

***METODOLOGÍA PARA LA CAPTURA Y ANÁLISIS DE ONDAS SÍSMICAS
ARTIFICIALES A PARTIR DE HOLOGRAMAS ACÚSTICOS PARA LA
DETECCIÓN DE OBJETOS RELACIONADOS CON MINAS ANTI-PERSONA***

ALFREDO OCAMPO HURTADO



**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL
MEDELLÍN, COLOMBIA
NOVIEMBRE, 2014**

***METODOLOGÍA PARA LA CAPTURA Y ANÁLISIS DE ONDAS SÍSMICAS
ARTIFICIALES A PARTIR DE HOLOGRAMAS ACÚSTICOS PARA LA
DETECCIÓN DE OBJETOS RELACIONADOS CON MINAS ANTI-PERSONA***

ALFREDO OCAMPO HURTADO

Tesis para optar el título de Magister en Automatización y Control Industrial

Directores

Prof., PhD, MSc, Jorge Alberto Jaramillo Garzón.

Prof., PhD, MSc. Edilson Delgado Trejos



**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL
MEDELLÍN, COLOMBIA
NOVIEMBRE 2014**

METHODOLOGY FOR THE CAPTURE AND ANALYSIS OF ARTIFICIAL SEISMIC WAVES FROM ACOUSTIC HOLOGRAMS FOR THE DETECTION OF OBJECTS ASSOCIATED TO LANDMINES

ALFREDO OCAMPO HURTADO

A thesis submitted to the postgraduate program “Masters in Industrial Control and Automation” in partial fulfillment of the requirements for the Master degree

Thesis Supervisor

Prof., MSc, PhD. Jorge Alberto Jaramillo Garzón.

Prof., MSc, PhD. Edilson Delgado Trejos



**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
MASTERS IN INDUSTRIAL CONTROL AND AUTOMATION
MEDELLÍN, COLOMBIA**

NOVIEMBRE, 2014

Dedicatoria

La presente investigación está dirigida a todas aquellas personas que con sus trabajos, de manera silenciosa hacen una pequeña contribución científica al problema social de la guerra que se vive día a día en nuestro País.

Agradecimientos

Al Doctor Edilson Delgado Trejos, quien dirigió con sabiduría y paciencia mis esfuerzos iniciales por cristalizar este trabajo.

Al Doctor Jorge Alberto Jaramillo Garzón, mi director de tesis, por sus orientaciones precisas y pacientes.

Al MSc. Delio Aristizábal, por su paciencia y valiosos aportes en el desarrollo del presente trabajo.

Al matemático Pablo Villegas, por su desinteresado y valioso aporte.

Al Ingeniero Industrial Felipe Ortiz Clavijo, por su amistad y colaboración.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	9
GLOSARIO DE TÉRMINOS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	13
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
JUSTIFICACIÓN	18
PROBLEMA	19
HIPÓTESIS	21
OBJETIVOS	21
<i>Objetivo General</i>	21
<i>Objetivos Específicos</i>	21
ORGANIZACIÓN DEL MANUSCRITO	22
CAPÍTULO 1 – ESTADO DEL ARTE	23
1.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	23
1.1.1 <i>Revisión de los principales métodos de prospección</i>	23
1.1.2 <i>Método de Radar de Penetración Terrestre (R.P.T)</i>	24
1.2 MÉTODOS DE PROSPECCIÓN.....	31
1.2.1 <i>Método Gravimétrico</i>	31
1.2.2 <i>Método Magnético</i>	32
1.2.3 <i>Método Eléctrico</i>	32
1.2.4 <i>Método Sismo –Acústico</i>	33
1.3 REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE DETECCIÓN SUPERFICIAL CON SENSORES NO ACOPLADOS EN LA ARENA	35
1.4 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE DETECCIÓN SUPERFICIAL DE SENSORES NO ACOPLADOS EN LA ARENA.	36
CAPÍTULO 2 – PRELIMINARES TEÓRICOS	38
2.1 TEORÍA DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL PROTOTIPO.....	38
2.1.1 <i>Comportamiento de micrófonos omnidireccionales</i>	39
2.1.2 <i>Características de los micrófonos condensadores y consolas BHERINGER</i>	40
2.1.3 <i>Resonador de Helmholtz</i>	41

2.2 GENERACIÓN DE LAS ONDAS DE RAYLEIGH.....	45
2.3 TRANSFORMADA DE HILBERT.....	50
2.4 COMPORTAMIENTO DE LA ONDA SUPERFICIAL DE RAYLEIGH.....	53
CAPITULO 3 – MARCO EXPERIMENTAL.....	57
3.1 METODOLOGÍA PROPUESTA.....	57
3.2 CELDA DE TIERRA.....	59
3.3 AUTOMATIZACIÓN DESPLAZAMIENTOS X, Y.....	60
3.4 MICRÓFONOS.....	61
3.5 SEÑAL SENSADA EN CADA UNO DE LOS MICRÓFONOS.....	61
3.6 OBTENCIÓN DE ECOGRAFÍA.....	63
3.7 ENVOLVENTES DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT.....	64
3.8 TRANSFORMADA CONTOURLET.....	64
3.9 DESCRIPCIÓN DE ACOPLAMIENTO DE LOS DIFERENTES EQUIPOS.....	65
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS.....	68
4.1 ANÁLISIS DE RUIDO DURANTE LAS DIFERENTES PROSPECCIONES.....	69
4.2 ANÁLISIS DE RUIDO CON MICRÓFONOS CON COPAS EN LOS EXTREMOS.....	70
4.3 ANÁLISIS DE SUELOS CON MICRÓFONOS CON COPAS EN LOS EXTREMOS Y FILTRO SIN OBJETO ENTERRADO.....	71
4.4 ANÁLISIS DE SUELOS CON MICRÓFONOS CON COPAS EN LOS EXTREMOS Y FILTRO CON OBJETO ENTERRADO.....	72
4.5 ADQUISICIÓN DE SEÑALES.....	74
4.5.1 Adquisición de señales E_{m1n} y E_{m2n}	74
4.5.2 Adquisición de señales $Z = E_{m1}[n] - E_{m2}[n]$	75
4.6 RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DE ECOGRAFÍA.....	76
4.7 TRANSFORMADA CONTOURLET.....	78
4.8 ANÁLISIS DE MAYORES INTENSIDADES DENTRO DEL TERRENO.....	79
4.9 ECOGRAFÍAS OBTENIDAS POR EL MÉTODO DEL MÁXIMO VALOR A PARTIR DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT.....	80
4.10 DISCUSIÓN.....	82
CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	86
5.1 CONCLUSIONES POR OBJETIVO.....	86
5.2 TRABAJO FUTURO.....	88
5.3 IMPACTOS.....	88
REFERENCIAS.....	89
APÉNDICE.....	96

Índice de Figuras

FIGURA 1. CUADRO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE PROSPECCIÓN.	24
FIGURA 2. EQUIPOS DE REMOCIÓN DE MINAS EN COLOMBIA.....	25
FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PROSPECCIÓN R.P.T.....	25
FIGURA 4. PRINCIPIO BÁSICO DEL FENÓMENO SISMO-ACÚSTICO	34
FIGURA 5. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL SISTEMA SISMO ACÚSTICO.....	34
FIGURA 6. RESUMEN DE SISTEMAS DE DETECCIÓN SUPERFICIAL DE SENSORES NO ACOPLADOS EN LA ARENA.	35
FIGURA 7. DESPIECE DE LAS PARTES DE UN PARLANTE.....	39
FIGURA 8. COMPORTAMIENTOS POLARES DE DIFERENTES MICRÓFONOS	40
FIGURA 9. RESONADOR DE HELMHOLTZ.....	42
FIGURA 10. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL RESONADOR DE HELMHOLTZ	44
FIGURA 11. PROSPECCIÓN DE LOS DIFERENTES SUBSECTORES POR EL RESONADOR DE HELMHOLTZ	47
FIGURA 12. PUNTO FOCALIZADO DE LA SEÑAL DE ESTIMULACIÓN CHIRP	47
FIGURA 13. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL RESONADOR DE HELMHOLTZ	48
FIGURA 14. COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS EN LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS.....	49
FIGURA 15. COMPORTAMIENTO DISPERSIVO DE LA ONDA DE RAYLEIGH.	50
FIGURA 16. ENVOLVENTE DE LA TRASFORMADA DE HILBERT	52
FIGURA 17. PLANOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS DE <i>RAYLEIGH</i>	54
FIGURA 18. COMPORTAMIENTO DE LA PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE <i>RAYLEIGH</i>	55
FIGURA 19. ATENUACIÓN DE LA ONDA DE RAYLEIGH.	55
FIGURA 20. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA LOCALIZACIÓN DE MINAS ENTERRADAS.	58
FIGURA 21. CELDA DE TIERRA PARA LA OBTENCIÓN DE ECOGRAFÍAS DE LOCALIZACIÓN DE LAS MINAS ENTERRADAS.	60
FIGURA 22. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA CELDA DE TIERRA PARA OBTENCIÓN DE ECOGRAFÍAS DE LA LOCALIZACIÓN DE MINAS ENTERRADAS	65
FIGURA 23. DIAGRAMA DEL CABLEADO DE LOS DIFERENTES EQUIPOS EN EL PROTOTIPO.....	66

FIGURA 25. ANÁLISIS DE RUIDO CON MICRÓFONOS EXPUESTOS.....	69
FIGURA 26. ANÁLISIS DE RUIDO CON COPAS DE GOMA EN LOS EXTREMOS DE LOS MICRÓFONOS.	70
FIGURA 27. ANÁLISIS DE RUIDO CON COPAS DE GOMA EN LOS EXTREMOS DE LOS MICRÓFONOS Y FILTRO SIN OBJETO ENTERRADO.....	71
FIGURA 28. ANÁLISIS DE RUIDO CON COPAS DE GOMA EN LOS EXTREMOS DE LOS MICRÓFONOS Y FILTRO CON OBJETO ENTERRADO.	73
FIGURA 29. SEÑALES $E_{m0n} = j = 16n = xm0jn$	74
FIGURA 30. ANÁLISIS DE LAS SEÑALES E_{m1n} Y E_{m2n}	75
FIGURA 31. DIFERENCIA DE DOS MICRÓFONOS E_{m1n} Y E_{m2n}	75
FIGURA 32. ECOGRAFÍA OBTENIDA POR LA TRANSFORMADA DE HILBERT	76
FIGURA 33. AMPLIACIÓN DE LA ECOGRAFÍA POR LAS ENVOLVENTES DE HILBERT.	77
FIGURA 34. IMÁGENES REVERBERACIONES OBTENIDAS POR LA TRANSFORMADA CONTOURLET	78
FIGURA 35. RELACIÓN OBJETO MÁXIMAS INTENSIDADES.....	80
FIGURA 36. ECOGRAFÍA OBTENIDA CON EL MÁXIMO VALOR DE LAS TRANSFORMADAS DE HILBERT.	81
FIGURA 37. ECOGRAFÍA OBTENIDA DE UN SOLO ELEMENTO ENTERRADO.....	81
FIGURA 38. ECOGRAFÍA DE VARIOS ELEMENTOS ENTERRADOS.....	82

Glosario de términos

Arcillas: es un tipo de tierra de color gris con un alto contenido de óxidos metálicos y presencia de agua.

Amplificador lineal: es un dispositivo electrónico de amplificación de sonido que convierte las señales eléctricas en sonoras, a través de un parlante.

Consola: es un elemento electrónico que permite la recepción, multiplexación y ecualización de diferentes señales acústicas por un micrófono.

Chirp: es una señal sinusoidal cuya función aumenta o disminuye con respecto al tiempo; adquiere un espectro ensanchado en su comportamiento en el dominio del tiempo.

Compliancia Acústica (m^5/N): se denomina compliancia a la capacidad de dureza de la suspensión en la rigidez de la araña ubicada en la base del cono de un parlante. Se mide en metros a la quinta potencia, entre Newton (m^5/N). La compliancia es inversamente proporcional a la dureza de la suspensión.

Elasticidad: es la propiedad de deformación que tiene un material sometido a una fuerza deformadora y la tendencia de recuperar su forma original cuando dicha fuerza cesa.

Inertancia Acústica (Kg/m^4): se denomina inertancia a la masa mecánica de todo el conjunto móvil o, sea, su peso. Dentro de este parámetro se incluye el peso del cono, de la bobina y de las suspensiones. Se mide en kilogramos entre metros a la cuarta potencia.

Limo o legamos: materiales constitutivos del suelo, de consistencia intermedia entre la arena y la arcilla.

Loésicos: son sedimentos eólicos conformados por extensiones de limos que son parte constitutiva del suelo.

Material elástico: propiedad de un material de recuperar su forma original, después de haber sido expuesto a una fuerza deformadora

Material Plástico: es la propiedad que tiene un material de no recuperar su forma después de ser deformado por fuerzas externas.

Medio: es un conjunto de elementos osciladores capaces de entrar en vibración por la acción de una fuerza.

Medio no dispersivo: es el fenómeno físico donde las ondas se propagan a la misma velocidad, independientemente de la frecuencia y la amplitud.

Medio homogéneo: es el fenómeno físico de propagación del sonido esféricamente, es decir, en todas las direcciones, generando el campo sonoro.

Longitud de onda: se define como la velocidad de onda multiplicada por la frecuencia.

Micrófono: es un elemento transductor que permite convertir de forma análoga los sonidos, en señales eléctricas.

Onda mecánica: es un tipo de onda que requiere de un medio para propagarse.

Onda electromagnética: es un tipo de onda que no requiere de un elemento material como medio de propagación.

Propagación lineal: es el fenómeno físico de propagación de ondas sonoras (sonidos) en el cual se da la propagación, sin afección mutua.

Lista de símbolos

ρ_0	Presión acústica sonora
p_{ref}	Presión de referencia adoptada internacionalmente
s_{pl}	Nivel de presión sonora
$s_e[n]$	Señal Chirp de excitación
$m_0[n]$	Señal captada por 6 micrófonos
$m_1[n]$	Señal captada por el micrófono 1
$m_2[n]$	Señal captada por el micrófono 2
z	Señal diferencia entre los micrófonos m_1 y m_2
$h_f[n]$	Respuesta al impulso de la fuente de perturbación
$s_0[n]$	Respuesta de los impulsos del medio de propagación (tierra)
s_0 y s_d	Respuestas impulsivas del medio de propagación
$w[n]$	Ruido
$s_r[n]$	Respuesta impulsiva de reflectores presentes en el medio
$\Delta_f = f_{max} - f_{min}$	Diferencia entre el valor máximo y mínimo de las frecuencias de la señal Chirp.
t	Período
x	Distancia horizontal
z	Distancia vertical
M_a	Inertancia acústica en $(K/m)^4$
C_{ae}	Compliancia acústica equivalente en m^5/N
V_e	Volumen equivalente entre cavidades de volúmenes v_1 y v_2

Resumen

En la presente tesis se plantea una metodología para la captura y análisis del comportamiento de las señales sismo-acústicas generadas artificialmente sobre un terreno, en el cual se encuentran objetos enterrados. Para esto, se construyó un prototipo de laboratorio que permite generar señales de estimulación de tipo *Chirp* y analizar la respuesta obtenida a través de diferentes herramientas de procesamiento de señales que proporcionan imágenes, mostrando las inclusiones del terreno. El principal objetivo de esta metodología es la búsqueda de un sistema de prospección superficial con micrófonos como sensores de presión no acoplados al suelo, conservando una mínima distancia entre el suelo y el sensor.

La señal de estimulación *Chirp* es generada por MATLAB, y amplificada por un parlante de 200 vatios y un resonador de *Helmholtz*. Esta señal genera una presión acústica sobre la superficie del terreno, provocando pequeños sismos en cada uno de los diferentes subsectores analizados. Los sismos producen cuatro tipos de ondas mecánicas -denominadas ondas de cuerpo: ondas primarias (p), ondas secundarias (s) y las ondas superficiales denominadas ondas de *Rayleigh* y *Love*. Para el presente trabajo se realiza la recepción de la onda superficial de *Rayleigh*, usando micrófonos omnidireccionales ECM 8000 BHERINGER, como sensores de presión.

Los diferentes comportamientos del terreno fueron grabados en un formato WAV que luego, con herramientas de procesamiento de señales, permitió la obtención de la ecografía del objeto enterrado.

Los resultados de las prospecciones fueron las *Dispersiones resonantes* de los elementos no pertenecientes al terreno; las ecografías fueron obtenidas por las respuestas de los diferentes subsectores adyacentes prospectados en línea recta de 10 posiciones por cada una de las 10 trazas a recorrer.

El principal resultado en el presente trabajo es una metodología que permite obtener imágenes de objetos enterrados en suelos de tipo arcilloso y poco homogéneos. Este resultado demuestra la aplicabilidad del método en el caso real Colombiano.

Abstract

This thesis proposes a method for capturing and analyzing the behavior of artificial seismic-acoustic signals on a field, with buried objects. For this purpose, a laboratory prototype was built, in order to generate stimulation signals and analyze the response by applying different tools signal processing tools that allows obtaining images where the inclusions on the ground can be detected.

The stimulation signal is generated using MATLAB and amplified with a speaker of 200W and a Helmholtz resonator. This signal generates an acoustic pressure on the surface of the ground, causing small earthquakes in each of the different sub-sectors analyzed. Earthquakes produce four types of mechanical waves called primary waves (P), secondary waves (S) and surface waves (Rayleigh and Love). For this study, the sensing of the Rayleigh surface wave is performed using omnidirectional microphones ECM 8000 BHERINGER as pressure sensors.

The methodology provides resonant dispersions of the buried elements. The scans are obtained by the responses of different adjacent sub-sectors prospected straight 10 positions for each of the 10 traces to go, for a total 100 positions. The information obtained was logically arranged in a matrix and then the method of the envelopes of the Hilbert transform and the maximum value theorem is applied to obtain the ultrasound field.

The main finding of the present study is a methodology for obtaining images of buried objects on non-homogeneous clay. This result demonstrates the applicability of the method on Colombian soils.

Introducción

En Colombia, de 32 departamentos 31 tienen minas antipersonales sin remover, siendo Antioquia la región más afectada. Dichas minas matan, hieren y desplazan personas, civiles y militares. Es de anotar que el estado hace grandes esfuerzos para acabar con las minas existentes en los distintos departamentos.

Los sistemas de prospección sismo-acústicos revisados en la literatura para este trabajo se han realizado en suelos arenosos, con grandes avances en la localización de minas antipersona en la guerra del golfo pérsico, donde el mayor avance fue la detección de minas antitanque (Sabatier, 2003; Teixido et al, 2000). De acuerdo con lo anterior, el presente estudio desarrolla una metodología para la localización de inclusiones en suelos clasificadas como limos arcillosos (Santamarina et al, 2001) y loésicas saturadas, características de la composición de los suelos de la cordillera central de la región Andina de Colombia (Lopera & Milisavljevic, 2008). Uno de los mayores retos para la prospección en este tipo de suelos es la falta de tecnología propia para determinar de una manera científica los comportamientos de sus elementos constitutivos.

En el presente estudio se plantea el desarrollo de una metodología en la que las respuestas de los diferentes transductores no dependan de la composición intrínseca del terreno (Scalon, 2003) y permitan, por el principio de ondas mecánicas, la localización de objetos enterrados mediante la técnica de sismo-acústica (Chen, 2007). Este fenómeno físico se logra con la estimulación del terreno, a través del resonador de *Helmholtz*, destacándose la utilización de un parlante como fuente amplificadora de la señal de excitación *Chirp*.

En el extremo del resonador se encuentra adherido un tubo que permite obtener un comportamiento de las variaciones de frecuencias, determinadas por la relación de volúmenes entre la caja réflex y el volumen del tubo (Molina, 2008). Esto hace que el resonador de *Helmholtz* se comporte como un filtro que elimina la banda cuya impedancia acústica tiende a cero en la frecuencia de resonancia; como resultado de este procedimiento, se obtiene una

señal distorsionada que permite la reverberación (Molina, 2009) de los diferentes elementos enterrados, por efectos de las frecuencias emitidas por la señal de estimulación *Chirp*.

La estimulación *Chirp* es una señal sinusoidal cuya función aumenta o disminuye con respecto al tiempo, adquiriendo un espectro ensanchado en su comportamiento. Con base en lo anterior, se desarrolló un prototipo de laboratorio para la obtención de ecografías y, por medio de la automatización con el método de control numérico por computador (CNC), se produjo una serie de desplazamientos en forma vertical y horizontal, con el fin de realizar prospecciones en línea recta de los diferentes subsectores; así, se obtuvo una familia de trazas que contiene información de diferentes subsectores del terreno. Después de obtener 10 trazas de información de cien subsectores subyacentes, se llevaron a una matriz en forma ordenada y lógica, y agrupadas en familias de diez trazas; luego, mediante procesamiento de señales, se obtuvieron las ecografías. El procesamiento de señales se efectuó por medio de consolas de sonido para estudios de grabación y MATLAB; para la recepción de datos, se utilizaron micrófonos omnidireccionales como sensores de presión, no acoplados a la superficie del terreno (Bulleti et al, 2010).

Cabe aclarar que este trabajo tiene intenciones exclusivamente académicas y no constituye ningún riesgo de tipo social, ambiental o jurídico.

Justificación

Las minas antipersona -MAP- matan y hieren a aproximadamente 1.000 colombianos cada año. La comunidad internacional ha emprendido diversas iniciativas, buscando la erradicación de este tipo de armas. La Vicepresidencia de la República coordina la Comisión Intersectorial Nacional para la acción contra minas antipersona, un grupo compuesto por 14 instituciones estatales que han desarrollado un programa especial para abordar este tema. Así mismo, el Gobierno Central ha aprobado un número significativo de leyes, entre ellas la 1421 del 2010, y procedimientos relacionados con las MAP que se han adherido a la normativa internacional (convención de Ottawa, 2010), la cual prohíbe la producción, el almacenamiento y el uso de este tipo de armas.

Las MAP más comunes en Colombia son las de onda explosiva, conocidas como las ‘quebra patas’, que explotan al ser pisadas y son producidas en serie, a costos muy bajos, por lo que son las más utilizadas. Otra característica de este tipo de MAP es que son de fragmentación y en la mayoría de casos están ubicadas a unos cuantos centímetros de la superficie de la tierra.

Los esfuerzos de desminado que buscan reducir el riesgo al que se enfrentan los militares y civiles, son llevados a cabo por el ejército colombiano, mediante lentos y costosos procesos de detección y remoción, mientras que los grupos al margen de la ley siguen colocando MAP todos los días.

Una de las principales actividades a las que están obligados los estados firmantes de la Convención de Ottawa, entre ellos Colombia, es la remoción de todos los campos minados de su territorio, lo que representa la única opción segura para detener el número creciente de víctimas y para devolver la tranquilidad a sus habitantes. La Convención de Ottawa de 2010, en el artículo quinto, exige a los estados signatarios que destruyan las MAP “sembradas” en territorio de su jurisdicción, a más tardar diez años después de firmado el acuerdo. En el caso colombiano, la ratificación se realizó el 1 de marzo de 2000; por tanto, la remoción de los campos minados debió ser completada el 1 de marzo de 2010. Sin embargo, ese artículo permite que los países que no puedan remover los campos minados en el tiempo establecido

presenten una solicitud a la reunión de estados, con el objeto de obtener una prórroga por diez años adicionales, para completar la labor en mención. De esta forma, la fecha límite para el desminado en Colombia es el 1 de marzo de 2020.

Problema

En la actualidad, en Colombia se remueven minas antipersona utilizando técnicas electromagnéticas y de inducción de potencial eléctrico, en todo tipo de suelos (Orellana, 1974; Orellana, 1982; Annan, 1992; Daniels, 2004). Pero diversos estudios han indicado que estas técnicas presentan 40% de inexactitud en la información sensada en los suelos de la región Antioqueña, clasificados como limosos-arcillosos y loésicos saturados. Su contenido orgánico es menor al 1% y su color amarillento se debe a la presencia de óxidos mixtos que contienen partículas de hierro fino (*Fe* de 5,2% y el 8,8%) (Lopera & Milisavljevic, 2007), lo que afecta la medida por la alta conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y permisibilidad dieléctrica en la toma de datos, dada la falta de atenuación en las diferentes prospecciones (Santamarina, 2001; 2002). Sumado a lo anterior, se encuentran elementos metálicos no pertenecientes al terreno, arrojados por los actores del conflicto; en estas condiciones, no se puede diferenciar una mina metálica de un residuo (Lopera & Milisavljevic, 2007).

La técnica de remoción de MAP denominada *inducción de potencial eléctrico*, tiene como principio la atenuación de un voltaje inducido en el terreno prospectado; requiere enterrar electrodos, lo cual podría activar una mina. El comportamiento del terreno es semejante a un conductor, debido a la presencia de elementos metálicos. Para realizar el análisis de la atenuación, se mide la diferencia de potencial en la emisión y recepción de voltaje inducido, el cual, finalmente, no presenta ninguna diferencia de potencial de voltaje por la presencia de elementos metálicos naturales en el terreno, lo que afecta las respuestas de variables como la permitividad, la permeabilidad, la permisibilidad (características intrínsecas del terreno).

