

# MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS A LA OPTIMIZACIÓN DE DISEÑOS EN MINERÍA: UNA REVISIÓN

GEOPHYSICAL METHODS APPLIED TO THE  
OPTIMIZATION DESIGN IN MINING:  
A REVIEW

FECHA DE RECIBIDO: 5 DE AGOSTO DE 2014

FECHA DE APROBADO: 19 DE AGOSTO DE 2014



LETICIA ACOSTA

Ingeniera Electrónica y de Telecomunicaciones  
Docente de la Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar

CARLOS MARTINEZ

Licenciado en Matemáticas  
Docente de la Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar

HELLEN ROSADO GARRIDO

Estudiante de ingeniería de Minas en la  
Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar

## RESUMEN

La geofísica aplicada surgió de la necesidad de resolver problemas asociados a la detección de yacimientos de hidrocarburos y minerales del subsuelo. Conforme se fue desarrollando el arte del estado sólido de la electrónica y creciendo los conocimientos en las diferentes técnicas de prospección, se empleó en agua subterránea, estudio del interior de la Tierra y finalmente contribuyendo de manera substancial la ingeniería civil a través de ayudar en el reconocimiento y solución de problemas relacionados con la construcción de presas, carreteras, túneles, etc, así como en distritos de suelos y rocas que presentaban algún riesgo potencial para las obras.

Se está avanzando de tal manera en la implementación y optimización de los métodos geofísicos, que se puede llegar a predecir el fuego en vetas de carbón a partir de la combinación los métodos de auto-potencial y resistividad DC, como lo presentan los autores Karaoulis, M., Revil, A. y Mao, D. (2014).

## ABSTRACT

Applied geophysics arose from the need to solve problems associated with the detection of hydrocarbon deposits and minerals from the subsoil. As it developed the art of solid state electronics and growing knowledge in different prospecting techniques are used in groundwater study of the interior of the Earth and eventually contributing substantially civil engineering by helping the recognition and solution of problems related to the construction of dams, roads, tunnels, etc. as well as in soil and rock districts presenting a potential risk to the works.

Progress is being made so in the implementation and optimization of geophysical methods, which can predict the fire in coal seams from combining the methods of self-potential and resistivity DC, as presented by Karaoulis authors M., Revil, A. and Mao, D. (2014).

Los métodos geofísicos han adquirido un desempeño notorio en la minería, lo cual se evidencia en la etapa de exploración en donde constituyen una excelente herramienta científica para la exploración de los recursos minerales, al poner al alcance la información estructural de la geología en las áreas de gran importancia con rapidez y economía. Entre los métodos geofísicos más utilizados, según diversos autores, se encuentran: los métodos gravimétricos, magnéticos, electromagnéticos, eléctricos, sísmicos y de polarización inducida y cada uno de ellos cuentan con diferentes técnicas según sea la necesidad de la actividad a realizar en campo. (Universidad Nacional de San Juan, (s. f.); TRX Consulting, 2012; Castilla Gómez J., y Herrera Herbert, J., 2012; Serralde Ordóñez, D, 2011; Hernández Pérez, I., 2012)

En minería la finalidad de la geofísica de exploración, es la de separar zonas que aparecen como estériles de las que presentan posibilidades de contener yacimientos económicamente explotables, obtener el índice físico del grosor de la veta de carbón, a fin de detectar con precisión la tendencia de variación de veta de carbón (Bo,W. et al, 2011), detección de anomalía geológica (Sheng-dong et al,2009), proporcionar una base fiable y correcta para el diseño de la prevención y el control y monitoreo del agua y otras incidencias (Shi, X. 2011; Sun J P. 2007) además de ser una herramienta muy útil en la detección de zonas de combustión espontánea del carbón; dicho de otra forma, es una herramienta necesaria para optimizar

y para la eficiencia de los procesos con fines mineros al momento de pensar en una explotación rentable.

Una de las ventajas de usar métodos geofísicos en la exploración es que estos no generan impactos sustanciales en el medio ambiente dada su temporabilidad, por lo tanto no se requiere la elaboración de estudios de impacto ambiental. (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA - MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2002)

