

**ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE DETECCION DE
OBJETOS MEDIANTE EL METODO RESISTIVO DE PROSPECCION
ELECTRICA**

MARTIN MOJICA BENAVIDES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FISICA**

2011

**ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE DETECCION DE
OBJETOS MEDIANTE EL METODO RESISTIVO DE PROSPECCION
ELECTRICA**

MARTIN MOJICA BENAVIDES

Trabajo de Grado para optar al Titulo de Físico

DIRECTOR:

YEZID TORRES MORENO, Docteur.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FISICA

2011

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	11
1. ANALISIS DEL POTENCIAL ELECTRICO Y LOSSISTEMAS DE MEDICION PARA EL METODO RESISTIVO DE PROSPECCION.	14
1.1 MEDIO HOMOGENEO	15
1.2 POTENCIAL DE UNA ESFERA SUMERGIDA EN UN MEDIO	17
1.3 CONFIGURACIONES ELECTRODICAS PARA LA PROSPECCION ELECTRICA	20
1.3.1 Dispositivos Electrónicos	21
1.3.2 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)	23
1.3.3 Calicatas Electricas (CE)	25
2. SISTEMA DE ADQUISICION	26
2.1 MONTAJE	26
2.2 ARENA OTTAWA 20-40	29
3. DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS PARAMETROS OPTIMOS PARA LAS MEDIDAS EN EL LABORATORIO	32
3.1 RANGO DE FRECUENCIAS Y AMPLITUD DE TRABAJO	34
3.2 PROFUNDIDAD, FORMA Y MATERIAL DE LOS ELECTRODOS	36
4. IMPLEMENTACION EXPERIMENTAL DEL METODO DE PROSPECCION ELECTRICA.	42
4.1 PROCESO DE ADQUISICION	42
4.2 TRATAMIENTO Y ANALISIS DE LOS DATOS	44

4.3 RECONSTRUCCION TOMOGRAFICA DE LA DISTRIBUCION DE RESISTIVIDAD	45
4.3.1 Reconstruccion Tomografica Para Arena Ottawa 20-40 Sola Y Con Esfera De Aluminio Sumergida.	46
CONCLUSIONES	52
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	55
BIBLIOGRAFIA	57
APENDICE	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Inyección de corriente en un medio.	14
Figura 2. Ejemplo de distribución de líneas equipotenciales para la circulación de corriente por un medio, usando dos fuentes puntuales.	17
Figura 3. Esfera sumergida en un medio infinito.	17
Figura 4. Diagrama de electrodos de corriente y de medición de potencial.	20
Figura 5. Diagrama de dispositivo tipo Wenner.	21
Figura 6. Diagrama del dispositivo Schlumberger.	22
Figura 7. Diagrama de dispositivo Doble Dipolo.	23
Figura 8. Diagrama simplificado de un sondeo eléctrico vertical.	24
Figura 9. Diagramas de SEV para las diferentes configuraciones electródicas: (a) Wenner. (b) Schlumberger. (c) Doble dipolo.	24
Figura 10. Diagrama simplificado de una calicata eléctrica.	25
Figura 11. Diagramas de CE para las diferentes configuraciones electródicas: (a) Wenner. (b) Schlumberger. (c) Doble dipolo	25
Figura 12. Esquema del sistema de adquisición construido.	27
Figura 13. Geometría del recipiente contenedor del medio a estudiar.	28
Figura 14. Diagrama de composición de la Arena Ottawa 20-40.	30
Figura 15. Tabla de especificaciones granulométricas para la Arena Ottawa 20-40	31
Figura 16. Esquema del sistema lineal equivalente.	32
Figura 17. Ejemplo de una adquisición de señales de entrada y salida, FFT indica el algoritmo de transformación de Fourier rápida del MatLab™ .	34
Figura 18. Función de transferencia para diferentes frecuencias.	35
Figura 19. Respuesta del sistema a bajas frecuencias para diferentes profundidades del electrodo.	37
Figura 20. Pruebas con diferentes materiales para la punta semiesférica	39

Figura 21. Pruebas con diferentes materiales para la punta cilíndrica.	40
Figura 22. Pruebas con electrodos de acero de diferentes formas.	41
Figura 23. Medida de la diferencia de tensión por niveles de profundidad.	
Esquema utilizado en el laboratorio.	43
Figura 24. Señal filtrada digitalmente.	44
Figura 25. Distribución de resistividad a 5,5 cm de uno de los bordes del dispositivo.	47
Figura 26. Distribución de resistividad a 7 cm de uno de los bordes del dispositivo.	47
Figura 27. Distribución de resistividad a 8,5 cm de uno de los bordes del dispositivo.	48
Figura 28. Distribución de resistividad a 10 cm de uno de los bordes del dispositivo.	48
Figura 29. Distribución de resistividad a 11,5 cm de uno de los bordes del dispositivo.	49
Figura 30. Distribución de resistividad a 13 cm de uno de los bordes del dispositivo.	49

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE DETECCION DE OBJETOS MEDIANTE EL METODO RESISTIVO DE PROSPECCION ELECTRICA*

AUTOR: MARTIN MOJICA BENAVIDES**.

Palabras claves: Prospección eléctrica, Respuesta Impulsional, Arena Ottawa 20-40

DESCRIPCION

La prospección eléctrica es una herramienta de exploración, que mediante variaciones en propiedades eléctricas en un medio, es posible detectar objetos o cambios en el medio sin afectar sus propiedades. En este trabajo, mediante un análisis frecuencial de señales sinusoidales inyectadas en arena Ottawa 20-40 como medio homogéneo, se analizan experimentalmente a una escala de laboratorio, las variables y características óptimas del sistema de medida para posteriormente realizar una prospección eléctrica en dicho medio.

La geometría, profundidad, distribución y material de los electrodos utilizados para la inyección y sensado de la señales son estudiados mediante las respuesta impulsional obtenida, variando cada uno de los parámetros a caracterizar. Tomando en cuenta las necesidades experimentales para llevar a cabo una configuración multielectrodica de prospección eléctrica, se hace un análisis de atenuación y diferencia de fase entre las señales inyectadas y las respuestas obtenidas, y así escoger a que frecuencias y con qué amplitudes deben ser las señales de entrada para realizar barridos en el medio con dimensiones específicas.

Los parámetros son puestos a prueba para localizar un objeto esférico inmerso en un recipiente llenado con arena Ottawa 20-40. La característica eléctrica analizada es la distribución de resistividad aparente, con la cual se realiza un estudio tomográfico que permitió obtener información espacial de la geometría y ubicación del objeto esférico.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ciencias, Escuela de Fisica, Director: Dr. Yezid Torres Moreno.

ABSTRACT

TITLE: A STUDY, DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN OBJECT DETECTING SYSTEM USING RESISTIVITY SURVEY.

AUTHOR: MARTIN MOJICA BENAVIDES **

Keywords: Resistivity survey, Impulse response, 20-40 Ottawa sand

DESCRIPTION

The resistivity survey is a powerful scan tool, which by varying electrical properties in a medium or material, you may detect objects or changes in it without affecting its properties. In this work, using a frequency analysis of injected sinusoidal signals in 20-40 Ottawa sand as a homogeneous medium, variables and optimal characteristics of the measurement system to subsequently perform a resistivity survey are experimentally studied in a laboratory scale.

The geometry, depth, distribution and the electrode material used for signals injection and sensing are studied using the impulse response obtained by varying each parameter. Taking into account the experimental requirements for using a multi-electrode resistivity survey configuration, an attenuation and phase difference analysis between the injected signals and the responses is carried out in order to choose the input frequencies and signal amplitudes for sweeps in the medium with specific dimensions.

The parameters are tested to find a spherical object immersed in a container filled with 20-40 Ottawa sand. The electrical characteristic analyzed is the apparent resistivity distribution by a CT scan which allowed obtaining spatial information on the geometry and location of the spherical object. A set of illustrations show how the resistivity distribution changes according to the geometry variations and the location of the electrodes on the medium surface.

* Work degree.

** Science Faculty, School of Physics, Director: Dr. Yezid Torres Moreno.

INTRODUCCION

El estudio y caracterización de propiedades físicas para diferenciar un material de otro, es el interés principal de muchas ramas de investigación que desarrollan técnicas para identificar y ubicar objetos embebidos en un medio. Los métodos físicos utilizados para la localización y caracterización desde la superficie son una gran ventaja, para aplicaciones con restricciones de costo y riesgo. La investigación en el desarrollo de estos métodos abre gran cantidad de posibilidades para la industria con intereses en la explotación mineral del subsuelo donde gran parte de la geofísica está encaminada a este tipo de investigación. También en campos como la arqueología y la medicina existe gran interés por los métodos no invasivos de prospección, donde es necesario una buena precisión y mínima alteración del medio. Entre los métodos físicos más importantes están el sísmico, el magnético, el gravimétrico, el georadar (GPR) y los métodos eléctricos; dentro de estos últimos se trabaja con la resistividad eléctrica, la cual es estudiada en este trabajo [1-2].