El presente estudio implementará un prototipo de laboratorio celda de tierra, para el desarrollo de una metodología basada en el procesamiento de señales (Cannellii & ottavi, 1989; Smith et

al, 1997; Frazier et al, 2000; Van Der Veen et al, 2001; Mamou,2002; Inazaki, 2004) que permitirá la localización de minas antipersona; para la recepción y el almacenamiento de las prospecciones de los diferentes subsectores analizados en el terreno, se utilizarán consolas de estudios de grabación, micrófonos como sensores de presión (Eargle, 2005) y MATLAB, y, así, generar el pulso de estimulación Chirp (Bull et al, 1998; Gutowski et al, 2002), con el cual se obtienen las respuestas espectrales de superficie del terreno (Roger & Don, 1993; Hsu,1997; Scott et al, 2000; Sabatier & Xian, 2001; Younis,2002), donde la energía que absorbe o refleja presenta una dependencia en el contenido de agua del suelo -de manera que cuanto mayor sea el contenido de agua (Biot,1956), mayor será la reflectividad-, generando con esto las ondas subsónicas superficiales denominadas Rayleigh (Hickey & Sabatier, 1997; Carcione, 2001), las cuales viajan a una velocidad aproximada del 90 al 95% de la velocidad de una onda transversal en el mismo material.

La oposición que presentan las partículas para no dejarse desplazar por el sonido se denomina *impedancia acústica* (Annan, 1992; Rinaldi et al, 1997; Rinaldi et al 2000; Rinaldi, 2002) y el análisis entre dos materiales de diferentes impedancias acústicas es denominado *interface acústica*. Cuando el sonido llega a una interface acústica con una incidencia normal, la cantidad de energía reflejada es diferente a la cantidad de energía transmitida (Sabatier, et al, 1986; Sabatier & Xiang, 2003; Sheriff et al, 1995; Molina, 2004; Molina, 2007; Molina, 2008; Molina, 2009); luego, por herramientas de procesamiento de señales, se obtienen las ecografías de los objetos enterrados.

Hipótesis

Mediante un sistema de barrido de mediciones, el análisis de la información obtenida a partir de señales acústicas tomadas a una distancia mínima del suelo (usando micrófonos comercialmente disponibles) y la utilización de una técnica que permitirá realizar un filtrado de señales sismo-acústicas, podrán obtenerse las ondas superficiales de *Rayleigh* y, con estas, se construirán imágenes a través ecografías.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una metodología para la captura y análisis de señales acústicas (tomadas sobre terrenos planos expuestos a ondas sismo- acústicas generadas artificialmente), para la detección de objetos enterrados relacionados con minas anti-persona, de manera que dicha metodología permita obtener las ondas superficiales de *Rayleigh* y -por procesamiento de señales- lograr las ecografías de los objetos enterrados.

Objetivos Específicos

Desarrollar un sistema de adquisición de señales sismo-acústicas que permita realizar un barrido sobre terrenos planos, expuestos a perturbaciones artificiales.

Desarrollar una estrategia de procesamiento de señales para extraer la información presente en las señales sismo-acústicas capturadas, como producto de la presencia de objetos enterrados superficialmente en el terreno analizado.

Desarrollar una metodología para la obtención de imágenes y filtrado, a través de la Transformada *Contourlet* o herramientas afines, de forma que se resalten los objetos enterrados.

Organización del manuscrito

En el capítulo 1 se presentan las principales filosofías de prospección de objetos enterrados en la arena y se proporciona una breve explicación de los diferentes trabajos encontrados en el estado del arte. Asimismo, se exponen los sistemas de prospección más importantes actualmente.

En el capítulo 2 se presenta la teoría de los elementos constitutivos del prototipo de laboratorio y la ampliación de las teorías del comportamiento de las ondas sísmicas superficiales, como la onda de *Rayleigh*, la transformada de las envolventes de *Hilbert* y la transformada *Contourlet*

En el capítulo 3 se exponen los diferentes pasos de la metodología, como la construcción del prototipo. Igualmente, se muestra la conexión de las consolas y micrófonos para la realización de las pruebas en la tierra, con lo cual, finalmente, se obtiene la información necesaria para las diferentes bases de datos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología empleada: por medio de herramientas de procesamiento de señales, se obtienen las ecografías de inclusiones superficiales del terreno.

CAPÍTULO 1 – Estado del Arte

1.1 Revisión del estado del arte

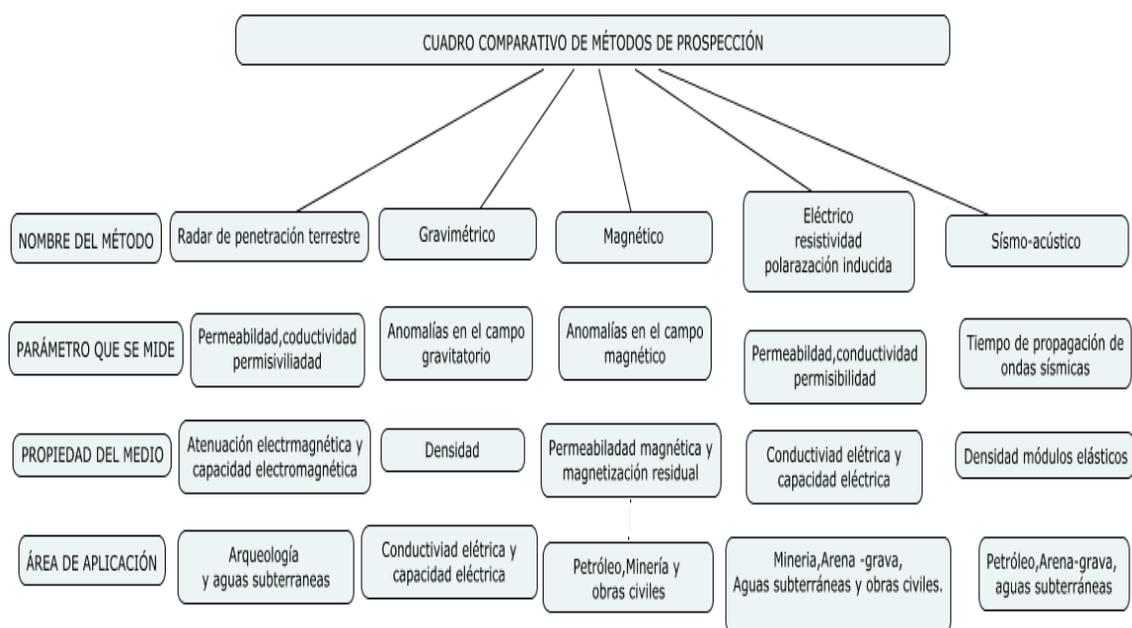
1.1.1 Revisión de los principales métodos de prospección

Uno de los principales objetivos del método de la sismica de prospección en la superficie terrestre es el estudio del movimiento elástico- homogéneo de las propiedades de las ondas mecánicas y del comportamiento en la corteza terrestre (Feng & Johnson, 1983; Gómez, 1994; Kanamori & Anderson, 1977; Lee, 2003). Por medio del análisis diferencial de densidades se obtiene, entonces, información útil para hacer una prospección de la ubicación exacta de los objetos enterrados. Para tal efecto, se utilizan micrófonos como sensores de presión que permiten determinar las diferentes magnitudes físicas (Scanlon, 2003) y sus comportamientos superficiales (con o sin objetos enterrados), al igual que los efectos producidos por la señal de estimulación: ondas de presión denominadas Primarias, las cuales poseen dos modos de propagación; el primero, se llama modo longitudinal rápido de propagación (MLR) u onda (P) y el segundo, se llama modo longitudinal lento de propagación (MLL) u ondas de segunda especie (P1). Los trabajos de Stoll (1980) y de Sabatier & Xiang (2001) demuestran que a partir de P1 se generan las ondas superficiales de Rayleigh, las cuales tienen un desplazamiento de forma elíptica en la superficie que disminuye exponencialmente con la profundidad.

El principio del presente trabajo se basa en las teorías desarrolladas por Biot (1956-1,2) y Stoll (1980). El parámetro fundamental a medir es la impedancia de las ondas sonoras producidas por diferencias de densidad, intensidad de permisibilidad, permeabilidad y circulación del sonido, a través del material (Lee & Wade, 1986; Mosher & Simpkin, 1999; Chen, 2007). El fenómeno de propagación de las ondas en dos medios diferentes y los argumentos que sustentan el concepto de acoplamiento sismo-acústico, se utilizan para explicar las diferentes interacciones existentes entre las interfaces aire-suelo (Sabatier et al, 1986 a, b) y la propagación de las ondas superficiales de Rayleigh - como respuesta del suelo- (Gregg et al, 2006).

Los sistemas de prospección utilizados en la actualidad requieren dispositivos transductores que posibiliten la toma de información, los cuales pueden ser acoplados o no acoplados, enterrados o no, en la zona de interés (Srdanovic et al, 2013); así como equipos de recepción y procesamiento de las diferentes señales captadas. También se requieren programas matemáticos que permitan hacer un análisis más profundo del comportamiento de las trazas obtenidas en la etapa de recepción. En la figura 1 se presenta un cuadro resumen comparativo de los diferentes métodos de prospección evidenciados en la literatura revisada.

Figura 1. Cuadro comparativo de métodos de prospección.



1.1.2 Método de Radar de Penetración Terrestre (R.P.T)

El ejército colombiano dispone actualmente de equipos para la inducción electromagnética, para la prospección de terrenos minados, como es el detector de metales (Lopera & Milisavljevic, 2007) y equipos anti-impacto para el cuerpo. En la figura 2 se presentan los equipos de remoción con que cuenta el grupo antiexplosivos MARTE de Colombia, para la remoción de minas en suelos Antioqueños.

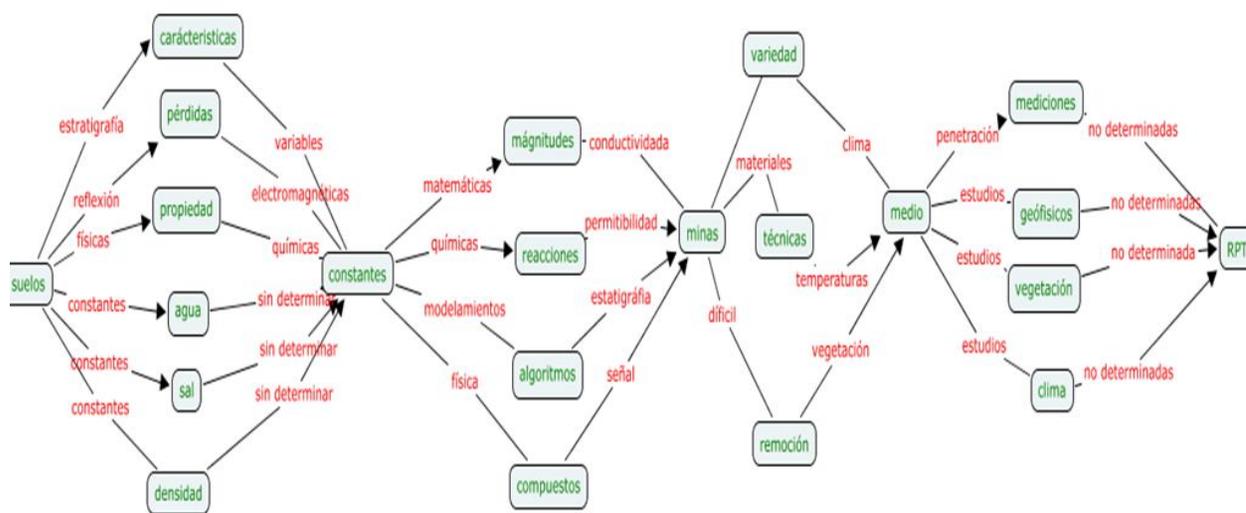
Figura 2. Equipos de remoción de minas en Colombia.



Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Grupo de remoción de explosivos MARTE.

El sistema de prospección por radar de penetración terrestre es ideal para la localización de minas antipersonales; su principio básico es la emisión de una señal electromagnética y la recepción de la atenuación de ésta. En los terrenos de la región Andina el sistema en mención presenta una serie de fallas en el sensado, las cuales se deben a la composición del terreno y a diferentes variables no resueltas para la utilización de esta técnica de remoción. Dichas variables son descritas en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de flujo de la prospección R.P.T



En la Figura 3 se presenta un análisis del proceso de emisión y recepción por la técnica de inducción electromagnético RPT (Radar de Penetración Terrestre). A continuación se mencionan algunos autores y sus respectivos trabajos relacionados con el tema:

- Biot (1956 a, b). Estudio sobre las teorías de propagación de ondas mecánicas en medios porosos, en el cual tiene presencia de un fluido simple (fluido viscoso, compresible, con flujo de tipo Poiseuille). La porosidad de un material logra que estos se intercomunicuen, lo que permite que el fluido se mueva libremente.
- Lopera & Milisavljevic (2007). Investigación sobre prospección de minas antipersona por los métodos de inducción de ondas electromagnéticas, a través de un RPT. Con este método, los resultados de la prospección tienen un margen de error hasta de 40% de inexactitud, porque en la prospección no hay una atenuación del terreno -por ser éste un buen conductor- debido a la presencia de elementos metálicos (de manera natural) o de desechos metálicos en zonas de conflicto, lo que no permite distinguirlos de una mina. Algunas zonas contienen suelos ferruginosos y loésicos; es decir, con alta concentración de hierro que afecta la sensibilidad de los métodos de inducción electromagnética.

En Colombia, las minas antipersona son fabricadas de forma improvisada, con diferentes materiales, entre ellos el plástico, los cuáles no pueden ser detectados mediante métodos de prospección electromagnética. Además, los suelos se clasifican en la región Antioqueña como franco- limos arcillosos, arenas, y loésicos saturados. Sus contenidos orgánicos son menores al 1% y su color amarillento se debe a la presencia de óxidos mixtos que contienen partículas de hierro fino (su porcentaje de Fe es de 5,2% y 8,8%, respectivamente).

- Rogers & Don (1993). Análisis de un tubo resonante con un arreglo de 2 micrófonos en el perímetro del diámetro, para la adquisición de datos, y de una señal de estimulación, para generar el fenómeno sismo-acústico con la presencia de agua y oxígeno en la arena. Las diferentes interacciones de sonido son almacenadas en un PC (computador personal) y luego, por procesamiento de señales, se trasladan a una matriz -de forma precisa y

ordenada- para, después, asignarles una escala de colores y, finalmente, obtener imágenes ecográficas.

- Xiang & Sabatier (2000). Análisis sobre la vibración superficial por la prospección sismo-acústica, cuyo procedimiento es la medición usando geófonos, entendidos como sensores de velocidad, cuya tensión de salida es proporcional a la velocidad de la vibración de la superficie donde se encuentra el objeto enterrado. Los geófonos utilizados son de la referencia L-4 de la marca Mark Products Inc, cilindro con un diámetro de $7,6\text{cm}$ y una altura de 13cm . En la primera etapa del programa de detección de minas se usan geófonos acoplados en contacto directo con la superficie. Esta clase de geófono muestra alta sensibilidad y cubre un rango de frecuencias entre 50Hz y 300Hz . Para la realización de pruebas se utilizan minas de metal o minas antitanque, enterradas unos centímetros por debajo de la superficie de diferentes tipos de suelo, incluidos grava y arena del fondo del río.
- Scott et al (2000). Modelo experimental a escala de laboratorio, desarrollado y probado en diferentes sistemas que utilizan un generador artificial de alta frecuencia de ondas sísmicas sin contacto, para detectar minas enterradas. Su principio de funcionamiento es el desplazamiento de las ondas muy cerca de la ubicación de una mina y de esta manera, medir la absorción y la difusión geométrica de las ondas sísmicas. Mediante una excitación sísmica, el sistema presenta la diferencia entre las propiedades elásticas del terreno y el suelo circundante de una mina; esta diferencia de las interacciones de la onda sísmica en las inmediaciones de una mina, provoca una proyección de las imágenes de una variedad de minas antitanques y antipersona, diferenciadas de objetos naturales que implican desorden, tales como piedras y palos o vegetación superficial.
- Xiang & Sabatier (2000). Trabajo sobre un sistema de detección de minas terrestres por el método de prospección sismo-acústica, desarrollando un láser de exploración avanzada del tipo Doppler Vibrómetro. Las minas antipersona enterradas en el subsuelo inducen distintos cambios de vibración sísmica de la superficie. Un láser Doppler Vibrómetro detecta la anomalía acústicamente inducida por sísmica de reflexión, con movimientos en la superficie del terreno sin contacto directo y un control remoto de monitoreo Este sistema

presenta ventajas significativas sobre sensores de detección de metales convencionales, debido a su capacidad para la detección de metal y, particularmente, de minas de plástico. Un desarrollo anterior del sistema mediante un rayo láser en movimiento continuo y un desplazamiento de la plataforma, también indican gran potencial para aumentar la velocidad de detección.

- Sabatier & Xiang (2003). Investigación basada en la detección de minas por el método de detección de acústica, a sísmica (A/S) que se define como la capacidad del sonido para penetrar el suelo mediante la utilización de una señal de excitación, permitiendo analizar la relación de fase entre el sonido y el aire, para recoger las señales en estéreo en los primeros 0,5m del suelo, por la naturaleza porosa de la tierra erosionada, resultando en vibraciones acústicas que son sensibles a la presencia de minas enterradas. Este fenómeno se ha denominado "acople sismo-acústico" en la literatura científica. Se utilizan altavoces estándar como fuente de sonido y Vibrómetros Doppler Láser disponibles (LDV) comercialmente, para medir las vibraciones del objeto enterrado. El uso de la acústica en el aire para la detección de minas determina nuevos fenómenos que hoy se emplean en la detección acústica de minas enterradas, lograda por un contraste de alta vibración entre los suelos y las minas. También la mina es un objeto no poroso que es detectable por contraste entre el suelo y el oxígeno.
- Frazier et al (2000). Estudio sobre la variabilidad de la tierra y las falsas alarmas de una mina, analizadas en una matriz para describir la interacción visco elástica de las capas de la tierra. El método de resonancia, en combinación con un método de búsqueda global, se utiliza para estimar un conjunto de parámetros para un modelo de terreno de tres capas visco elásticas, que presentaron una buena concordancia entre los datos experimentales y los simulados, con efecto de un tamaño finito de la fuente de sonido en la transmisión sismo-acústica. El análisis del efecto de variabilidad de las propiedades de la tierra sobre los sistemas sismo-acústicos se realiza por planos, midiendo los parámetros de las capas del terreno en un amplio rango de frecuencias, en todos los ángulos de incidencia. Se presentan los resultados de las mediciones de la función de transferencia sismo acústica al aire libre, y una correlación entre la magnitud acústica y la diferencia entre dos sensores

que permiten obtener la función en ciertas gamas de frecuencia y determinar el contenido de humedad en la superficie.

- Manolakis et al (2005). Modelo para el procesamiento de señales con una serie de conjuntos de filtros adaptivos que permiten analizar los diferentes comportamientos superficiales y obtener imágenes de los objetos enterrados en la arena; para la recolección se usaron geófonos acoplados y un sensor Barligton que evidenciaron excelentes resultados a la hora de construir imágenes.
- Gregg et al (2006). Localización de minas antipersona, a través de la estimulación de la superficie con un generador de vibraciones, produciendo con éste movimientos superficiales elásticos en dos medios diferentes, lo que provoca pequeños sismos que generan frecuencias subsónicas como la onda superficial de *Rayleigh*, la cual es sesada tiempo después de que el generador de sismos ha cesado; muy cerca de la superficie, por micrófonos omnidireccionales ECM 8000 BHERINGER y por diferentes procesamientos de datos, se obtienen distintas ecografías de los objetos enterrados en la arena. Para una mejor relación señal - ruido, se utilizan copas de goma en los extremos de los micrófonos, con lo cual se logra un punto fijo omnidireccional más focalizado y, con ello, la disminución del ruido ambiental y una mejor recepción de la señales.
- Sabatier et al (1996). Resultados de estudios sismo acústicos con objetos enterrados (trabajo realizado por el National Center for Physical Acoustic -NCPA- en la Universidad de Mississippi, durante el período comprendido entre el 1 de julio de 2002 y el 30 de noviembre de 2007). Por medio de esta investigación se lograron avances significativos en la comprensión de las causas de las falsas alarmas en la utilización de tecnología para detección acústica. Estos avances incluyen una comprensión más clara de los fenómenos subyacentes a la tecnología, y al desarrollo de modelos y técnicas de procesamiento de la señal, para reducir las falsas alarmas.
- Rupitsch et al (2006). Investigación sobre la detección de minas terrestres mediante señales acústicas generadas por ondas en el aire (de baja frecuencia) que son transmitidas

al suelo por encima de una mina enterrada. Determina que la frecuencia en la mina la hará vibrar en resonancia y será detectada por un sistema de escaneo LDV; modelado en diversas condiciones, puede predecir matemáticamente si el sistema sería capaz de detectar con precisión minas terrestres en ambientes más desafiantes. El modelamiento matemático de la detección de minas enterradas implica la propagación de la onda, tanto en presencia como en ausencia de un objeto enterrado. Se calcularon las resonancias en un modelo que relaciona la densidad, la velocidad y la atmósfera, con el contenido de humedad en el aire.

Plantea que una solución analítica de la bicapa que sirve como guía para resolver la ecuación de *Helmholtz*, son las coordenadas polares. Se utiliza una fuente de punto función *delta* para simular un altavoz compacto, a fin de obtener unas complicadas expresiones analíticas para los diferentes resultados. En esta investigación se utiliza MATLAB para resolver numéricamente los valores, y las tramas de presión y velocidad, versus variables espaciales y de frecuencia. En presencia del objeto circular, las resonancias son predichas por técnicas de modelado. La placa superior de la mina enterrada es modelada como un elemento elástico circular, extendida sobre una cavidad cilíndrica en un sustrato rígido, debajo de la capa porosa. La ecuación de *Helmholtz* se resuelve otra vez en la capa atmosférica, mediante coordenadas cilíndricas y un punto de origen; la presión es trazada en función de la frecuencia y las resonancias aparecen como máximas y mínimas.

- Korman et al (2004) Modelo matemático de los diferentes comportamientos de los estudios de movimientos superficiales de la onda de *Rayleigh*, analizada en diferentes subsectores del medio arena; todos los resultados de los cálculos son presentados en este trabajo, donde se realiza una comparación matemática del mejoramiento del modelo propuesto por James Sabatier de la universidad de Mississippi, en el que se realizaron los desarrollos de localización de minas anti-tanque para el ejército de los estados unidos.
- Molina & Rinaldi (2009). Estudio basado en Roger & Don (1993), donde se expone el principio de prospección sismo acústica a través de micrófonos, para obtener la ecografía de los objetos enterrados; para tal fin, se implementa una celda de arena y se muestran los resultados obtenidos con diferentes elementos enterrados (como tubos de plástico a

diferentes profundidades) y la obtención de la ecografía de dos medios, como son la arena seca y la arena húmeda.

- Papandreou et al (2010). Estudio del comportamiento de onda superficial de Rayleigh, a través de diversos medios, con distintas configuraciones de sensores. Aquí se presentan los resultados de diferentes experiencias, relacionadas con técnicas de localización de minas antipersona.
- Srdanovic et al (2012). Propone una metodología para el uso de las ondas sísmicas en la prospección de subsuelos con énfasis en la detección física a baja profundidad, con aplicaciones de transmisiones remotas, con un monitoreo a distancia, la utilización de la técnica de prospección de reflexión y la estimulación del subsuelo, por el método sismo-acústico.

1.2 Métodos de prospección

1.2.1 Método Gravimétrico

Es una prueba geofísica que consiste en la medición de la aceleración de la gravedad en diferentes puntos de un terreno, con el fin de determinar cambios de densidad. Algunos trabajos relacionados con este tema son los de Orellana (1974, 1982); Annan (1992); Daniels et al (2004); Srdanovic (2012). Unos de estos autores presentan métodos de prospección gravimétrica. Uno de los más antiguos está basado en el estudio de la variación del campo gravitatorio terrestre, como producto de la distorsión que sufre el campo gravitatorio ante la comparación de distintas densidades, para la localización de fuentes de agua; se realizan mediciones relativas, a partir de las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar a otro, respecto del campo gravitatorio absoluto de la tierra.

1.2.2 Método Magnético

Es el procedimiento geofísico de generar un campo magnético para detectar partículas metálicas y diamagnéticas dentro del terreno y, así, determinar la superficialidad o profundidad de elementos dentro de la tierra, en ciertos materiales ferrosos. Orellana (1974; 1982), Annan (1992), Daniels (2004), Srdanovic (2012) presentan trabajos cuyos resultados son las diferentes variaciones del campo magnético terrestre, con las cuales se puede determinar la presencia de profundidad o superficialidad de sustancias diamagnéticas o paramagnéticas.

El método magnético es empleado en la prospección petrolífera, para obtener información acerca de la profundidad de las rocas y del basamento. A partir de estos conocimientos, se pueden localizar y definir las áreas de las cuencas sedimentarias ubicadas en el basamento que posiblemente contiene reservas de petróleo. En las exploraciones mineras se aplica el método magnético para la búsqueda directa de minerales paramagnéticos y para la exploración de minerales diamagnéticos asociados con los minerales que ejercen un efecto magnético en la superficie terrestre.

1.2.3 Método Eléctrico

Este método permite medir el diferencial de atenuación de potencial, la resistividad, permisividad y conductividad, de un terreno prospectado. Orellana (1974; 1982), Annan (1992), Daniels (2004), Srdanovic (2012) exponen diversos métodos eléctricos clasificados como inductivos y conductivos, basados en las propiedades electromagnéticas intrínsecas del subsuelo, tales como su composición, observando otras variables como conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y la permisividad dieléctrica. Las diferencias obtenidas por estos métodos radican en las relaciones entre las ondas artificiales de transmisión y el receptor utilizado para captar los comportamientos eléctricos o electromagnéticos del subsuelo.