Los métodos geofísicos tienen además un sin número de aplicaciones en el desarrollo industrial actual, gracias a sus diferentes y especializados métodos para las exigentes áreas de aplicación en campo del conocimiento; industria minera, por ejemplo, lleva a cabo la implementación de dichos métodos que ofrecen soluciones a los problemas constantes presentes en esta actividad permitiendo tomar decisiones acertadas de una manera rápida y económica, como es definir características de las estructuras geológicas mineralizadas de gran importancia para la programación de obras directas. La detección y posterior exploración de los yacimientos minerales exigen el conocimiento de la génesis, forma de emplazamiento de la mineralización, geometría y relaciones entre las diversas unidades litológicas involucradas; lo cual se puede lograr en menor tiempo con la implementación del método geofísico adecuado.( Vorsevi. (s.f.), CORPOGUAJIRA, 2011; INGEOMINAS, 2004; Jing-cun, Y., et al 2007 Entre los métodos más empleados en la minería se encuentran: métodos de ondas elásticas, el método de resistividad DC, el transitorio método

electromagnético y la detección de infrarrojos (Sheng-dong et al, 2009), aplicados a la optimización en el diseño de las obras mineras y el control de los problemas que se puedan presentar con el agua en las explotaciones. Sin embargo, cada método geofísico se caracteriza por sus propias debilidades y sólo a través de la combinación de los métodos geofísicos se pueden determinar, un objetivo específico de forma inequívoca; según Gielisch (2007).

### **EXPLORACIÓN GEOFÍSICA:**

Se puede considerar como el arte de aplicar las ciencias físicas al estudio de la estructura y composición de las diversas capas de la Tierra; es la que se dedica a la aplicación de los principios específicos en la investigación de los depósitos económicamente explotables, o en el conocimiento de las condiciones físicas del subsuelo en proyectos de cimentaciones de obras importantes. (Álvarez Manilla Aceves, A. 2003). En la exploración geofísica se emplean cada vez más las técnicas basadas en electromagnetismo con el dominio del tiempo ya que ofrecen una alternativa eficiente para estimar la resistividad del suelo, entre estas se encuentra el método de sondeo electromagnético transitorio TEM o TDEM (Transient Electromagnetic, Time Domain Electromagnetic) usado en geohidrología, minería, geotermia, etc. Los sondeos TEM son realizados con un transmisor constituido por una espira de alambre, una bobina o un bipolo eléctrico, y un receptor formado por una bobina o dipolo eléctrico( Universidad Sonora (s. f.), ). El TEM,

método electromagnético transitorio es un tipo de método de dominio de tiempo de la exploración electromagnética. Debido a su alta eficiencia se puede medir directamente el segundo campo (Guo, W., et al. 2011;; Li Xiu, 2002;; Niu Zhilian, 1993); también lo definen como una técnica de exploración geofísica usada para estimar la resistividad eléctrica del subsuelo, con aplicaciones en diversas áreas (Flores Luna, F, 2000), ya que es muy sensible a identificar el cambio de humedad en el terreno y los cambios relativos en las características de la litología, método puede mejorar el grado exacto de la perspectiva en gran medida, y puede ofrecer mucho más juicio, adecuado y razonable (Sheng-dong, et al. 2009)

### **EL TEM O TDEM**

(Transient Electromagnetic, Time Domain Electromagnetic)

Muchos TEM avanzados son importados. Desde los últimos años, la investigación en la teoría de TEM y aplicación ha sido progresivamente activa, aparte de la aplicación frecuente de minerales no ferrosos, las aguas subterráneas, geotérmica y estructuras geológicas, se ha aplicado ampliamente para garantizar la seguridad y la alta producción eficiente en minas de carbón y la investigación de ingeniería (Depin, H., Pu, Z. y Dan, L., 2009) También son empleados en el diseño, construcción y operación de la red de monitoreo de aguas subterráneas (CORPOCESAR & IDEAM, 2006). Y en la prevención de desastres por deslizamiento y/o fracturación de la roca. (Jing-cun, Y., Zhi-xin, L. y Jin-yun T., 2007).

El método TEM es muy adecuado para el mapeo de la profundidad y la resistividad de buenos conductores, y, por lo tanto, una fuerte herramienta para la identificación de la parte superior de los sedimentos de baja resistividad que son saturados con agua intersticial salina. La superficie que marca la parte superior de los sedimentos saturados de agua salada tiene forma de platillo. Estas acciones permiten identificar y crear un mapa de la intrusión de agua salada con el fin de obtener una visión general de los recursos de agua dulce restantes, lo cual es de gran importancia en comunidades como Keta Barrier (Ghana). (Nielsen, L., Jorgensen, N. O. y Gelting, P., 2007).