Los métodos eléctricos se dividen dependiendo de las propiedades eléctricas que se caracterizan en los materiales y el medio que los rodea. El método resistivo consiste en dos pares de electrodos ubicados en la superficie del medio; Por un par de electrodos se introduce una corriente y se mide la diferencia de potencial entre el otro par de electrodos, de estas medidas se obtiene el parámetro de resistividad aparente, el cual depende de la resistividad de los objetos sumergidos en el medio. Para el caso donde se utiliza una señal de corriente alterna se hace un análisis con las impedancias obtenidas para de ahí obtener los valores de la resistividad. Este método tiene aplicación en la detección de reservas geotérmicas, agua subterránea y restos arqueológicos. En la exploración petrolera

y medicina es material de investigación ya que se destaca su buena penetrabilidad y bajo costo de los equipos empleados.

La medida de la resistividad mediante prospección eléctrica, implementa diferentes configuraciones geométricas de electrodos que permiten localizar objetos con dimensiones y profundidad que oscilan entre pocos metros y varios kilómetros. La capacidad para obtener información útil está en la cantidad de datos que se obtengan y el análisis de los mismos. El inconveniente que presenta este método se da cuando se requiere una gran resolución espacial, ya que es necesario interpretar una gran cantidad de datos. Por otro lado el aumento en la capacidad de cálculo de los computadores personales ha permitido la obtención de mejores imágenes en los últimos años.

Este trabajo comienza analizando la teoría para estudiar el problema directo, donde se analiza la solución y los sistemas de medidas del potencial eléctrico para la implementación del método resistivo de prospección. Primero se considera el caso para un medio homogéneo y para el caso de una esfera sumergida, acto seguido se estudian las configuraciones electródicas para las medidas experimentales del método.

Mediante un análisis frecuencial de señales sinusoidales inyectadas en arena Ottawa 20-40 como medio homogéneo, se analizan experimentalmente a escala de laboratorio, las variables y características óptimas del sistema de medida para una prospección eléctrica en dicho medio. La geometría, profundidad, distribución y material de los electrodos utilizados para la inyección y sensado de la señales son estudiados mediante las respuesta impulsional obtenida, variando cada uno de los parámetros a caracterizar. Tomando en cuenta las necesidades experimentales para llevar a cabo una configuración multielectródica de prospección eléctrica, se hace un análisis de atenuación y diferencia de fase entre las señales inyectadas y las respuestas obtenidas, para así escoger a que

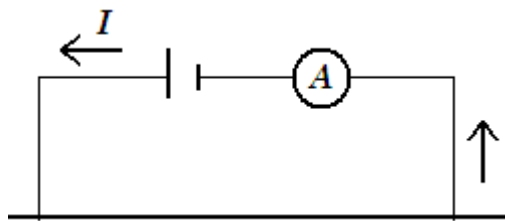
frecuencias y con qué amplitudes deben ser las señales de entrada para realizar barridos en el medio con dimensiones específicas.

Finalmente se utilizan los datos de resistividad obtenidos de las medidas experimentales adquiridas, para realizar un mapeo tomográfico mediante un software de interpolación y ajuste de datos por el método de mínimos cuadrados. Los resultados son analizados con el fin de comprobar la eficiencia del montaje y los parámetros establecidos experimentalmente.

1. ANALISIS DEL POTENCIAL ELECTRICO Y LOSSISTEMAS DE MEDICION PARA EL METODO RESISTIVO DE PROSPECCION.

Para generar un campo eléctrico en un medio con resistividad ρ , se supone la inyección de una corriente eléctrica por medio de una fuente puntual en la superficie del mismo. En la práctica se hace necesario utilizar dos electrodos para hacer circular esta corriente por el interior del medio (Figura 1).

Figura 1. Inyección de corriente en un medio.



Para el estudio del campo generado, se parte de cuatro relaciones fundamentales [1-3]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{Ley de Faraday}), \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} - \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{Ley de Ampère}), \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{Continuidad}), \quad (1.3)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Ley de Ohm}). \quad (1.4)$$

Para el caso en que se utilizan corrientes a bajas frecuencias, donde se desprecian los efectos magnéticos, puede hacerse la aproximación de un campo electrostático, el cual toma la forma:

$$\vec{E} = -\nabla U. \quad (1.5)$$

Ahora, reemplazando la ecuación (1.4) en la ecuación (1.3) y utilizando la relación (1.5) se tiene:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{J} &= \nabla \cdot (\sigma \vec{E}) \\ \nabla \cdot \vec{J} &= \sigma \nabla \cdot \vec{E} + \vec{E} \nabla \sigma \\ \nabla \cdot \vec{J} &= -\nabla^2 U + \vec{E} \nabla \sigma = 0. \end{aligned} \quad (1.6)$$

1.1 MEDIO HOMOGÉNEO

Para un medio homogéneo con resistividad uniforme, el gradiente de la conductividad es cero y la ecuación de continuidad daría como resultado la ecuación de Laplace para el potencial eléctrico,

$$\nabla^2 U = 0. \quad (1.7)$$

Para resolver esta ecuación se plantea primero para una sola fuente puntual y se escribe en coordenadas esféricas, dada la simetría del problema,

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (1.8)$$

Al tener un medio homogéneo la ecuación (1.8) no depende de θ ni de φ , así que se reduce solo a la parte radial:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) = 0. \quad (1.9)$$

Por otra parte la corriente inyectada en $r=0$ en el medio va a tener la forma:

$$I = \int_s \sigma \bar{E} \cdot dA = \sigma \bar{E} \cdot A = \sigma \cdot \Delta U \frac{A}{r} \quad (1.10)$$

Despejando y hallando el potencial de esta ecuación da como resultado:

$$U = \frac{I}{4\pi\sigma r} = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (1.11)$$

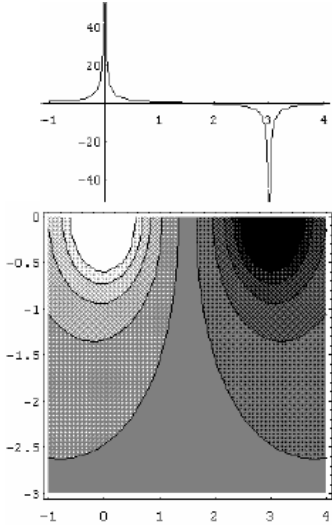
La ecuación (1.11) satisface la ecuación (1.9), ahora, esta solución es para una propagación radial en todas las direcciones, para el caso práctico, la corriente solo se propaga en el medio es decir de forma semiesférica, así, la expresión para el potencial en el medio queda:

$$U_m = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1.12)$$

También se tiene que tener en cuenta que se utilizan dos fuentes de corriente con signos opuestos, y dependiendo de su ubicación geométrica se formaran las líneas equipotenciales en el medio (ver figura 2) [1-3].

Figura 2. Ejemplo de distribución de líneas equipotenciales para la circulación de corriente por un medio, usando dos fuentes puntuales. Tomado de la referencia

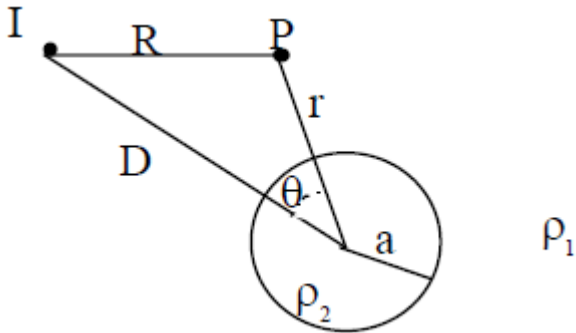
[2].



1.2 POTENCIAL DE UNA ESFERA SUMERGIDA EN UN MEDIO

Se supone ahora una esfera de resistividad ρ_2 y radio a , inmersa en un medio homogéneo de resistividad ρ_1 .

Figura 3. Esfera sumergida en un medio infinito. Tomado de la referencia [3].



