron anomalías en diversos puntos de la zona de estudio, interpretándose como la respuesta de elementos constructivos, estimando que estarían edificados con piedra de río, unidas con cementante limo-arcilloso. Esto se estableció en base a edificaciones recién excavadas en la zona. La interpretación quedó satisfactoriamente comprobada con los resultados de las excavaciones 8 meses después de haber realizado el trabajo de campo. Al correlacionar la interpretación de las secciones con los resultados de las excavaciones se comprobó que las anomalías fueron originadas por rampas de edificios de 4 a 5 m. de altura y de algunos pisos de las terrazas de estas estructuras arquitectónicas. Todo el complejo arquitectónico descubierto se representa en la figura 5.8b.

En esta zona se recomienda efectuar sondeos posteriores en las zonas donde no se han realizado excavaciones, para dar localizaciones de anomalías que pudieran representar estructuras arquitectónicas de valor arqueológico. También es conveniente efectuar un estudio de reconocimiento con frecuencias de 100 a 450 MHz sobre las construcciones descubiertas por las excavaciones para identificar elementos de pequeñas dimensiones de valor arqueológico.

La interpretación de los siete sondeos realizados en la zona arqueológica de Cuicuilco se apoyó con la información de una columna estratigráfica de la zona y en una cavidad con dirección perpendicular al perfil 1, con características bien identificadas. En esta zona también se realizó un sondeo de velocidades para determinar la velocidad de propagación de la señal electromagnética en el terreno y un modelado bidimensional basado en el sistema de trazado de rayos.

Los resultados de la interpretación establecen la presencia de estructuras al norte y sur-oriente de la pirámide. En el caso de la zona sur-oriente se registraron dos estructuras, una con dirección N-S y otra con dirección E-W, que pudieran corresponder a un mismo complejo constructivo, cubiertos por el espesor del derrame basáltico. La localización de estas anomalías permite identificar sitios para futuros trabajo de prospección utilizando diferentes frecuencias con radar para delimitar zonas de excavación y recuperar los vestigios arqueológicos sepultados por la actividad del volcán Xitli hace 2000 años, lo que representará un ahorro de tiempo y costos para este fin.

La tercera aplicación presentada en este trabajo se efectuó en la ciudad de Morelia, Michoacán. Se realizó con la finalidad de determinar la continuidad de fallas geológicas en los primeros 10 m. de profundidad, detectadas en la superficie del terreno. A diferencia de las dos aplicaciones anteriores estos eventos son fenómenos de origen natural que han causado daños en las estructuras civiles dentro de la ciudad. La interpretación de los sondeos se apoyó en un modelado bidimensional, para establecer la geometría del medio en estudio. Concluyendo que los eventos que se registran en la superficie del terreno son eventos que se extienden a más de 8 m. de profundidad y que es importante tomar medidas de precaución en las zonas donde se registran.

Se recomienda efectuar estudios posteriores en los mismos sitios donde se obtuvieron los datos que se presentan en este trabajo, con la finalidad de evaluar la evolución de las fallas geológicas. Así como realizar sondeos en sitios probables de continuidad de los eventos en la superficie del terreno, esto ayudaría considerar zonas de riesgo en donde se manifieste la continuidad de las fallas en el subsuelo.

En general se establece que los datos obtenidos en los estudios analizados en este trabajo demuestran que la técnica de prospección geofísica de georadar puede considerarse como una disciplina complementaria en diversas áreas de investigación o prospección. Siendo una herramienta que proporciona resultados en tiempos relativamente cortos.

BIBLIOGRAFIA

- Annan, A. P., Davis, J. L., Gendzwill, D., 1988, **Radar sounding in potash mines, Saskatchewan, Canada**, *Geophysics*, vol. 53, No. 12, p. 1556-1564.
- Annan, A. P. and Davis, J. L., 1976, **Impulse radar sounding in permafrost**, *radio Sci.*, vol. 11; p. 383-394.
- Annan A. P., 1996, **Ground Penetrating Radar, Workshop Notes**, Sensors and Software.
- Arreygue, E. y Garduño, M., V., 1997, **Las fallas geológicas y sísmicas de la Ciudad de Morelia y su influencia en la planificación de su territorio**, Depto. de Geología y Mineralogía IIM-UMSNH, Morelia, Michoacán.
- 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, p. 177-193.
- 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, p. 1211-1221.
- 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, 437-466.
- Cai, J., McMechan, G. A., 1995, **Ray-based syntetic of biestatic ground-penetrating radar profiles**, *Geophysics*, vol. 60, no. 1, p. 87-96.
- Cantos, F. J., 1973, **Tratado de Geofísica Aplicada**, LITOPRINT, Depósitos Legal: M-4379/978., Capítulo 4.
- Cummings, B., 1933, **Cuicuilco and the Archaic Culture of México**, *University of Arizona Bulletin, Social Science Bulletin*, vol. IV, No. 8., p 1-56
- Davis, J. L. and Annan, A. P., 1989, **Ground-Penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy**, *Geophysical Prosp.*, vol. 37, p. 531-551.
- Doolite, J. A. and Asmussen, L. E., 1992, **Ten years of applications of ground penetrating radar by the United States Department of Agriculture. Proc. IV Int. Conf.**

