

ONDAS SÍSMICAS Y SENSORES INALÁMBRICOS: HERRAMIENTAS POTENCIALES PARA LA PROSPECCIÓN DE SUBSUELOS A BAJA PROFUNDIDAD

"SEISMIC WAVES AND WIRELESS SENSORS: POTENTIAL TOOLS FOR REMOTE SHALLOW SOIL PROSPECTION".

V. Srdanovic^a, V. H. Aristizabal^b, M. R. Fulla^c y C. A. Florez^d

RESUMEN

Este trabajo presenta el estado del arte y propone una metodología a desarrollar en el uso de ondas sísmicas para prospección de subsuelos con énfasis en la detección de discontinuidades físicas a baja profundidad. Esta actividad es el centro de atención de importantes áreas de la nación, como es el caso de la minería, la geología, la construcción (geotecnia), la ingeniería ambiental, las ciencias forenses, el sector militar y la arqueología. Las propiedades de los suelos locales, los cuales se caracterizan por tener una topología irregular y una alta densidad de vegetación, imponen condiciones desde el punto de vista teórico y experimental muy diferentes a las estudiadas por otros autores que utilizan métodos sísmicos para este propósito en el ámbito internacional. Adicionalmente, el trabajo de campo exige que los prototipos sean portátiles y a esto, se le podrían sumar condiciones hostiles que tornarían difícil la presencia continua del personal de investigación en el trabajo de campo en algunos casos, siendo así de fundamental importancia, el control y la adquisición de datos remotamente mediante tecnología inalámbrica. El impacto de esta actividad y las dificultades que implicaría implementar este tipo de tecnologías en suelos nacionales, nos motiva a proponer en el presente trabajo, una novedosa metodología que hace uso de métodos geofísicos junto a sensores inalámbricos para detectar discontinuidades físicas.

PALABRAS CLAVES:

Ondas sísmicas, detección de objetos en el subsuelo, exploración del subsuelo, sensores inalámbricos.

ABSTRACT

This contribution presents the art of state and proposes a new method using seismic waves for prospecting soils in order to detect physical discontinuities. This activity is the focus of attention of important areas such as mining, geology, geotechnical and environmental engineering, forensic sciences, the military sector and archeology. The properties of local soils, which are characterized by having an irregular topography and a high density of vegetation, impose physical conditions different to those studied by several authors in experimental and theoretical works in foreign soils, where the seismic method is used. Additionally, the fieldwork requires portable prototypes to avoid hostile conditions to which the workers could be exposed due to a continuous presence in field. In this regard, it is necessary to employ wireless technology in order to control and acquire data remotely. Taking in mind the importance of this activity and the aim of overcoming the risks associated to local soil prospection, it has been proposed in this work a novel method that uses geophysical methods and wireless sensors to detect physical discontinuities.

KEYWORDS:

Seismic waves, buried object detection, soil exploration, wireless sensors.

Grupo de Investigación en
Ciencias Electrónicas e
Informáticas, Institución
Universitaria Pascual Bravo, A.A.
6564 Medellín
vesna.srdanovic@pascualbravo.edu.co

^aFacultad de Ingeniería,
Universidad Cooperativa de
Colombia, A.A. 50630 Medellín
vharist@yahoo.com

^bFacultad de
Telecomunicaciones,
Universidad Santo Tomás,
Medellín



1. INTRODUCCIÓN

LA FÍSICA DE LAS ONDAS SÍSMICAS

La prospección geofísica es el estudio indirecto del subsuelo o de la corteza terrestre que no está expuesta a la vista directa, utilizando algún método físico. En general, todas las técnicas de prospección tienen en común la integración de diversos conjuntos de mediciones relacionadas con las diferentes propiedades físicas y físico-químicas del subsuelo. Adicionalmente, involucran un cuidadoso análisis e interpretación cuantitativa de los resultados, con el objetivo de entregar un diagnóstico sobre la estructura del subsuelo. El gran interés de obtener la localización eficiente de los recursos naturales y de objetos enterrados en el subsuelo, impulsó el desarrollo de diferentes métodos de prospección geofísica, entre los cuales se encuentra la exploración vía ondas sísmicas [Herrera y Cooper, 2010; Khalil et al., 2006] y ondas electromagnéticas [Scott et al., 2004].

Una fuente sísmica es un agente que libera energía mecánica en el suelo, produciendo una deformación temporal del terreno, la cual se propaga a una determinada velocidad (onda

elástica o sísmica) que es fuertemente dependiente de las propiedades físicas del medio [Scott, 2006; Eringen and Suhubi, 1975; Achenbach, 1973]. En otras palabras, las ondas sísmicas son vibraciones mecánicas que se propagan en el subsuelo, las cuales pueden reflejarse, refractarse, difractarse y presentar comportamientos interferométricos [Achenbach, 1973; French, A.P., (1971).].

En la práctica, es posible generar perturbaciones sísmicas artificialmente a partir de una explosión o un actuador mecánico, tal como se muestra en la Figura 1. El conjunto de ondas generadas por la perturbación en la superficie, se propagan en el subsuelo y la dirección de su propagación se representa mediante las flechas de la Figura 1(a). Como se puede observar en esta misma figura, las ondas que viajan de la superficie al fondo (ondas incidentes), al enfrentarse a un cambio de medio (zona a cuadros), pueden reflejarse y las características de estas ondas reflejadas, son fuertemente dependientes de las propiedades mecánicas y geométricas del medio que las reflejó. En la superficie se pueden ubicar sensores (por ejemplo geófonos) que detecten la perturbación generada por las ondas reflejadas. Cabe mencionar que parte de la energía asociada a las ondas incidentes, podría dar lugar a la generación de ondas transmitidas que penetrarían en el medio representado por cuadros.

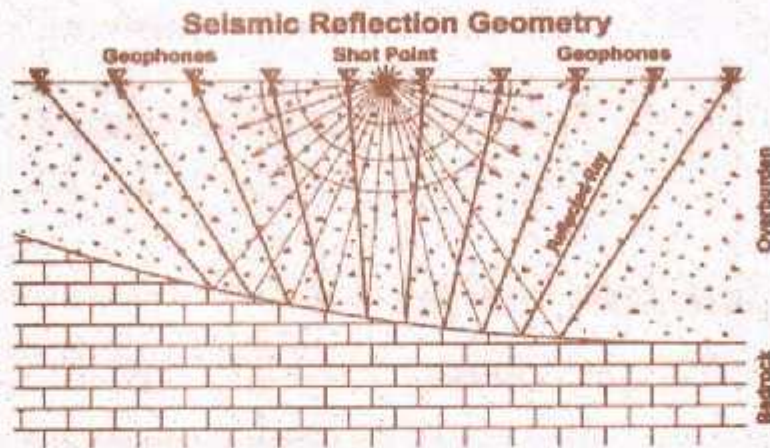


Figura 1. (a) Ondas sísmicas generadas a partir de una explosión [Imagen tomada de Enviroscan Inc, 2012]