Para obtener el potencial en el punto **P** de la figura 3, debe resolverse la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas. Debido a la simetría de la esfera en un medio infinito, no hay dependencia de la variable φ , es decir, se tiene simetría axial [2-4]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (1.13)$$

La tensión en **P** se expresa como:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{4\pi R} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \frac{1}{r^{n+1}} P_n \cos(\theta) \quad (1.14)$$

Si se tiene que $r < D$, R se puede relacionar como:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{D} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{D} \right)^n P_n \cos(\theta) \quad (1.15)$$

ahora, la forma del potencial dentro de la esfera viene dado por:

$$U_2 = \sum_{n=0}^{\infty} B_n r^n P_n \cos(\theta) \quad (1.16)$$

Por continuidad para $r=a$ se tiene que:

$$U_1 = U_2$$

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial r} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial r} \quad (1.17)$$

Utilizando las expresiones (1.14) a (1.17) y la ortonormalización de los polinomios de Legendre se tiene que:

$$A_n = \frac{I\rho a^{2n+1}}{4\pi D^{n+1}} \frac{n(\rho_2 - \rho_1)}{(n+1)\rho_2 + n\rho_1} \quad (2.18)$$

$$B_n = \frac{I\rho}{4\pi D^{n+1}} \frac{1}{(n+1)\rho_2 + n\rho_1} \frac{(2n+1)\rho_2}{(n+1)\rho_2 + n\rho_1}$$

teniendo esto, la ecuación (1.14) se puede reescribir de la forma:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{R} + \frac{a}{Dr} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a^2}{Dr} \right)^n \frac{n(\rho_2 - \rho_1)}{(n+1)\rho_2 + n\rho_1} P_n \cos(\theta) \right) \quad (1.19)$$

Donde el primer termino de la suma es el potencial del medio como sí no existiese la esfera y el segundo es la contribución de la esfera sumergida.

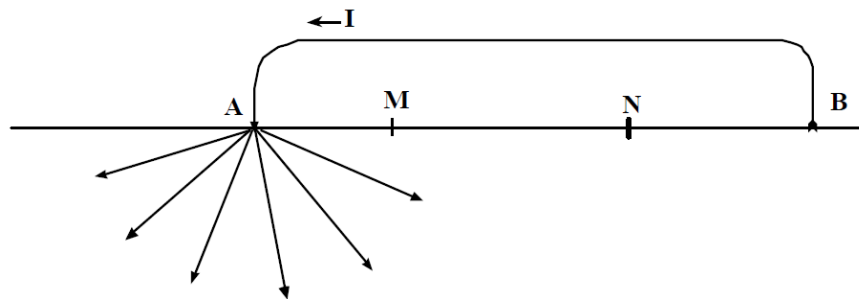
Debido a que el cálculo es desde la superficie del medio, la propagación es semiesférica por lo tanto el factor multiplicativo de la expresión se divide por 2. También teniendo en cuenta la interfase entre el medio y el aire, el potencial debido a la esfera va a tener una carga imagen y esto implica un factor multiplicativo de 2 en este segundo término. Dando como resultado final para el potencial medido desde la superficie debido a una esfera inmersa la expresión [3-4, 7]:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{R} + \frac{2a}{Dr} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a^2}{Dr} \right)^n \frac{n(\rho_2 - \rho_1)}{(n+1)\rho_2 + n\rho_1} P_n \cos(\theta) \right) \quad (1.20).$$

1.3 CONFIGURACIONES ELECTRODICAS PARA LA PROSPECCION ELECTRICA

Para medir el potencial eléctrico aparte de los electrodos de corriente, se utiliza un par de electrodos M y N (figura 4) en los que se mide la diferencia de potencial entre dos puntos [2, 7, 9, 13].

Figura 4. Diagrama de electrodos de corriente y de medición de potencial.



Donde los valores para estos potenciales vienen dados por:

$$V_M = \rho \frac{I}{2\pi AM} - \rho \frac{I}{2\pi BM} \quad ; \quad V_N = \rho \frac{I}{2\pi AN} - \rho \frac{I}{2\pi BN} \quad (1.21)$$

así, la diferencia de potencial entre ellos sería:

$$\Delta V_{MN} = \rho \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (1.22)$$

Despejando la resistividad ρ de (1.22) se obtiene la expresión que se utiliza experimentalmente, la cual en la práctica siempre se calcula desde la superficie, por lo que recibe la connotación de resistividad aparente ρ_a .

$$\rho_a = \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (1.23)$$

donde la segunda fracción es denominada el coeficiente geométrico K , el cual evidentemente sólo depende de las distancias entre los electrodos y determina qué tipo de dispositivo es utilizado.

En el caso de la implementación de corrientes alternas, la resistividad vendría dada por:

$$\rho_a = KZ_T \quad (1.24)$$

Donde Z_T corresponde a la impedancia del terreno medida entre M y N.

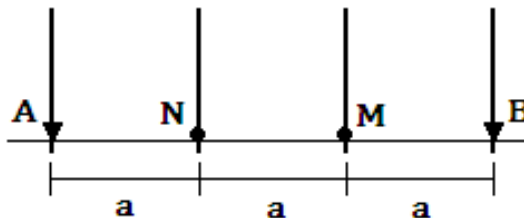
1.3.1 Dispositivos Electrónicos

Mediante todos los dispositivos electrónicos es posible hallar la resistividad aparente conociendo el coeficiente geométrico K , la corriente inyectada por los electrodos A y B y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N. [2, 7, 9, 13].

Dispositivo Wenner

En este dispositivo los cuatro electrodos se encuentran equidistantes y en orden ANMB (figura 5).

Figura 5. Diagrama de dispositivo tipo Wenner.



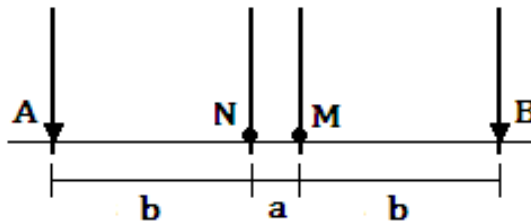
Para este dispositivo el coeficiente geométrico se deduce de (1.23),

$$K = 2\pi a \quad (1.25)$$

Dispositivo Schlumberger

Para este dispositivo se ubican los electrodos de forma simétrica, donde las distancias cumplen la relación $AB > 5MN$ (figura 6).

Figura 6. Diagrama del dispositivo Schlumberger.



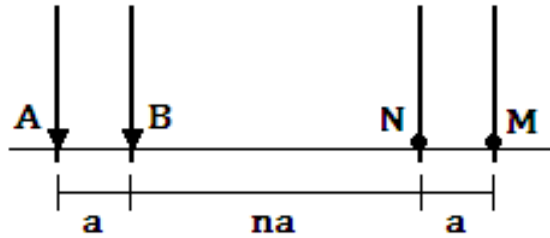
En este caso se llega a que el coeficiente encontrado de la ecuación (1.23) es:

$$K = \pi \frac{b(b+a)}{a} \quad (1.26)$$

Dispositivo Doble Dipolo

Para esta configuración se ubican los electrodos en el orden ABNM (Como se muestra en la figura 7).

Figura 7. Diagrama de dispositivo Doble Dipolo.



Para este tipo de configuración el coeficiente geométrico es:

$$K = -\pi n(n + 1)(n + 2)a \quad (1.27)$$

es conveniente utilizar este dispositivo con $n \gg 1$, lo cual da como resultado un dipolo de corriente y uno de tensión. Teniendo en cuenta esta condición se tiene para el coeficiente geométrico:

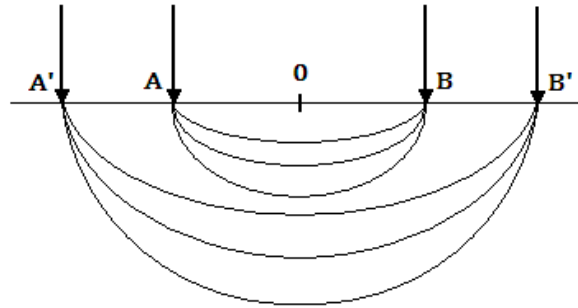
$$K = -\pi n^3 a \quad (1.28)$$

1.3.2 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

El sondeo eléctrico vertical permite encontrar la distribución vertical hallando la profundidad de las diferentes resistividades en el medio a partir de la medida de la diferencia de potencial en la superficie [2, 7, 9, 13].