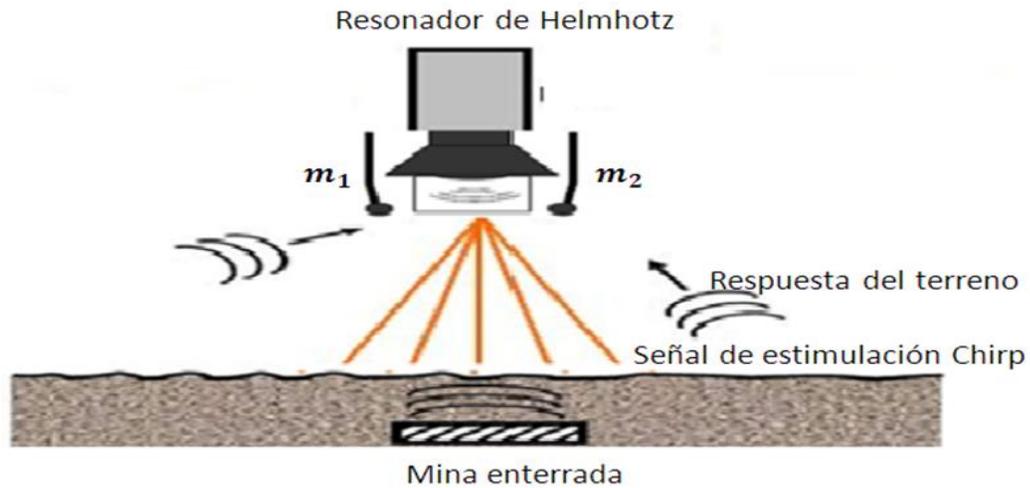
Una de las ventajas de este método es la sencillez de su procesamiento e identificación de los resultados. La principal desventaja es que no funciona en presencia de metales o de cualquier

material dieléctrico; en el primer caso, el terreno se convierte en un conductor que no permite atenuación; y en el segundo, no se trasmite el voltaje porque el terreno se convierte en un aislante.

1.2.4 Método Sismo –Acústico

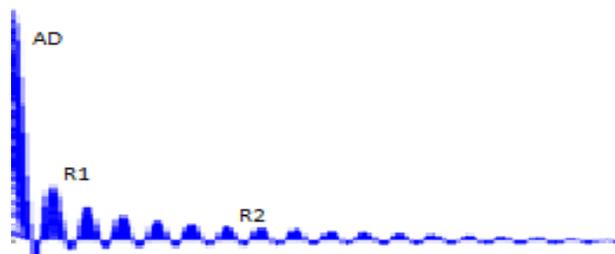
La propagación de ondas superficiales fue establecida en la formulación de Stoll (1980), basada en Biot (1956 a, b). Según ellos, la oscilación resultante depende de la frecuencia y de la amplitud de la señal de estimulación Chirp, así como de las propiedades del suelo. La penetración de las ondas acústicas es mayor si la permeabilidad al paso del aire es elevada (baja impedancia de flujo en la superficie); sucede todo lo contrario, si la permeabilidad al aire es baja (alta impedancia del flujo en la superficie). En ambos casos, la transmisión de la onda acústica es atenuada, dada la naturaleza inelástica disipativa del medio (Stoll, 1980); la porción de energía transmitida al medio corresponde a la onda secundaria, que es la que transporta la mayor cantidad de energía (Sabatier & Xiang, 2001), cuando existe un cambio de impedancia mecánica en el medio (objeto enterrado). Regresa a la superficie y debido a que ésta presenta menor velocidad de propagación que la velocidad del sonido en el aire, la onda se refracta en la interface, afectando el modo de vibración en forma elíptica que disminuye exponencialmente con la longitud de la superficie, siendo ésta el principal componente de la onda de *Rayleigh*.

Figura 4. Principio básico del fenómeno sismo-acústico



En la Figura 4 se presenta el principio básico de una prospección sismo acústica, consistente en la utilización de un parlante como fuente de estimulación, acoplado a una caja réflex en la parte posterior, con un tubo adherido al extremo de la caja resonadora, dotado de ocho micrófonos omnidireccionales en el perímetro del tubo. A todo este conjunto se le denomina resonador de *Helmholtz*; el fenómeno físico consiste en la respuesta del terreno ante una estimulación de una señal que aumenta y/o decrece con el tiempo (*Chirp*) y la forma como estas variaciones toman movimientos elípticos anti horario que se desplazan con una velocidad subsónica en la superficie denominada ondas de *Rayleigh*.

Figura 5. Funcionamiento Básico del sistema sismo acústico



En la Figura 5 se presenta el comportamiento de las señales registradas y grabadas en un formato WAV de MATLAB, con la ayuda de un PC. Donde AD es arribo directo del frente de onda, R1 es la reflexión de interfaz 1 y R2 es interfaz de arribo 2; con un alto contenido de ruido ambiental que apantalla la información de los diferentes comportamientos del terreno.

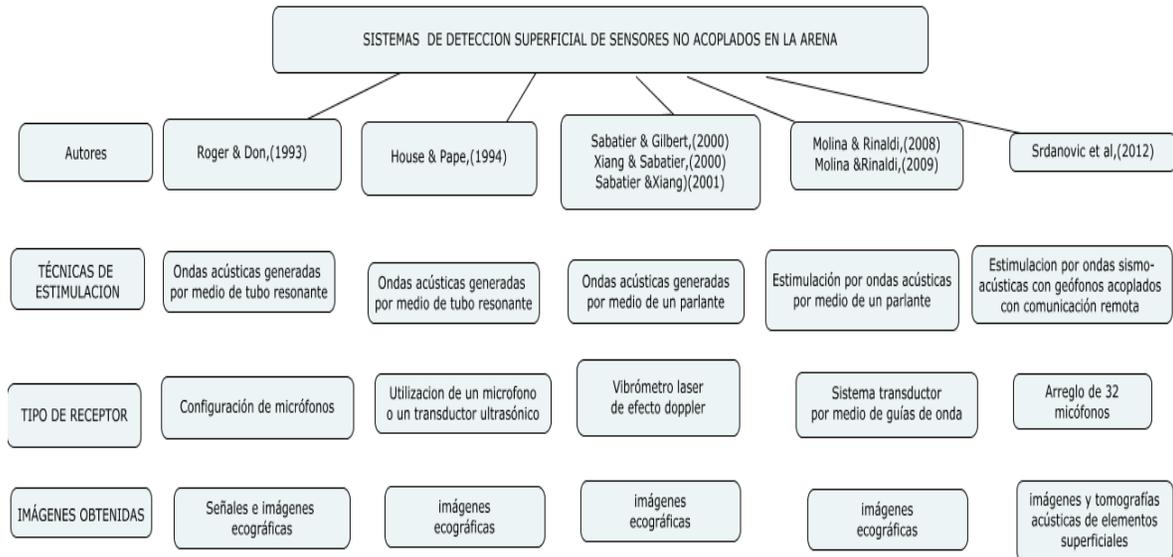
El registro se logra por cada posición adyacente en línea recta (identificada como traza) que contiene 10 posiciones, las cuales se obtienen por la emisión y recepción de una señal de estimulación denominada *Chirp*. Estos registros son capturados por una consola de sonido y luego registrados de una manera ordenada y secuencial, formando una matriz de envolventes de *Hilbert*, denominada ecografía sísmica. Así, se obtiene una imagen de la energía de la onda superficial de Rayleigh que puede caracterizar los materiales enterrados por el comportamiento de éstos ante las frecuencias largas y la caracterización de la tierra a través de las frecuencias bajas.

El método utilizado en el presente trabajo para diferentes prospecciones es la sísmica de reflexión que se fundamenta en medir el tiempo de propagación de las ondas elásticas desde el punto de estimulación (*Chirp*), hasta cualquier distancia de la prospección. Para obtener esta información se utilizaron micrófonos dispuestos en línea recta (llamada línea de presión sísmica), los cuales se comportan como sensores de presión y recogen la señal de los comportamientos del terreno. También se utilizaron equipos de adquisición y procesamiento de la señal registrada. El estímulo genera en el terreno una respuesta de las ondas de presión (P) y las ondas de callamiento (S).

1.3 Revisión de los principales sistemas de detección superficial con sensores no acoplados en la arena

Se realizó un resumen de algunas de las filosofías más importantes en el estado del arte de sistemas de detección de objetos enterrados en la arena. En la Figura 6 se presenta una distribución de las principales filosofías del estado del arte.

Figura 6. Resumen de sistemas de detección superficial de sensores no acoplados en la arena.



1.4 Revisión del estado del arte de sistemas de detección superficial de sensores no acoplados en la arena.

- Smith et al (1997). Nuevo método de prospección en la localización de residuos metálicos en el medio de propagación, obteniendo diferentes interfaces que se pueden adquirir por medio de análisis de ondas superficiales
- Mullins (1977), Dearing (1994). Estudios para determinar el efecto de los componentes de hierro en las propiedades magnéticas. Se mide la susceptibilidad de los suelos seleccionados, mediante un sensor de frecuencia dual Burlington, con el fin de obtener una prospección que permita la identificación de minas antipersona.
- Von Hippel (1995). Investigación sobre los distintos materiales con que se fabrican las minas antipersona, cuyo principal hallazgo es que el material más común es el plástico, como el polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno (PS), goma o baquelita; y su carga principal es una mezcla de diferentes componentes químicos. Su constante dieléctrica se calcula con un promedio de las constantes dieléctricas del material y la constante dieléctrica de la carga principal.

- Linde et al (2006). Análisis de las propiedades electromagnéticas del suelo, como factor principal que influye en el rendimiento de detección. Variables como permisividad dieléctrica relativa, conductividad efectiva y permeabilidad magnética, tienen diferentes enfoques para su detección y es difícil aplicar un método universal de detección, porque su éxito depende de la conformación de cada terreno en forma particular. En general, los métodos se basan en información a priori, ya que los datos de un área afectada por minas antipersona son limitados, dada la imposibilidad de realizar mediciones en el sitio, así como la falta de bases de datos geofísicos que faciliten el estudio de estos terrenos.

Las técnicas actuales de prospección de inclusiones se ven afectadas por la composición intrínseca del suelo. La superficie terrestre tiene características diferentes en su composición de minerales ferrosos; por esta razón, las técnicas actuales empleadas para la prospección se basan en la propagación de ondas electromagnéticas (Annan, 1992; Rinaldi et al, 1997; Rinaldi, 2002).

Otras técnicas se basan en voltaje inducido, tales como las presentadas por Dobrin (1988), US Army Corps of Engineers (1995), Vargas & Ruiz (2004). Estos métodos están limitados por la conductividad del terreno, teniendo una variación de la interfaz entre la inclusión y el suelo circundante. Muchos ambientes presentan suelos conductivos (como son los limos-arcillas) y suelos loésicos saturados (como es el caso de los suelos de la región antioqueña). Otro aspecto limitante es la falta de bases de datos que permitan analizar los comportamientos de las prospecciones.

CAPÍTULO 2 – Preliminares teóricos

2.1 Teoría de los elementos constitutivos del prototipo

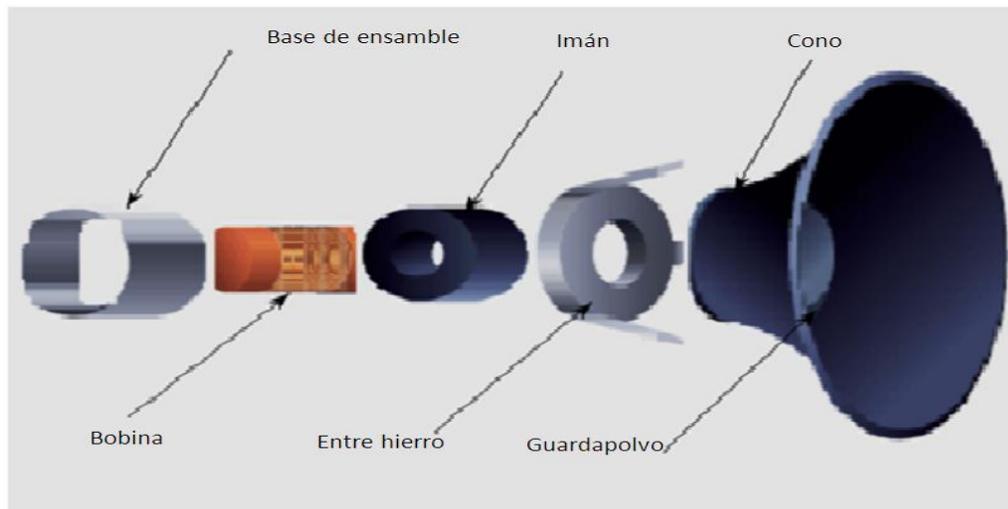
Un altavoz es un transductor que transforma señales eléctricas en mecánicas y son emitidas por un amplificador; su comportamiento es un desplazamiento hacia adelante y hacia atrás que produce presiones y depresiones del aire, lo que genera las ondas sonoras. De acuerdo con la construcción del parlante, a continuación se presenta una clasificación de las diferentes secciones:

Sección magnética: ubicada entre el imán y la bobina móvil. La bobina es afectada por un campo magnético del imán permanente de ferrita, lo cual produce atracción y repulsión de campos magnéticos; la bobina tiene desplazamientos hacia adelante y hacia atrás.

Sección mecánica: ubicada entre el cono y el sistema de suspensión. El cono está unido a la bobina y ésta lo acompaña en su movimiento cuando hay un paso de corriente. De esta manera, el cono vibra.

Sección acústica: ubicada entre el recinto acústico y la tapa de guardapolvo; se encarga de transmitir la energía sonora producida por el cono. En la Figura 9 se presenta un despiece de las partes de un parlante electrodinámico, el cual convierte pulsos eléctricos en sonido.

Figura 7. Despiece de las partes de un parlante



Algunos autores que han estudiado el tema son:

Beranek (1993). Presenta un trabajo sobre la eficiencia con la cual se lleva a cabo la transducción electroacústica en el parlante, también denominada potencia acústica, que viene determinada por la sensibilidad -parámetro que se define como el Nivel de Presión Sonora SPL por sus siglas en inglés- que es capaz de producir un parlante con una potencia eléctrica de $w_0 = 1W$ a una distancia $d_0 = 1m$ del centro del parlante

$$SPL(d_o, w_e) = 20 \log \left(\frac{\rho_0}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

Dónde:

ρ_0 = Presión acústica sonora a la distancia d_0 .

$P_{ref} = 20\mu P$ Presión de referencia adoptada internacionalmente.

SPL = Nivel de presión sonora.

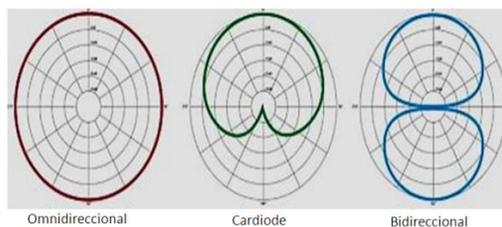
2.1.1 Comportamiento de micrófonos omnidireccionales

Los micrófonos, de acuerdo con su trabajo, se dividen en unidireccionales, omnidireccionales, bidireccionales y cardiodes. Unidireccionales son los que recogen sonidos en una sola dirección; omnidireccionales son los que recogen sonidos en todas las direcciones;

bidireccionales se encargan de recoger información en dos direcciones; y los cardiodes tienen una recepción en forma de corazón.

- **Unidireccionales:** estos tipos de micrófono son muy utilizados para recoger señales que requieren análisis en una sola dirección.
- **Bidireccionales:** captan sonidos por ambos lados de la membrana, lo que permite obtener dos intensidades de audio y registrar dos audios de la misma intensidad.
- **Omnidireccionales:** permiten recoger señales de audio en todas las direcciones.

Figura 8. Comportamiento polar de diferente micrófono.



2.1.2 Características de los micrófonos condensadores y consolas BHERINGER

El micrófono MCM8000 ultra lineal para medición es aplicado perfectamente con diversos amplificadores de consola de sonido, como la BHERINGER 2222 USB para ocho micrófonos. Sus características más importantes son:

- Uniformemente ponderada, cierto patrón omnidireccional.
- Funciona con alimentación panto de 15V a 48 V.
- Uso con cualquier otro analizador.
- Entrada sin transformador ultra-bajo ruido; elimina la distorsión de baja frecuencia.
- Conector pin bañado en oro, para la integridad máxima de la señal.
- Componentes de alta calidad y construcción extremadamente robusta, para una larga vida útil.

Los preamplificadores de micrófono de alimentación *phantom* de última generación son equiparables a preamplificadores de gama alta independientes. Tienen compresores de calidad de estudio, un funcionamiento sencillo con un solo control y LED de control para un sonido

vocal e instrumental profesional. Asimismo, cuentan con ecualizadores neoclásicos de 3 bandas y con banda media semi-paramétrica para un sonido cálido y musical.

Este nuevo procesador de efectos de calidad de estudio cuenta con 16 pre-ajustes editables que influyen en la reverberación; tiene una función de toque y ajuste de los parámetros de usuario almacenables, con una interfaz USB/Audio estéreo integrada, para una conexión directa al PC. Incluye software gratuito de grabación, edición y post-casting de audio, además de 150 complementos de efectos e instrumentos, un controlador de latencia ultra baja y un revolucionario software de producción musical. Sumado a lo anterior, este procesador tiene Inserciones de canales en cada canal mono, para una conexión flexible a equipos externos.

AMPLIFICADOR: Es un dispositivo que sirve para amplificar una señal varias veces y puede funcionar como mono canal para un solo parlante, de manera independiente o estéreo, cuando se activan los dos canales simultáneamente.

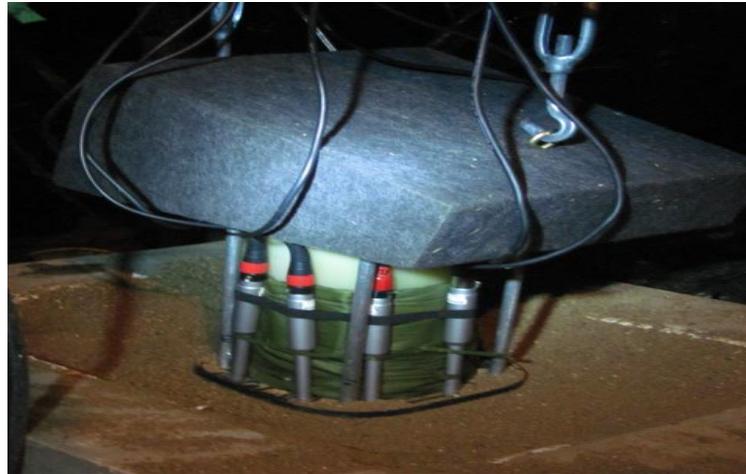
MOTORES DC: Los motores de 12V D.C (corriente directa) tienen engranajes de amplificación de fuerza capaces de mover 6.5 Kg que pesa el resonador de Helmholtz.

TARJETA DE CONTROL DE MOTORES: Es el diseño de un programa en lenguaje C, grabado en un circuito electrónico que permite realizar la interfaz entre el computador y los motores.

2.1.3 Resonador de Helmholtz

El resonador de *Helmholtz* es un dispositivo que consta de una caja réflex y un tubo adherido a su extremo, en cuyo interior se encuentra un parlante de 200 vatios. Todo el conjunto se desplaza automática y linealmente, realizando una prospección lineal de 10 posiciones por cada traza y generando una presión sonora en cada subsector prospectado, con la emisión de una señal de estimulación Chirp que emite una serie de frecuencias de menor a mayor en un intervalo de tiempo; dicha presión acústica se describe en el trabajo presentado por Beranek (1993 a, b) y Kinsler et al., (2000).

Figura 9. Resonador de Helmholtz.



En la Figura 9 se observa el resonador de Helmholtz con ocho micrófonos omnidireccionales de la referencia MCM 8000 de la marca BHERINGER, dispuestos en el perímetro del tubo. Algunos trabajos relacionados con el tema –con sus respectivos autores- se presentan a continuación:

Beranek (1993 a, b). Considera el parlante como un pistón circular plano y demuestra que un parlante con una potencia acústica W , a una distancia d , origina una presión acústica cuadrática:

$$P^2 = W_a * \rho_o * C * \left(\frac{D}{4\pi d^2} + 4 \frac{1 - \alpha}{\alpha S_\alpha} \right) \quad (2)$$

Donde

$\rho_o = 1.18 \text{kg/m}^3$ Corresponde a la densidad del aire

$C = 343 \text{m/s}$ Es la velocidad de propagación de la onda en el aire a 20°C

α = Es el coeficiente de absorción o atenuación acústica

S_α = Es el área total de las superficies aledañas del parlante que participan en la absorción de las ondas acústicas.

D = Es el factor de directividad y define cuánto sonido irradia el parlante, en relación con una fuente omnidireccional de irradiación de la misma energía.

A través de sus dos términos, esta expresión presenta los efectos de radiación directa del parlante como los efectos de reflexión de la onda, la cual se conoce como campo reverberante.

La distancia del centro del parlante que delimita el campo cercano (near-field) con el campo lejano (Fairfield), a partir de la consideración realizada, se denomina distancia de Fresnel y puede determinarse a través de la siguiente expresión (Kinsler et al, 2000).

$$d_f = r \left[\frac{r}{\lambda} - \frac{\lambda}{4r} \right] \quad (3)$$

d_f = Es la distancia de Fresnel

r = Es el radio del parlante

λ = Es la longitud de onda acústica

Si la relación r/λ es lo suficientemente grande para que d_f sea un valor positivo, en caso de que $\lambda = 2r$, la frecuencia de la onda acústica es aproximadamente de 2.6kHz, la densidad $d_f=0$ y el campo cercano es nulo. A partir de dicho valor de frecuencia, existe entonces un campo cercano, cuya máxima distancia de influencia es de aproximadamente $d_f \cong 6 \text{ cm}$, de donde se demuestra que el parlante cumple la siguiente ecuación fundamental.

$$SPL(d, W_e) = 20 \log \left(\frac{P}{P_o} \right) + 20 \log \left(\frac{P_o}{P_{ref}} \right) = SPL(d_o, W_o) + 10 \log \left(\frac{W_e}{W_o} \right) + 10 \log \left[\frac{d_o^2 + \frac{16\pi d_o^2}{D} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha S \alpha} \right)}{1 + \frac{16\pi d_o^2}{D} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha S \alpha} \right)} \right] \quad (4)$$

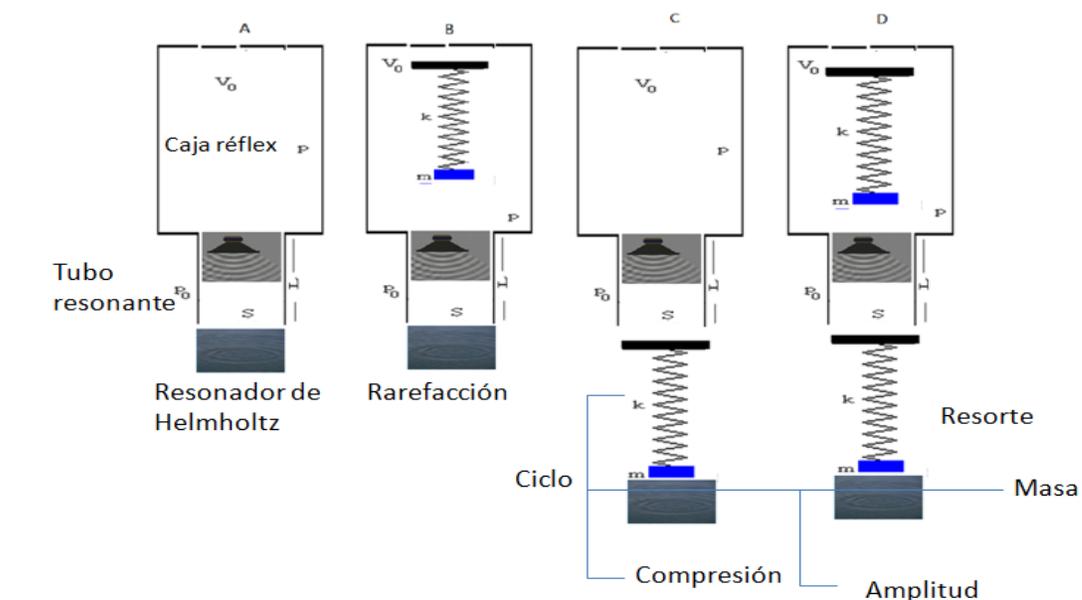
Con esta fórmula se calcula la presión sonora a una distancia d cualquiera, cuando se excita el parlante con una potencia eléctrica W_e .

Representación de la presión acústica en el resonador de Helmholtz

En la interacción entre las ondas acústicas y las ondas elásticas, en cualquier interface, lo que se busca medir es la impedancia de flujo de la superficie prospectada. Distintas investigaciones al respecto (Bass et al, 1980; Atterborough et al, 1986; Feng & Johnson, 1993; Atterborough, 1982; Sabatier et al, 1986); Gómez Álvarez Arenas, 1994) desarrollan técnicas, con las cuales se logran identificar ciertos patrones de onda relacionados con el mencionado fenómeno de interacción.

Sabatier et al (1986) expone un estudio entre las interacciones de las ondas acústicas y las ondas sísmicas (interface aire-suelo), con el objetivo de realizar prospecciones con objetos enterrados superficialmente (acoplamiento sismo-acústico). Las ondas sismo acústicas se propagan en medios elásticos homogéneos, con la ayuda de una señal de perturbación directa e impuesta en la superficie, utilizando una señal de estimulación *Chirp* que perturba la superficie del medio. En la Figura 10 se representa este fenómeno con la descripción del resonador de *Helmholtz*.

Figura 10. Principio de funcionamiento del resonador de Helmholtz



En la Figura 10 se describe la parte constitutiva del resonador de *Helmholtz* (A). Se presenta el fenómeno de rarefacción que consiste en la ausencia del sonido cuando la compresión se encuentra en la caja réflex (B). Se muestra cuándo la compresión del sonido se encuentra en la parte externa produciendo ondas análogas de compresión en la superficie del terreno (C). Se evidencia cuándo existe una presión nula en la caja de réflex, por existir presión tanto en la caja como en el resonador, lo que ocasiona en el terreno una interferencia de las ondas compresionales (D); allí:

V_0 = Volumen de la caja réflex

k = Es la constante del resorte

p = Es la presión sonora

L = Longitud del tubo

P_0 = Presión sonora en el tubo

S = Sección transversal del tubo

M = Comportamiento del aire como una masa sujeta a un resorte.