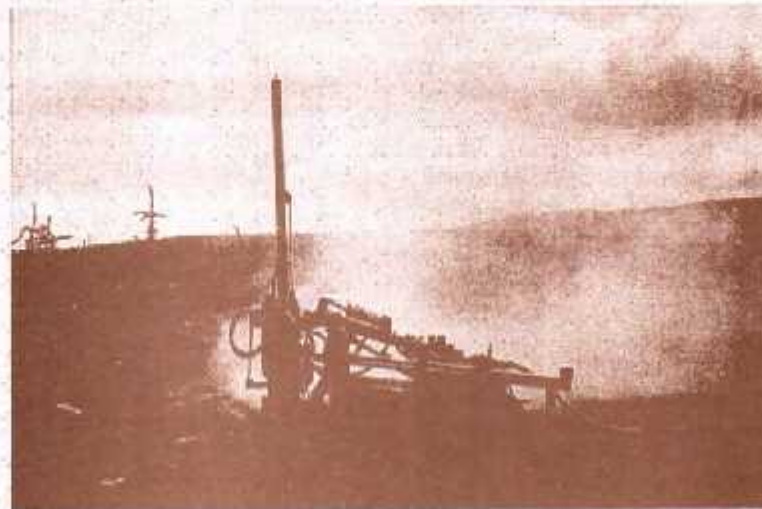


Figura 1. (b) un actuador mecánico [Imagen tomada de Bamford D. y Faber. S, 1976].

En geofísica las ondas sísmicas se clasifican en dos grupos, las ondas de cuerpo o volumétricas, que se propagan al interior del suelo y las superficiales, que se propagan a lo largo de un volumen muy reducido, cerca de la superficie terrestre, puesto que ellas se atenúan exponencialmente con la profundidad. Las ondas volumétricas se clasifican a su vez en ondas primarias (ondas P) y ondas secundarias (ondas

S). Las ondas P son ondas longitudinales donde la vibración de las partículas se transmite en la dirección de propagación de la onda, en contraste con las ondas S que son transversales y las partículas vibran perpendicularmente a la dirección de propagación (ver Figura 2). Las ondas P se evidencian físicamente como compresiones del medio y pueden propagarse en todas las direcciones y en todos los materiales, a

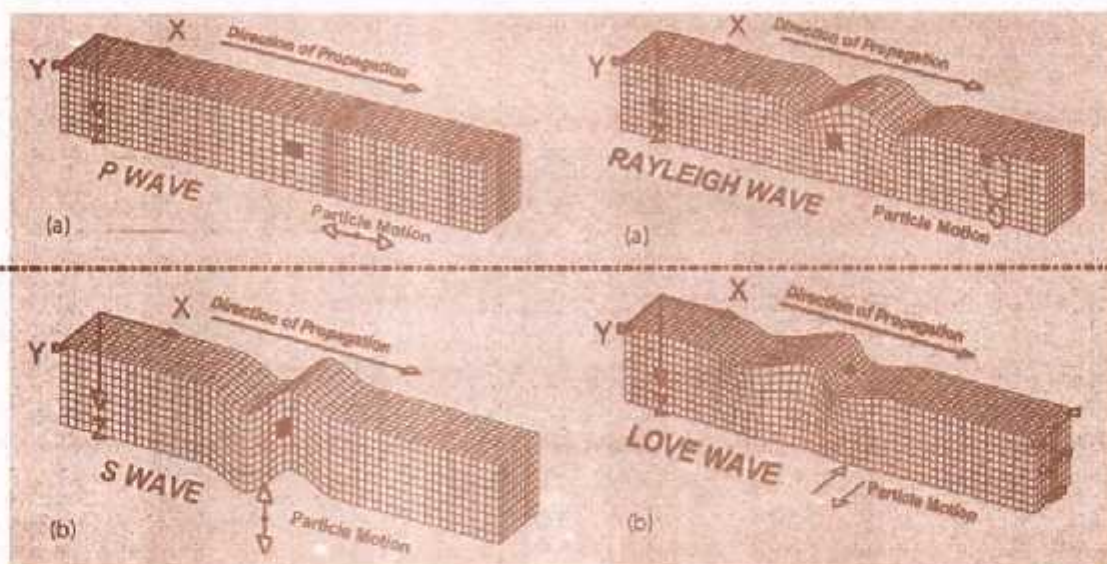


Figura 2. Las ondas P son ondas longitudinales donde la dirección de vibración de un elemento del medio (cuadro negro), es paralela a la dirección de propagación de la onda (eje x). A diferencia de las ondas P, las ondas S son transversales, aquí el elemento del medio vibra transversalmente (eje z) a la dirección de propagación de la onda sísmica. Un análisis de la mecánica ondulatoria muestra que las ondas P se propagan con mayor velocidad (razón por la que también se les denomina ondas primarias) que las ondas S (secundarias). [Imágenes tomadas de la Universidad de Alicante, 2012].

diferencia de las ondas S que no se pueden propagar en medios líquidos, dado que las características físicas de estos materiales no permiten fuerzas de cizalla. Las ondas superficiales denominadas ondas de Rayleigh y Love (en honor a los científicos que demostraron teóricamente su existencia), cuentan con las características que se describen a continuación. En las ondas Rayleigh, las partículas se mueven siguiendo una trayectoria elíptica en el plano xz, tal como se muestra en la Figura 3(a), en contraposición a la dirección de propagación de la onda. En las ondas de Love, la vibración de la partículas se presenta perpendicularmente a la

Figura 3. Las ondas (a) Rayleigh y (b) Love se presentan en puntos cercanos a la superficie terrestre debido a que se atenúa exponencialmente con la profundidad. Un análisis de la mecánica ondulatoria predice que las ondas Love y Rayleigh se propagan a una velocidad de alrededor del 90% y 70% de la velocidad de las ondas S, respectivamente [Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica]. [Imágenes tomadas de la Universidad de Alicante, 2012].

dirección de propagación, es decir, una onda de Love es transversal pero dicha vibración ocurre paralelamente al plano de la superficie (eje y en la Figura 3(b)).

Las ondas sísmicas se propagan a diferentes velocidades dependiendo de las propiedades mecánicas del subsuelo como la densidad, el coeficiente de Poisson, el módulo de Young, entre otras. Las ondas P en general se propagan con mayor velocidad y alcanzan velocidades de aproximadamente 0.330 km/s en el aire, 0.300 km/s en suelos blandos, 1.45 km/s en agua, 2.6 km/s en roca dura y cerca de 5 km/s en granito. Las ondas S se propagan a una velocidad cercana a 0.59 la velocidad de las ondas P. Las ondas superficiales se propagan con velocidades que son fracciones de la velocidad de las ondas S, es decir,

en un sismo son las últimas en arribar desde el epicentro de la perturbación a los sensores puestos en la superficie terrestre (ver Figura 4).