### **VENTAJAS**

El método electromagnético transitorio observa el campo secundario directamente, eliminando la influencia del campo principal en el método de dominio de la frecuencia; se caracteriza por una alta sensibilidad a los órganos, de baja resistividad, una resolución más alta transversal (que puede resolver estructuras de conducción de agua de más de 400 m de profundidad y transversalmente ancho), poca influencia topográfica y un funcionamiento rápido. Se puede, de forma rápida y precisa, lograr la detección para localizar estructuras donde se presentaría irrupción de agua, para ahorrar tiempo en el rescate de emergencia durante accidente de inundaciones en las minas de carbón. (Depin, H., Li, D. y Shi, X., 2011); sus ventajas como la distancia de detección de largo y construcción rápida crea una brillante perspectiva para su aplicación en la detección de

problemas ocultos de agua que brota la cara de carbón. (Shi, X. y Wu, K. 2011). Tiene una profundidad de investigación variable que va desde los 10 hasta los 1000 m, lo que lo convierte una técnica muy versátil aplicable a varias áreas de la ingeniería que requieren exploración del subsuelo. Para la implementación de este método se requiere de un área libre de construcciones, lejana de torres de alta tensión, subestaciones eléctricas, generadores de alta potencia y antenas de telecomunicación, ya que el ruido electromagnético es su única limitante. (GEOPHYSICAL Surveys, s. f.). El método TEM electromagnéticos transitorios tiene un buen potencial para el mapeo del subsuelo, estratigráfico o mapear un acuífero es otra de los trabajos que se pueden realizar utilizando este método. (Meju, M.A., Fenning, P.J. y Hawkins, T.R.W. 2000).

### **PRINCIPIO DEL TEM**

Generalmente adopta dos pequeños bucles multi - vueltas: uno se utiliza para transmitir señales magnéticas y el otro se utiliza para recibir las señales inducidas. La dirección normal del bucle es sólo la detección de dirección y el bucle se colocan para que el normal, direcciona el objetivo en el objeto a detectar. El paso la corriente fluye a través del bucle transmisor y el primario, entonces se genera el campo magnético. Después, la corriente del transmisor se desconecta, haciendo que el campo magnético primario inmediatamente cae a cero. Una corriente de Foucault centra en la dirección normal del bucle se induce en las rocas circundantes de la carretera. Inicialmente, el campo de corriente del

inducida solamente se encuentra alrededor del bucle transmisor y es el más fuerte. Al correr el tiempo, la corriente inducida se difunde en las rocas alrededor y el poder se vuelve cada vez más débil. Según una investigación realizada por Nabighian y Macnae (Nabighian, M. N. y Macnae, J, 1979), La corriente inducida se distribuye anularmente en el medio uniforme con el valor máximo inicial de la corriente de campo en primera instancia tendido en la roca cerca del bucle transmisor. Con el paso del tiempo, la zona de máxima influencia se extiende a lo largo de la superficie en forma de cono. Un segundo campo magnético formado por la corriente de Foucault en el centro del bucle transmisor puede ser equivalente al campo de una línea de bucle en cualquier momento. Cuando el bucle de paso está apagado, la corriente de línea bucle equivalente se acerca al bucle transmisor y tiene la misma forma como el bucle. Luego se difunde en todas las direcciones, convirtiendo poco a poco en un bucle de corriente ronda. La corriente equivalente es igual que un conjunto de anillos de humo soplado fuera del circuito transmisor. Así que este proceso de difusión de la corriente de Foucault puede ser llamado el "Efecto de anillo de humo" (Zhi-hai, J., Jian-hua, Y. y Shu-cai L, 2007), es decir: El principio básico de método consiste en medir el campo secundario inmediatamente después de apagar el equipo emisor, ya que en ese momento desaparece el campo primario y sólo queda el secundario, que va decayendo gradualmente de manera tal que se puede extraer información sobre la resistividad del subsuelo.

(Comisión Nacional del Agua, 2007) Resistividad aparente tardía. En los sondeos TEM es común expresar la respuesta del terreno como el voltaje medido en la bobina receptora o como una resistividad aparente. En los métodos geofísicos del sondeo eléctrico vertical y sondeo magnetotelúrico la resistividad aparente de un semiespacio homogéneo se obtiene directamente de la resistencia e impedancia medidas, respectivamente. (Universidad Sonora, s. f.).

### **EMPLEO DE TEM EN MINERÍA**

Los dispositivos de minas TEM que se utilizan con frecuencia contienen principalmente dos tipos: 1) forma de bucle superposición y 2) forma de bucle centro. Forma de bucle La superposición tiene tales ventajas como respuesta fuerte a la estructura geológica anormal, fácil de construir. Sin embargo, su desventaja es que el transceptor tiene fuerte inductancia mutua entre las bobinas y campo primario afecta. Mientras que la ventajas de dispositivo de bucle central son que la inductancia mutua entre la transmisión y recepción bobina es pequeño y eliminando así el efecto de campo primario. El inconveniente es señal de campo secundario es relativamente débil por lo que su identificación de las anomalías geológicas no es tan buena como la superposición de bucles (Feng, H. y Wang, K. 2011; Wang YZ, Yu JC, Liu J, et al. 2009.).