2.2 Generación de las ondas de Rayleigh

La tierra como modelo de propagación, se considera como medio homogéneo y elástico que al deformarse, jala o empuja partículas vecinas que, a su vez, mueven otras partículas lo, que origina que la deformación se propague a través del medio, el cual absorbe parte de la energía de la fuente de estimulación *Chirp*. Otra parte la refleja presentando un frente de onda de círculos concéntricos que se desplazan alejándose de la fuente de estimulación; se caracteriza por un comportamiento que se desplaza en el tiempo y se ensancha a medida que se propaga por el medio (la forma de la onda se ensancha conforme se aleja de la fuente de perturbación). Si la onda viaja con una velocidad (v), al cabo de un periodo habrá recorrido una distancia llamada longitud de onda

$$\lambda = v * T \quad (5)$$

Donde:

λ = Es la longitud de onda

v = Representa la velocidad de la onda

T = Es el periodo

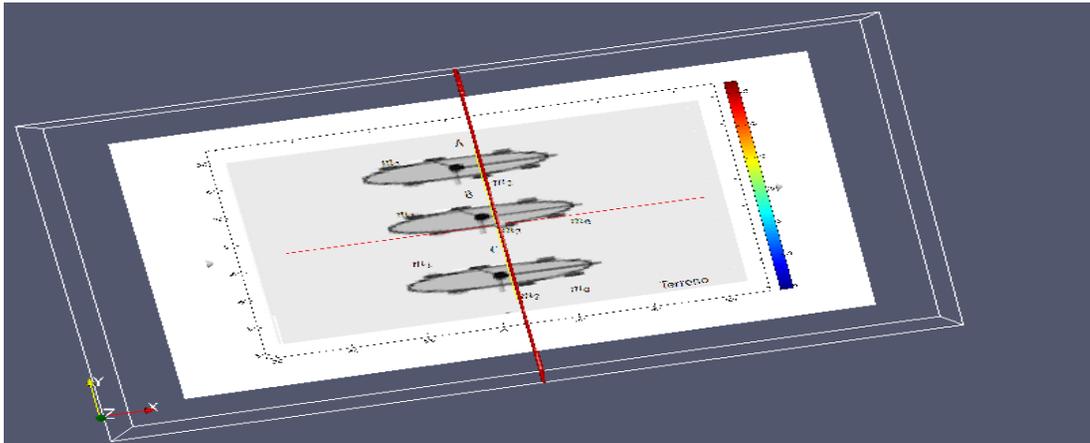
La propagación de las ondas de presión P (primarias) se basa en los trabajos desarrollados por Biot (1956 a, b), donde las oscilaciones del medio dependen de la presencia de aire en los poros, presentando una oscilación resultante que depende de la frecuencia y la amplitud de la señal de estimulación (*Chirp*), y de las propiedades del suelo. Esta teoría sostiene que en las penetraciones, las ondas acústicas dependen de la permeabilidad al paso del aire; si ésta es elevada, es porque existe una baja impedancia de flujo en la superficie; si la permeabilidad del paso del aire es baja, es porque existe una alta impedancia de flujo en la superficie. En ambos casos, la transmisión de las ondas acústicas es atenuada, debido a la naturaleza inelástica disipativa del medio (Stoll, 1980).

Las ondas de presión P en el medio presentan dos comportamientos: modo longitudinal rápido de propagación, MLR u onda primaria P; y Modo longitudinal lento de propagación o MLL u onda de segunda especie de la onda P, también llamada difusa. Adicionalmente, existe una onda denominada S (secundaria), la cual se desplaza en forma transversal, en dirección de la propagación; su velocidad es menor que la de las ondas P, ya que aparece en el terreno después de las primeras. También existe un tipo de ondas denominadas superficiales, las cuales son generadas por las ondas internas; cuando llegan a la superficie, especialmente las MLL transportan la mayor cantidad de energía (Sabatier & Xiang, 2003).

Cuando existe un cambio de impedancia (mina), la onda primaria MLR regresa a la superficie con una menor velocidad que la velocidad del sonido en el aire, mientras que las ondas MLL se refractan en la interface, afectando el modo de vibración en la superficie, siendo esta una componente de las ondas superficiales de Rayleigh. Otra característica observada por Hickey & Sabatier (1997) y Hickey et al., (2000) respecto al modo de propagación MLL, es el comportamiento dispersivo anómalo, dado que su velocidad de propagación (velocidad de fase), como coeficiente de atenuación, varía de forma creciente con la frecuencia. La ley de

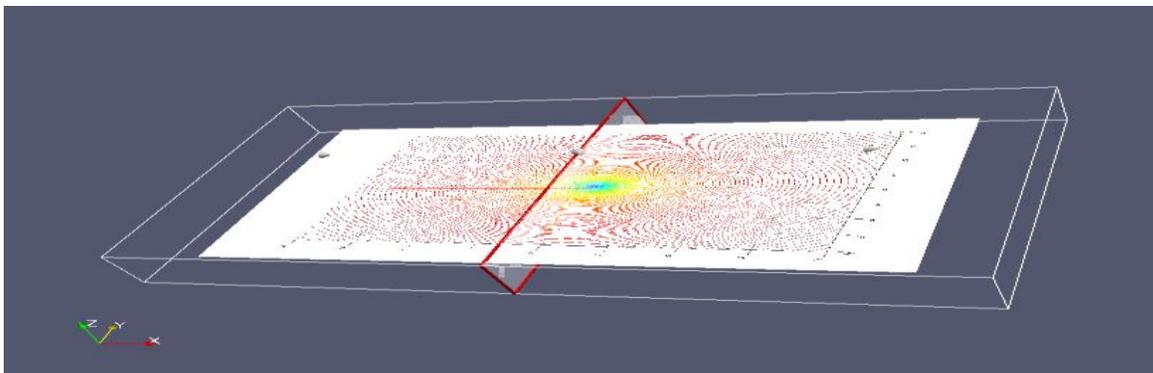
crecimiento en ambos casos es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia con respecto a los valores de magnitud y fase de los pulsos de las ondas registrados.

Figura 11. Proyección de los diferentes subsectores por el resonador de Helmholtz



En la Figura 11 se presentan las diferentes posiciones del resonador de Helmholtz, con un arreglo de ocho micrófonos, de los cuales dos de ellos son independientes Em_1 y Em_2 y participan en la localización del objeto. Los seis micrófonos restantes forman el conjunto denominado Em_0 , encargado de recoger el comportamiento superficial de la onda de la fuente de estimulación.

Figura 12. Punto focalizado de la señal de estimulación Chirp

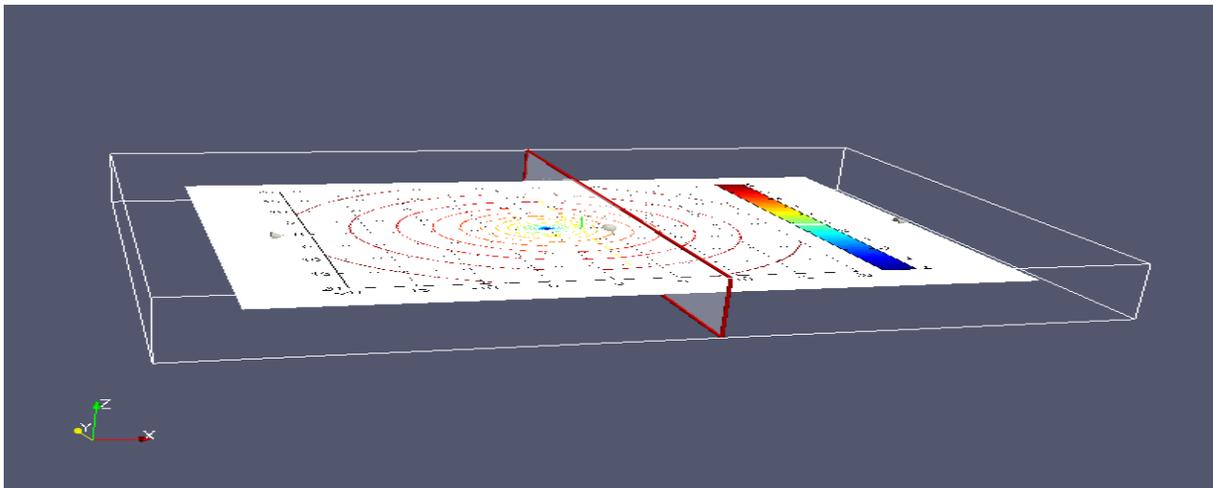


La Figura 12 muestra el comportamiento de la superficie, en presencia de una señal *Chirp* de estimulación: ensanchamiento hacia la derecha, a medida que aumenta el barrido de

frecuencias altas y bajas. El punto de color verde representa el punto fijo de emisión y el comportamiento del terreno de color rojo, ante este estímulo puntual por presión acústica.

Al perturbar el terreno en la superficie (Sabatier & Xiang, 2001) por la técnica de prospección sísmo-acústica, es posible observar dos modos longitudinales de propagación. Un modo longitudinal rápido de propagación o MLR y un modo longitudinal lento de propagación o MLL. Ambos se propagan de manera simultánea en el par fluido sólido, donde la propagación de la onda P en el terreno es recibida por una presión de la columna de aire dentro del tubo del resonador de *Helmholtz*, que proviene de una parlante de 200 vatios; produciendo una onda P relativamente no dispersiva, la cual adquiere una mayor velocidad de propagación con un menor grado de atenuación. Mientras que la onda de cizallamiento(S) o modo lento de propagación MLL es la que transporta la mayor cantidad de energía al encontrar una mina y regresa a la superficie con una menor velocidad de propagación que la velocidad del sonido en el aire. Ésta se refracta en el objeto, afectando el modo de propagación de la superficie donde se generan las ondas superficiales de *Rayleigh* (Daniels et al, 2004), generando una respuesta en el terreno.

Figura 13. Principio de funcionamiento del resonador de Helmholtz

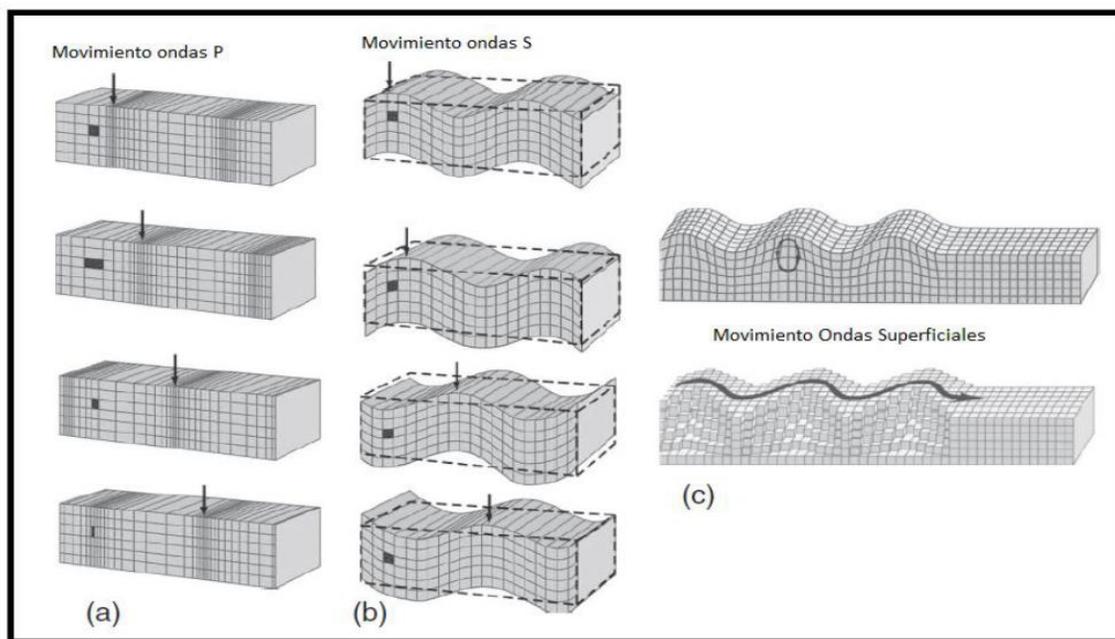


En la Figura 13 se muestra la respuesta del terreno cinco segundos después de que la señal de estimulación Chirp (Dobrin et al, 1976) ha cesado, lo cual ocasiona la manifestación de la onda de *Rayleigh*; el espectro acústico de este comportamiento es clasificado como subsónico

(0 a 20Hz) y sólo puede ser percibido muy cerca de la superficie; para lograr la relación señal ruido SNR en los diferentes puntos focalizaciones, se adhirieron copas de goma en los extremos de los micrófonos.

Las ondas superficiales de *Rayleigh* se desplazan a través de los sólidos isotrópicos, con movimientos longitudinales; dichas ondas tienen un comportamiento elíptico de eje mayor vertical y paralelo a la dirección de propagación. Unas de sus principales características son su baja velocidad, baja frecuencia y gran amplitud que decrece con la profundidad. En un medio estratificado, la velocidad de propagación o velocidad de fase depende de la frecuencia; a este fenómeno físico se le denomina dispersión, en tanto que refiere el cambio de velocidad en función de la longitud de la onda y la frecuencia (Park, 1999).

Figura 14. Comportamiento de las partículas en la propagación de las ondas sísmicas.



Fuente Schock (2001)

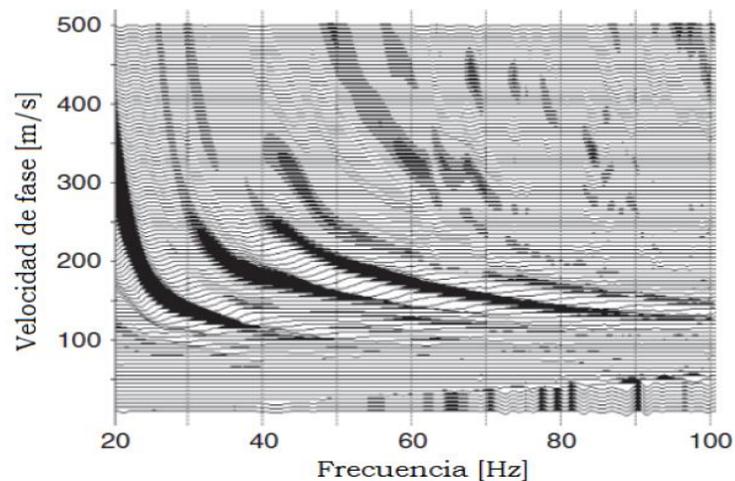
(a) Compresión (b) Cizalla (c) Ondas superficiales, *Rayleigh* y *Love*

En Park et al., (1999) se presenta un trabajo donde la velocidad de un medio estratificado se denomina velocidad de fase de las ondas de *Rayleigh* y depende de la frecuencia. Esta propiedad se conoce con el nombre de dispersión. La dispersión es un concepto fundamental en la propagación de las ondas de *Rayleigh*, en función de la longitud de onda y la frecuencia.

Este fenómeno se manifiesta en un medio homogéneo, en términos de distribución de valores V vs la vertical.

En la Figura 14 se presenta el comportamiento dispersivo de las ondas de *Rayleigh* que puede ser cuantificado en la curva de dispersión y evidencia la velocidad de propagación en función de la frecuencia de la onda; se concluye que la dispersión en el propagante está relacionada con la atenuación del material y las ondas de alta frecuencia se atenúan más rápido que las ondas de baja frecuencia. También los picos de los espectros de frecuencia de la onda viajan de las altas frecuencias. En la medida en que las ondas se propagan por el medio, la forma de la onda se ensancha conforme se aleja de la fuente de perturbación. El comportamiento en frecuencia de las velocidades censada en la superficie cambia ante la presencia de un objeto enterrado, manifestándose una resonancia característica. En la figura 15 el comportamiento se presenta en forma de curvas de dispersión de ondas superficiales de Rayleigh

Figura 15. Comportamiento dispersivo de la onda de Rayleigh.



Fuente: Everett (2013)

2.3 Transformada de Hilbert

La transformada de *Hilbert* es el procedimiento matemático que expresa la relación existente entre la parte real y la parte imaginaria de una función causal o bien entre la fase y la amplitud

de la misma. Oppenheim & Schaffer (1999) presentan un trabajo en el que mediante la transformada, se puede reconstruir la parte real, conocida la parte imaginaria, o viceversa; o bien reconstruir la amplitud de una señal a partir de su fase conocida o viceversa. Con este tratamiento se obtiene la envolvente de los registros (amplitud instantánea), fase y frecuencia instantáneas. La transformada de *Hilbert*, se comporta como un filtro que pasa todo lo que produce un desplazamiento de fase de 90° en la señal de entrada al sistema. Por lo tanto, la respuesta en frecuencia se especifica como:

$$X(\Omega) = Re[X(\Omega) + jIm[X(\Omega)]] \quad (6)$$

Siendo $Re [X (\Omega)]$ y $Im [X (\Omega)]$ la transformada de Fourier de las componentes real e imaginaria de las señales discretas $x[n]$, respectivamente, y partiendo de la ecuación 5 y de las relaciones implícitas de fase entre la parte real e imaginaria de la señal discreta $x[n]$ –con base en su parte imaginaria- y viceversa, se obtiene:

$$x_i[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[n-m]x_r[m] \quad (7)$$

$$x_r[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[n-m]x_i[m] \quad (8)$$

Cumplida, además, la siguiente relación en el dominio de la frecuencia:

$$Im[X(\Omega)] = H(\Omega)Re[x(\Omega)] \quad (9)$$

$$Re[X(\Omega)] = H(\Omega)^{-1}Im[X(\Omega)] = -H(\Omega)Im[X(\Omega)] \quad (10)$$

La transformada de *Hilbert* permite, adicionalmente, obtener los valores instantáneos que representan la señal discreta compleja $x[n]$, es decir, su amplitud, su fase y su frecuencia instantánea; de acuerdo con ello, se obtiene la representación de la señal $x[n]$ en forma polar:

$$x[n] = \hat{a}[n]e^{j\theta[n]} \quad (11)$$

Siendo $\hat{a}[n]$ la amplitud discreta instantánea y $x[n]$ la fase instantánea de la señal, puede obtenerse la amplitud instantánea discreta $\hat{a}[n]$ de la siguiente manera:

$$\hat{a}[n] = \sqrt{x_r^2[n] + x_i^2[n]} \quad (12)$$

Por otro lado, puede obtenerse la fase instantánea discreta, a través de la siguiente expresión:

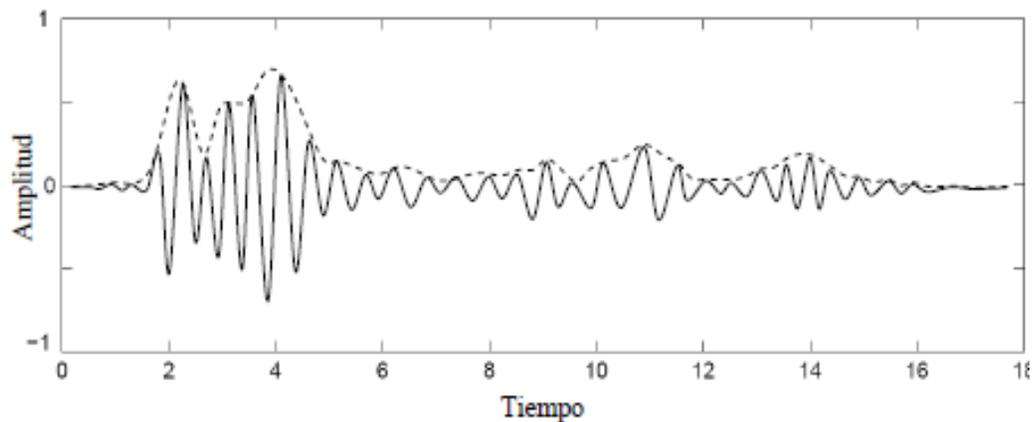
$$\varphi[n] = \tan^{-1} \left(\frac{x_i[n]}{x_r[n]} \right) \quad (13)$$

Mientras la frecuencia instantánea discreta puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\Omega[n] = \frac{1}{2\pi} [\varphi[n] - \varphi[n - 1]] \quad (14)$$

La amplitud instantánea $\hat{a}[n]$ corresponde a la envolvente de la señal $x[n]$. Esta señal proporciona información más exacta de la energía reflejada en cada objeto, en comparación con la forma de onda del registro sísmico, ya que las reflexiones en estos casos están compuestas por varios ciclos y así mismo la frecuencia instantánea es un indicador del tipo de filtrado que está sufriendo la onda sísmica, al propagarse en el medio.

Figura 16. Envolvente de la transformada de *Hilbert*



Fuente: Kirlin et al., (1984).

En la Figura 16 se presenta la forma de la envolvente de *Hilbert* que permite proporcionar una información más exacta acerca de la energía reflejada en cada objeto, en comparación con la forma de onda en un registro sísmico, ya que las reflexiones en estos registros están compuestas normalmente por varios ciclos. Así mismo, la frecuencia instantánea es un indicador del tipo de filtrado que está sufriendo la onda sísmica al propagarse por el medio y al realizar una transformada de *Hilbert*.

2.4 Comportamiento de la onda superficial de Rayleigh

En el fenómeno de propagación de una onda, ésta se manifiesta en la superficie del medio y es conocida como onda superficial u onda de *Rayleigh* (Richard et al, 1970; Das, 1983; Kramer, 1996). Este tipo de ondas surgen de las deformaciones que se producen por corte y compresión en una dirección de propagación de partículas con un comportamiento en forma elíptica y se pueden definir dos funciones potenciales \mathcal{Q} y \mathcal{U} , relacionadas con la compresión-dilatación y la rotación del medio, respectivamente. Se representa:

$$r_x(x, y, z, t) = \frac{\partial \mathcal{Q}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial z} \quad (15)$$

$$r_z(x, y, z, t) = \frac{\partial \mathcal{Q}}{\partial z} + \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial x} \quad (16)$$

Por lo que la deformación volumétrica $\dot{\epsilon} = \epsilon_x - \epsilon_z$ y la rotación en el plano x - z estarán definidas de la siguiente manera:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial r_x}{\partial x} + \frac{\partial r_z}{\partial z} = \nabla^2 \mathcal{Q} \quad (17)$$

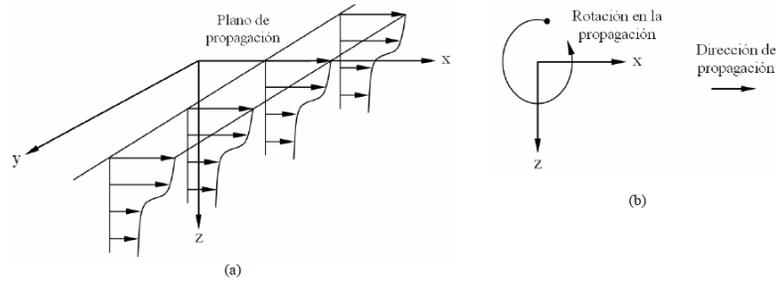
$$2\Omega_y = \frac{\partial r_x}{\partial z} - \frac{\partial r_z}{\partial x} = \nabla^2 \mathcal{U} \quad (18)$$

Sustituyendo estas ecuaciones cinemáticas en las componentes x , z , se obtienen las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno de la onda de *Rayleigh*

$$\frac{\partial^2 \mathcal{Q}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} = v_p^2 \Delta^2 \mathcal{Q} \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 \mathfrak{u}}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} = v_s^2 \Delta^2 \mathfrak{u} \quad (20)$$

Figura 17. Planos de propagación de ondas de *Rayleigh*



Fuente: Richard (1970).

En la Figura 17 se presenta en la parte (a) el plano de propagación de las ondas superficiales de *Rayleigh*; la parte (b) corresponde a la forma de los movimientos de las partículas anti horario, a medida que avanza el frente de compresión.

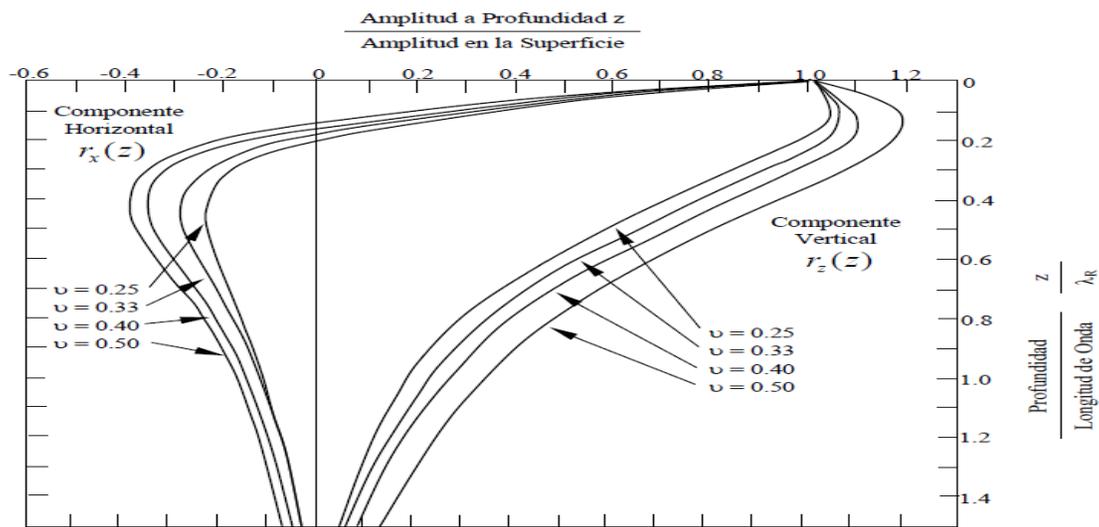
Otras características que pueden distinguirse en una onda de *Rayleigh* es la distribución de amplitudes de los desplazamientos, respecto a los coeficientes de Poisson (Richard et al, 1970; Kramer, 1996). Estas distribuciones de amplitudes pueden ser resueltas por las siguientes expresiones:

$$r_x(x, y, z, t) = A_1 \left(-jk_R e^{-qz} + \frac{2jqsk_R}{s^2 + k_r^2} e^{-sz} \right) e^{j(\omega t - k_R x)} \quad (21)$$

$$r_z(x, y, z, t) = A_1 \left(\frac{2jqsk_R}{s^2 + k_r^2} e^{-sz} - q e^{-qz} \right) e^{j(\omega t - k_R x)} \quad (22)$$

Los términos entre paréntesis describen la variación de amplitud; cada uno de estos componentes, horizontal y vertical en la dirección del eje coordenado z , exhiben un desfase de 90° entre las mismas

Figura 18. Comportamiento de la propagación de la onda de *Rayleigh*.