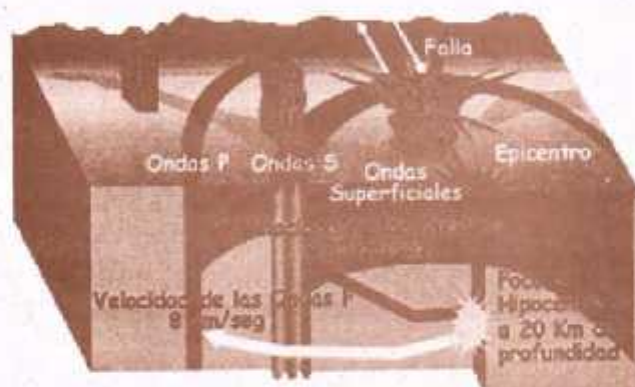


Figura 4. Propagación de ondas sísmicas en un terremoto [Imagen tomada de Biblioteca de Investigaciones, 2012]. Las ondas P se propagan a una velocidad de entre 8 y 13 km/s; circulan por el interior de la Tierra, atravesando tanto líquidos como sólidos. Son las primeras que registran los aparatos de medida o sismógrafos en la superficie, de ahí su nombre P. Las ondas S son más lentas que las P y su velocidad de propagación está entre 4 y 8 km/s; atraviesan únicamente los sólidos y se registran en segundo lugar en los aparatos de medida. Las ondas superficiales son las más lentas de todas y su velocidad de propagación es de alrededor de 3,5 km/s y son producto de la interacción entre las ondas P y S a lo largo de la superficie de la Tierra; son las que producen más daños. Este tipo de ondas son las que se registran en último lugar en los sismógrafos.

2. PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO VÍA ONDAS SÍSMICAS

En la prospección del subsuelo vía ondas sísmicas, se pueden destacar los métodos sísmicos activos que utilizan fuentes artificiales de energía mecánica o vibracional como pequeñas explosiones subterráneas, caída de objetos pesados, fuentes de vibraciones mecánicas o de ondas acústicas. Las ondas generadas por las fuentes sísmicas artificiales se transmiten en el subsuelo y cada vez que se encuentran con una interfase (límite de dos capas con diferentes propiedades físicas, es decir, una frontera donde

se presenta una discontinuidad física del medio) experimentan una partición de la energía. Parte de esta energía es reflejada, dando origen a las ondas de interfase, ondas superficiales y las típicas ondas reflejadas; y la otra parte de la energía continúa propagándose en el otro medio, generándose las típicas ondas refractadas.

Las ondas superficiales o las que se reflejan desde el subsuelo hacia la superficie del terreno, pueden ser detectadas por medio de sensores como geófonos, acelerómetros o vibrómetros (ver Figura 5). Con base en las mediciones realizadas en superficie, se pueden desplegar módulos de visualización y ser posteriormente analizados e interpretados de tal manera que se pueda extraer información acerca de las características de las discontinuidades u objetos presentes en el subsuelo [Herrera, Y., Cooper, N. y Mustagh

Resources Ltd.]. También se puede destacar que en la prospección del subsuelo con sísmica activa hay tres técnicas diferentes: la no invasiva (la fuente de perturbación y los sensores no hacen contacto con el suelo), la invasiva (la fuente de perturbación y los sensores hacen contacto con el suelo), y la híbrida (uno de los dos, la fuente de perturbación o los sensores, hacen contacto con el suelo y el otro no). Independientemente de la técnica que se adopte, en todas ellas se obtiene información de las discontinuidades físicas u objetos enterrados, a partir de las mediciones realizadas en la superficie.

Las Figuras 5 permiten comprender el proceso de generación y propagación de las ondas sísmicas. El caso más simple corresponde a una fuente puntual de ondas mecánicas ubicada en la

superficie del suelo, tal como se muestra en la Figura 5(a). Esta gráfica es el resultado de una simulación computacional donde se logra diferenciar los diferentes tipos ondas generadas (ondas P, S y superficiales) y su distribución de desplazamientos. En la Figura 5(b) se ilustra una situación similar donde se puede observar la dirección de propagación de las ondas generadas por la fuente puntual (líneas verdes) y posteriormente al encontrar una discontinuidad en el medio donde se propagan (zona en cuadros), experimentan un cambio en la dirección de propagación, generan ondas reflejadas y refractadas (líneas en rojo). Las ondas reflejadas son las que logran retornar a la superficie y pueden ser detectadas con diferentes tipos de sensores como los mencionados previamente.

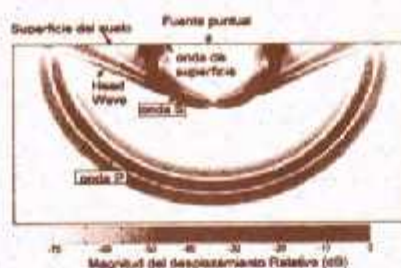


Figura 5 (a)

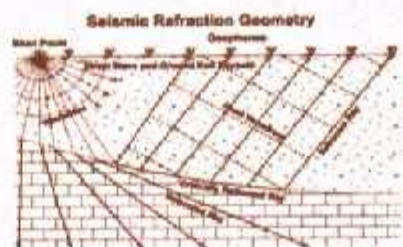


Figura 5 (b)

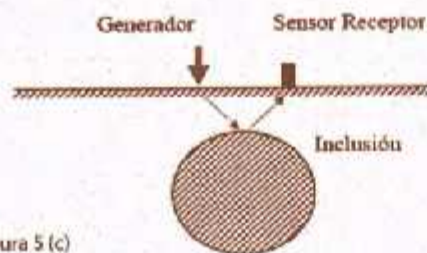


Figura 5 (c)

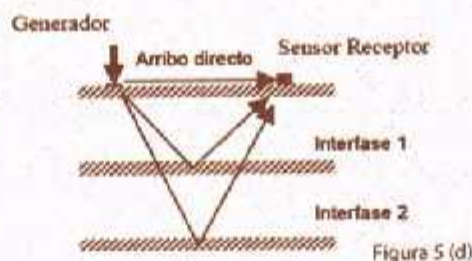


Figura 5 (d)

Figura 5. (a) Ondas generadas por una fuente puntual en un semi-espacio elástico y homogéneo [Imagen tomada de Schroder y Scott, 2000]. (b), (c) y (d) Esquemas geométricos de la emisión y recepción en los diferentes sensores (de desplazamientos, aceleraciones o velocidades) ubicados en la superficie, de las ondas reflejadas y refractadas debido a las discontinuidades que se presentan al interior del semi-espacio [Imágenes tomadas de Hernández (2008), Molina y Rinaldi (2008)].

Estas ondas mecánicas reflejadas, producen un patrón de vibraciones características en la superficie, el cual está fuertemente relacionado

con la geometría y las propiedades físicas del medio y los objetos que subyacen en la superficie. En la Figura 5(c) se ilustra el montaje típico de

reflexión para el estudio de inclusiones a baja profundidad. Las ondas mecánicas se generan mediante una fuente sísmica en la superficie, se propagan en el subsuelo y al encontrarse con la inclusión, se reflejan de nuevo a la superficie para ser detectadas por un sensor de movimiento. Este tipo de montaje también se puede extender para estudios sobre caracterización de estratos como se muestra en la Figura 5(d), donde el modelo se torna más complejo que en el caso anterior, al considerar los fenómenos interferométricos que se presentan entre las ondas reflejadas y la de arribo directo.