### **IRRUPCIÓN DE AGUA EN LAS MINAS**

Los problemas que se presentan en las minas con el componente agua se clasifican de la siguiente manera:

(a) El agua: agua de la superficie, agua subterránea (Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad de Medellín & Universidad Nacional, 2011), agua fisura y agua cárstica, etc. La energía de los puntos de irrupción se puede medir por la presión y la afluencia del agua. (b) Canal: Canal está estrechamente relacionado con la capa impermeable, y que afecta efecto interceptor de la capa impermeable. Hay canales naturales, tales como fallas, grietas, columnas, caídas, etc., como los canales hechos por el hombre, incluyendo techo veta de carbón y el piso de la mina fisuras inducidas, perforación hecha por el hombre y así sucesivamente. Todos los tipos de agua entran en el área de la mina a través de Canales. El agua y los canales son las condiciones materiales de la liberación accidental de la energía de agua de mina, de manera que la mina se encuentra en estado de inseguridad. (c) Las actividades mineras: "actividades riesgosas", tales como la tecnología de producción, gestión, operación falla y error humano, etc., son los factores que inducen al aumento de la energía del agua, la activación del canal, el aumento de flujo anormal de agua. (d) El drenaje y medidas de emergencia: Los problemas habituales incluyen: el equipo de drenaje dejó de funcionar, la falta de capacidad de drenaje, deficiencia en las técnicas por obstáculos en el control y gestión del agua, etc., que agravan la irrupción del agua, lo que lleva a las pérdidas de la vida y la propiedad. Las cuatro fuentes de peligro mencionadas son condiciones necesarias para la aparición peligrosa de agua en la mina de carbón.

(Gong, Ch., Li, L., Zhu, K. y Gao, Y. 2011; Dennis, Z.R. y Cull, J.P. 2012; Dennis, Z.R., Cull, J.P., Cayley, R.A., 2010) Influenciado por las condiciones topográficas y geológicas, la investigación de la geofísica en la hidrología de las minas, rápida y con precisión se ha dificultado; detectar con precisión las pequeñas estructuras que causan la inundación en las minas activas y minas abandonadas donde se presenta acumulación de agua son igualmente complicadas al momento de su predicción. El estudio de los principales problemas técnicos en la exploración hidrogeológica en las minas de carbón se realiza con la aplicación del método electromagnético transitorio (TEM) por las características de este, como sensibilidad a baja resistividad, alta resolución transversal y de alta velocidad. Las nuevas tecnologías de inversión se han utilizado para mejorar la precisión de la detección logrando situar rápidamente y con precisión estructuras que permiten la irrupción de agua en las minas de carbón. Se gana tiempo para el rescate de emergencia en las minas de carbón, tiene significativos beneficios sociales y económicos. La tecnología del TEM se ha convertido en un medio importante para la exploración de control de agua en minas de carbón y tiene perspectiva optimista de la aplicación. (Depin, H., Li, D. y Shi, X., 2011). Sin embargo hay muchos métodos de evaluación de los peligros del agua de las minas de carbón, como el coeficiente de irrupción de agua método (Duan S. 2003.), el método de índice de vulnerabilidad basada en SIG, ANN y AHP (Wu, Q., Zhang, Z., Zhang, S. y Ma, J. 2007),

el método de análisis de capa crítica (Kong, H., Chen, Z., Bu, W., Wang, B. y Wang, L. 2008), la culpa método de análisis del árbol de (Wang, C., Sun, Y. y Hang, Y. 2009), la información método de análisis de fusión (Li, L. y Cheng, J. 2006), DC (Yu, J. 2007), TEM (Liu, Z., Yu, J. y Guo, D. 2006).