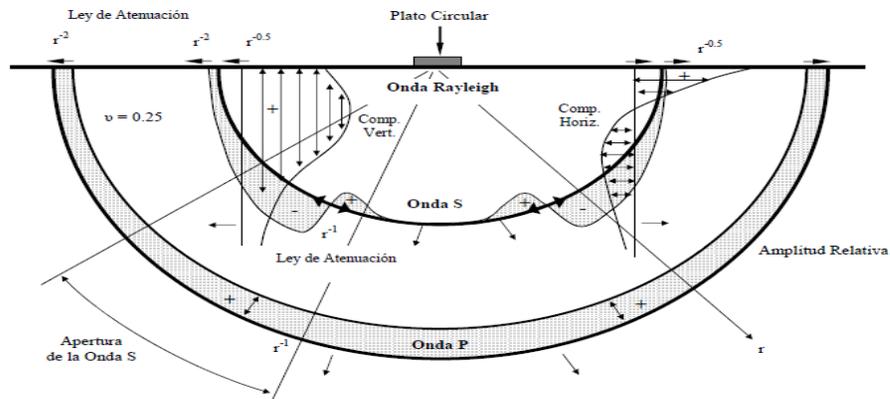


Fuente: Richard et al., (1970)

En la Figura 18 se presentan los desplazamientos ante la propagación de la onda de *Rayleigh*. El radio de amplitud negativa indica que el desplazamiento es opuesto al que produce la superficie libre Richard et al., (1970).

En términos de la energía que se confiere al momento de llevar a cabo la perturbación, ésta disminuye con la propagación de la onda en un 67% de la onda de *Rayleigh*, un 26% de onda *S* y 7% de la onda *P*. Esta distribución de energía se explica por el hecho de que la onda de *Rayleigh* es la que menos se atenúa con el aumento de la distancia *r* (Richard et al., 1970).

Figura 19. Atenuación de la onda de *Rayleigh*.



Fuente Richard et al., (1970)

En la Figura 19 se presenta la atenuación y distribución de los desplazamientos de las ondas, a partir de la perturbación realizada en un plato circular en un medio elástico, homogéneo (Adaptado de Richard et al., 1970).

Cuando se descompone el pulso del espectro en amplitudes y se cumple que la velocidad es la misma para todas las frecuencias, la forma del pulso no varía y, en ese caso, la velocidad de fase coincide con la velocidad de grupo, porque el medio no es dispersivo. Pero, por el contrario, si el medio es dispersivo, la velocidad varía con la frecuencia, la forma del pulso cambia y la velocidad del pulso es diferente a la velocidad de grupo; en este caso, se puede representar con la siguiente expresión.

$$v_g = \frac{dw}{dk(w)} \approx w \frac{dv_f}{dw} + v_f(w) \quad (23)$$

La perturbación ondulatoria corresponde a la combinación de dos señales elementales (azul y verde) de longitudes de ondas parecidas (λ, λ_1), con la misma amplitud (A, A_1), con un desfase respectivo (α, α_1), con una velocidad que avanza de izquierda a derecha, con una velocidad v ; la resta de ambas ondas individuales produce una perturbación mayor que las ondas iniciales.

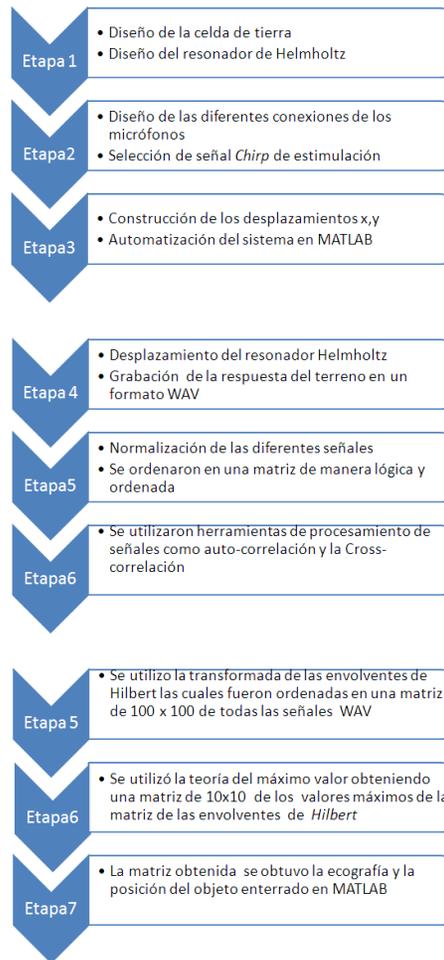
CAPITULO 3 – Marco Experimental

3.1 Metodología Propuesta

La metodología propuesta pretende la realización de una serie de prospecciones en línea recta, en suelos de la región Antioqueña clasificados como limosas arcillosos loéssicos saturados y que, por métodos sismo-acústicos y procesamiento de señales, permita obtener ecografías de la ubicación de la mina enterrada que, posteriormente, se pueden analizar para identificar los materiales enterrados que pueden hacer parte de elementos explosivos. En la Figura 20 se describen las etapas de metodología implementada para la obtención de ecografía sismo-acústica.

En el desarrollo del presente trabajo se realizaron el diseño y la implementación de un prototipo de laboratorio para la obtención de ecografías sismo-acústicas, en las tierras de la región Antioqueña, clasificadas como limosas arcillosas y loéssicos saturadas, las cuales poseen un alto contenido en elementos metálicos, condiciones que pueden llegar a perturbar las medidas realizadas sobre dichos terrenos, incrementado hasta 40% el error si se emplean técnicas electromagnéticas y de tomografía eléctrica.

Figura 20. Metodología propuesta para la localización de minas enteradas.



Cabe destacar que para la realización de las pruebas de laboratorio se acondicionó el prototipo con recubrimientos anti refracción en las paredes. El principio de funcionamiento del prototipo está basado en diferentes desplazamientos en coordenadas XY , automatizados a través del software MATLAB, y la implementación de un carro longitudinal y transversal desplazado por tonillos acoplados a dos motores amplificadores de fuerza que permiten la prospección superficial con micrófonos, actuando como sensores de presión no acoplados, empleando el principio del fenómeno físico de presión acústica, generando un modo longitudinal rápido de propagación (MLR) u onda P y un modo longitudinal lento de propagación (MLL) u onda (S); ésta onda, al chocar con un objeto, regresa a la superficie, de manera que las ondas superficiales causan movimientos superficiales componentes de la onda de *Rayleigh* que se desplaza a frecuencias subsónicas evanescentes en el aire, la cual obtiene su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad, siendo adquiridas

a dos centímetros de la superficie, lo que permite obtener una bases de datos de 10 subsectores posibles en una línea de una traza. Se demostró que las minas pueden ser detectadas por consolas para estudio de grabación y por procesamiento de señales, de manera que se pueden analizar los efectos de las ondas de *Rayleigh* en la superficie. Para el mejoramiento de la relación señal ruido, se adhirieron copas de goma en los extremos de los micrófonos.

El resultado de las prospecciones en la tierra fue la obtención de las ondas superficiales de *Rayleigh* en 10 subsectores subyacentes, prospectados en línea recta; así pues, se obtuvieron familias de información individual por cada subsector, las cuales fueron ordenadas en una matriz de 100 x100 y, por procesamiento de señales, fueron normalizadas con una frecuencia de muestreo de 14500 Hz; con el método de la transformada de *Hilbert* se lograron las diferentes envolventes de las señales normalizadas de la matriz.

Para obtener la posición y la reflexión, se utilizó el teorema del máximo valor, el cual genera una matriz de 10 x 10, a partir de la matriz de las envolventes de *Hilbert*. Para la obtención de las ecografías se utilizó el método de la transformada *Contourlet*.

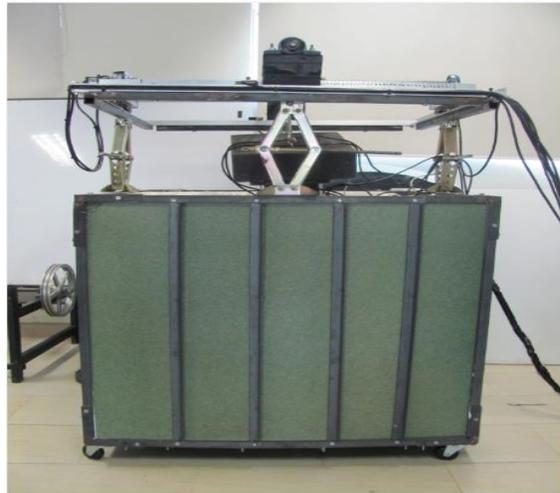
3.2 Celda de tierra

Se presenta una implementación de un prototipo de laboratorio basado en las propiedades físicas de la interacción de las ondas mecánicas del objeto y la tierra; la prospección se realiza por sensores no acoplados en la superficie, empleando una señal de estimulación *Chirp*. Se realizaron diferentes procesos, utilizando configuraciones de dispositivos de medición y señales *Chirp* de estimulación, para caracterizar el terreno por la técnica sismo-acústica, con base en los trabajos de Biot (1956, I y II) y de Stoll (1980). Los métodos de propagación se fundamentaron en el trabajo de Sabatier et al., (1986 a, b). Para la generación y recolección de las ondas superficiales de *Rayleigh*, se tomó como fundamento el trabajo de Gregg et al., (2006).

Así pues, se diseñó y construyó una celda de tierra con ángulos de hierro, forrada en formaleta pesada, con recubrimiento acústico para evitar las refracciones. Para ello, se vertieron 0.80

cm^3 de tierra de la región Antioqueña, clasificada como Franco de lima y arcillosos: arena con un contenido orgánico de 1%, cuya característica es un color amarillento, dada la presencia de óxidos mixtos que contienen partículas de hierro fino (su contenido en hierro es de 5.2% y 8.8, respectivamente). La prospección de estas tierras por los métodos tradicionales, presentan un error en la adquisición de señales hasta de un 40% (Lopera & Nada Milisavljevic., 2007). En la Figura 21 se presenta el prototipo de celda de tierra desarrollado para la obtención de ecografías de la localización de las minas enterradas.

Figura 21. Celda de tierra para la obtención de ecografías de localización de las minas enterradas.



En la Figura 21 se presenta una fotografía del prototipo celda de tierra donde se acoplaron equipo electrónico de recepción para luego por procesamiento de señales obtener la ecografía de la localización de los objetos enterrados.

3.3 Automatización desplazamientos x, y

Para realizar las diferentes prospecciones, fue necesario desplazar el resonador de *Helmholtz* por los diferentes subsectores, con el fin de emitir una señal de estimulación *Chirp*, de manera precisa y ordenada, a cada subsector, generando una matriz de las diferentes respuestas del terreno sensado por el arreglo de micrófonos ubicados alrededor de tubo del resonador, por lo cual se automatizaron movimientos en x, y, por medio de tornillos de rosca cuadrada de dos

entradas, acoplados a motores de 12 voltios de corriente continua, los cuales fueron controlados y automatizados en MATLAB, con una interfaz de comunicación USB.

3.4 Micrófonos

El prototipo utiliza un arreglo de ocho micrófonos omnidireccionales de marca BHERINGER 8000 MCM, utilizados como sensores acústicos de presión y distribuidos de la siguiente manera: dos micrófonos denominados $E m_1$ y $E m_2$ conectados en forma individual a consolas de sonido XENYX302 USB de la marca BEHRINGER; dichos micrófonos participan en la detección de la mina enterrada, mediante la comparación de señal; los seis micrófonos restantes se utilizan para registrar la respuesta de terreno, cinco segundos después de que la señal de estimulación ha cesado, lo que permite obtener una sumatoria de señales que se logra con la conexión en paralelo de micrófonos, a una consola de sonido XENYX 222USB de la marca BHERINGER. Con la conexión de estos micrófonos, se obtiene una directividad de tipo cardiode y el incremento de la relación señal ruido SNR se ve afectada por el ruido ambiental (el incremento de SNR de \sqrt{n} , siendo n el número de micrófonos conectados en paralelo) (Eargle, 2005). Por lo cual, para obtener un punto omnidireccional focalizado se implementaron unas copas de goma en los extremos de los micrófonos, obteniendo una respuesta del terreno más precisa de cada subsector (Gregg et al., 2006)

3.5 Señal Sensada en cada uno de los micrófonos

A partir de estas señales discretas, se construyen las siguientes matrices de señales discretas acumuladas:

$$E_{mo}[\mathbf{n}] = \sum_{j=1}^6 [\mathbf{n}] x_{m0_j}[\mathbf{n}] \quad (24)$$

Este comportamiento de señal representa la sumatoria de seis señales obtenidas como respuesta del terreno, cinco segundos después de que la señal de estimulación ha cesado, cuyo resultado es una señal con un gran ancho de banda.

$$\mathbf{E}_{m1}[\mathbf{n}] \quad (25)$$

Este comportamiento de señal corresponde a la señal \mathbf{E}_{m1} que participa en la localización del objeto enterrado.

$$\mathbf{E}_{m2}[\mathbf{n}] \quad (26)$$

Este comportamiento de señal corresponde a la señal \mathbf{E}_{m2} que participa en la localización del objeto enterrado.

Este comportamiento de señal corresponde a la señal $\mathbf{z}[\mathbf{n}] = \mathbf{E}_{m1}[\mathbf{n}] - \mathbf{E}_{m2}[\mathbf{n}]$ que participa en la localización del objeto enterrado

El modelo de señal discreto correspondiente a la señal sensada en cada uno de los micrófonos i y se define como:

$$E_{i[n]=\hat{a}(nT)=\sum_{j=0}^{Q-1} S_j P[n-j]+w(n)} = P[\mathbf{n}] * S[\mathbf{n}] + w[\mathbf{n}] \quad (27)$$

Donde

n = es el tiempo discreto asociado a cada tiempo $t[n] = nT = nf_s^{-1}$ como la frecuencia de muestro.

$\mathbf{P}[\mathbf{n}] = \mathbf{p}(nT)$ =señal digital o discreta correspondiente al pulso de excitación acústica.

$\mathbf{S}[\mathbf{n}]$ = es la respuesta impulsiva discreta del medio de propagación de Q elementos.

$\mathbf{w}[\mathbf{n}]$ = componente de ruido.

Se puede observar que la expresión anterior corresponde a la Cross- correlación de la señal de excitación acústica $\mathbf{P}[\mathbf{n}]$, con la respuesta impersonal del medio de propagación.

Los Q elementos de la respuesta de estimulación $\mathbf{S}[\mathbf{n}]$ corresponden a los coeficientes de reflexión; de esta manera, se obtienen tres grupos de señales discretas: La suma de las señales discretas correspondientes a los seis micrófonos que conforman \mathbf{E}_{m0} , la señal discreta correspondiente al micrófono \mathbf{E}_{m1} y la señal discreta correspondiente a \mathbf{E}_{m2} .

3.6 Obtención de ecografía

Para obtener las ecografías, se siguió el procedimiento descrito en Molina (2009). En el entorno MATLAB se diseñó una etapa de procesamiento digital de la señal, con la cual se transformaron señales digitales para la obtención de las ecografías acústicas. Las etapas de procesamiento digital consistieron en:

Normalización de la señal x_n correspondiente a la señal digital del grupo de micrófonos:

$$E_{m_0}[n] = \sum_{j=1}^6 [n] x_{m_0_j}[n] \quad (28)$$

Se normalizaron la auto correlación de la señal E_{m_0} y se normalizó la Cross correlación de las señales E_{m_0} y z

Cálculo de la señal, $S[n]$

$$S_n = [E_{m_0}[n]]^{-2} \sum_m E_{m_0}[n] E_{m_0}[m + n] \\ + (|E_{m_0}[n]| |z[n]|)^{-1} \sum_m E_{m_0}[n] * z[m + n] \quad (29)$$

Donde:

El primer sumando corresponde a la auto-correlación normalizada de la señal x_n

El segundo sumando corresponde a la cross-correlación normalizada entre la señal x_n y z_n ; este procedimiento mejora la relación señal ruido y realiza una transformación de los efectos de la señal *Chirp*, en una leve compresión digital.

3.7 Envolventes de la transformada de Hilbert

Para la obtención de la envolvente de la señal S_n , a través de transformada de *Hilbert*:

$$\hat{S}[n] = \left(\mathbf{R}_e(\mathbf{Hilbert}(s[n]))^2 + \mathbf{I}_m(\mathbf{Hilbert}(s[n]))^2 \right)^{1/2} \quad (30)$$

Asignación de las señales \hat{S}_n a una matriz y construcción de la ecografía acústica de modo B de representación. Para comprobar la eficiencia de la metodología, se realizaron diferentes pruebas de localización de un objeto enterrado, en seis posiciones, donde la máxima perturbación corresponde al objeto enterrado.

3.8 Transformada Contourlet

La transformada Contourlet es una herramienta matemática, que permite descomponer una imagen en sub-bandas direccionales, lo que permite un análisis multiresolución de los contornos de una imagen a múltiples escalas definida como:

$$E_{jk} = \frac{1}{M_{jk} * N_{jk} \sum_{n=1}^{N_{jk}} \sum_{m=1}^{M_{jk}} [I_{jk(m,n)}^2]} \quad (31)$$

Dónde:

I_{jk} Es el tamaño de la fila de la imagen sub-banda M_{jk}

N_{jk} Es el tamaño de la columna de la imagen sub-banda I_{jk}

La desviación estándar S_{jk} de la imagen sub-banda I_{jk} y N_{jk} para imágenes de textura tiene las siguientes relaciones:

$$S_{jk} = \sqrt{\frac{1}{M_{jk} M_{jk}} \sum_{n=1}^{N_{jk}} \sum_{m=1}^{M_{jk}} (I_{jk(m,n)} - I_{jk})^2} \quad (32)$$

$$I_{jk} = \frac{1}{M_{jk} M_{jk}} \sum_{n=1}^{N_{jk}} \sum_{m=1}^{M_{jk}} (I_{jk(m,n)}) \quad (33)$$

3.9 Descripción de acoplamiento de los diferentes equipos

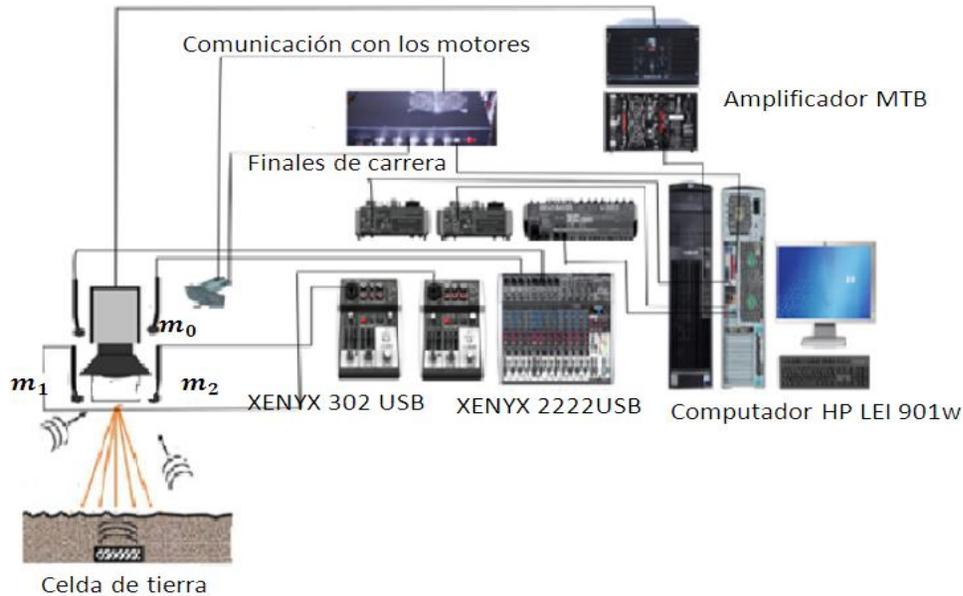
Para el estudio del comportamiento superficial de onda de *Rayleigh*, se implementó un resonador de *Helmholtz* que consiste en una caja réflex y, adherido a un extremo, se encuentra un tubo de teflón; distribuidos en su perímetro, se ubicaron ocho micrófonos que actúan como sensores de presión. La conexión de los diferentes equipos permitió grabar las respuestas del terreno, ante un estímulo de perturbación (*Chirp*), en un formato WAV -de manera lógica y ordenada- y, posteriormente, obtener la ecografía por procesamiento de señales para la ubicación de las minas enterradas.

Figura 22. Elementos constitutivos de la celda de tierra para obtención de ecografías de la localización de minas enterradas



En la Figura 22 se presenta una fotografía de los elementos constitutivos de la celda de tierra, para la obtención de la ecografía de la celda de tierra y para la localización de las minas enterradas en el terreno. A continuación, en la Figura 23, se describe la forma de conexión de los diferentes elementos constitutivos de celda.

Figura 23. Diagrama del cableado de los diferentes equipos en el prototipo.



En la Figura 23 se describe el prototipo constituido por ocho micrófonos que se utiliza para registrar las propiedades espectrales del suelo, considerando que su transmisión es nula; por lo tanto, la energía se absorbe o se refleja, pero hay cierta dependencia entre la reflectividad y el contenido de agua en el suelo: cuanto mayor sea la presencia de agua, mayor es la reflectividad, permitiendo las interfaces de tierra-agua o tierra aire, lo que posibilita -por medio de una fuente de perturbación audible (20Hz - 20kHz)- generar niveles de ondas subsónicas de 0 - 20Hz , por impedancia acústica de los elementos constitutivos del terreno, generando con esto la onda superficial bajo la misma, sin ningún tipo de comparación en relación con los micrófonos m_1 y m_2 .

Seis micrófonos se conectaron en paralelo a la consola de sonido XENYX 2222 USB, para obtener así la sumatoria de las señales de cada micrófono, formando una sola señal. Se obtuvo una directividad de conjunto de tipo cardiode, con una relación \sqrt{n} , siendo n el número de micrófonos conectados en paralelo. Los micrófonos utilizados tienen la característica de poseer un gran ancho de banda y de responder a las variaciones de presión. Para determinar estas variables, se desarrolló un sistema prototipo de laboratorio para la obtención de imágenes

sismo-acústicas o ecografías acústicas, el cual consiste en una celda de tierra conformada por una serie de ángulos de una pulgada por una pulgada y cubierto con tablas para formaleta pesada. Su volumen es de 0.80. Sus paredes interiores fueron recubiertas con icopor, para evitar las refracciones.

Los fenómenos de prospección están basados en el principio de ondas mecánicas, que es el más utilizado en los sistemas de detección de cambios de impedancia mecánica. Con base en el sistema propuesto por Roger & Don (1996), se realizó la comparación entre dos señales captadas a través de dos micrófonos Em_1 y Em_2 . Si se encuentra un objeto enterrado en el suelo, dicha señal presenta una impedancia mecánica diferente al medio circundante, al momento de inducir pulsos acústicos; la prospección varía, de acuerdo con el desplazamiento y el sector donde se encuentre el objeto enterrado; las señales serán diferentes a las del terreno donde no hay objeto enterrado. En el caso de la señal correspondiente a Em_1 , será diferente a la señal del micrófono Em_2 , por lo que a través de la señal diferencia z se podrá identificar un patrón de los diferentes materiales enterrados. Por otro lado, a través de la aplicación de técnicas de procesamiento de señal, es posible determinar la distancia a la que se encuentra el objeto.

También para una mejor recolección de la onda superficial de *Rayleigh*, fue necesaria la utilización de copas de caucho en los extremos de los micrófonos, con una espuma anti-reflectiva, para la atenuación del ruido ambiental. El prototipo cuenta con una etapa de amplificación lineal de potencia que amplifica la señal de excitación proveniente del generador de señal del parlante. El parlante utilizado como parte de la fuente de perturbación acústica es de tipo electrodinámico, de 200 vatios de potencia y una impedancia de 8 ohmios. El mismo se encuentra acoplado a una caja acústica y en su extremo presenta un cilindro de teflón de 10 cm de diámetro y de largo 20cm. Junto al cilindro de teflón, se ubican los sensores acústicos, los cuales consisten en una combinación de 8 micrófonos capacitivos omnidireccionales.

CAPÍTULO 4 – Resultados

Se logró realizar una presión sonora de la fuente de estimulación *Chirp*, a una distancia normal frente al plano de emisión para tierras de la región antioqueña. (Considerado apto).

Se logró revelar la interacción sismo-acústica que existe entre el aire y la tierra, como medios de propagación de los fenómenos de la onda. (Considerado apto).