- Ground Penetrating Radar**, June 8-13, 1992, Rovaniemi, Finland, Geol. Surv. Finl. Spec. Pap., 16; 139-147.
- Fisher, E., Mc. Mecham, G. A., Annan, P., Cosway, S. W., 1992, **Examples of Reverse-Time Migration of Single-channel, Ground Penetrating Radar Profiles**, vol. 57, No. 4, p. 577-586.
- Fisher, E., Mc. Mecham, G. A. and Annan, A. P., 1992, **Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data**. Geophysics, vol. 57; p. 495-504.
- Goodman, D., 1994, **Groud-penetrating radar simulation in engineering and archaeology**, Geophysics, vol. 59, No. 2, p. 224-232.
- Greaves, J. R., Lesmes, J. D., Mo Lee J., Toksöz N., 1996, **Velocity Variations and Water Content Estimated from Multi-offset, Ground Penetrating Radar**, Geophysics, vol. 61, No. 3, p. 683-695.
- Hollyday, D., Resnick, R., 1982, **Física, 2ª parte**, Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V., México, 353-356.
- Lorenzo, H., Hernández, M. C., 1996, **La Alambra y Numancia: Dos ejemplos de utilización del Geo-Radar en España**, Actes du college de périgueux, 1995, Suplement à la Revue d' Archéometrie, p. 19 - 23.
- Lorenzo, H., C., 1994, **Prospección Geofísica de alta resolución mediante Geo-radar. Aplicación a Obras Civiles**, Tesis Doctoral, Departamento de Física de la Tierra, Astronimia y Astrofísica 1, Univeresidad Complutense de Madrid, 198 p.
- Luhr, J. F., y Carmichael, I. S. E., 1990, **Geology of Volcán de Colima**, Boletín 107, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- May, B. T., Hron, F., 1978, **Syntetic seismic sections of typical petroleum traps**, Geophysics, vol. 43, No. 6, p. 1119-1147.
- Nathan, I. J., Bastos, P. A., 1992, **Electromagnetics and Calculation of fields**, Departament of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana - Champaign Urbana, IL 61801-2991, USA.
- Pastrana, A., 1996, **Estratigrafía de la rampa este: corte y pozo**.
- Pérez C. M., Pastrana C. A., Gómez R. H., 1995, **Investigación y Conservación de Cuiculco**, DICPA-INAH.

- Rodríguez, E. S. R., 1991, **Geología del volcán de Colima, Estados de Jalisco y Colima**, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la UNAM.
- Robin, G. de Q., Evans, S., and Bailey, J. T., 1969, **Interpretation of radio echo sounding in polar ice sheets**; Philosophical Transaction of the Royal Society A, vol. 265, No. 1166, p. 437-505.
- Sauck, W. A., Desmond, L. G., 1997, **Applying Ground Penetrating Radar to Archaeology**, A short course for Archaeologists, Geophysicists and other Scientists.
- Sauck, W. A., Desmond, L. G., Callaghan, J. M., Muehlhausen, J., Zschomler, K., 1984, **A Reconnaissance GPR Investigation al Chichén Itzá, Yucatán, México**, Environmental and Geophysical Society, p 864-881.
- Sensors and Software Inc., 1993, **Pulse EKKO, Basic Plotting & Editing Software User's Guide**, Technical Manual, Versión 4.0, Mississauga, Ontario Canada.
- Smith, S.G., 1977, **A reflection profile modelling system**, Geophysics J. R. Ast. Soc., vol. 49, p. 723-737.
- Stanislav, M., 1984, **Introduction to Applied Geophysics**, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht / Boston / Lancaster, p. 457-465.
- 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, p. 125-141.
- Telford, W. M., Sheriff, R. E.; Geldart, L. P. and Keys, D. A., 1994, **Applied Geophysics**, Cambridge University Press., Capitulo 4.
- Tillard, S., Jean-Claude Dubois, 1995, **Analysis of Gpr data: Wave propagation velocity determination**, Journal of Applied Geophysics, vol. 33, p. 77-91.
- Turner, G., 1994, **Subsurface Radar Propagation Deconvolution**, Geophysics, vol. 59, No. 2, p. 215-223.
- Ulriksen, C. P., 1982, **Application of impulse radar to civil engineering**; Ph. D. Thesis, Department of Engineering Geology, Lund University of Technology, 175 p.
- Vaughan, C. J., 1986, **Ground Penetrating Radar Surveys Used in Archaeological Investigations**, Geophysics, vol. 51, No. 3, p. 595-604.