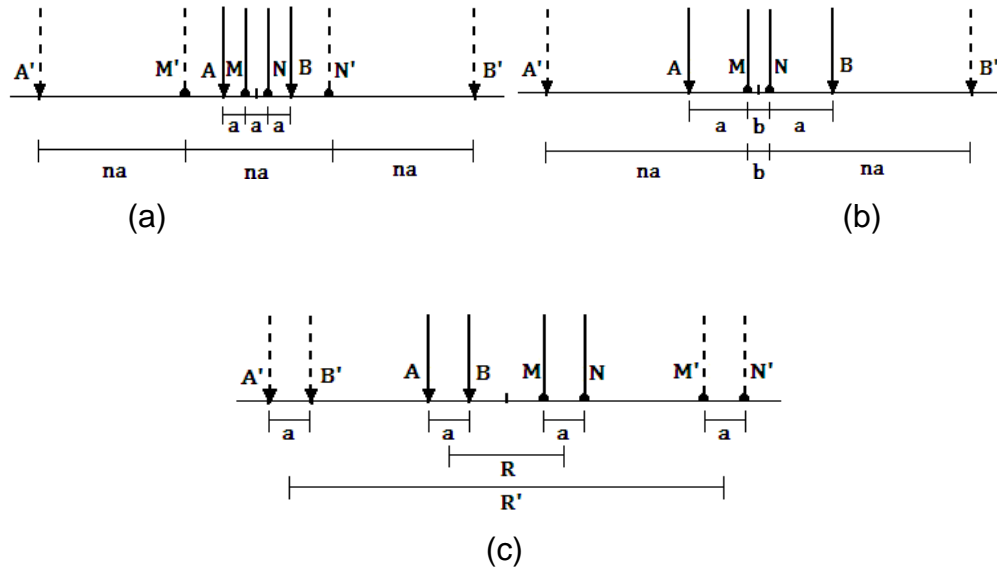
La profundidad de penetración de la corriente eléctrica inyectada depende de la separación entre los electrodos A y B. A medida que aumenta la separación entre los electrodos A y B, aumenta la profundidad en la cual circula la corriente pero disminuye su densidad. Para un medio homogéneo se puede afirmar que la penetración es proporcional a \overline{AB} como se aprecia en la figura 8.

Figura 8. Diagrama simplificado de un sondeo eléctrico vertical.



La profundidad de investigación no viene determinada únicamente por la penetración y distribución de corriente sino también por la configuración electródica que se esté implementando, y para cada una de ellas la variación de las distancias se hace en diferentes proporciones, aunque teóricamente los valores de las resistividades obtenidas deben ser los mismos (figura 9).

Figura 9. Diagramas de SEV para las diferentes configuraciones electródicas: (a) Wenner. (b) Schlumberger. (c) Doble dipolo.

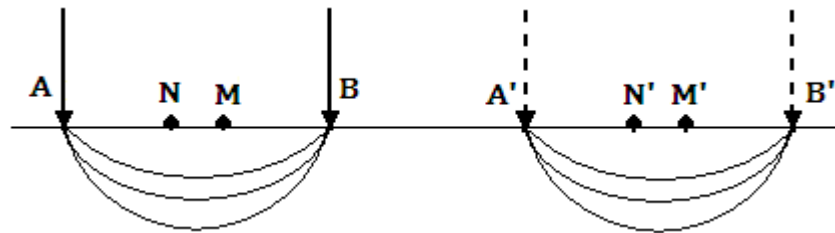


1.3.3 Calicatas Electricas (CE)

El objetivo de este procedimiento es encontrar las variaciones laterales de resistividad a una profundidad constante. Esto permite encontrar objetos o estructuras como heterogeneidades laterales de resistividad.

El método consiste en desplazar los cuatro electrodos a lo largo de un perfil manteniendo su separación (figura 10) [2, 6, 7, 9, 13].

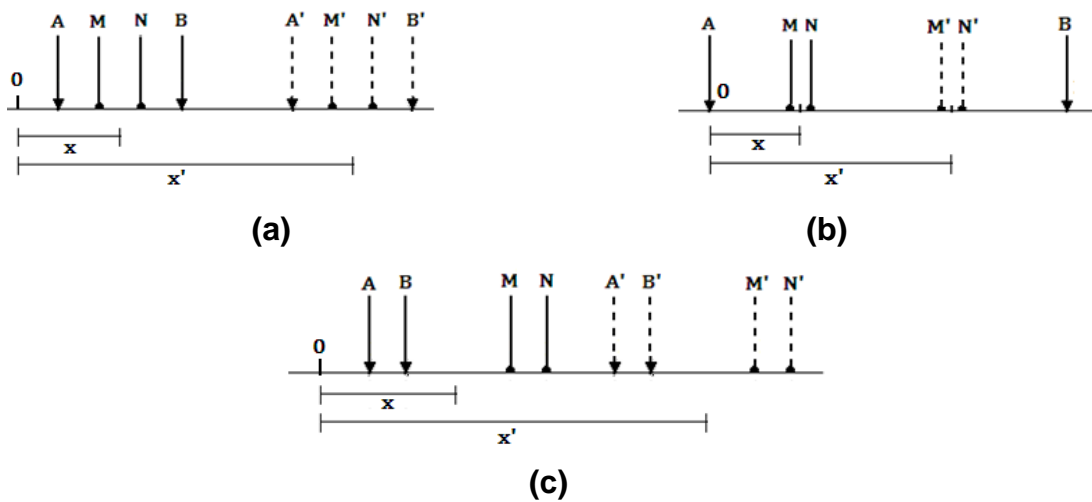
Figura 10. Diagrama simplificado de una calicata eléctrica.



Análogamente al método de sondeo eléctrico vertical, para cada una de las configuraciones electródicas establece un tipo de calicata eléctrica.

Figura 11. Diagramas de CE para las diferentes configuraciones electródicas:

(a) Wenner. (b) Schlumberger. (c) Doble dipolo



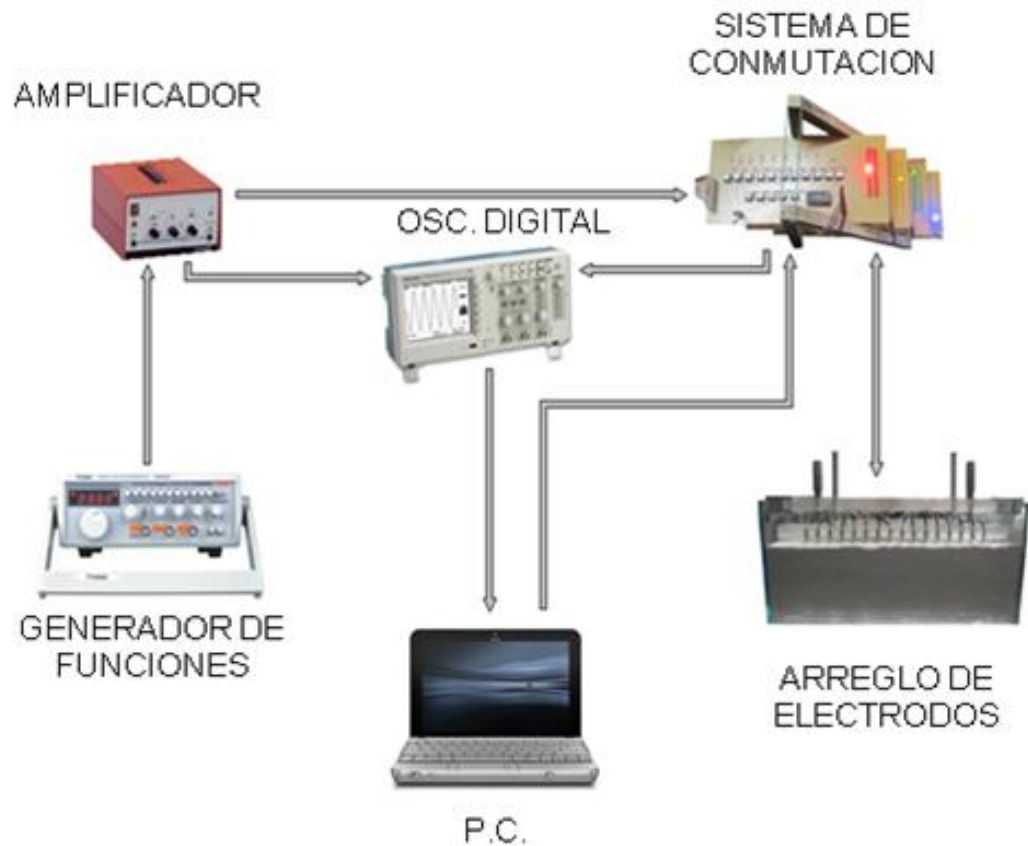
2. SISTEMA DE ADQUISICION

En la actualidad existen sistemas automáticos de medida para prospección eléctrica que permiten una adquisición rápida de los datos. Sin embargo, estos equipos son sistemas cerrados que no permiten modificar parámetros como la frecuencia de la corriente inyectada o su forma de onda, siendo el primer factor uno de los intereses principales de investigación en este trabajo. Tampoco están diseñados para estudios de laboratorio a escalas y condiciones personalizadas. Es por esto que parte fundamental del proyecto fue el diseño de un montaje que permitiera realizar las medidas necesarias y modificar las variables contenidas en el sistema con el fin de analizar las diferentes situaciones y escoger los parámetros más adecuados para la adquisición.