Se comprobó que al perturbar la superficie en forma acústica, es posible observar dos modos longitudinales de las ondas P: un modo longitudinal rápido o MLR y un modo longitudinal lento de propagación MLL; si bien ambos modos se desarrollan simultáneamente, las MLL poseen mayor energía y menor velocidad, la cual se atenúa con la profundidad y es uno de los componentes de las ondas superficiales de *Rayleigh*.

Se utilizaron micrófonos unidireccionales como sensores de presión, con una configuración de ocho sensores, entre los cuales dos (denominados ***Em₁*** y ***Em₂***) participan en la localización de la mina enterrada en la superficie; los seis micrófonos restantes (denominados ***m₀***) se conectaron en paralelo, cuyo resultado fue la obtención de una señal con un gran ancho de banda y la recolección de la respuesta del terreno ante una señal de estimulación *Chirp*. Para una mejor relación señal ruido, se adhirieron copas de goma, lo que permitió un censado focalizado omnidireccional, no acoplado en la superficie. (Considerado apto).

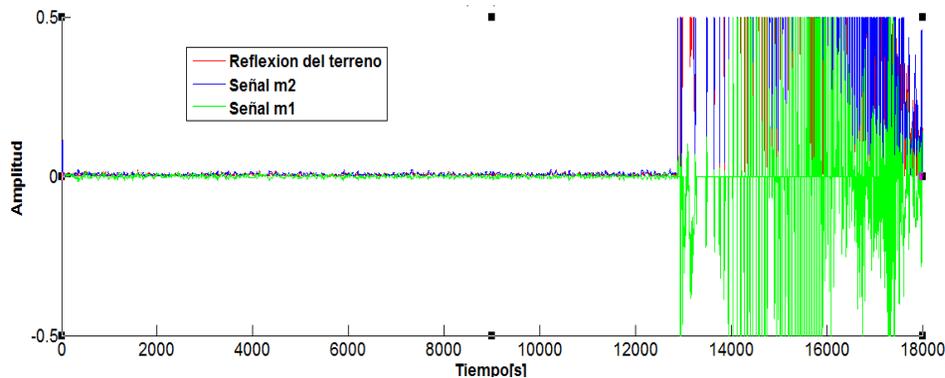
Las imágenes ecográficas acústicas se componen a través de las diferentes versiones de las prospecciones en cada uno de los subsectores del terreno, como respuesta de la señal *Chirp* de estimulación correspondiente al grupo de micrófonos ***Em₀*** y a la diferencia entre los micrófonos $Z = \mathbf{Em}_1[n] - \mathbf{Em}_2[n]$. Considerado apto).

Se desarrolló una estructura computacional para el sistema prototipo celda de tierra, con la cual es posible obtener imágenes de la ecografía acústica; asimismo, se adelantó una comunicación por los puertos del computador, para automatizar los diferentes desplazamientos que permitieron la precisión en la obtención de los mejores resultados. (Considerado apto).

4.1 Análisis de ruido durante las diferentes prospecciones

Para el análisis de ruido de $Z = Em_1[n] - Em_2[n]$ se implementaron dos micrófonos en el perímetro del tubo del resonador de Helmholtz. El análisis se hizo con dos micrófonos expuestos (y se analizaron sus diferencias entre Em_1 y Em_2) y una consola de estudio de grabación (XENYX 302USB), obteniendo como resultado las perturbaciones con ruido de las diferencias de las prospecciones de las señales analizadas.

Figura 24. Análisis de ruido con micrófonos expuestos.



En la Figura 24 se presentan señales con ruido de $Z = Em_1[n] - Em_2[n]$ de dos micrófonos expuestos en dos puntos diferentes del terreno, presentando diferentes comportamientos de las perturbaciones obtenidas cinco segundos después de que la señal de emisión ha cesado. Las tres señales captadas son las diferencias de $Z = Em_1[n] - Em_2[n]$ en diversos materiales, obteniendo la reflexión $R = f(Em_1 \text{ y } Em_2)$. El comportamiento registrado fue tomado cinco segundos después de que la emisión de la señal de estimulación *Chirp* ha cesado.

El rango de señal de 0 a 1200 segundos presenta un comportamiento subsónico de la onda superficial de Rayleigh. El rango de señal de 1200 segundos en adelante, evidencia que, a medida que se propaga por el medio, la forma de onda se ensancha conforme, se aleja de la fuente de perturbación.

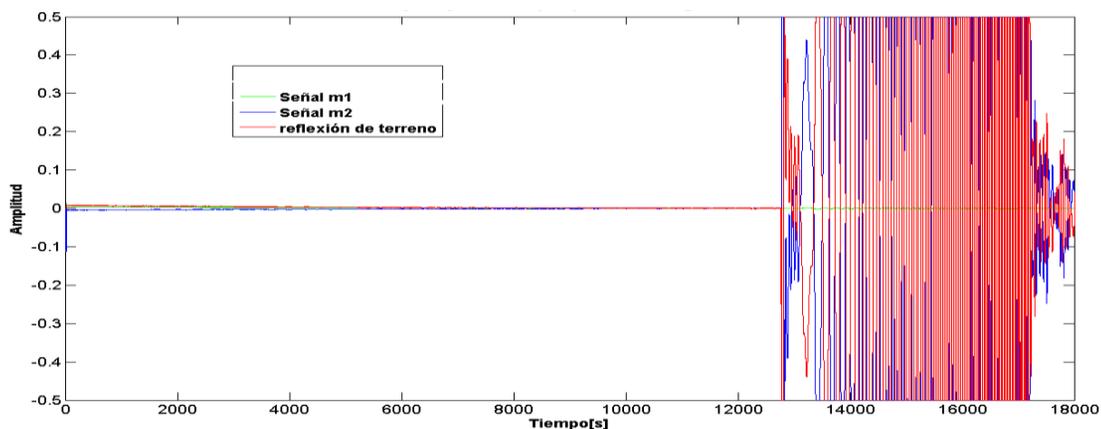
La perturbación verde corresponde a la reflexión $R = f(Em_1 \text{ y } Em_2)$ y representa la diferencia: $m_1[n]$ censada en la tierra y $m_2[n]$ señal sensada en la tierra. (Tierra-Tierra). La

perturbación azul corresponde a la reflexión $R = f(Em_1 \text{ y } Em_2)$ y representa la diferencia: la señal $m_1[n]$, señal censada en la tierra y $m_2[n]$ señal censada con objeto enterrado (**Tierra-Objeto**). La perturbación roja corresponde a la reflexión $R = f(Em_1 \text{ y } Em_2)$ y representa la diferencia de la señal $m_1[n]$, señal censada con objeto enterrado, y $m_2[n]$ señal censada con objeto enterrado (**objeto-objeto**); por el ruido que contiene la información, no se puede determinar cuáles de estos materiales censados presentan mayor reflexión.

4.2 Análisis de ruido con micrófonos con copas en los extremos

Para el análisis de ruido de $Z = Em_1[n] - Em_2[n]$ se implementó un método de análisis en el que se utilizaron como transductores de recepción dos micrófonos MCM 8000 omnidireccionales, de marca BHERINGER, en cuyos extremos se adhirieron copas de goma, lo que permitió cerrar el punto fijo omnidireccional, para medir en dos partes del terreno la atenuación del material; para este procedimiento se utilizaron dos consolas de sonido como receptoras, de la referencia XENYX 302USB, de la marca BHERINGER. Con los micrófonos conectados en paralelo, como fuente de estimulación sonora, se utilizó un parlante de 200w y 8ohmios de impedancia, de tipo electrodinámico, y un amplificador de recepción POWER AMPLIFIER PW1600A de la marca MTE. Tanto la amplificación como la recepción, fueron controladas por un PC. Los diferentes desplazamientos de las prospecciones se realizaron con la ayuda de un tornillo y sus movimientos fueron en forma automática

Figura 25. Análisis de ruido con copas de goma en los extremos de los micrófonos.



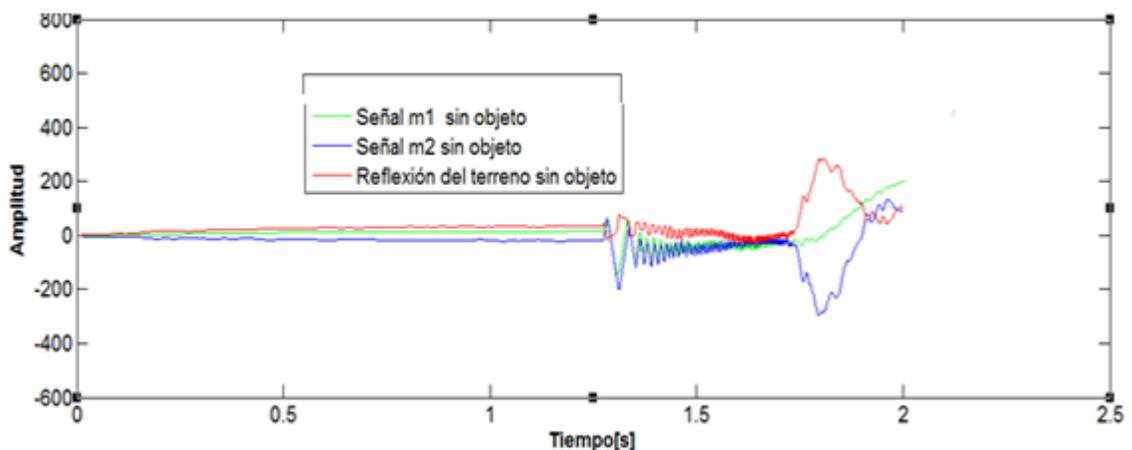
En la Figura 25 se presenta el comportamiento de la onda superficial de Rayleigh, capturada con copas de goma adheridas en sus extremos, en dos puntos diferentes del terreno, mejorando la relación señal ruido SNR, lo que permitió un punto de focalización omnidireccional muy próximo en la superficie, presentando un mejor comportamiento de las señales analizadas, aunque el ruido sigue enmascarando la información de los comportamientos de las diferentes señales de análisis, donde la señal $m_1[n]$ y la señal $Em_2[n]$ corresponden al terreno.

La señal de color rojo corresponde a la reflexión de terreno $R = Em_1[n] - Em_2[n]$; el comportamiento de la señal hasta los 1200 segundos, concierne al comportamiento de la superficie cinco segundos después de que la señal de estimulación *Chirp* ha cesado; dicha señal tiene un comportamiento de ensanchamiento, a medida que se aleja de la fuente sonora (de 1200 en adelante).

4.3 Análisis de suelos con micrófonos con copas en los extremos y filtro sin objeto enterrado

Para el análisis de ruido de $Z = Em_1[n] - Em_2[n]$ se implementó un filtro de media móvil, lo que posibilitó observar los comportamientos superficiales sin ruido ambiental de la señales censada por los micrófonos $m_1[n]$ y $Em_2[n]$ sin objeto enterrado. En la Figura 26 se presenta el comportamiento de la superficie del terreno sin objeto enterrado.

Figura 26. Análisis de ruido con copas de goma en los extremos de los micrófonos y filtro sin objeto enterrado.



En la Figura 26 se presenta el comportamiento de $Z = Em_1[n] - Em_2[n]$ sin objeto enterrado, con micrófonos en dos puntos fijos omnidireccionales, con copas de goma en los extremos de los micrófonos y filtro de media móvil. Se muestra el comportamiento de reflexión $R = Em_1[n] - Em_2[n]$ en diferentes materiales.

La perturbación verde corresponde a la reflexión $R = Em_1[n] - Em_2[n]$ y representa la diferencia $Em_1[n]$ y $Em_2[n]$; señal censada con un micrófono, relacionada con el pulso directo de la onda acústica; y $Em_2[n]$: señal censada por un segundo micrófono que está relacionada con el pulso de onda acústica reflejado en la superficie (**Tierra-Tierra**). El comportamiento es la impedancia del flujo del aire en la superficie en el dominio del tiempo.

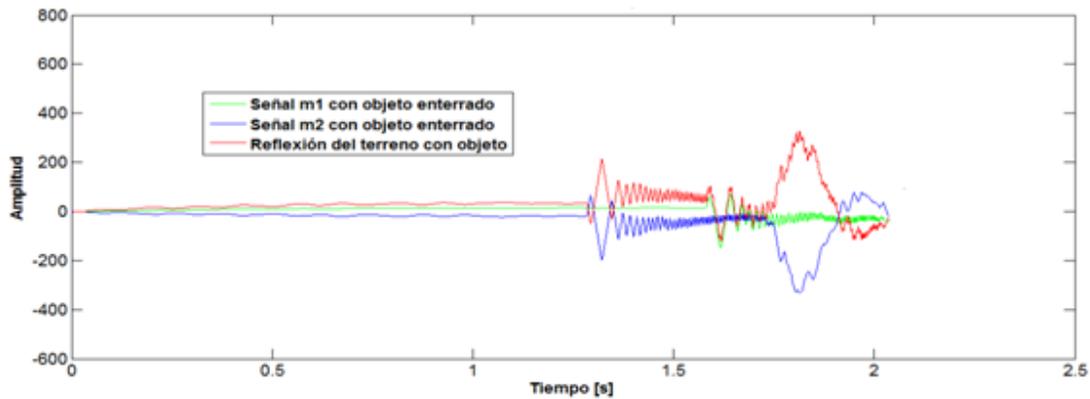
La perturbación azul corresponde a la reflexión $R = f(Em_1[n] - Em_2[n])$ y representa la diferencia $Em_1[n]$ y $Em_2[n]$; La señal censada con un micrófono está relacionada con el pulso directo de la onda acústica; $Em_2[n]$: señal censada por un segundo micrófono que está relacionada con el pulso de onda acústica reflejado en la superficie (**Tierra-Tierra**). Lo que representa este comportamiento es la impedancia del flujo del aire en la superficie, en el dominio del tiempo.

La perturbación roja corresponde a la reflexión $R = f(Em_1[n] - Em_2[n])$ y representa la diferencia de la señal $Em_1[n]$: señal censada con un micrófono, relacionada con el pulso directo de la onda acústica; y $Em_2[n]$: señal censada por un segundo micrófono, relacionada con el pulso de onda acústica reflejado en la superficie (**Tierra-Tierra**). Lo que representa este comportamiento es la impedancia del flujo del aire en la superficie y la impedancia del terreno, debido a su textura en el dominio del tiempo.

4.4 Análisis de suelos con micrófonos con copas en los extremos y filtro con objeto enterrado

Para el análisis de ruido de se implementó un filtro de media móvil, lo que dio lugar a observar los comportamientos superficiales sin ruido ambiental de la señales censadas por los micrófonos $Em_1[n]$ y $Em_2[n]$ con inclusión.

Figura 27. Análisis de ruido con copas de goma en los extremos de los micrófonos y filtro con objeto enterrado.



En la Figura 27 se presenta el comportamiento superficial del terreno con objeto enterrado, en dos puntos fijos omnidireccionales, con copas de goma en los extremos de los micrófonos. Se puede observar que la mayor reflexión corresponde a la perturbación de color rojo, la cual pertenece al terreno con objeto enterrado.

La perturbación verde corresponde a la reflexión $R = f (Em_1[n] - Em_2[n])$ y representa la diferencia $Em_1[n]$: señal censada con un micrófono, relacionada con el pulso directo de la onda acústica; $Em_2[n]$: señal sensada por un segundo micrófono, relacionada con el pulso de onda acústica reflejado en la superficie (**Tierra-Tierra**). Representa la impedancia del flujo del aire en la superficie, en el dominio del tiempo.

La perturbación azul corresponde a la reflexión $R = f (Em_1[n] - Em_2[n])$ y representa la diferencia entre la señal $Em_1[n]$ y la señal censada en la tierra. La señal $Em_2[n]$ censada en el objeto (**Tierra-objeto**) representa la impedancia de la tierra en la superficie, más un objeto. Así, se representa el comportamiento de la superficie con objeto enterrado en el dominio del tiempo.

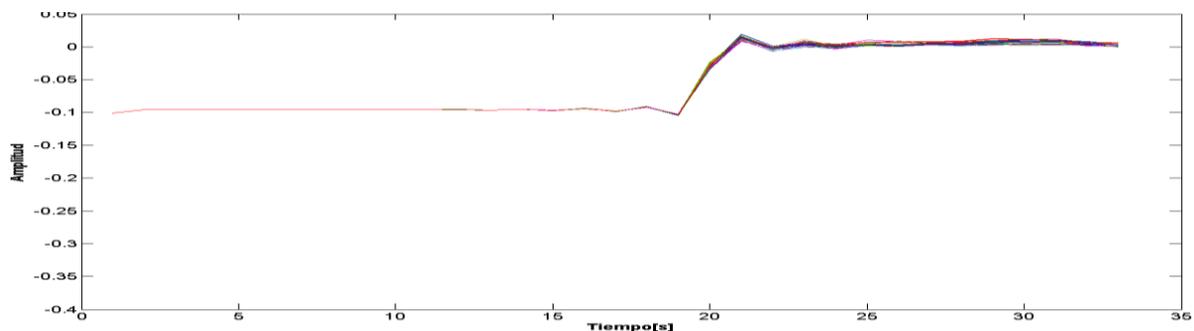
La perturbación roja corresponde a la reflexión $R = f (Em_1[n] - Em_2[n])$ y representa la diferencia de la señal $Em_1[n]$: señal censada con un micrófono, relacionada con el pulso directo de la onda acústica; $Em_2[n]$: señal censada por un segundo micrófono, relacionada con el pulso de onda acústica reflejado en la superficie (**Objeto-Objeto**). Representa la

impedancia del aire en la superficie de la tierra, más la impedancia de aire en el objeto enterrado, como comportamiento de la superficie con objeto enterrado en el dominio del tiempo.

4.5 Adquisición de señales

Para la adquisición de las señales $E_{mo}[n] = \sum_{j=1}^6 [n] = x_{m0_j}[n]$ se implementaron seis micrófonos en el perímetro del tubo del resonador de Helmholtz. Éstos micrófonos fueron conectados en paralelo a una consola XENYX 2222USB, la cual suma las seis señales, generando una señal con un gran ancho de banda; todo esto constituye el análisis en diferentes puntos de adquisición de la respuesta del terreno.

Figura 28. Señales $E_{mo}[n] = \sum_{j=1}^6 [n] = x_{m0_j}[n]$

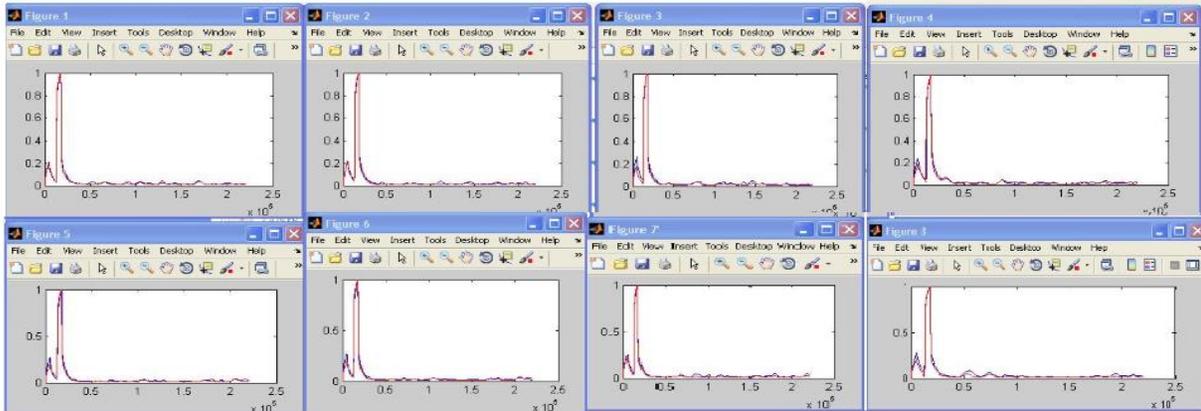


En la Figura 28e presenta el comportamiento de la sumatoria de seis señales grabadas por seis micrófonos conectados en paralelo a una consola XENYX 2222USB, ubicados en diferentes puntos del perímetro del tubo de resonador, formando un espectro de un gran ancho de banda. Los colores representan la cantidad de señales que se están sumando para formar esta banda.

4.5.1 Adquisición de señales $E_{m1}[n]$ y $E_{m2}[n]$

Para la adquisición de las señales $E_{m1}[n]$ y $E_{m2}[n]$ se implementaron dos micrófonos en el perímetro del tubo del resonador de *Helmholtz*. conectados en paralelo a dos consolas XENYX 302USB; se analizaron 8 sectores del terreno prospectado.

Figura 29. Análisis de las señales $E_{m1[n]}$ y $E_{m2[n]}$

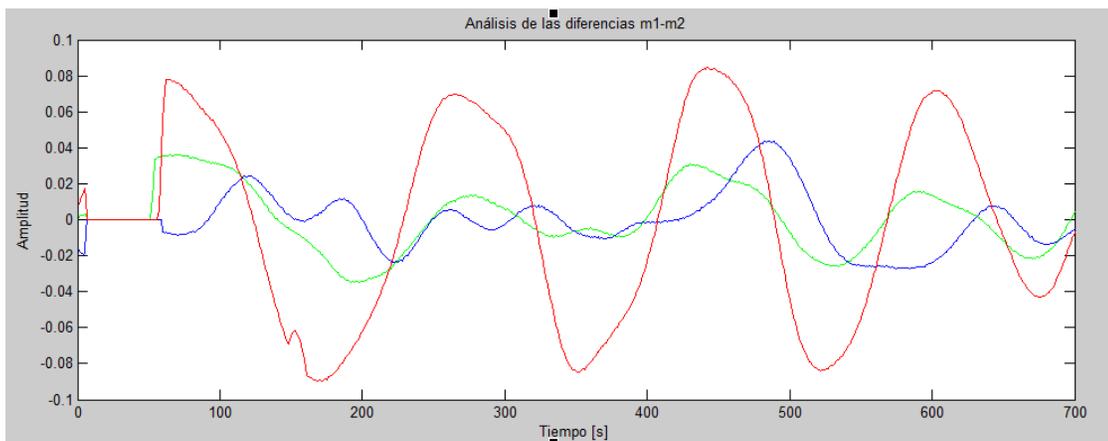


En la Figura 29 se presenta el análisis de los comportamientos de los micrófonos m_1 y m_2 en ocho posiciones diferentes de terreno, obteniendo como resultado que la recepción de este tipo de señales tiene un comportamiento igual en cada uno de los diferentes subsectores.

4.5.2 Adquisición de señales $Z = E_{m1}[n] - E_{m2}[n]$

Para la adquisición de las señales $Z = E_{m1}[n] - E_{m2}[n]$ se implementaron dos micrófonos en el perímetro del tubo del resonador de Helmholtz y se analizaron sus diferencias $E_{m1}[n]$ y $E_{m2}[n]$ (XENYX 302USB), obteniendo como resultado las perturbaciones de las prospecciones de las dos señales analizadas (con y sin objeto enterrado).

Figura 30. Diferencia de dos micrófonos $E_{m1}[n]$ y $E_{m2}[n]$

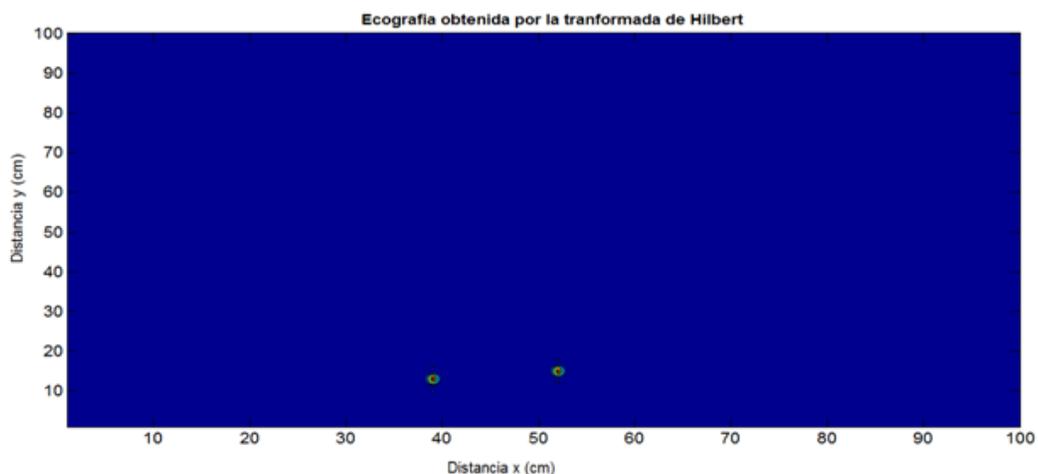


En la Figura 30 se analizan tres diferencias de $E_{m1[n]}$ y $E_{m2[n]}$. La perturbación de color verde corresponde al terreno sin objeto enterrado; la perturbación de color azul corresponde al terreno con objeto enterrado; y la tercera perturbación de color rojo y mayor amplitud corresponde a la diferencia del terreno con objeto enterrado. Lo que demuestra que siempre que haya un objeto enterrado la diferencia de la perturbación de color rojo será de mayor amplitud que las demás señales analizadas.