Los parámetros ondulatorios que se registran en superficie, como pueden ser la velocidad de propagación, la amplitud, la fase y la atenuación, están fuertemente relacionados con las propiedades elásticas del medio [Achenbach, 1973; Richard, 1970; Eringen, 1973], siendo esta una de las principales razones que justifica el empleo de métodos sísmicos para la detección de objetos. Estudios que emplean esta metodología,

han permitido determinar experimentalmente la velocidad de onda para algunos materiales poliméricos, [Patel, 1992] que poseen una velocidad de onda de corte aproximadamente 20 veces mayor que el de un suelo típico homogéneo.

Una fuente de ondas mecánicas que se aproxime a una fuente puntual, puede lograrse empleando vibradores mecánicos de alta energía, golpes mecánicos o explosivos sobre la superficie del suelo, tal como se muestra en la Figura 6(a). Considerar el modelo de fuente puntual dentro de la experimentación, conlleva a simplificar sustancialmente los cálculos y algoritmos computacionales y el posterior análisis e interpretación de los datos obtenidos. Una alternativa para simplificar el análisis, consiste en el uso de fuentes acústicas altamente direccionales, donde, si su área de acción es grande en comparación del objeto enterrado en el suelo, se podría tomar la aproximación de una onda acústica plana que incide sobre el suelo (ver Figura 6(b)).

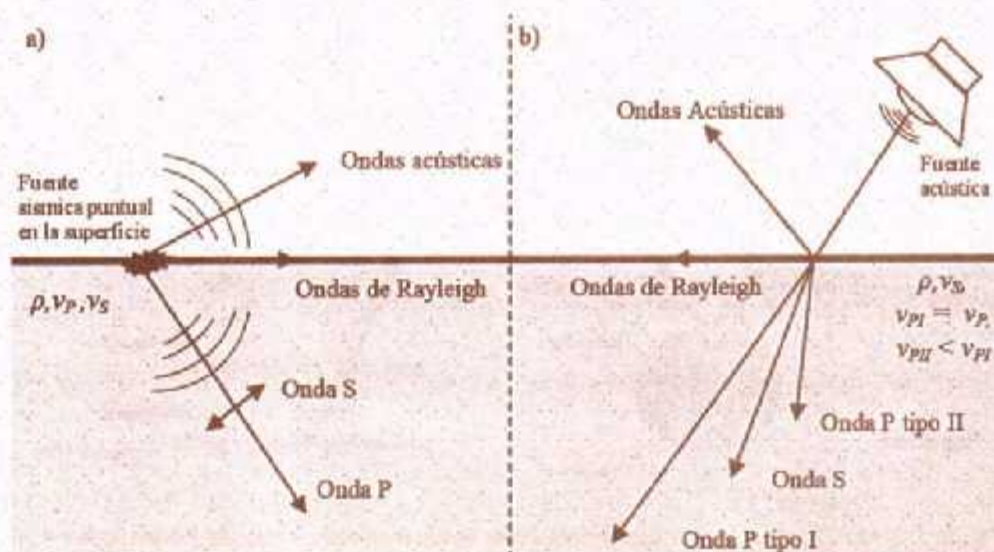


Figura 6. Mecanismos de generación ondas sísmicas en un semi-espacio. (a) A partir de una fuente puntual en contacto con la superficie. (b) A partir de una fuente acústica que no hace contacto con el suelo [Imagen tomada de Molina y Rinaldi (2010)].



3. ESTADO DEL ARTE DE LA PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO A BAJA PROFUNDIDAD

Para la prospección de subsuelos a baja profundidad, se han desarrollado nuevas técnicas que involucran ondas sísmicas en combinación simultánea con otros métodos geofísicos. Entre los desarrollos teórico-prácticos más relevantes en los últimos años alrededor del tema de prospección de subsuelo con aplicaciones comerciales y militares, se pueden enunciar los siguientes trabajos:

- Donskoy et al (2002). Estos autores proponen una metodología de detección y discriminación de minas enterradas en el suelo, a partir del comportamiento de las vibraciones emergentes del terreno, luego de aplicar ondas de pruebas acústico-sísmicas y realizar mediciones remotas utilizando vibrómetros láser. La clave de esta metodología consiste en la acertada interpretación de las vibraciones reflejadas de las minas enterradas, llamadas "firma vibracional". En este proceso, la energía acústica (tono puro) se inyecta al suelo produciendo el efecto de rebote acústico en la superficie mina-subsuelo. Así, se producen las vibraciones denominadas "firma vibracional"

Que caracteriza las propiedades mecánicas de la mina. En este trabajo, se propone un análisis con base en "distorsiones no lineales" generadas por el sistema vibratorio, las cuales pueden reducir la contribución de señales parásitas producidas por rocas o raíces de árboles. Dentro de los cálculos del modelo físico-matemático se implementó el uso del modelo unidimensional "masa-resorte acoplado no lineal".

- Khalil et al (2006), proponen el uso de un sistema conformado por una fuente de ondas acústicas y el uso de un sensor óptico (vibrómetro láser), con la finalidad de detectar y cuantificar las vibraciones emergentes del terreno, provocadas por la interacción de la onda sísmica de Rayleigh con la discontinuidad presente en el terreno. En el experimento desarrollado por el autor para probar el sistema de detección, se toma una

porción del terreno con una discontinuidad básica (en forma de prisma o de esfera) confinada en una caja cúbica y se excita el modelo de prueba con una onda sísmica generada por una fuente acústica. Posteriormente, se miden las deformaciones del terreno provocadas por la dispersión de ondas sísmicas generadas por la discontinuidad. Dentro de las principales falencias asociadas a este experimento, se puede mencionar el inadecuado modelamiento de las fronteras del sistema físico, mediante el uso abusivo de modelos unidimensionales (masa-resorte) para predecir el comportamiento mecánico del suelo en presencia de una onda sísmica generada por la incidencia de una onda acústica sobre el terreno, ya que las dimensiones geométricas de las discontinuidades que se desean detectar son levemente inferiores al campo de análisis (caja cúbica con tierra). Esto implica que si dichas fronteras no están lo suficientemente lejos, las ondas que se reflejen desde allí no se atenúan lo suficiente como para no afectar la medida en superficie. Adicionalmente, la presencia de obstáculos en la superficie del terreno, como por ejemplo, vegetación o contaminantes en la atmósfera, no fueron tenidas en cuenta por el autor en el proceso de medición de las vibraciones mediante el vibrómetro láser.