2.1 MONTAJE

Los elementos principales del sistema son, un generador de funciones para inyectar corriente entre los electrodos A y B, un sistema de detección para las señales sensadas entre los electrodos M y N, Para llevar a cabo la selección del par de electrodos de inyección y el par correspondiente para la detección, se diseñó un sistema de conmutación que permitiera escoger de un arreglo de 16 electrodos, la ubicación y función de cada uno. Todo esto controlado de manera automática desde un PC, lo cual permitió realizar barridos de manera automática debido a la cantidad de datos requeridos (ver figura 12).

Figura 12. Esquema del sistema de adquisición construido.



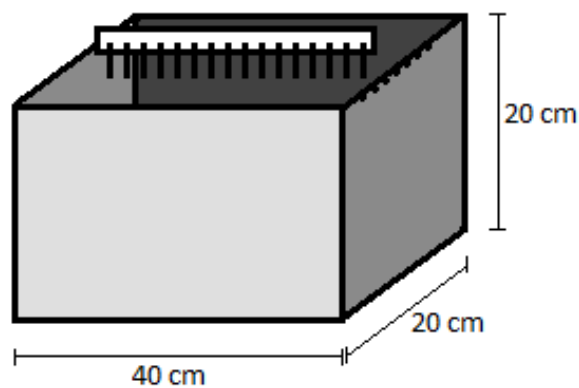
En el generador de funciones se gradúa manualmente la frecuencia y el tipo de onda con la que se quiere trabajar, posteriormente la señal pasa por un amplificador donde también de forma manual se define con que amplitud en voltaje se va a efectuar la inyección. Paralelamente la señal que pasa por el amplificador es enviada al circuito de conmutación y al canal uno, CH1 del osciloscopio digital. En el circuito de conmutación, desde el computador personal P.C. mediante la herramienta MATLAB se asigna y envía la señal por los electrodos escogidos y de igual manera, la señal sensada es enviada al canal dos, CH2 del osciloscopio. Las dos señales son adquiridas de forma sincronizada y en forma digital son enviadas al P.C.

Para evitar problemas de tierra, las señales sensadas se midieron con respecto al electrodo tierra (B). Para llevar a cabo las configuraciones geométricas requeridas, la diferencia de potencial entre los electrodos M y N fueron realizadas digitalmente de forma numérica.

Los electrodos son ubicados de forma equiespaciada a 2 cm con el fin de realizar los cambios de separación para la prospección como múltiplo de esta distancia. Con el fin de realizar un análisis tomográfico del volumen estudiado, con el arreglo de electrodos se realizó un barrido trasversal a un paso de 1,5 cm de seis líneas centradas en la superficie de la arena con el fin de reducir el efecto por los bordes finitos del recipiente donde está contenida. La profundidad de los electrodos es posible graduarla con una sensibilidad de centésima de milímetro para que fuera posible el estudio de este parámetro posteriormente.

Para realizar la caracterización de la arena a una escala adecuada se utilizó un recipiente rectangular de vidrio (ver figura 13) que permitiera un volumen adecuado a estudiar en el laboratorio para diferentes situaciones experimentales.

Figura 13. Geometría del recipiente contenedor del medio a estudiar.



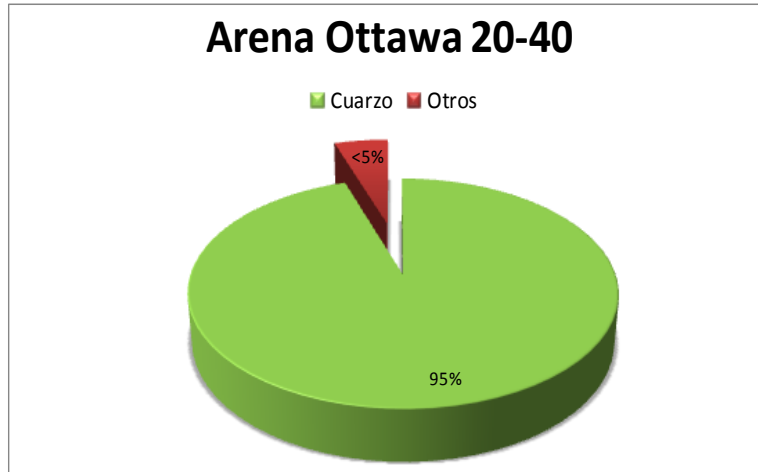
Es importante recalcar el error introducido en los valores en los extremos de cada línea, ya que el cálculo de la resistividad aparente se basa en un modelo de medio muy grande con respecto a la separación entre los electrodos M y N .

2.2 ARENA OTTAWA 20-40

Al momento de buscar un medio sólido para realizar el experimento, en contraste con un medio líquido ya estudiado [7], se tuvieron que tomar en cuenta condiciones del mismo, que permitieran la implementación del método con las aproximaciones necesarias. El medio requerido debe garantizar homogeneidad e isotropía con el fin de aproximar la propagación de las líneas de campo eléctrico de forma radial a donde se inyecta la señal de corriente. Se busca que sea resistivo con el fin de observar un contraste en la detección de objetos conductores.

La Arena Ottawa 20-40 fue estudiada mediante un análisis de difracción de rayos X y tamizaje (Lab. DRX, Instituto Colombiano del Petróleo ICP.) con el fin de observar su composición y tamaño de grano (**Apéndice A**).

Figura 14. Diagrama de composición de la Arena Ottawa 20-40.



En la figura 14 se observa que un 95% de la arena está compuesta por cuarzo, mientras que menos de un 5% otros materiales, esto satisface la condición de ser un material resistivo. En la tabla de la Figura 15, se observan los resultados granulométricos del análisis al que se sometió la arena.

Estos resultados obtenidos satisfacen las condiciones requeridas para implementar esta arena como medio a estudiar en cuanto a composición y tamaño del grano, sin embargo las variables como la humedad y compactación no fueron cuantificadas y lo que se buscó fue mantener condiciones en las que estos parámetros no variaran significativamente.

**Figura 15. Tabla de especificaciones granulométricas para la Arena Ottawa
20-40**

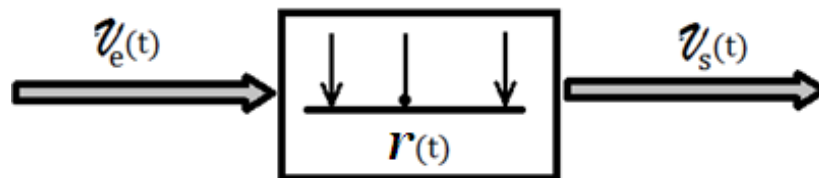
Arena Ottawa 20/40		
Diámetro promedio	Xm [μm]	362,80
Área superficial específica	Sv [cm²/cm³]	193,41
Coeficiente de uniformidad	U	2,27
Percentil 10	X10 [μm]	187,30
Percentil 40	X40 [μm]	332,00
Percentil 50	X50 [μm]	379,50
Percentil 60	X60 [μm]	426,00
Percentil 90	X90 [μm]	494,40

3. DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS PARAMETROS OPTIMOS PARA LAS MEDIDAS EN EL LABORATORIO

Con el fin de obtener resultados que permitieran una ilustración adecuada de la distribución de resistividad en la arena, se variaron experimentalmente los parámetros involucrados en el sistema de medida y se analizaron para así escoger en qué condiciones se efectuaría la prospección eléctrica.

Usando la variación de la respuesta impulsional de todo el sistema como herramienta principal, se escogieron los valores de frecuencia de la señal, material y forma de los electrodos y la profundidad a la que estos debían estar sumergidos para la inyección y sensado de la corriente. Se utilizó la arena sin algún tipo de objeto sumergido y sólo tres electrodos, donde la inyección se hizo entre las posiciones 1 y 16, y el sensado se hizo en la posición 7 con respecto a la tierra del sistema. Las medidas se hicieron en voltaje con el fin de observar su cambio en magnitud y fase (ver figura 16).

Figura 16. Esquema del sistema lineal equivalente.