4.6 Resultados de la obtención de ecografía

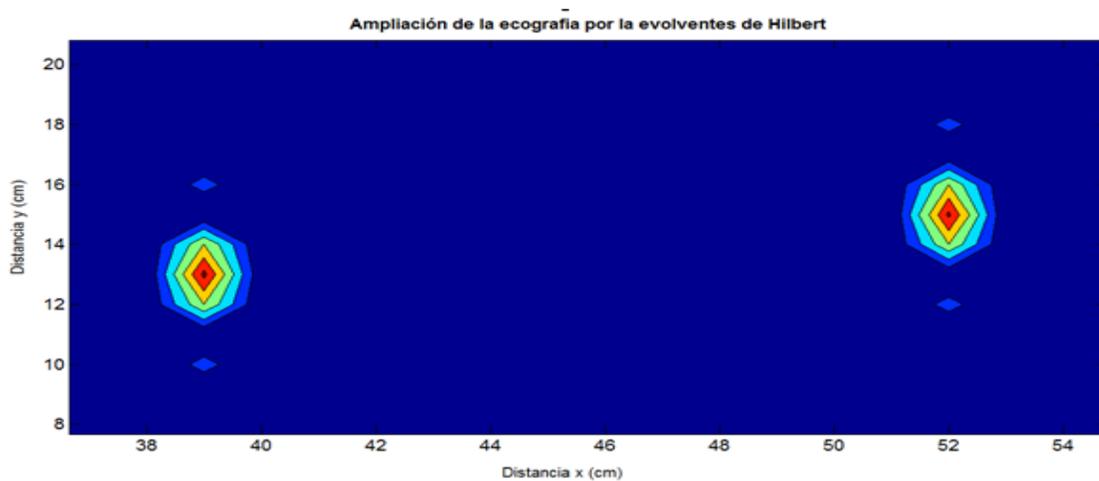
Las ecografías obtenidas experimentalmente sobre el comportamiento de la superficie -después de que se ha emitido la señal de estimulación *Chirp*- presentan un fenómeno de impedancia acústica que, como respuesta en los sólidos isotrópicos, se denomina dispersión resonante, es decir, ondulaciones por debajo del objeto en forma elíptica. Este fenómeno es ocasionado en la superficie por los objetos rígidos enterrados, los cuales pueden ser de dimensiones iguales o mayores que las longitudes de ondas que se desarrollan en el medio; los resultados obtenidos en las diferentes ecografías no representan el área o la forma del objeto enterrado. Lo que realmente se presenta en las ecografías son las impedancias acústicas que existen entre el objeto enterrado y la superficie que las contiene. En la Figura 31 se presenta el resultado de la ecografía sísmo- acústica de dos elementos enterrados, del mismo material y a distancias distintas en una superficie de tierra.

Figura 31. Ecografía obtenida por la transformada de Hilbert



En la Figura 31e presenta una ecografía que evidencia los cambios de impedancia del flujo de sonido subsónico de la onda de *Rayleigh* en la superficie, en solidos isotrópicos, mostrando un comportamiento de forma elíptica de eje mayor vertical y paralelo a la dirección de propagación (dispersión resonante). El punto sobresaliente de color rojo se denomina horno reverberante y las dispersiones generadas por debajo de la mina, de acuerdo con su intensidad, determinan el comportamiento singular en el material constitutivo de la mina enterrada. Para un mejor entendimiento de este fenómeno físico, se realiza una ampliación de la ecografía de la Figura 32.

Figura 32. Ampliación de la ecografía por las envolventes de Hilbert.

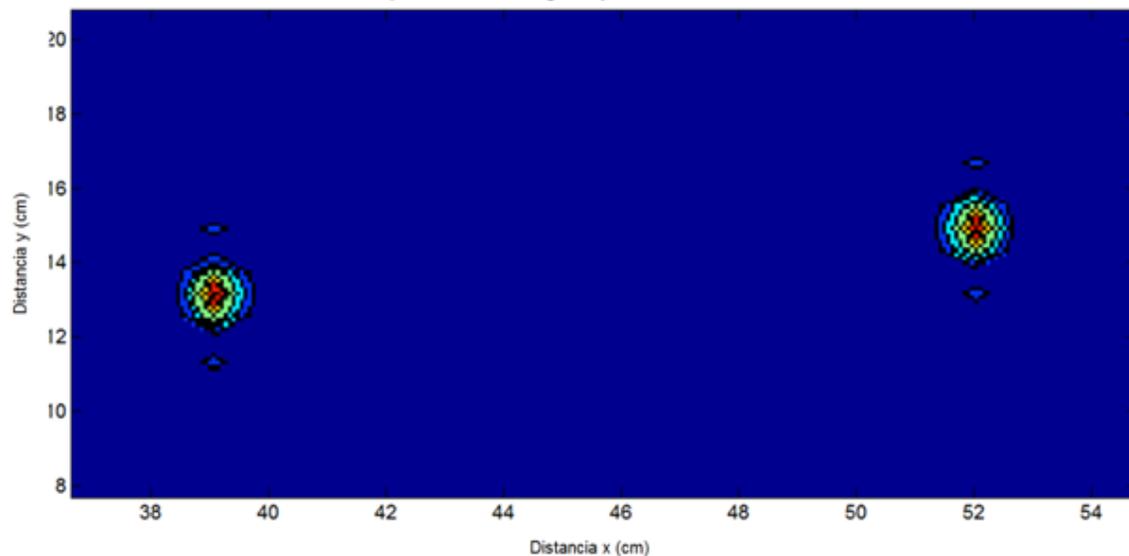


En la Figura 32se presenta una ampliación de la ecografía de dos elementos enterrados, donde se puede distinguir la dispersión resonante por debajo del objeto enterrado, cinco segundos después de que la señal de estimulación *Chirp* ha cesado. También se puede observar que el comportamiento de dispersión resonante en estos dos materiales es idéntico. La dispersión resonante del objeto enterrado describe una forma elíptica de eje mayor vertical que corresponde a los movimientos superficiales de onda de *Rayleigh*, debajo de la mina enterrada. Se evidencia, igualmente, que por ser del mismo material, el comportamiento subsónico de las ondas de *Rayleigh* es idéntico, lo que permite la identificación del material resonante en la presente ecografía.

4.7 Transformada Contourlet

Para una mejor representación de los diferentes contornos de las minas enterradas, se realizó un procesamiento de imágenes a través de la transformada *Contourlet* que permitió resaltar los contornos de las formas de las reverberaciones obtenidas por el método de las transformadas de las envolventes de *Hilbert*. En la Figura 33 se presenta la ecografía obtenida por procesamiento de imágenes de la transformada *Contourlet*

Figura 33. Imágenes reverberaciones obtenidas por la Transformada Contourlet.



En la Figura 33 se presenta el resultado del procesamiento de imagen de la Transformada Contourlet, a partir de las envolventes de la Transformada de *Hilbert*, que permitió obtener una imagen de los contornos de los objetos enterrados, donde se puede identificar que la parte roja corresponde al objeto enterrado y que los demás contornos pertenecen a la dispersión resonante que experimenta el objeto cuando el sonido permanece a su alrededor, cinco segundos después de que la señal de estimulación ha cesado.

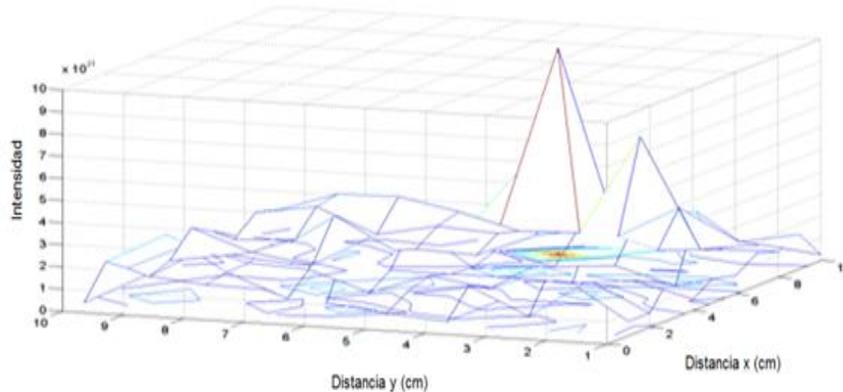
4.8 Análisis de mayores intensidades dentro del terreno

Al estimular la superficie del medio en forma acústica, es posible observar dos modos longitudinales de propagación de las ondas de presión, también llamados modo longitudinal rápido de propagación -o MLR u onda primaria P- y modo longitudinal de propagación lento -o MLL- de las ondas de presión de segunda especie.

La forma de propagación MLR u onda primaria P es análoga a la onda de presión acústica, presentando un comportamiento no dispersivo, con una mayor velocidad de propagación de menor grado de atenuación que caracteriza las impedancias del terreno; mientras que las ondas o MLL u ondas de segunda especie tienen un comportamiento disperso y transportan mayor cantidad de energía al encontrar la mina enterrada; y regresan a la superficie con una menor velocidad de propagación, que es la velocidad del sonido en el aire, lo que genera movimientos elípticos en la superficie, dando lugar a la onda superficial de *Rayleigh*, la cual disminuye exponencialmente con la distancia.

La mayor parte de energía de las ondas superficiales está contenida dentro de una zona donde las frecuencias cortas permiten caracterizar los extractos profundos del suelo, mientras que las frecuencias largas posibilitan la caracterización de los materiales cercanos a la superficie. Como resultado de esto se presenta la Figura 34 donde se exponen las relaciones frecuencias del objeto enterrado y el suelo que lo contiene.

Figura 34. Relación objeto máximas intensidades.



En la Figura 34 se representa la relación intensidad - objeto que corresponde al comportamiento de las ondas de Rayleigh en la superficie con mina enterrada, obtenida por un pulso de estimulación denominado *Chirp*, la cual está contenida dentro de un subsector de análisis, donde las frecuencias cortas permiten caracterizar los extractos profundos del suelo, mientras que las frecuencias largas permiten caracterizar los materiales cercanos a la superficie.

4.9 Ecografías obtenidas por el método del máximo valor a partir de la transformada de Hilbert

Las ecografías son obtenidas por medio de una acumulación de familias de trazas sub adyacentes en una línea recta de prospección. Cada familia tiene diez posiciones, no relacionadas con otra prospección de otras diez posiciones y así sucesivamente.

Se tomó el máximo valor de la matriz de las envolventes de la transformada de *Hilbert*, conformada por 100 posiciones y estos valores se asignaron a una matriz de una manera lógica y ordenada de 10x10, de la cual se obtienen las diferentes ecografías mostradas a continuación.

Figura 35. Ecografía obtenida con el máximo valor de las transformadas de Hilbert.

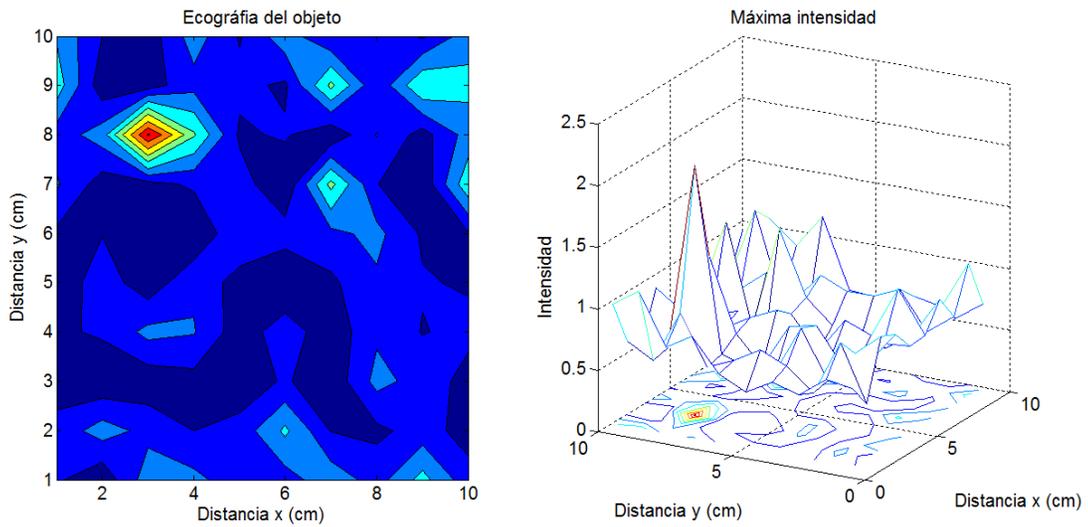


Figura 36. Ecografía obtenida de un solo elemento enterrado

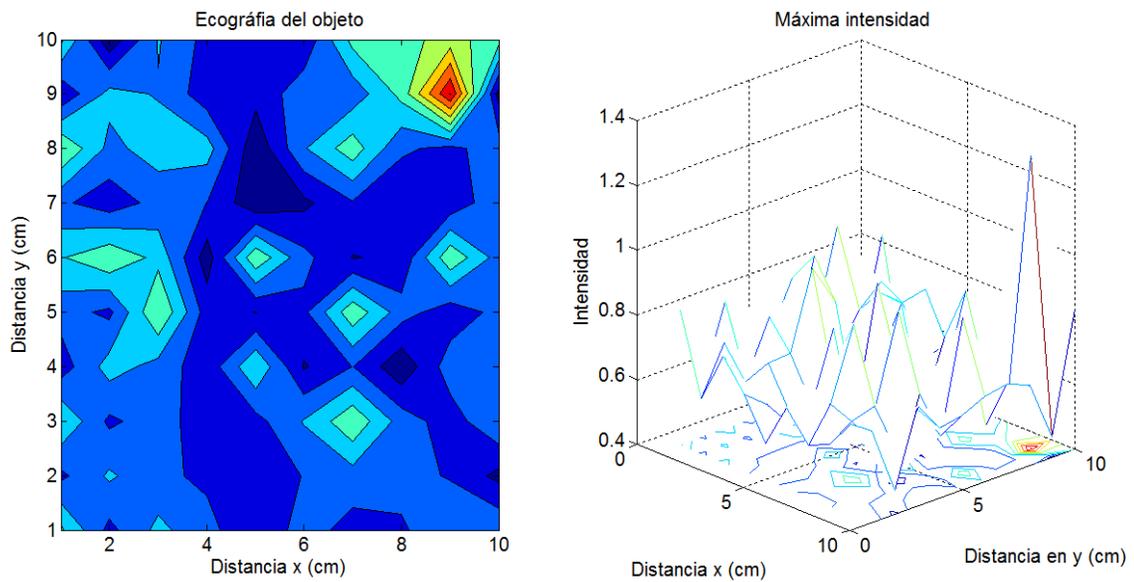
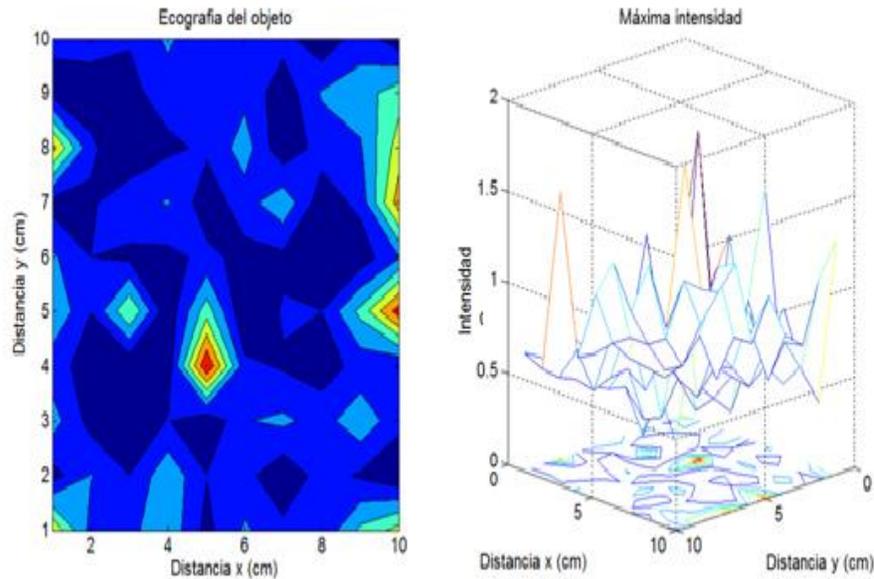


Figura 37. Ecografía de varios elementos enterrado



Las Figuras 35, 36, 37 muestran los resultados de aplicación de la metodología descrita en terrenos irregulares; las gráficas muestran dos tipos de representaciones de las imágenes obtenidas; a la derecha de las figuras se muestra una reconstrucción de las curvas de nivel de las amplitudes de las ondas de *Rayleigh*, denominada dispersión resonante, la cual se genera por comportamiento de las ondas de *Rayleigh* debajo del objeto enterrado. Al lado izquierdo muestran el comportamiento de las curvas de nivel de las amplitudes de las ondas superficiales de *Rayleigh* donde se comprueba que la mayor intensidad en el terreno corresponde al objeto enterrado.

4.10 Discusión

Para lograr el primer objetivo, se implementó un sistema de adquisición de señales acústicas que permitió realizar un barrido sobre terrenos planos expuestos a perturbaciones sísmicas artificiales, basado en los desplazamientos del resonador de *Helmholtz* en diferentes subsectores, de forma lógica y ordenada. Los desplazamientos fueron automatizados con la técnica del control numérico por computador (CNC), donde existe una comunicación entre el software MATLAB y los diferentes elementos constitutivos del resonador.

Se puede describir el resonador de *Helmholtz* como una relación de volúmenes entre la caja réflex y un tubo cerrado por un extremo, lo que permite la interface entre el aire y el sonido denominada presión sonora, la cual se define como; la diferencia existente entre la presión acústica y la presión atmosférica. Al presentarse dicha presión, se originan pequeños sismos, debido a la elasticidad del terreno y por el principio de la onda superficial de *Rayleigh* se obtuvo una serie de trazas con las diferentes impedancias acústicas de los subsectores analizados, las ondas fueron censadas por el arreglo de ocho micrófonos como sensores de presión, grabadas de manera lógica y ordenada en un formato de sonido WAV.

Se experimentaron diferentes formas de acoplamiento entre consolas y micrófonos comercialmente disponibles, obteniendo un mayor rendimiento con los micrófonos omnidireccionales de la marca BHERIGER MCM 8000, los cuales se adhirieron en el perímetro de un tubo de teflón de 30cm y un diámetro de 15cm, en cuyo interior se ubica un parlante que funciona como fuente de estimulación *Chirp*, que está soldado a una caja réflex de resonancia, cuyas dimensiones son 40x10x22 cm y está fundamentado en una variación de la frecuencia relacionada por sus volúmenes.

Lo anterior, permitió obtener una frecuencia de trabajo -en relación con la longitud del tubo- y la resonancia que tiene un comportamiento inversamente proporcional al aumento de la longitud del tubo. A todo este conjunto se denominó resonador de *Helmholtz*, el cual se comporta como un filtro, eliminando la banda cuya impedancia acústica tiende a cero en la frecuencia de resonancia y generando una señal distorsionada, cuyo efecto es obtener las dispersiones resonantes que se producen por debajo de la mina por efecto de la propagación de la onda superficial de *Rayleigh* y, a través de procesamiento de señales, permite visualizar el resultado de la impedancia natural del terreno, su comportamiento con o sin objeto enterrado.

Uno de los mayores avances en el presente trabajo es el diseño y experimentación de la señal de estimulación *Chirp* y la ayuda del resonador de *Helmholtz*, por el cual se determinaron las diferentes características de impedancia acústica en los subsectores prospectados. La definición de la señal *Chirp* es una señal sinusoidal, cuya función aumenta o disminuye con respecto al tiempo.

Para lograr el segundo objetivo se implementó una estrategia de procesamiento de señales que permite extraer la información presente en las señales acústicas capturadas, producto de la presencia de minas enterradas superficialmente en el terreno. Las señales existentes en la celda de tierra son Em_1 y Em_2 que corresponden a una distancia en dos puntos distintos de la distribución de ocho micrófonos alrededor del diámetro del tubo de resonancia, lo que permite hacer una comparación de la recepción de las señales captadas en un tiempo, después de que la fuente de emisión ha cesado, registrando con esto dos instantes de tiempos de comportamientos diferentes; la diferencia de estas dos señales se definió como z que corresponde a la impedancia acústica del terreno con objeto / sin objeto enterrado.

Hay que tener en cuenta que el terreno siempre tiene una impedancia acústica de menor intensidad, que cuando hay presencia de una mina enterrada. Los seis micrófonos restantes por recepción de señales realizan una sumatoria con un gran ancho de banda que presenta los comportamientos superficiales de las impedancias, en diferentes puntos de diámetro del tubo de resonancia denominada Em_0 y que, posteriormente, permite obtener la información de las diferentes subsectores analizados con y sin objeto enterrado.

Las diferentes señales fueron grabadas en un formato WAV, con una frecuencia de muestreo de 14600 Hz, lo que posibilita realizar la respectiva normalización, la auto correlación de las señales z y la Cross correlación con las señales z y Em_0 . La información obtenida en cada subsector fue considerada como una familia -denominada familia de trazas-, considerada como única y carente de una forma matemática de comparación, por lo cual cada información de cada familia fue llevada a una matriz de 100x100, de forma lógica y ordenada, lo cual facilita la aplicación de las envolventes de la transformada de *Hilbert*.

Para lograr el tercer objetivo se implementó una metodología dirigida hacia la obtención de imágenes holográficas del terreno y su filtrado, a través de la Transformada *Contourlet* o herramientas afines, de forma que se realtaran los objetos. Para obtener las primeras posiciones de las minas enterradas se empleó el método del máximo valor de la matriz de las envolventes de *Hilbert*, obteniendo una matriz de 10x10, indicando las diferentes frecuencias de la señal de estimulación *Chirp* alrededor del objeto. Las Dispersiones resonantes que se

producen por debajo de la mina por efecto de la propagación de la onda superficial de *Rayleigh*, permitieron su ubicación; para mejorar la resolución por procesamiento de imágenes, se determinó la forma de la mina enterrada, se analizaron las diferentes gráficas obtenidas por el método de las envolventes de *Hilbert* y se procesaron imágenes con la transformada *Contourlet*.

CAPÍTULO 5 - Conclusiones y Trabajo futuro

5.1 Conclusiones por objetivo

Del primer objetivo se obtuvo el funcionamiento de un sistema de adquisición de señales acústicas que facilitó realizar diferentes análisis sobre terrenos planos expuestos a perturbaciones sismo acústicas superficiales (no acoplado), a una distancia mínima de la superficie –con y sin objeto enterrado- basado en los desplazamientos del resonador de *Helmholtz* en diferentes subsectores, de una manera secuencial y adyacente, la que permitió guardar la información obtenida en un formato WAV de manera lógica y ordenada.

Estos desplazamientos fueron automatizados con la técnica del control numérico por computador (CNC) donde existe una comunicación entre MATLAB y un computador. Lo que permitió enlazar los diferentes elementos constitutivos del resonador.

Para obtener la información de las prospecciones y las diferentes impedancias acústicas de cada subsector de la onda superficial de *Rayleigh*, se diseñó del resonador de *Helmholtz*, donde se tuvieron en cuenta los diferentes comportamientos de la señal de estimulación *Chirp*. Se realizaron múltiples pruebas a manera de ensayo y error, hasta obtener las diferentes intensidades de frecuencia que presentaban los comportamientos. Uno de los avances más significativos en el presente trabajo fue el descubrimiento de dicha señal, sin la cual los demás elementos descritos no funcionarían. También hay que tener en cuenta la selección de cada elemento constitutivo de la celda de tierra; en este caso, dichos elementos fueron escogidos por los comportamientos más aptos que existen en el mercado, permitiendo realizar un análisis más profundo de los fenómenos estudiados. Una de la principales limitaciones en esta etapa fue el ruido ambiental, por lo cual se implementó un filtro de media móvil. También para mejorar la recepción de la onda superficial de *Rayleigh*, se Implementaron unas copas de goma en los extremos de los micrófonos con espuma dentro de las copas, obteniendo una mejor relación señal ruido SNR y una notable disminución del ruido.

Del segundo objetivo se obtuvo una estrategia de procesamiento de señales que permite extraer la información presente en las señales acústicas capturadas, producto de la presencia de

objetos enterrados superficialmente en el terreno. Las señales existentes en la celda de tierra son Em_1 y Em_2 que corresponden a una distancia en dos puntos distintos de la distribución de ocho micrófonos ubicados en el perímetro del tubo de resonancia, lo que facilita una comparación de las recepciones de dos señales independientes, captadas en un mismo instante de tiempo, después de que la fuente de emisión ha cesado; así, se registran dos instantes de tiempos de comportamientos diferentes, donde su diferencia es definida como z que corresponde a la impedancia de aire en la superficie del terreno con objeto / sin objeto enterrado. Hay que tener en cuenta que el terreno siempre tiene una impedancia, debido a su textura natural, que es de menor intensidad que cuando hay presencia de una mina..

Los seis micrófonos restantes posibilitan una sumatoria (por procesamiento de señales), cuya característica es un gran ancho de banda de los comportamientos superficiales en diferentes puntos del perímetro del tubo de resonancia, denominada Em_0 ; y que, posteriormente, permite obtener la información de los diferentes subsectores analizados con y sin objeto enterrado. Las diferentes señales fueron grabadas en un formato WAV, con una frecuencia de muestro de $14600Hz$, lo que permitió realizar la respectiva normalización, la auto correlación de las señales y la Cross-correlación con las señales z y Em_0 . La información obtenida en cada subsector fue considerada como una familia y denominada *familia de trazas*. Dicha familia es considerada como única y no tiene una forma matemática de comparación, por lo cual cada información de cada familia fue llevada a una matriz de 100×100 , de forma lógica y ordenada, lo cual facilitó la aplicación de las envolventes de la transformada de *Hilbert*.

Del tercer objetivo se obtuvo una metodología para la obtención de imágenes holográficas del terreno y su filtrado a través de la Transformada Contourlet o herramientas afines, de manera que se resalten las formas de los objetos enterrados. Para obtener las primeras posiciones, se empleó el método del máximo valor de la matriz de las envolventes de *Hilbert*, obteniendo una matriz de 10×10 , la cual generó una imagen del horno reverberante de la posición del objeto enterrado en forma romboidal, indicando las diferentes frecuencias de la señal de estimulación *Chirp*, alrededor de la mina. Permitted con esto su ubicación, mejorar la resolución de la forma del objeto enterrado obtenido por el método de las envolventes de *Hilbert* y el uso de procesamiento de imágenes con la transformada *Contourlet*.