Algunos de los desarrollos más relevantes en prospección de subsuelos a baja profundidad, corresponde al trabajo desarrollado por [Scott et al (2004), (2006)] quienes usan ondas electromagnéticas y sísmica para tal fin. [Scott et al (2006)] Propusieron la implementación de un arreglo de acelerómetros para medir el campo de aceleración en diferentes puntos de la superficie de un terreno, cuando en éste se aplica una onda sísmica con el objetivo de estudiar como una discontinuidad presente en el subsuelo perturba la propagación de las ondas y así develar la naturaleza y dimensiones del objeto enterrado. A diferencia de los experimentos propuestos por [Donskoy et al (2006)] y [Khalil et al (2006)], la ausencia de sensores ópticos (vibrómetros láser) atenúa el error introducido por agentes ambientales en las lecturas. Sin embargo, la técnica sugiere que los acelerómetros deben estar en contacto con el terreno, lo cual no es fácil de llevar a cabo en algunas labores de campo, como por ejemplo, las ejecutadas en la milicia. Scott et

al (2004) también proponen el uso de un inductores electromagnéticos y un radar GPR (GroundPenetrating Radar) que emplea ondas electromagnéticas de corta longitud de onda, para medir las vibraciones ocasionadas por la discontinuidad existente usando efecto Doppler.

Finalmente, Rahman y Mukherjee (2011) utilizan algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes que tratan de eliminar en mayor grado el efecto de la vegetación y de otros elementos presentes en la superficie del terreno, en el proceso de detección y medición de dimensiones de la discontinuidad. La limitación se presenta cuando se desea tener una buena detección de los objetos, es necesario obtener datos desde la combinación de diferentes técnicas, tales como GPR (GroundPenetrating Radar) y detección de radiación infrarroja.

4. INSTRUMENTACIÓN EN PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO A BAJA PROFUNDIDAD

Un diagrama del montaje implementado en los diversos trabajos relacionados con la prospección del subsuelo y que sintetice el proceso de

medición, independiente de las variantes asociadas a la técnica, se presenta en la Figura 7, la cual corresponde a una representación esquemática de medición híbrida que goza de mayor generalidad. En un sistema de prospección se pueden destacar como partes principales las fuentes sísmicas, los sensores, los transductores, el subsistema de adquisición de datos, el módulo de registro y almacenamiento de datos y finalmente el módulo de procesamiento y visualización de datos.

Para la detección del movimiento producido en la superficie por las ondas dispersadas por el objeto enterrado, se puede emplear sensores acoplados directamente al suelo (como por ejemplo geófonos o acelerómetros) y sensores no acoplados directamente al suelo (como por ejemplo arreglos de micrófonos, vibrómetros u otros sensores que empleen el efecto Doppler para ondas acústicas o electromagnéticas). La generación de ondas mecánicas por actuadores electromecánicos o altavoces y las ondas electromagnéticas por antenas, se realiza gracias a la transducción que hacen estos dispositivos de la señal proveniente de un generador de señales eléctricas, la cual es necesario acondicionar mediante un circuito de acople que bien puede ser una interfaz controladora (para actuadores) o un amplificador lineal de potencia (para altavoces o antenas).

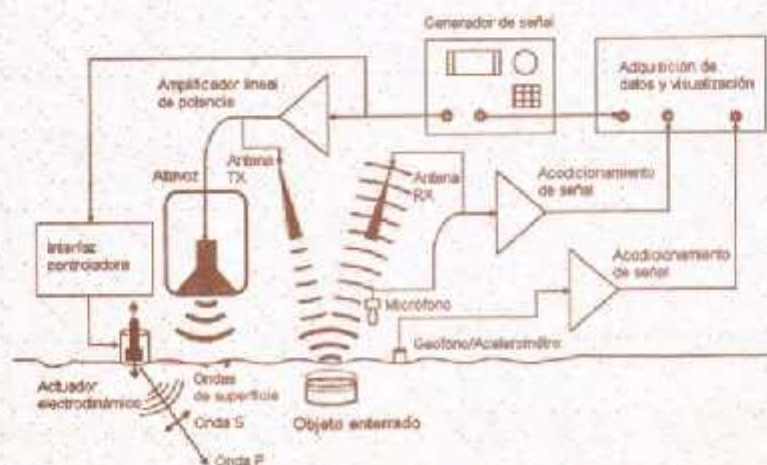


Figura 7. Diagrama de los principales componentes usados en técnicas de detección acústica/sísmica/electromagnética de objetos enterrados. Partes de la imagen han sido tomadas de Bellan et al (2004) y Larson et al (2001).



Los detectores que sensan las ondas mecánicas reflejadas (microfonos, geófonos, acelerómetros) o las antenas que detectan las ondas electromagnéticas, requieren de igual forma, circuitos de acondicionamiento que se ajusten a las especificaciones del detector y permitan posteriormente llevarlas a un sistema de adquisición de datos y visualización.

5. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO ANTIOQUEÑO VÍA ONDAS SÍSMICAS

Los diversos trabajos realizados en el área de prospección de subsuelos, expuestos en la sección 3, han motivado a los autores a pensar en la posibilidad de desarrollar una metodología para la detección de discontinuidades físicas a bajas profundidades en subsuelos de la geografía antioqueña, y que sirva en un futuro para cimentar las bases teóricas y constructivas de un prototipo experimental para la detección de objetos enterrados con diversas propiedades físicas y geométricas, como por ejemplo, objetos de origen mineral, metálicos y plásticos. Esto se podría llevar a cabo mediante una apropiación de esta tecnología, proponiendo y explorando cambios en los métodos para construir un prototipo de medición óptimo, para la necesidad nacional.

A nivel nacional, son múltiples y diversas las áreas que requieren de sistemas tecnificados y adaptados a las condiciones locales, que permitan detectar objetos en el subsuelo. Esta actividad es el centro de atención de importantes áreas económicas de la nación, como es el caso de la minería, la ingeniería ambiental, la geología y la construcción (geotecnia). También es de vital importancia en arqueología, en el área de la seguridad, la salud pública y en el sector militar. En ese sentido, una contribución de estas características, puede proporcionar una interesante y sofisticada herramienta que puede ser de potencial interés para estos sectores. Si bien ya existen equipos comerciales actualmente disponibles para desarrollar estas tareas, no son completamente adecuados para ser utilizados en los diversos ambientes físicos y climatológicos de

la nación, debido a que las regiones geográficas en Colombia presentan situaciones muy adversas a los equipos humanos y técnicos para la detección de objetos enterrados, como por el ejemplo, la alta presencia de vegetación, terrenos poco homogéneos y con diferentes propiedades físicas (suelos arenosos, franco-arenosos, húmedos, arcillosos, etc.). Adicionalmente se le suman los elevados costos asociados a su adquisición.

Teniendo en cuenta las condiciones particulares de los suelos regionales y después de un exhaustivo análisis bibliográfico y de realizar algunas pruebas preliminares, los autores de esta contribución, concluyen, que para desarrollar una metodología para la prospección de subsuelos que se adapte a las condiciones locales, es necesario llevar a cabo una apropiación y articulación de los siguientes elementos:

6. MODELO FÍSICO Y ALGORITMOS COMPUTACIONALES

Si bien ya se han llevado a cabo algunos avances importantes en el desarrollo de modelos físicos para estudios de prospección de subsuelo, [Schröder and Scott, 2000; Khalil et al., 2006; Scott et al., 2006], la implementación de este tipo de tecnologías en zonas geográficas nacionales puede conducir a una toma errónea de los datos experimentales y por consiguiente, a inconsistencias en el análisis de resultados, dada las grandes diferencias que presentan los suelos locales, los cuales no suelen ser planos ni homogéneos y cuentan con una alta densidad y diversidad de vegetación. Los modelos físicos y los algoritmos computacionales característicos de los sistemas desarrollados, asumen discontinuidades, con geometrías y propiedades regulares y conocidas (por ejemplo, minas de fabricación industrial que poseen una forma, morfología y composición estándar), adicionalmente suponen suelos geográficos muy diferentes a los locales (es decir suelos planos, desérticos o con baja vegetación). En este sentido, el llevar a cabo

estudios de detección de objetos irregulares como envases, cajas, tarros, etc. en sitios locales con propiedades típicas de la geografía nacional, conlleva a errores en la interpretación de los sistemas de detección.