La respuesta del sistema viene dada por,

$$v_s(t) = v_e(t) \otimes r(t) \quad (3.1).$$

En el dominio frecuencial se puede expresar como,

$$V_s(f) = V_e(f) \cdot R(f) \quad (3.2),$$

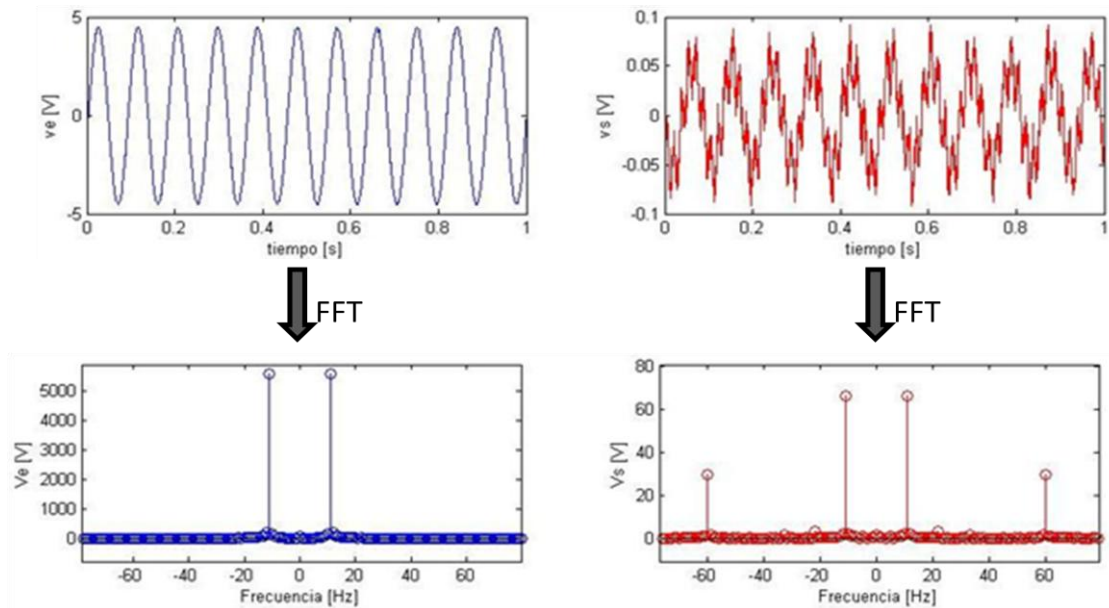
$$|V_s(f)|e^{j\phi_s(f)} = |V_e(f)|e^{j\phi_e(f)} \cdot |R(f)|e^{j\phi(f)} \quad (3.3),$$

a partir de esta relación se puede expresar la función de transferencia del sistema en amplitud y en fase,

$$|R(f)| = \frac{|V_s(f)|}{|V_e(f)|} \quad ; \quad \phi(f) = \phi_s(f) - \phi_e(f) \quad (3.4).$$

Las señales de entrada y salida fueron adquiridas de forma sincronizada, esto hizo más fácil la medición de su diferencia de fase. Las señales fueron digitalmente llevadas al dominio frecuencial por medio de la transformación de Fourier discreta TFD con el fin de observar en la señal de salida que frecuencias estaban presentes y así filtrar el ruido, que para este caso es principalmente el introducido por la red eléctrica a 60Hz (Figura 17).

Figura 17. Ejemplo de una adquisición de señales de entrada y salida, FFT indica el algoritmo de transformación de Fourier rápida del MatLab™ .



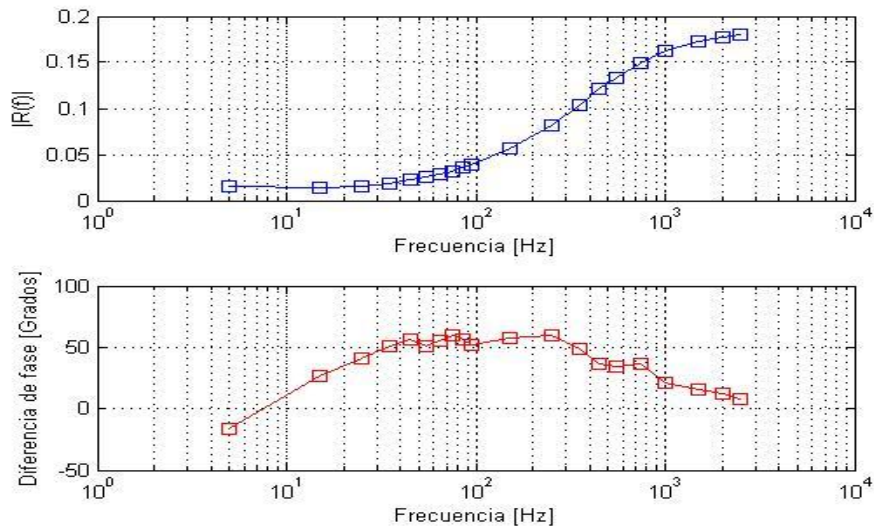
Se observó que aparte de los 60 Hz no había más frecuencias con magnitudes significativas aparte de la utilizada en la señal de entrada, esto indica que el sistema es lineal y que no introduce nuevas frecuencias. Es por esto que la amplitud y fase correspondiente a la frecuencia de trabajo en las dos señales es lo que va a ser utilizado para la obtención de la función de transferencia del sistema.

3.1 RANGO DE FRECUENCIAS Y AMPLITUD DE TRABAJO

El primer paso fue observar la variación en esta relación a medida que se variaron los valores de frecuencia para diferentes valores de amplitud de la señal inyectada. Los parámetros como el material y forma de los electrodos así como su profundidad no fueron variados en esta fase del análisis, ya que el estudio pertinente a estos cambios se hace posteriormente, es por esto, que para estas pruebas se definieron electrodos de acero cilíndricos a 5 mm de profundidad.

Para escoger la frecuencia óptima se realizó un barrido en frecuencias desde la mínima que permite el generador a una amplitud de 5 Vpp. sin deformarse, hasta la máxima para esta misma amplitud, el paso es función de las variaciones observadas para cada incremento. Ver la (Figura 18).

Figura 18. Función de transferencia para diferentes frecuencias.



Tomando en cuenta los resultados anteriores y las necesidades para la prospección eléctrica, se decidió centrarse en las bajas frecuencias; para encontrar la profundidad limite a la cual se puede tener información es necesario considerar el campo eléctrico oscilante E inyectado desde la superficie del medio, su amplitud al interior del mismo estaría dada por:

$$|E_M| = E_0 e^{-\gamma} \quad (3.5)$$

Donde γ es el factor de amortiguamiento y el inverso es conocido como penetración nominal o “skin depth” δ , esta se define como la profundidad a la cual la amplitud del campo eléctrico queda reducida a e^{-1} de su valor en la superficie. [2, 3, 8]

$$\delta = \frac{1}{\gamma} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0 f}} \quad (3.6)$$

Así, a bajas frecuencias se garantiza una buena profundidad aunque no se conozca el valor de la resistividad del medio. Un aspecto importante para no utilizar altas frecuencias es el incremento de interferencias inductivas y capacitivas entre el inyector y el detector, hecho que se verificó experimentalmente en nuestro dispositivo.

El paso siguiente fue comparar experimentalmente con más detalle el cambio de la respuesta impulsional en frecuencias desde los 3 Hz hasta los 43Hz. Experimentalmente se probaron amplitudes de 5 Vpp, 7 Vpp, 9 Vpp y 11 Vpp y finalmente la escogida fue la de 7 Vpp puesto que fue lo suficiente para poder inyectarse a los 3 Hz sin distorsionarse y lo suficientemente alta para que la atenuación fuera medible.

3.2 PROFUNDIDAD, FORMA Y MATERIAL DE LOS ELECTRODOS

Las características físicas de los electrodos son una fuente de cambio en la respuesta del sistema, pues las medidas van a estar influidas por parámetros como la resistencia de contacto y por ende la impedancia de los electrodos. Pero estas magnitudes no fueron halladas por separado ya que el experimento se hizo adquiriendo la respuesta final de todo el sistema y analizando cómo los cambios variaban la señal de salida. El objetivo de esta fase del proceso fue encontrar las condiciones en la que se generan menos pérdidas en la respuesta impulsional para garantizar que el sistema de medida afecte lo menos posible las medidas realizadas sobre la arena.