### **FALLAS Y FRACTURAS**

Las zonas de fallas, fractura y cuerpos acuíferos son los principales desastres en las minas, por lo que es importante llevar a cabo su detección y predicción avanzada de antelación con el fin de proporcionar apoyo técnico fiable para la excavación. Basado en la teoría de la inducción electromagnética, se llevan a cabo análisis de las características de los campos primarios y secundarios con una forma de onda positiva y negativa, se propone el procesamiento de la detección avanzada con una tasa de variación de la resistividad aparente e introducción, en detalle, de las fórmulas y procedimientos de cálculo. (Bo, W., Shengdong, L., Zhen, Y., Zhijun, W. y Lanying, H., 2012)

### **IDENTIFICACIÓN DE DERANJE ÁCIDO DE MINAS (ADM):**

Es un problema ambiental importante, común a la mayoría de las minas de roca dura que contienen minerales sulfurosos, tales como pirita y pirrotita. La acción conjunta de oxígeno y agua en éstos minerales reactivos provoca una compleja secuencia de oxidación-reducción reacciones (en combinación con otros procesos físicos o biológicos) que puede producir un lixiviado ácido ( $\text{pH} \leq 3$ ). para ello se aplica la combinación

### **OTROS MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPLEADOS EN MINERIA**

La interferencia electromagnética (EMI) de los sistemas de suministro de energía y equipos en las minas de carbón. El método separará interferencia de señales a través de la descomposición de paquetes de ondas y luego lograr la síntesis de paquetes de ondas hacia la descomposición resultados después de filtrado, para eliminar ruido armónico e interferencia electromagnética, tiene la capacidad para análisis de señales no estacionarias, es fácil de implementar, tiene filtros facilidad de adaptación, puede eliminar la interferencia, resolver problemas en el espacio local. (Fan, Z. y Ming, L. 2010).

El método de polarización inducida (IP) ha demostrado ser una herramienta eficaz en la exploración de minerales; en la mayoría estudios IP de los datos se adquieren con electrodos de tierra, más comúnmente con la configuración de dipolo-dipolo. Una corriente se introduce en tierra a través de dos electrodos de corriente, y una diferencia de potencial es medida entre dos electrodos de potencial situadas a cierta distancia de los electrodos de corriente. La polarización de la superficie puede ser detectada en dos dominios. En el dominio del tiempo, el voltaje de descomposición es medido en varias ocasiones después de que se interrumpe una corriente continua. En el dominio de la frecuencia, la tensión y su desplazamiento de fase se miden para diferentes frecuencias de una sinusoidal aplicaron corriente. (Flores, C. y Peralta Ortega, S. A., 2009).

Los métodos IP y SP (auto-potencial) ofrecen la mejor posibilidad para la

detección directa de la filtración en el caso de mediciones simultáneas para el control en el cambio de respuesta. Además, los métodos de resistividad y TEM DC ayudan a resolver estructura geológica relevante para procesos hidrogeológicos que podrían afectar el comportamiento de la filtración a través del tiempo. (Buselli, G. y Lu, K. 2001)

**Resonancia Magnética Protónica (RMP):** a principal característica de este método consiste en el hecho de que es el único capaz de detectar de forma directa la presencia de agua en el subsuelo, es efectivo no sólo para localizar el agua subterránea en acuíferos granulares, sino también en medios fracturados. El principio operativo del método consiste en la excitación de los protones del agua subterránea en presencia del campo magnético terrestre. Para ello es necesario disponer de una unidad emisora y una receptora. El transmisor genera una corriente alterna a la frecuencia de resonancia a través de una bobina situada sobre la superficie del terreno. A continuación la corriente se interrumpe bruscamente y se mide la señal de RMP en la misma bobina que actúa como receptor. (Casas, A. s. f.)

**Geo-Radar:** El geo-radar, radar de subsuelo o GPR (Ground-penetrating radar) es una técnica relativamente nueva que permite la investigación a poca profundidad del subsuelo. Aunque las primeras aplicaciones del geo-radar estuvieron orientadas a resolver el grosor de la capa de hielo en los glaciares, en los últimos años se han desarrollado nuevas aplicaciones de esta técnica que van desde la Arqueología a la Geotecnia.

En estudios medioambientales el geo-radar puede aplicarse como apoyo para establecer mapas de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, en el reconocimiento de vertederos y zonas degradadas. (Casas, A. s. f.)

**Tomografía EM por Radio-Ondas:** el principio del método de la tomografía por radioondas está basado en la determinación de los factores de atenuación y fase de los rayos. En el procedimiento de cross-hole, se introduce en un sondeo una sonda transmisora y otra sonda receptora se hace descender por otro pozo. Con diferentes posiciones TR a espaciados adecuados es posible obtener una densa malla de medidas del área de interés, generando un gran número de rayos. El receptor en cada punto mide la amplitud y fase de las ondas EM que llegan desde diferentes posiciones del transmisor. (Casas, A. s. f.)