Por esta razón, es necesario considerar en los modelos físicos/computacionales, situaciones que suponen condiciones anisotrópicas, donde factores como la densidad y la geometría de los objetos influyen fuertemente en la señal detectada en el punto de medición en superficie. Como punto de partida se pueden proponer modelos, donde se analicen los efectos sobre las vibraciones mecánicas detectadas por los sensores, al considerar cambios geométricos y de densidades de los objetos inmersos en el subsuelo, o en las discontinuidades físicas. Luego, se podría ir avanzando a estructuras más complejas acercándose a las reales, lo que implicaría que se deben hacer modelos físico/computacionales más realistas, es decir, hacer análisis tridimensionales y considerar en detalle la geometría de los objetos en cuestión; exigiéndose en últimas más capacidad de cómputo, por lo que se vuelve necesario acudir a nuevas tecnologías, como es el caso de cómputo en tarjetas gráficas (GPUs), las cuales brindan computación de alto desempeño, a bajo costo y que son relativamente portables, ideales para incorporar en un prototipo portátil que

se pueda llevar fácilmente a trabajo de campo para exploración.

7. SENSORES

Por factores económicos y de fácil adquisición, un buen candidato para realizar la detección de vibraciones mecánicas es el acelerómetro triaxial MMA7260QT, capaz de medir la aceleración a lo largo de los tres ejes ortogonales X-Y-Z a partir de tres señales de voltaje proporcionales a la aceleración en las respectivas direcciones. Este transductor pertenece al grupo de transductores capacitivos, (el modelo físico) se puede observar en la Figura 8. Los vibrómetros capacitivos consisten en dos placas conductoras que forman un puente capacitivo y el aire actúa como medio dieléctrico. Las placas externas son fijas y en el medio existe una tercera placa móvil. La capacitancia entre los dos electrodos varía con el desplazamiento de la placa central, como consecuencia de la vibración generada por la onda sísmica, en este sentido, este sensor opera como un capacitor variable mecánicamente. Estos transductores utilizan un circuito microelectrónico acoplado a los puentes capacitivos, para convertir la variación de capacitancia en una señal de voltaje. Las principales características operacionales de estos acelerómetros se encuentran resumidas en la Tabla 1.

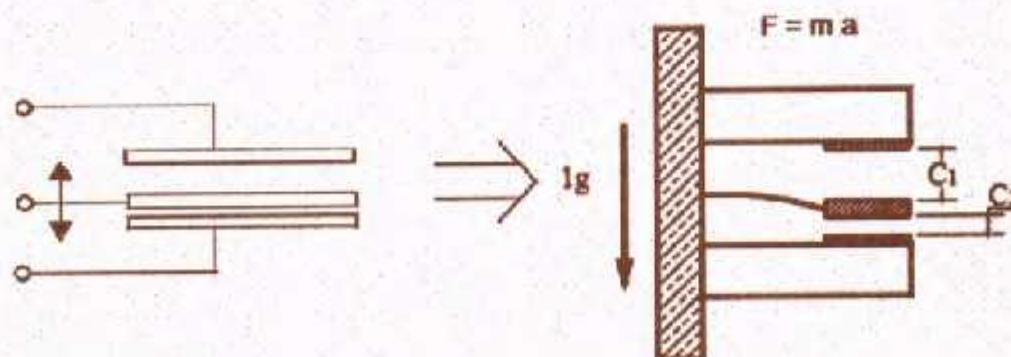


Figura 8. Modelo físico del acelerómetro MMA7260QT [imágenes tomada de Free Scale Semiconductors Inc. 2012].

Tabla 1. Características eléctricas del acelerómetro MMA7260QT.

Encapsulado	QFN
Dimensiones	6mmX6mmX1,45mm
Voltaje de operación	2.2V a 3.6V
Consumo de corriente	500µA
Filtro Pasa Bajo	Integrado
Rango de mediciones	1.5g, 2g, 4g y 6g
Niveles de sensibilidad	800mV/g, 600mV/g, 300mV/g y 200mV/g

El acelerómetro MMA7260QT es un transductor pasivo y genera una señal eléctrica de salida débil, que requiere un previo acondicionamiento de señal. Para esta tarea la señal debe amplificarse (hasta obtener el nivel de voltaje requerido) y debe realizársele un cambio de rango dinámico (para obtener una máxima precisión). Adicionalmente es necesario eliminar las señales no deseables, limitando el espectro de señal proveniente del transductor mediante un filtro. En el proceso de acondicionamiento, la señal debe optimizarse antes de ser ingresada al sistema de adquisición de datos. Para lograr una señal con un valor de voltaje adecuado, se puede emplear un pre-amplificador de una o varias etapas. La principal función del preamplificador es la amplificación de señal y el acople de impedancias para aislar el módulo de muestreo y de procesamiento o visualización. El preamplificador puede ser configurado como amplificador de voltaje, (cuyo voltaje de salida proporcional al voltaje de entrada), o como un amplificador de corriente, (donde el voltaje de salida es proporcional a la corriente de entrada).

Una vez acondicionadas las señales provenientes de los acelerómetros, es requerido un módulo de procesamiento de datos que se encargue de digitalizarlas. Para este propósito se propone

construir un sistema de microcontroladores FreeScale [Free Scale Semiconductors Inc., 2012] para tal efecto. Un buen candidato que cumpla con los requerimientos de número de canales, resolución y velocidad de operación, puede ser el microcontrolador MC68HC908QY4. Si bien es relativamente económico, esta solución propone una serie de interesantes retos desde el punto de vista de la programación y de la electrónica.

8. MÓDULO DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Uno de los aspectos más llamativos de esta propuesta y sobre el cual no existen muchos trabajos al respecto, es la posibilidad de ubicar remotamente el sistema de detección e inalámbricamente controlar y transferir los datos a una estación de trabajo para realizar allí el análisis de los datos. El módulo de comunicación inalámbrica le da portabilidad al sistema, permitiéndole llevar a cabo estudios remotos de los datos, evitando así, el contacto directo y los riesgos asociados que se podrían tener al permanecer en contacto con el montaje en una exploración de campo específica, como podría ser en el área militar.