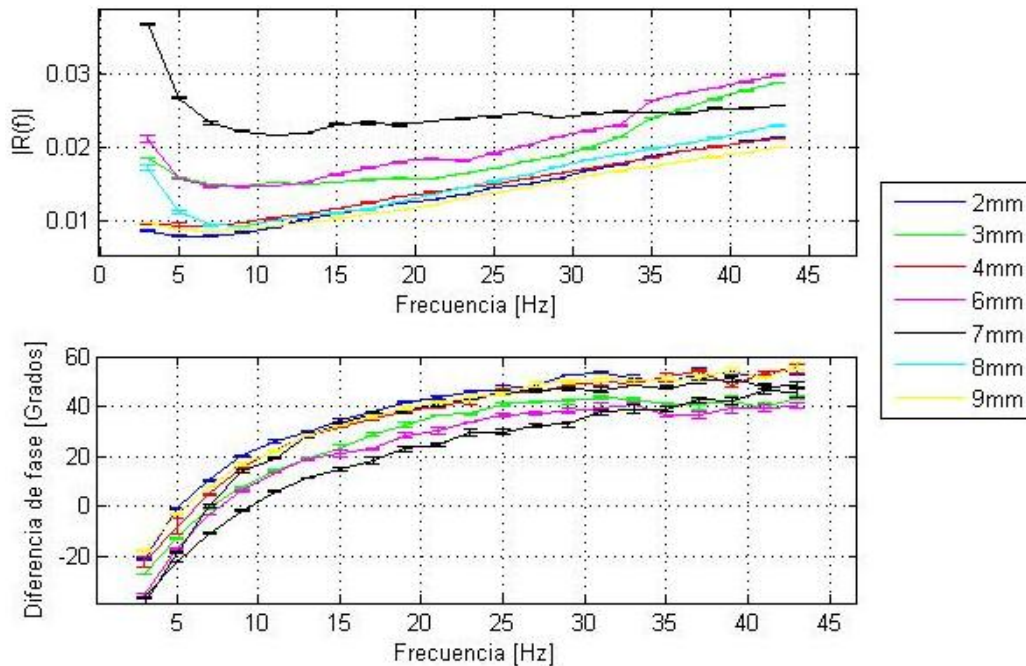
Teniendo un rango de frecuencias establecido, antes de escoger una sola frecuencia de trabajo se hicieron experimentos utilizando estas frecuencias para diferentes valores de longitud sumergida de los electrodos, el primer estudio se hizo efectuando un barrido con un paso de 1 mm desde 2 mm hasta completar 9 mm. Ver (figura 19).

La adquisición de estos datos se hizo en cinco tomas separadas y la desviación estándar fue hallada y graficada con la expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3.7),$$

donde n es el número de medias realizadas para cada dato, x_i corresponde a la i -ésima medida y \bar{x} es el promedio de las mediciones.

Figura 19. Respuesta del sistema a bajas frecuencias para diferentes profundidades del electrodo.



Como se puede apreciar en la Figura 19 para la profundidad de 7 mm fue donde se registraron menos pérdidas en amplitud y menos diferencia de fase con respecto a las demás profundidades, Este resultado es coherente con lo esperado ya que la resistencia de contacto que se produce es debido a la interfase de los electrodos con la arena. La resistencia de contacto se puede expresar usando la Ley de Gauss para una superficie cilíndrica como:

$$R_C = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{r}\right) \quad (3.8),$$

en esta ecuación ρ es la resistividad del terreno, l y r son la longitud sumergida y el radio del del electrodo cilíndrico respectivamente. Por otra parte al aumentar la profundidad de penetración de los electrodos también aumenta el efecto capacitivo entre el inyector y el detector lo cual es más apreciable a bajas frecuencias. Es por esto que es razonable el comportamiento observado a una profundidad de 7 mm donde estos dos efectos se contrarrestan de tal manera que la atenuación es mínima para los casos analizados.

Una vez se tiene una aproximación de la profundidad y de las frecuencias, se procede a hacer un análisis más detallado para así definir con más exactitud estos parámetros. Para esto se escogieron las frecuencias más opcionadas según el criterio antes mencionado y se hicieron medidas variando la longitud sumergida pero en el rango de 7 a 8 mm en un paso de 0.2mm. A partir de este punto se empieza a variar también el material de los electrodos y la forma de la punta de los mismos con el fin de observar de manera experimental los cambios introducidos por estos parámetros. Los materiales utilizados fueron; cobre, hierro y acero para puntas semiesféricas y cilíndricas. (ver la Figura 20 y la Figura 21).

Al analizar esta serie de gráficas, se decidió utilizar el acero como material para los electrodos en la prospección eléctrica, ya que presentó resultados favorables

según el criterio de atenuación. Sin embargo, dentro de este material se quiso comparar la forma más detenidamente y se hicieron pruebas donde aparte de las dos geometrías ya utilizadas, se incorporó la de punta cónica. (ver la Figura 22). La frecuencia escogida fue de 7 Hz ya que fue la que presentó resultados más estables en los barridos que se hicieron para diferentes materiales.

Figura 20. Pruebas con diferentes materiales para la punta semiesférica

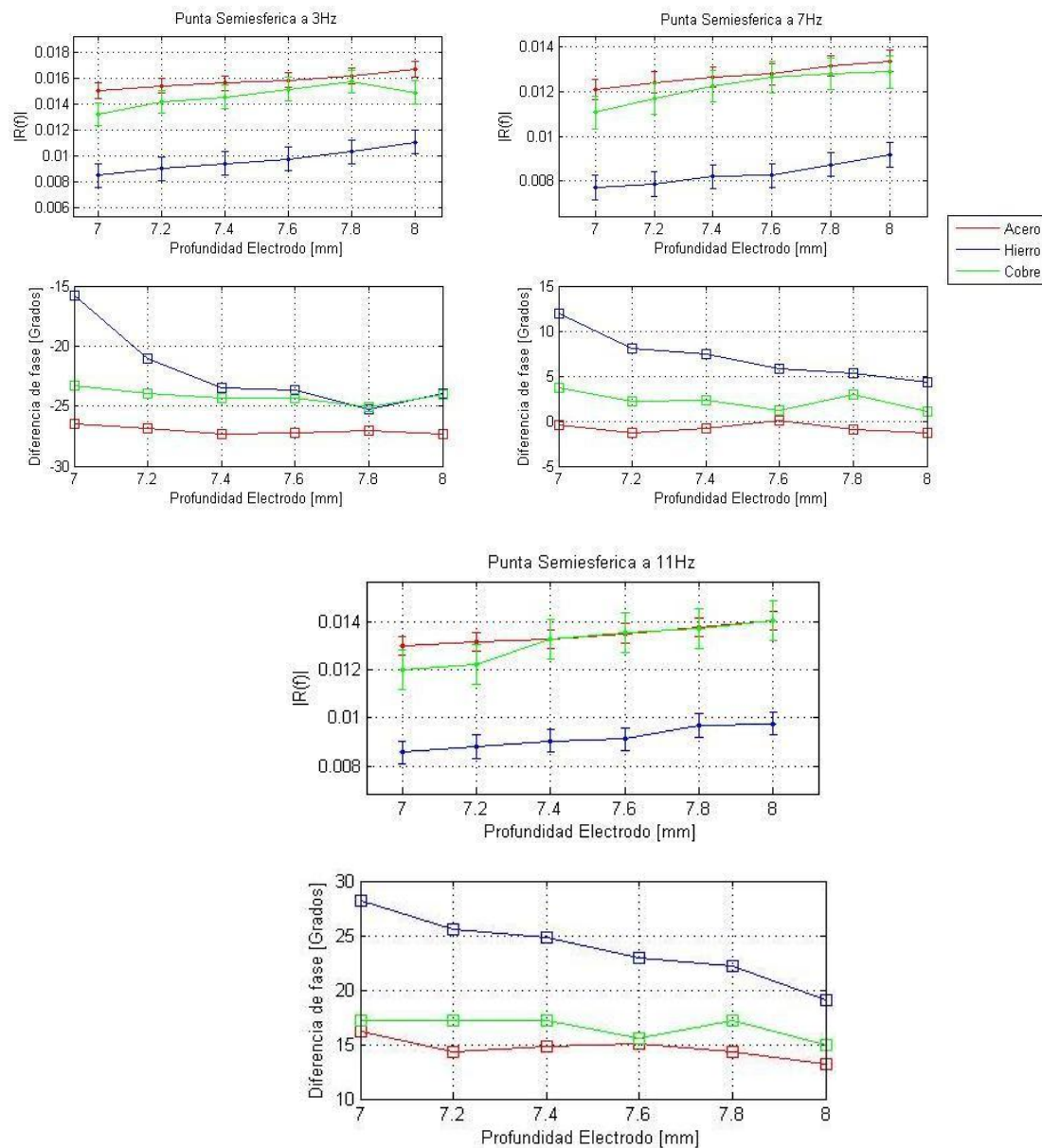


Figura 21. Pruebas con diferentes materiales para la punta cilíndrica.