## CONCLUSIONES

Las técnicas geofísicas superficiales son utilizadas para obtener información acerca de las unidades del subsuelo que controlan el almacenamiento, movimiento y calidad de las aguas subterráneas. Todos los métodos geofísicos se basan en la medición de una propiedad física específica de los materiales que conforman el subsuelo, por ejemplo, la resistividad y la conductividad eléctrica, la velocidad de propagación del sonido, el campo magnético, el campo gravitacional, entre otras. (TRX Consulting. 2012)

Emplear estos métodos depende de las necesidades en campo conjuntamente

con las propiedades que darán pauta para la implementación del mejor método posible, teniendo en cuenta también que se pueden combinar para la obtención de resultados óptimos.

Son eficientes, eficaces y rápidos en la resolución de problemas relacionados con filtración de agua o en la localización de la misma con fines de inventario o de prevención de inundaciones, se pueden utilizar combinados en la ubicación de incendios en las vetas de carbón aunque es esta última parte se deben realizar más estudios, puesto que aún no es del todo fiable en un cien por ciento; son de gran importancia en la planeación minera.

## REFERENCIAS

1. Alonso Díaz, A. L. (2001). Estudio de prospección geofísica y geotécnica para el emplazamiento del embalse de san esteban de andagoya (álava). Proyecto fin de carrera. Ingeniería Geológica, Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Recuperada de: [www.minas.upm.es/fundacion/jgs/images/pdf/LAAlonso.pdf](http://www.minas.upm.es/fundacion/jgs/images/pdf/LAAlonso.pdf)
2. Alvarez Manilla Aceves, A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte. Disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt229.pdf>
3. Bo, W., Shengdong, L., Zhen, Y., Zhijun, W. y Lanying, H. (2012). Fine analysis on advanced detection of transient electromagnetic method. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22, (2012), 669–673.
4. Bo, W., Shengdong, L., Zhi-hai, J. y Lan-ying H. (2011). Advanced forecast of coal seam thickness variation by integrated geophysical method in the laneway. *Procedia Engineering*, 26, 335 – 342.
5. Alvarez Manilla Aceves, A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte. Disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt229.pdf>
6. Bo, W., Shengdong, L., Zhen, Y., Zhijun, W. y Lanying, H. (2012). Fine analysis on advanced detection of transient electromagnetic method. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22, (2012), 669–673.
7. Bo, W., Shengdong, L., Zhi-hai, J. y Lan-ying H. (2011). Advanced forecast of coal seam thickness variation by integrated geophysical method in the laneway. *Procedia Engineering*, 26, 335 – 342.
9. Castilla Gómez, J. y Herrera Herbert, J. (2012). Proceso de exploración Minera mediante sondeos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
10. Castillo González, L. (s. f.). Estudio de factibilidad hidrogeológica en la porción sur oriente de la ciudad de san juan del rio. Qro, con la aplicación de métodos electromagnéticos. Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.
11. Comisión Nacional del Agua. (2007). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

Prospección geoelectrónica y registros geofísicos de pozos.

12. CORPOCESAR & IDEAM. (2006). Aprovechamiento y Protección Integral del Agua Subterránea en las Ecorregiones de los Valles de los Ríos Cesar y Magdalena Departamento del Cesar. Disponible en: <http://www.corpocesar.gov.co/files/Informe%20zona%20centro.pdf>

13. CORPOGUAJIRA. (2011). Plan de manejo ambiental de agua subterránea, su administración y aprovechamiento. En el municipio de Maicao, la Guajira. Disponible en: [http://www.corpoguajira.gov.co/web/attachments\\_Joom/article/483/PMA%20MAICAO.pdf](http://www.corpoguajira.gov.co/web/attachments_Joom/article/483/PMA%20MAICAO.pdf)

14. Dennis, Z.R. y Cull, J.P. (2012). Transient electromagnetic surveys for the measurement of near-surface electrical anisotropy. *Journal of Applied Geophysics*, 76, (2012), 64–73.

15. Dennis, Z.R., Cull, J.P., Cayley, R.A., (2010). Transient electromagnetic profiles across gold mineralisation zones in central Victoria. *Australian Journal of Earth Sciences* 57, 317–328.

16. Depin, H., Li, D. y Shi, X., (2011). Effect of Application of Transient Electromagnetic Method in Detection of Water-Inrushing Structures in Coal Mines. *Procedia Earth and Planetary Science*, 3, (2011), 455 – 462.

17. Depin, H., Pu, Z. y Dan, L. (2009) Status and prospects of application of mine geophysical exploration technology. *Geophysical Progress*, 24, (5),1839-1849.