5.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone desarrollar un método de adquisición de señales que permita realizar prospecciones con distancias mayores, con el fin de reducir los tiempos de prospección. Además, realizar diferentes caracterizaciones de las tierras de las regiones de Colombia, lo que permitiría ver los comportamientos de los elementos naturales del terreno mediante una señal de estimulación.

5.3 Impactos

El principal impacto del presente trabajo es ahondar en la importancia de realizar la verdadera remoción de minas antipersona. En la actualidad, la remoción se realiza por una implosión adyacente al artefacto explosivo, provocando una serie de reacciones químicas entre los elementos constitutivos de la mina y el terreno. Como consecuencia de esto, se obtendrán grandes extensiones de suelos estériles, impredecibles, teniendo en cuenta que el 50% de la región colombiana es selvática.

Un segundo impacto del presente trabajo es el inicio de una tecnología propia, aplicada a la remoción de minas antipersona en suelos de la región de Antioquia, con todas sus variantes en morfología, clima y vegetación.

En tercer lugar, con esta investigación se propone implementar una verdadera tecnología de remoción de minas antipersonas y no implosiones cercanas a la mina improvisada.

REFERENCIAS

- Aki, K & Richards Ground P.G., (2002) Quantitative seismology. 2nd Edition university science books
- Annan, A., P., (1992) Ground penetrating radar workshop notes. *Sensor and so ware Inc. Mississauga, Ontario, Canada*
- ASTM INTERNATIONAL, (1990). Standard Test Method for Particle –Size Analysis of Soils. *ASTM D 854-83*.
- Attenborough, K., (1982). Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. *Journal of the Acoustical Society of America* 73 (3).
- Attenborough, K., Sabatier, J. M., Bass, H. E., y Bolen, (1986). The acoustic transfer functions at the surface of a layered pyroclastic soil. *Journal of the Acoustical Society of America*, 79 (5).
- Badger, A. S., (1988). Special Report on Digital Seismic Recorder Specification Standards by SEG Subcommittee on Digital Seismic Recorder Specifications. *Geophysics*, 53, No. 03, 415-416.
- Alakrishnan, A. V., (1984). Kalman Filtering Theory. Optimization Software, Inc. *Publication Division, New York*.
- Barry, K. M., Cavers, D. A. y Kneale, C. W., (1975). Report on Recommended Standards for Digital Tape Formats. *Geophysics*, 40, No. 02, 344-352.
- Bass, H. E., Bolen, L. N., Cress, D., Lundien, J. y Flohr, M., (1980). Coupling of airborne Sound Into the Earth: Frequency Dependence. *The Journal of the Acoustical Society of America* 67, 1502-1506
- Bellan, F., Bulletti, A. y Capineri, L., (2004). (Non-Linear) Acoustic Landmine Detection Study. *EUDEM2 Technology Survey*.
- Beranek, Leo L., (1993). Acoustical Measurements. Acoustical Society of America. *American Institute of Physics, Inc*.
- Biot, M. A., (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low frequency range. *J. The Journal of the Acoustical Society of America* 28, 168–178.
- Biot, M. A., (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II. Higher frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America* 28, 179-191.
- Bonomi, E., Brieger, L., Nardote, C. y Pieroni, E., (1999). Acoustic earth imaging by seismic migration. Lecture Notes in Physics. Volume 518/1999. *Springer Berlin – Heidelberg*.
- Bracewell, R. N., (1986). The Fourier Transform and its Applications. *Second Edition. McGraw Hill*
- Bull, J. M., Quinn, R., y Dix, J. K., (1998). Reflection Coefficient Calculation from Marine High Resolution Seismic Reflection (Chirp) Data and Application to an Archeological Case Study. *Marine. Geophysical Researches*, V.20, p. 1-11.
- Cafforio C., Prati, C. Y Rocca, E., (1991). SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. 27, No. 2.
- Cannelli, G. B. y D’ottavi, E., (1989). Echographic technique-based apparatus to detect structure and anomalies in the subsoil. *American Institute of Physics. Rev. Sci. Instrum.* 60 (5).
- Cannelli, G. B, D’ottavi, E. y Santoboni, S., (1987). Electroacoustic pulse source for high resolution seismic explorations. *American Institute of Physics. Rev. Sci. Instrum.* 58 (7).
- Carcione, J. M., (2001). Wave Fields in Real Media: Wave Propagation in Anisotropic, An elastic and Porous Media. *Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration*. Pergamon. Elsevier Science.

- Cheeke, J. D., (2002). *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press LLC.
- Chen, C H., (2007). *Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization*. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*
- Childers, D. G., Skinner, D. P. & Kemerait, R. C., (1977). *The Cepstrum: A Guide to Processing*. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 65, Nro. 10.
- Claerbout, J. F., (1985), *Imaging the Earth's interior*: Blackwell Scientific Publications, *Oxford, London, Edinburgh*.
- Claria, J. J., (2003). *Caracterización y Comportamiento del Módulo de Elasticidad Dinámico de Loess en Estado Natural y Compacto*. *Tesis Doctoral de la Universidad Nacional de Córdoba*.
- Codron, F., (2000). *Detection Of Surface Waves In The Ground Using an Acoustic Method*. Thesis of Master of Science in Mechanical Engineering, *Georgia Institute of Technology*.
- Connolly, P., (1999). Elastic impedance. *THE LEADING EDGE*. Vol 18. pp. 438-452.
- Costain, J. K. y Coruh, C., (2004). *Basic Theory of Exploration Seismology*. *Handbook of Geophysical Exploration*. *Seismic Exploration Vol. 1, Elsevier Ltd.*
- Cramond, A. J. y Don, C.G., (1984). Reflection of impulses as a method of determining acoustic Impedance. *Journal of the Acoustical Society of America* 75 (2).
- Daniels, David J., (2004). *Ground Penetrating Radar - 2nd. Edition*. *The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom*.
- Das. B. M. (1983). *Fundamentals of Soil Dynamics*. *Elsevier Science Publishing Co. Inc. New York*.
- Dearing,(1994) *Envirosmetal magnet susceptibilidad: Using thr Bartigton MS2 sistem chi publishing,kentworth*.
- Dobrin, M. B., (1976). *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill, Inc. New York.
- Dobrin, M. y Savit, C., 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting*. *McGraw-Hill Book Company*
- Doctor, S. R., et al., (1986). SAFT - The Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing. *NDT-International* 19, 1986, pp. 163-167.
- Don, C.G. y Cramond, A. J., (1984). Soil impedance measurements by an acoustic pulse technique. *Journal of the Acoustical Society of America* 77 (4).
- Donskoy, D. M. y Sutin, A. M., (2002). Method and apparatus for acoustic detection of mines and other buried man-made objects. *US Patent 6415666*.
- Duffaut, K., Alsos, T., Landro, M., Rogno, H. y Al-Najjar, N. F., (2000). Shear-Wave Elastic Impedance. *THE LEADING EDGE*. Vol 19. pp. 1222-1229.
- Eargle, J., (2005). *The Microphone Book*. Second edition. Focal Press is an imprint of Elsevier.
- Elbern, A.W. y Guimarães, L., (1999). Synthetic Aperture Focusing Technique for Image Restauration. *International Symposium on NDT Contribution to the Infrastructure Safety Systems*. *NDTISS '99*.
- Eyre, J. & Bier, J., (2000). *The Evolution of DSP Processors*. Berkeley Design Technology, Inc.
- Feng, S. & Johnson, D. L., (1983). High-frequency acoustic properties of a fluid/porous solid interface. I. New surface mode. *Journal of the Acoustical Society of America* 74 (3), 906-914.
- Feng, S. & Johnson, D. L., (1983). High-frequency acoustic properties of a fluid/porous solid interface. II. The 2D reflection Green's function. *Journal of the Acoustical Society of America* 74 (3), 915-924.
- Frazier, C. H. y O'Brien Jr., W. D., (1998). Synthetic Aperture Techniques with a Virtual Source Element. *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 45, No. 1.

- Frazier, C. H., Cadalli, N., Munson Jr., D.C y O'Brien Jr., W., (2000). Acoustic Imaging of Objects Buried in Soil. *Journal Acoustical Society of America*. 108 (1).
- Gadallah, M. R. y Fisher, R., (2009). *Exploration Geophysics*. Springer. Verlag, Berlin.
- Gasulla, M. F., (1999). Obtención de Imágenes de la Distribución de Impedancias Eléctricas del Subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Gazdag, J. y Sguazzero, P., 1984. Migration of Seismic Data. *Proceedings of the IEEE*, Vol... 72, N° 10.
- Gómez Álvarez Arenas, T. E., (1994). Estudio de la Propagación Ondas de Biot en Materiales Porosos Trifásicos y de la Interacción en las Discontinuidades con un Medio Elástico y Continuo. *Tesis Doctoral de la Universidad Complutense de Madrid*.
- González, R. C. y Woods, R. E., (2002). Digital Image Processing. Second Edition, *Prentice-Hall, Inc*.
- Gray, S. H., Etgen, J., Dellinger, J. y Whitmore, D., (2001). Seismic Migration Problems and Solutions. *Geophysics* 66, 1622.
- Gregg D. Larson, James S. Martin, and Waymond R. Scott, Jr. Detection of Buried Landmines Using Seismic Waves and Microphones. *Georgia institute of Technology*. SPIE, Bellingham, (2006)
- Gutowski, M., Bull, J., Henstock, T., Dix, J., Hogarth, P., Leighton, T. and White, P., (2002). Chirp sub-bottom profiler source signature design and field testing. *Marine Geophysical Researches* 23: 481–492, 2002
- Hardin, B. y Drnevich, V., (1972). Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, Vol. 98, No. 7, pp. 667-692.
- Hardin, B. y Richart, F., (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *JSMFD, ASCE*, 89, SM1, 33-65.
- Hickey, C. J. y Sabatier, J. M., (1997). Measurements of two types of dilatational waves in an air-filled unconsolidated sand. *Journal of the Acoustical Society of America* 102 (1).
- Hickey, C. J., Sabatier, J. M. y McGee, T. M., 2000. A method for the detection of shallow buried objects. *ANNALI DI GEOFISICA* VOL. 43. N. 6.
- Hickling, Robert, (2005). Method and apparatus for acoustic detection of buried objects. *US Patent 6862252*.
- Higgins, R. J., (1990). Digital Signal Processing In VLSI. *Prentice-Hall, Inc. New Jersey*. House, L. J. y Pape, D. B., (1994). Method and apparatus for acoustic energy identification of objects buried in soil. *US Patent 5357063*.
- Hsu, H., (1997). Theory and Problems of Probability, Random Variables, and Random Processes. McGraw-Hill, New York.
- Inazaki, T., (2004). High-resolution seismic reflection surveying at paved areas using an S-wave type land streamer. *Exploration Geophysics*, Vol. 35.
- Ingard, U., (1953). On the Theory and Design of Acoustic Resonators. *Journal of the Acoustical Society of America* Vol 25 N° 6, pp. 1037-1061.
- Jinfeng. M. y Morozov. I. B., (2004). Ray-Path Elastic Impedance. CSEG 2004. *Canadian Society of Exploration Geophysicists National Convention*.
- Jinfeng. M. y Morozov. I. B., (2005). The Exact Elastic Impedance. CSEG 2005. *Canadian Society of Exploration Geophysicists National Convention*.
- Johnson, A. J. and Barina, B.A., (1983). The effects of Surface Mapping Corrections with Synthetic-Aperture Focusing Techniques on Ultrasonic Imaging. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, VOL. SU-30, NO. 5.

- Kalman, R. E., (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D): 35-45.
- Kanamori, H. & Anderson, D. L., 1977. Importance of Physical Dispersion in Surface Wave and Free Oscillation Problems: Review. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 15. 105-102.
- Kino, G. S., (1996). Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing. *Prentice-Hal I, Inc.*
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., (2000). Fundamentals of Acoustics. *Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc.*
- Kirilin, R. L., Hutchins, R., Cudzilo, B., Dewey, L. A. y Hailey, L. L., (1984). *The enhancement seismogram parameters using image processing techniques*. Exploration 23.
- Korman, M. S. y Sabatier, J. M., (2004). Nonlinear acoustic techniques for landmine detection. *Journal of the Acoustical Society of America* 116 (6).
- Kramer, L. S., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. *Hall, Inc.* Upper Saddle River, New Jersey.
- Lagunas, M. A., (2003). Procesado de Señal. Publicación del Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Cataluña (CTTC), *Cataluña, Barcelona, España.*
- Lawrence, D. E. P. y Don, C. G., (1995). Impulse measurements of impedance and propagation constant compared to rigid-frame and dual-wave predictions for foam. *Journal of the Acoustical Society of America* 97 (3).
- Lee, H. y Wade, G., (1986). Modern Acoustical Imaging. The Institution of Electrical and Electronics Engineers. *New York.*
- Lee, J. S., (2003). High resolution geophysical techniques for small-scale soil model testing. PhD Thesis, *Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.*
- Linde, N., Chen, J., Kolwalsky, M., Hubbard S., (2006). Hydro-geophysical parameter estimation approaches for field scale characterization applied hydrophysics. *Springer*. London. Chap2
- Lévesque, D., Blouin, A., Néron, C. y Monchalín, J. P., (2004). Performance of ultrasonic imaging with frequency domain SAFT (F-SAFT). 17th World Conference on Nondestructive Testing, WCNDT (2004). *Shanghai, China.*
- Lopera & Nada Milisavljevic., (2007). Prediction of the effects of soil and target properties on the antipersonal landmine performance of ground penetrating radar: A Colombian case study. *Science Direc. Journal of applied geofisics* 63 (2007) 13-23
- Mahafza, B. R. y Elsherbeni, Z., (2004). MATLAB Simulations for Radar Systems Design. *CHAPMAN & HALL/CRC, CRC Press Company.*
- Mamou Jonathan, (2002). Subsurface Acoustic Imaging in a Highly Attenuating Material. Thesis of Master of Science in Electrical Engineering. *College of the University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, Illinois.*
- Manolakis, D. G., Ingle, V. K. y Kogon, S. M., (2005). Statistical and Adaptive Signal Processing: Spectral Estimation, Signal Modeling, Adaptive Filtering, and Array Processing. *Artech House Inc.*
- Maurice Ewing, W. et al. (1957). Elastic Waves in Layered Media. *McGraw-Hill Co. Inc. New York.*
- McCann, D.M., Jackson, P.D. y Fenning, P.J., (1988). Comparison of the Seismic and Ground Probing Radar Methods in Geological Surveying. *IEE Proceedings*, Vol. 13.5, Pt. F, No. 4.
- Microsoft Developer Network (2000). MSDN Library Visual Studio 6.0. Microsoft Corp.
- Milsom, J., (2003). Field Geophysics. *John Wiley & Sons Ltd. Third Edition*

- Molina, G. A. R., Rinaldi, V. A. y Taborda, R., (2004). Tomografía Geo eléctrica: Desarrollo y Potenciales Aplicaciones en Geotecnia. XVII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, SINERGIA 2004.
- Molina, G. R. y Rinaldi, V. A., (2007). Identificación de los Primeros Arribos de Ondas de Cross-Hole Sonic Logging mediante un estimador de máxima verosimilitud. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Argentina. The e-Journal & Database of Nondestructive Testing – ISSN 1435-4934.
- Molina, G. R. y Rinaldi, V. A., (2008). Ecografía Acústica del Suelo a través de sensores .Suelos e Ingeniería Geotécnica, CAMSIG (2008), Octubre del 2008, La Plata, Argentina.
- Molina, G. R., Rinaldi, V. A., (2009). Ecografía Acústica Subsuperficial en Arenas Sueltas a Través de Sensores no Acoplados. III Conferencia Sudamericana de Ingenieros Geotécnicos Jóvenes. 30 de Marzo al 1 de Abril de (2009), Córdoba, Argentina. ISBN 978-987-24861-2-9, CD ISBN 978-987-24861-6-7.
- Mosher, D.C. y Simpkin, P.G. (1999). Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: data acquisition. *Geoscience Canada*, 26 (4): 174-188.
- Müller, S. y Massarani, P. (2001). Transfer Function Measurement with Sweeps. *Journal Audio Engineering Society*, Volume 49 Issue 6 pp. 443-471.
- Mullins, C., (1977). Magnetic susceptibility of the soil its significance in soil science-A review. *Journal of Soil Science* 28, 223-243.
- Oppenheim, A. V. y Schaffer, R. W., (1999). Discrete-Time Signal Processing. 2nd Ed. Prentice-Hall Signal Processing Series.
- Oppenheim, A. y Willsky, A. S., (1983). Signals and Systems. Prentice Hall Inc.
- Orellana, E., (1974). Prospección Geoeléctrica por Campos Variables. Paraninfo, Ltd. Madrid.
- Orellana, E., (1982). Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. 2^a ed., Paraninfo, Ltd. Madrid
- Papandreou, E. Rustighi and M.J. Brennan A Study Into The Feasibility of Using Acoustic Techniques to Locate Buried Objects. ISVR Technical Memorandum No 979 October 2010
- Papoulis, A. y Pillai, S.U., (2002). Probability, Random Variables and Stochastic Processes. 4 Editions, Mc. Graw Hill, New York 10020.
- Park C.B, Xia, J. and Miller, R.D. Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Rayleigh waves *Geophysics* vol 64 No 3 1999
- Petrashen. G. I. (2003). Propagation of Seismic Wave Fields in Layered Media. I. *Journal of Mathematical Sciences*. Vol. 116. No. 2.
- Petrashen. G. I. (2003). Propagation of Seismic Wave Fields in Layered Media. II. *Journal of Mathematical Sciences*. Vol. 117. No. 1.
- Prasad, S. y Mahalanabis, A. K., (1980). Adaptive Filter Structures for Deconvolution of Seismic Signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE- 18, No. 3.
- Proakis, J. G. y Manolakis, D. G., (1996). Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. Third Edition. Prentice Hall Inc.
- Pullan, S. E., (1990). Recommended Standard for Seismic –Radar Files in the Personal Computer Environment. *Geophysics*, 55, No. 09, 1260-1271.
- Quinn, R., Bull, J. M. y Dix, J. K., (1998). Optimal Processing of Marine High Resolution Seismic Reflection (Chirp) Data. *Marine Geophysical Researches*. Vol 20, pp. 13-20.
- Richard, J. R., Hall, J. R. y Woods, R. D., (1970). Vibrations of Soils and Foundations. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

- Rinaldi V. A. y Francisca F. M. , (2000). Dielectric Permittivity of Loess From the Central Area of Argentina. *XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguazú, Brasil*, Vol 1, pp. 209-216.
- Rinaldi V. A., Redolfi E. R. Y Santamarina J. C., (1997). Propiedades dieléctricas del Loess y su Influencia en las Mediciones con Geo-Radar. Encuentro de Geotécnicos Argentinos GT'97.
- Rinaldi, V. A., (2002). Límites Y Potenciales Aplicaciones Del Georradar (Gpr) En Limos Loessicos Colapsables. *XXI Reunión Científica de la asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Rosario*.
- Rogers, A. J. y Don, C. G., (1993). Location of Buried Objects by an Acoustic Impulse Technique. *Acoustic Australia*. Vol. 22, Nº 1-5.
- Rogers, A. J. y Don, C. G., (1996). Object detector for detecting buried objects. US Patent 5563848.
- Rossing, T. D., (2007). *Springer Handbook of Acoustics*. Springer Science+Business Media, LLC New Cork.
- Rupitsch, S. J., Maier, F. Y Zagar, B. G., (2006). Synthetic Aperture Focusing Technique in High-Frequency Ultrasound Imaging to Locate Layer Delamination. *IMTC (2006) - Instrumentation and Measurement Technology Conference Sorrento, Italy*.
- Sabatier, J. M. y Gilbert, K. E., (2000). Method for detecting buried objects by measuring seismic vibrations induced by acoustical coupling with a remote source of sound. *US Patent 6081481*.
- Sabatier, J. M. y Xiang, N., (2001). An investigation of acoustic-to-seismic coupling to detect buried antitank landmines. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, Vol. 39.
- Sabatier, J. M., Bass, H. E., Bolen, L. N. y Attenborough, K., (1986). Acoustically Induced Seismic Waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80.
- Sabatier, J. M., Bass, H. E., Bolen, L. N. y Attenborough, K., (1986). The interaction of airborne sound with the porous ground: the theoretical formulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 79.
- Sabatier, J. M., Sokol, D. C., Frederickson , C. K., Römken , M. J. M., Grissinger, E.H. y Shipps, J. C., (1996). Probe microphone instrumentation for determining soil physical properties: testing in model porous materials. *Soil Technology* 8, 259-274. *Elsevier Science*.
- Sabatier, J. M., Xiang, N., Petculescu, A., Aranchuk, S., Bradley, M., y Korman, M., (2003). Vibration sensors for buried landmine detection. Proc. International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, 2003.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A. y Fam, M. A., (2001). Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring. *John Wiley & Sons, Ltd*.
- Santamarina, J. C., Rinaldi, V. A., Fratta, D., Klein, K., Wang, Y.H., Cho, G.C. y Cascante, G., (2002). A Survey of Elastic and Electromagnetic Properties of Near- Surface Soils. Near-Surface Geophysics, Chapter IV. *Ed. D. Buttler, SEG*.
- Scanlon, Michael V., (2003). Method and apparatus using acoustic sensor for sub-surface object detection and visualization. *US Patent 6536553*.
- Schock, S. G., Tellier, A., Wulf, J., Sara, J. y Ericksen, M., (2001). Buried Object Scanning Sonar. *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. 26, NO.*
- Schutz, K. D., (1994). Optimum Deconvolution of Seismic Transients: A Model-Based Signal Processing Approach. *Thesis of Master of Science, Ohio University*.
- Scott, W. R., Jr. Larson, G. D. y Martin, J. S., (2000) Simultaneous use of elastic and electromagnetic waves for the detection of buried land mines. *Proceedings of SPIE, Vol. 4038*.
- Sheriff, R.E. y Geldart, L.P., (1995). Exploration seismology. *Cambridge University Press; 2 edition*.

- Skolnik, M. I., (1990). Radar Handbook. Second Edition, McGraw-Hill.
- Smith, E., Wilson, P. S., Bacon, F. W., Manning, J. F., Behrens, J. A. y Muir, T. G., (1997). Measurement and localization of interface wave reflections from a buried target. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 103.
- Stockham, T., Cannon T. y Ingerbretsen, R.. (1975). Blind Deconvolution Through Digital Signal Processing. Proc. *IEEE*, 63:678–692.
- Stoll, R. D., (1980.) Theoretical aspects of sound transmission in sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America* 68, 1341-1350.
- Streeter, V. y Wylie, E. B., 1994. Mecánica de los Fluidos. Ver. Español. Ed. McGraw- Hill.
- Sullivan, R. J., (2004). Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts. SciTech Publishing Inc.
- Teixidó i Ullod, M. T., (2000). Caracterización del Subsuelo Mediante Sísmica de Reflexión de Alta Resolución. Tesis Doctoral de la Universidad de Barcelona, Barcelona.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. y Sheriff, R. E., (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. 2 edition.
- Toes, J., Sirovyak, W.: (2003). Metal Detector trial Colombiza technical Memorandum. Defense R&D Canada, Tm 2003-99 Colombia
- Turin, G. L., (1960). An Introduction to Matched Filters. *IRE Transactions on Information Theory*. Vo 6 Issue: 3.
- Ulrych, T. J. y Sacchi, M. D., (2005). Information-Based Inversion and Processing with Applications. Handbook of Geophysical Exploration. *Seismic Exploration*. Vo. 36. Elsevier Ltd.
- US Army Corps of Engineers, (1995). Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Applications, Washington, DC 20314-1000.
- Srdanovic, V.H. Aristizabal; M.R Fulla y C.A. Florez, (2013). Ondas Sísmicas y Sensores Inalambricos Herramientas Potenciales Para La Prospección de Suelos a Baja Profundidad. *Revista CINTEX* numero 16 81
- Van Der Veen, M., Spitzer, R., Green, A. G. y Wild, P., (2001). Design and application of a towed land-streamer system for cost-effective 2-D and pseudo-3-D shallow seismic data acquisition. *Geophysics*, Vol. 66.
- Vargas, E. A. and Ruiz, R. C., (2004). Axial resolution criteria for pulse echo measurement technique. *Latin America Transactions, IEEE*. VOL. 2, NO. 2: 81- 86.
- Vargas, E. A., (1999). Caracterización de Reflectores e Irregularidades Superficiales por Ultrasonidos en Aire. *Tesis Doctoral de la Universidad Complutense de Madrid*.
- Ver West. B., (1998). Elastic Impedance for the Inversion of Far Offset Seismic Sections. ARCO U.S. Patent US6058073.
- William Lambe, T. y Whitman, R. V., (1972). Mecánica de Suelos. Editorial Limusa- Wiley, S. A. México.
- Von Hippel, A., (1995) Dielectric materials and applications. Artech House.
- Wu, K., Xue, Q. y Adler, L., (1990). Reflection and transmission of elastic waves from a fluid-saturated porous solid boundary. *Journal of the Acoustical Society of America* 87, 2349-2358.
- Xiang, N. y Sabatier, J. M., (2000). Land mine detection measurements using acoustic-to-seismic coupling. *Proceedings of SPIE* Vol. 4038.
- Yan, (2002). Suppression of Water-Column Multiples by Combining Components of Ocean-Bottom Seismic Surveys. *Thesis of Master of Science*, University of Calgary.
- Yao, H., (1997). Synthetic Aperture Methods for Medical Ultrasonic Imaging. *Diploma in Computer Science* (Cand.scient.) - University of Oslo.

Yilmaz, Ö. & Doherty, S. M., (1987). Seismic data processing. *Society of Exploration Geophysicists*.

Younis, W. A., Stergiopoulos, S., Havelock, D. y Grodski, J., (2002). Nondestructive imaging of shallow buried objects using acoustic computed tomography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 111.

Apéndice

Certificados de ponencias y artículos