Una red de sensores inalámbricos se define como un sistema, donde se interconectan un conjunto de nodos equipados con sensores, que transmiten los datos inalámbricamente a un nodo coordinador conectado a un computador, u otro equipo receptor de datos. En la actualidad, la comunicación inalámbrica utilizada en muchas de las redes de sensores inalámbricos corresponde con el protocolo ZigBee, el cual cumple el estándar IEEE 802.15.4 [Maroto Cantillo, 2010]. En una red de sensores inalámbricos se distinguen básicamente los siguientes elementos: los dispositivos finales denominados motes o nodos sensores, el nodo coordinador y los dispositivos enrutadores o nodos enrutadores (opcionalmente). La red de sensores inalámbricos permite la instalación de un elevado número de nodos sensores (alrededor de 65.000) en la topología de malla (meshnetwork). Una de las principales ventajas que ofrece una red

de sensores inalámbricos, es la posibilidad de manipular un elevado número de nodos sensores instalados en una amplia área geográfica, lo que permite realizar una amplia recolección de datos permitiendo tener una mejor caracterización de los parámetros que se están monitoreando. Adicionalmente, la red de sensores inalámbricos elimina el cableado dentro de la red, hecho que en nuestra propuesta es de absoluta importancia, dado que le proporciona al equipo portabilidad y puede esta característica en futuros prototipos, eliminar los riesgos asociados a una continua movilidad del montaje para el analista. El costo de estas redes depende básicamente del tamaño de la red, (número de nodos sensores) y de la complejidad de los nodos sensores.

Los motes integran varias funciones: recolección de datos (por medio de los sensores), el procesamiento local de datos (mediante un microcontrolador y otros elementos electrónicos) y la transmisión de datos vía ondas de radiofrecuencia, empleando el radiotransmisor ZigBee. A diferencia de los sensores tradicionales (transductores) que captan variables físicas y generan una señal eléctrica relacionada con los cambios de la variable sensada, en las redes de sensores inalámbricas los nodos sensores tienen un valor agregado. Se puede decir que tienen un cierto grado de "inteligencia", porque además de captar la señal de la variable física, realizan un proceso de digitalización de datos y su preparación para transmisión inalámbrica. De esta forma, se obtiene una disminución del tráfico de datos y se facilita el procesamiento de datos en el destino final.

Dentro de los avances importantes en el desarrollo de las redes de sensores inalámbricos, se destaca el trabajo hecho por la Universidad de Berkeley e Intel, que consiste en el desarrollo de un software específico para este tipo de redes que tiene en cuenta la restricción de memoria de los nodos. En particular, se ha desarrollado un sistema operativo, llamado TinyOS, donde se utilizó el lenguaje de programación nesC con sintaxis parecida a lenguaje C [Mojino, 2007]. Moog Inc. (Crossbow) es una de las empresas que representa el más grande proveedor de esta tecnología y ha desarrollado las redes de sensores inalámbricos a gran escala para uso comercial.

La tecnología ZigBee, de comunicación inalámbrica a corto alcance, también se utiliza para interconectar inalámbricamente dispositivos fijos o portátiles en las redes de área restringida, denominadas las Redes de Área Personal (PAN). Los módulos ZigBee se caracterizan por una baja tasa de transmisión de datos y bajo consumo de potencia (larga duración de las baterías). Se pueden configurar para operar en el modo de reposo (*sleepmode*), que también permite un significativo ahorro de potencia. Operan en bandas libres de frecuencia de 2.4 GHz (a nivel mundial), 915 MHz (Estados Unidos) y 868 MHz (Europa). La tasa de transmisión de datos es de 250 kbps (frecuencia de 2.4GHz) y 20 kbps (frecuencias de 915/868 MHz).

La distancia de alcance de comunicación de los módulos XBee Serie 1 es alrededor de 30m en interior y hasta 100m en exterior y para los módulos XBee Serie 2 es de 100m en interior y 1500m o más en el exterior. El rango de transmisión en espacio cerrado se encuentra entre 10 y 300 metros dependiendo de la potencia de transmisión y de las condiciones del medio. Es muy importante destacar que se puede alcanzar mayores distancias utilizando la topología de conexión escalonada (topología malla), que permite tener hasta 65.000 nodos dentro de una red individual (punto a punto o punto a multipunto).

La tecnología ZigBee en general tiene las siguientes características:

- Comunicación inalámbrica en el área restringida.
- Baja tasa de transmisión de datos.
- Fácil de instalar y mantener el sistema.
- Fiabilidad.
- Capacidad de conexión escalonada.
- Larga duración de las baterías de dispositivos.
- Bajo costo de los dispositivos.

Uno de los candidatos para ser empleados en nuestro modelo de transmisión inalámbrica, son módulos XBee PRO (ver Figura 9) del fabricante Digi International [Digi International Inc., 2012], los cuales tienen incorporado un microprocesador con firmware proporcionado por el fabricante.



Figura 9. a) Módulo XBee PRO Serie II. Este dispositivo cuenta con una Tasa de transmisión de datos 250 Kbps, tiene 15 pines de comunicación, 8 entradas/salidas digitales, opera en una Banda de frecuencia 2.4 GHz, su voltaje de alimentación puede ser regulado de 2.7 a 3.6 VDC y tiene un alcance de comunicación en Interior de 90m y en el exterior de 3200m.

El diagrama de bloques que sintetiza nuestro modelo propuesto de transmisión inalámbrica, se puede observar en la Figura 10. Su función es realizar la lectura de las señales analógicas provenientes de los sensores de aceleración, (o desplazamiento) y su posterior multiplexación y conversión A/D mediante un microcontrolador de

tecnología Microchip, o FreeScale [Ray y Koopman, 2006]. Una vez obtenida la información del sistema de detección, se procede a almacenarse temporalmente para luego ser transferida a un módulo de transmisión ZigBee TX, tal como se muestra en la Figura 10.

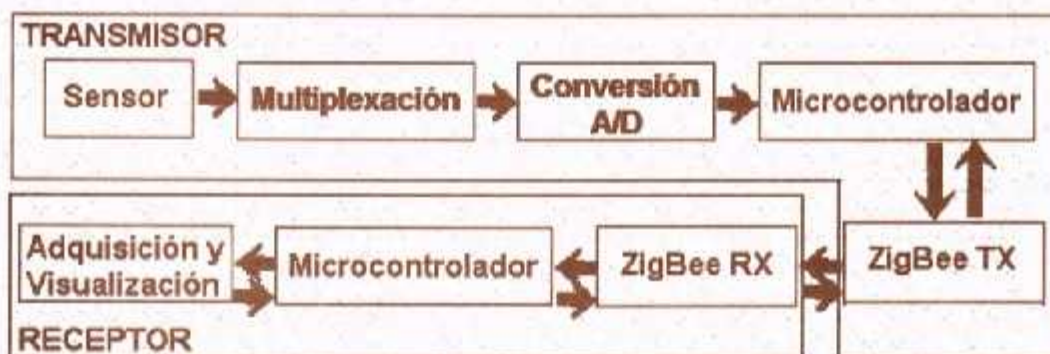


Figura 10. Diagrama de bloques del sistema de transmisión inalámbrica de datos, entre el sensor y una interfaz hombre-máquina (IHM). El sistema cuenta con un flujo bidireccional de información, que en este caso consiste en la posibilidad desde la IHM enviar instrucciones que accionen remotamente el sistema de detección para llevar a cabo la toma de nuevas mediciones.