18. Duan S. (2003). Probe into the calculation formula of coefficient of water bursting from coal seam floor.

*Hydrogeology & engineering geology*,1, (2003), 96–99.

19. Fan, Z. y Ming, L. (2010). Wavelet analysis method of harmonics and electromagnetic interference in coal mines. *Mining Science and Technology*, 20, (2010), 0576–0580.

20. Feng, H. y Wang, K. (2011). Study on Environmental Noise of the Mine TEM Detection System and Development of the Induction Probe. *Procedia Earth and Planetary Science*, 3, (2011), 477 – 484.

21. Feng, H., Wang, K. y Lian, J. (2011). Study on High Resolution Transient Electromagnetic Detecting Device Based on FPGA. *Procedia Earth and Planetary Science*, 3, (2011), 95 – 102.

22. Flores Luna, F. (2000). La exactitud del problema directo de sondeos electromagnéticos transitorios. *GEOS*, 20, (2), 70-88.

23. Flores, C. y Peralta Ortega, S. A. (2009). Induced polarization with in-loop transient electromagnetic soundings: A case study of mineral discrimination at El Arco porphyry copper, Mexico. *Journal of Applied Geophysics*, 68, (2009) ,423–436.

24. GEOPHYSICAL Surveys. (s. f.). Metodo Transitorio Electromagnetico en dominio del tiempo (TEM o TDEM). Disponible en: <http://www.gsu.com.mx/tecnicas/tem/>

25. Gielisch, H., (2007). Detecting concealed coal fires. *Rev. Engineering Geol.* 18, 199–210

26. Gong, Ch., Li, L., Zhu, K. y Gao, Y. (2011). Evolutionary Model of Coal Mine Water Hazards Based on Multi-Agent. *Systems Engineering Procedia*,

27. Guo, W., Li, X., Liu, Y. y Qi, Z. (2011). Apparent Resistivity Calculation Method of the Wide-area, Multi-component Transient Electromagnetic Field. *Procedia Earth and Planetary Science*, 3, 113 – 122.
28. Hernández Pérez, I. (2012). Nuevas tecnologías en el servicio geológico mexicano. Disponible en: [www.sgm.gob.mx](http://www.sgm.gob.mx)
29. Instituto de Geología y Minería de Colombia INGEOMINAS. (2004). Programa de Exploración de Aguas Subterráneas. Disponible en: <http://www2.sgc.gov.co/getattachment/92fd1dc3-e4a6-4450-96b5-b19abf276144/Programa-exploracion-aguas-subterranas.aspx>
30. Jing-cun, Y., Yang-zhou, W., Jian, L. y Xiao-bo, Z. (2008). Time-depth conversion of transient electromagnetic method used in coal mines. *J China Univ Mining & Technol*, 18, (2008), 0546–0550.
31. Jing-cun, Y., Zhi-xin, L. y Jin-yun T. (2007). Research on Full Space Transient Electromagnetism Technique for Detecting Aqueous Structures in Coal Mines. *J China Univ Mining & Technol*, 17, (1), 0058–0062.
32. Jun, M. y Yingmei, Z., (2012). A New Dynamic Assessment for Multi-parameters Information of Water Inrush in Coal Mine. *Energy Procedia*, 16, (2012), 1586 – 1592.
33. Karaoulis, M., Revil, A. y Mao, D. (2014). Localization of a coal seam fire using combined self-potential and resistivity data. *International Journal of Coal Geology* 128–129 (2014) 109–118.
34. Karaoulis, M., Revil, A., Minsley, B., Todesco, M., Zhang, J., Werkema, D.D., 2014. Time-lapse gravity inversion with an active time constraint. *Geophys.J.Int.* 196, 748–759.
35. Kong, H., Chen, Z., Bu, W., Wang, B. y Wang, L. (2008). A primary exploration on the relationships among loading key strata, water-resisting key strata and seepage key strata. *Journal of china coal society*, 5, (2008), 485-488.
36. Li Xiu. (2002). The theory and application of transient electromagnetic resonance. Xi'An: Science Technology Shaanxi Press. 1-48, 84-97,102-105.
37. Li, L. y Cheng, J. (2006). Floor water irruption prediction based on information fusion. *Journal of china coal society*, 5, (2006), 623-626.
38. Liu, Z., Yu, J., Guo, D. (2006). Application of mine transient electromagnetic method in the detection of hydrological borehole. *Geophysical and Geochemical Exploration.*; 30 (1): 59-61
39. Maya, M., Buenaventura, J., Salinas, R., (2004). Estado del conocimiento de la exploración de esmeraldas en Colombia. Nombre de la publicación. INGEOMINAS.
40. Meju, M.A., Fenning, P.J. y Hawkins, T.R.W. (2000). Evaluation of small-loop transient electromagnetic soundings to locate the Sherwood Sandstone aquifer and confining formations at well sites in the Vale of York, England. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 217–236.
41. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2014). Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos. Colombia.

42. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA - MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. (2002). Guía Minero Ambiental 1 Exploración. Colombia.
43. Nabighian, M. N. y Macnae, J. (1979). Quasi-static transient response of a conducting half-space—an approximate representation. *Geophysics*, 44, 1700–1705.
44. Nielsen, L., Jorgensen, N. O. y Gelting, P. (2007). Mapping of the freshwater lens in a coastal aquifer on the Keta Barrier (Ghana) by transient electromagnetic soundings. *Journal of Applied Geophysics*, 62, (2007), 1–15.
45. Niu Zhilian. (1993). Time domain transient electromagnetic principle. Changsha: Central South University of Technology Press. 1-15
46. Poisson, J., Chouteau, M., Aubertin, M. y Campos, D. (2009). Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. *Journal of Applied Geophysics*, 67, (2009), 179–192.
47. Serralde Ordóñez, D. (2011). Caracterización electromagnética, una aplicación de la geofísica somera, Templo del Sol, Sogamoso (Boyacá). Tesis de Magister. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
48. Sheng-dong, L., Ping-song, Z., Yu, C. y Bo, W. (2009). Characteristic of geological anomaly detected by combined geophysical methods in a deep laneway of coal mine. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 936–942.
49. Shi, X. y Wu, K. (2011). Down-hole electromagnetic method for detecting water hazard of coal mine. *Procedia Environmental Sciences*, 11, (2011), 970 – 976.
50. Shi, X. y Wu, K. (2011). Research and Application of Comprehensive Electromagnetic Detection Technique in Spontaneous Combustion Area of a Coalfields. *Procedia Earth and Planetary Science*, 3, (2011), 195 – 202.
51. Sun J P. (2007). The New Standard Compilation of Coal Mine Safety Production Monitoring System. Beijing: Coal Industry Press, 2007. (In Chinese)
52. TRX Consulting. (2012). Métodos Geofísicos e Integración de Datos en Investigaciones Hidrogeológicas - Innovaciones Tecnológicas. Disponible en: <http://es.slideshare.net/wpachecoe/geofisica-agua>
53. Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad de Medellín & Universidad Nacional. (2011). Lineamientos para exploración y perforación, realización de pruebas de bombeo y mantenimiento y limpieza de captaciones de aguas subterráneas. Disponible en: [http://www.metropol.gov.co/recursohidrico/Documents/LINEAMIENTOS\\_AGUAS\\_SUBTERRANEAS.pdf](http://www.metropol.gov.co/recursohidrico/Documents/LINEAMIENTOS_AGUAS_SUBTERRANEAS.pdf)
54. Universidad Nacional de San Juan. (s. f.). Exploración minera. Disponible en: <http://www.fi.unsj.edu.ar/descargas/ingreso/exploracion-minera.pdf>.
55. Universidad Sonora (s. f.). El Método de los sondeos electromagnéticos transitorios. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/17428/Capitulo2.pdf>
56. Vorsevi. (s.f.). Ingeniería Geo-

técnica investigación y medios de vanguardia. Disponible en: [http://www.vorsevi.es/descarga/Nuevas\\_Tecnicas.pdf](http://www.vorsevi.es/descarga/Nuevas_Tecnicas.pdf)

57. Wang YZ, Yu JC, Liu J, et al. (2009). Application of Transient Electromagnetic Method in Advanced Detection, Chinese Journal of Engineering Geophysics, 6, (1),28-32.

58. Wang, C., Sun, Y. y Hang, Y. (2009). Application of fault tree analysis to risk assessment of potential water-inrush hazards in coal mining. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2 (2009) 298-304.

60. Xueqiu, H., Baisheng, N.,

Wenxue, Ch., Enyuan, W., Linming, D., Mingju, L. y Mitri, H. (2012). Research progress on electromagnetic radiation in gas-containing coal and rock fracture and its applications. Safety Science, 50, (2012), 728–735.

61. Yu, J. (2007). Development and prospect of geophysical technology in deep mining. Process in geophysics, 2, (2007), 586-592.

62. Zhi-hai, J., Jian-hua, Y. y Shu-cai L. (2007). Prediction Technology of Buried Water-Bearing Structures in Coal Mines Using Transient Electromagnetic Method. J China Univ Mining & Technol, 17, (2), 0164–0167.