La información finalmente se recibe remotamente en un módulo receptor ZigBee RX y mediante un segundo microcontrolador, se envía inalámbricamente a un PC (mediante USB o RS-232), quien será el punto de almacenamiento de

toda la información proveniente del sistema de detección, para ser analizada a la luz del modelo físico del problema y de los paquetes computacionales que se desarrollen para tal efecto. En este sentido, el sistema de adquisición

de datos y visualización de la Figura 7, en nuestra propuesta, correspondería al módulo descrito en la Figura 10.

9. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La prospección del subsuelo vía ondas sísmicas, es una actividad de interés de diversos sectores nacionales como la minería, la geología, la ingeniería ambiental, la construcción, las ciencias forenses e inclusive el campo militar y arqueológico. Si bien existen desarrollos en esta materia en el ámbito internacional, este tipo de tecnologías no son aptas para los suelos locales. Por esta razón, es de gran interés realizar una apropiación de este tipo de tecnologías y desarrollar una metodología que tenga en cuenta las características de los suelos nacionales, que gozan de una gran diversidad y densidad de vegetación y suelen ser húmedas y no homogéneas, a diferencia de los suelos desérticos donde se ha venido desarrollando este tipo de tecnologías para la prospección. Adicionalmente, proponemos un módulo de comunicación inalámbrica, que le proporcionará al sistema de detección una manera alternativa de realizar análisis de datos remotamente. Todo lo mencionado anteriormente tiene como fin servir como base para el diseño y construcción de futuros prototipos de mayor portabilidad.

Para darle una mayor portabilidad a un prototipo de detección, podría pensarse en implementar vehículos no tripulados para la exploración sobre la superficie del subsuelo, dotados de una red de sensores inalámbricos. Un trabajo de esta naturaleza impone grandes retos interdisciplinarios, que requieren de un sólido conocimiento en física de ondas, electrónica, telecomunicaciones y robótica. Lo que se podría llevar a cabo en un futuro, después de desarrollar lo propuesto en este artículo.

10. REFERENCIAS

- Achenbach, J. D. (1973). *Wave Propagation in Elastic Solid*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, London.
- Bellan, F., A. Bulletti and L. Capineri (2004). *Acoustic Landmine detection study*, project report, University of Florence, Italy.
- Barnford D., Faber, S. et al. (1976). *Lithospheric Seismic Profile in Britain*, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, United Kingdom.
- Biblioteca de investigaciones, (última visita Mayo 2012). *Terremotos, tsunamis y fallas geológicas*. <http://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com/ciencias-de-la-tierra/terremotos-tsunamis-y-fallas-geologicas/>
- Digi International Inc., (última visita Mayo 2012). *Zigbee device*. <http://www.digi.com/technology/rf-articles/wireless-zigbee>
- Donskoy, D., A. Ekimov, N. Sedunov and M. Tsionskiy (2002). *Nonlinear seismo-acoustic land mine detection and discrimination*, Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 111 No. 6, 2705-2714.
- Enviroscan Inc., (última visita Mayo 2012). *Seismic Refraction Vs Reflection*. <http://www.enviroscan.com/html/seismic-refraction-versus-refl.html>
- Eringen, A. C. and E. S. Suhubi (1975). *Elastodynamics Volume II: Linear Theory*, Academic Press, Inc., New York.
- Eringen, A. C. (1971). *Vibrations and Waves* (Mir Introductory Physics Series). Washington D.C. CRC Press.
1. FREESCALE SEMICONDUCTORS. (VISITADO 2012, MAYO 1). *±1.5G - 6G THREE AXIS LOW-G MICROMACHINED ACCELEROMETER*. <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data-sheet/MMA7260QT.pdf>
- Hernández, V. L. (2008). *Procesamiento de datos de sísmica de reflexión de alta resolución para la*

obra: plataforma del corredor Norte-Noroeste del tren de alta velocidad ubicado en Ourense, Galicia, España, Tesis pregrado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

Herrera, Y. and N. Cooper (última visita Mayo 2012). Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. [www.apigeophysical.com/2/Manual_Tecnicas\[1\].pdf](http://www.apigeophysical.com/2/Manual_Tecnicas[1].pdf)

Jaramillo P. y Yady A. (2009). Determinación de técnicas de detección de explosivos, óptimas para el departamento de Antioquia, Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.

Khalil, A., H. Hotait, M. Mrad and T. Rabbani (2006). Experimental mine detection using acoustic to seismic approach, project report, Libanon.

Larson, G. D., J. S. Martin, W. R. Scott and G. S. McCall (2001). Environmental factor that impact the performance of a seismic land mine detection system, Proceedings of SPIE, Vol. 4394, 1-12.

Londoño, I.F. implementación de un sistema de monitorización de señales sísmicas del volcán Cotopaxi empleando una red de sensores inalámbricos, Trabajo de grado, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.

Maroto Cantillo, S.R. (2010). Desarrollo de aplicaciones basadas en WSN, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Molina, G. R. and V. A. Rinaldi (2008). Ecografía acústica del suelo a través de sensores no acoplados: primeras experiencias, Notas de los autores, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Molina, G. R. and V. A. Rinaldi (2010). Algunas consideraciones sobre el fenómeno de acoplamiento acústico-sísmico, CAMSIG, Argentina.

Moñino, J.A. Aplicación del Modelado Específico de Dominio a las Redes de Sensores Inalámbricos,

Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cartagena, España.

Patel, D. L. (1992). Handbook of land mines and military explosives for countermine exploitation, Tech. Rep. 2495, U.S. Army Belvoir Res. Devel. Center.

Rahman, K. F. and S. Mukherjee (2011). Analysis of imagery-producing techniques for detection of anti-personnel landmines covered by shallow vegetation and/or soil - A humanitarian approach, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 3 No. 2, 1021-1030, American University of Beirut, Lebanon.

Ray, J. and Koopman, P. (2006). Efficient High Hamming Distance CRCs for Embedded Networks, DSN '06 Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks, doi:10.1109/DSN.2006.30.

Richard, F. E., J. R. Hall and R. D. Woods (1970). Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Scott, W. R., K. Kim, G. D. Larson, A. C. Gurbuz and J. H. McClellan (2004). Combined seismic, radar, and induction sensor for landmine detection, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Proceedings IEEE International, Vol. 3, 1613-1616.

Scott, W. R., J. O. Hamblen, J. S. Martin and G. D. Larson (2006). Large vibrometer array for seismic landmine detection, Proceedings of SPIE, Vol. 6217, 1-10.

Schröder, C. T. and W. R. Scott Jr (2000). A finite-difference model to study the elastic-wave interactions with buried land mines, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38 no. 4 pt.1, 1505-151.

i. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, (última visita Mayo 2012). Tipos de Ondas Sísmicas <http://www.smis.org.mx/html/smi4.htm>

ii.

iii. Universidad de Alicante, (última visita Mayo 2012). Propagación de Ondas Sísmicas.

<http://web.ua.es/es/urs/divulgacion/propagacion-de-ondas-sismicas.html>