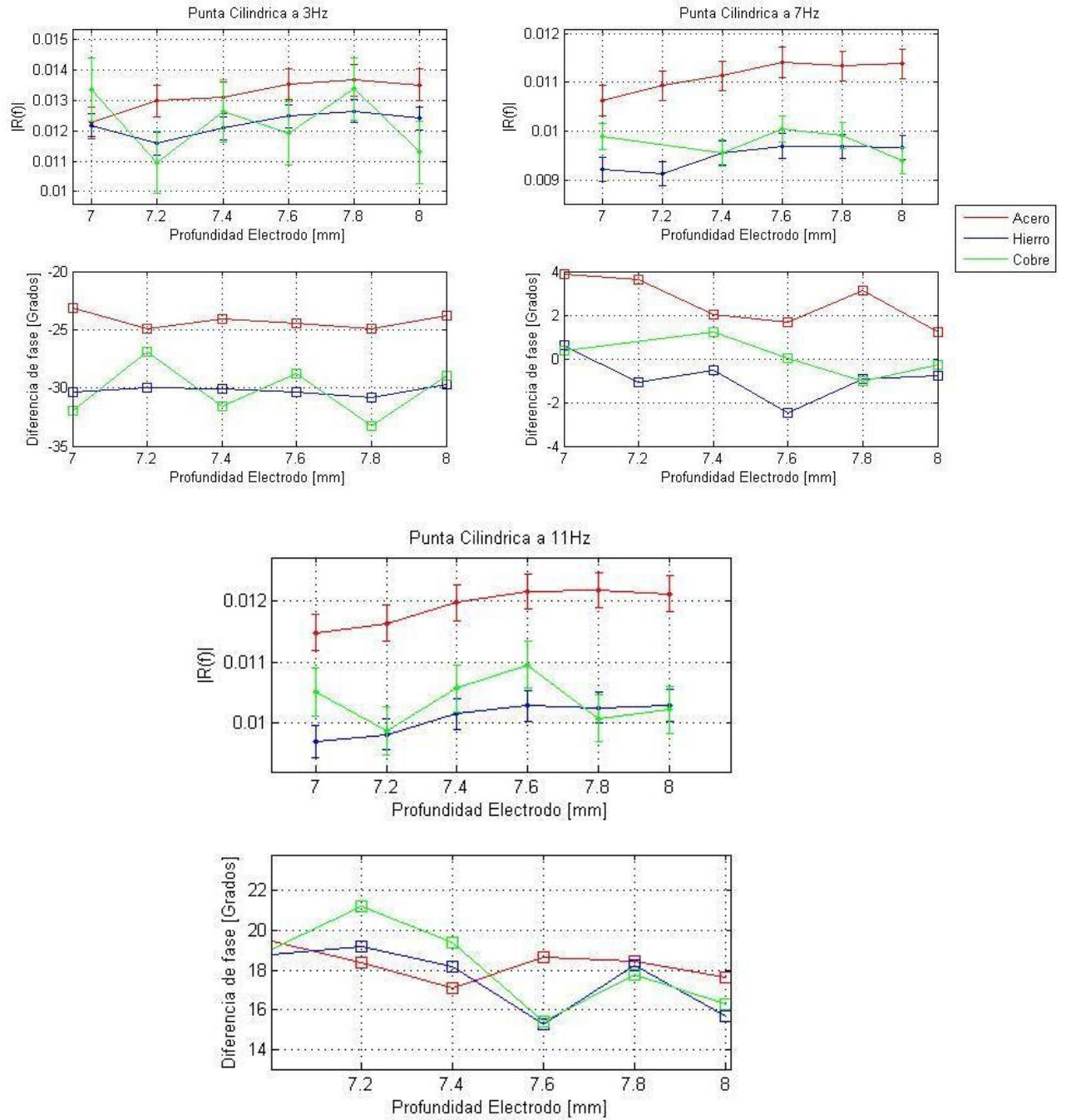
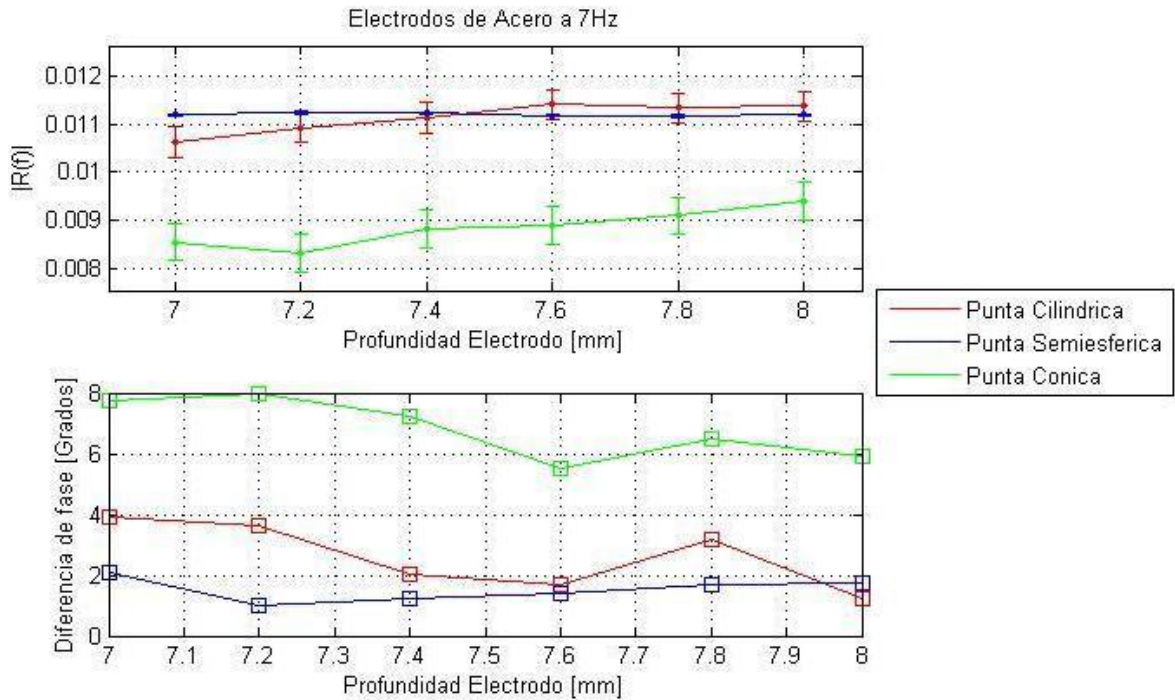


Figura 22. Pruebas con electrodos de acero de diferentes formas.



Finalmente se concluye con la escogencia de la punta cilíndrica para los electrodos de acero y la longitud para sumergir los mismos de 7,6 mm ya que es a la profundidad donde se visualiza menos atenuación para la geometría y el material escogido.

De esta manera quedan determinados los parámetros óptimos del sistema de adquisición mediante evidencia experimental para empezar a realizar los estudios de prospección eléctrica.

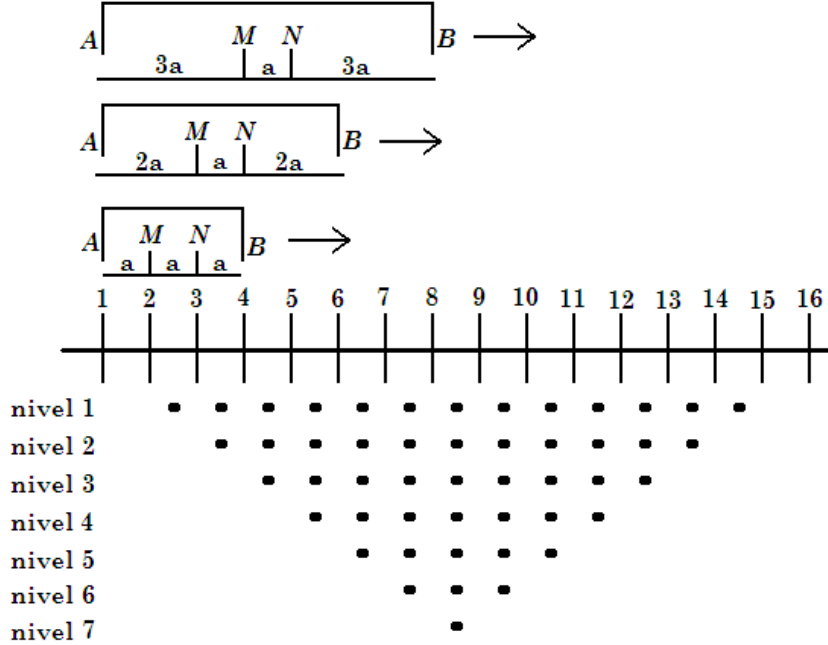
4. IMPLEMENTACION EXPERIMENTAL DEL METODO DE PROSPECCION ELECTRICA.

Para la implementación del método se inyectó corriente alterna incluso cuando los valores de resistividad que se tomaron en cuenta fueron los de la parte real. Esto se hizo con el fin de reducir el error introducido por efectos de oxidación-reducción en los electrodos que son más propicios en corriente continua, ya que esto los degradaría, y la disminución de los efectos en las propiedades magnéticas del medio. También se tuvo en cuenta la disminución de la impedancia del electrodo ya que esto permitiría que con la misma tensión se lograra inyectar más corriente [2, 3, 8].

4.1 PROCESO DE ADQUISICION

La configuración electródica escogida para hacer los barridos horizontales y en profundidad fue la Wenner-Schlumberger, donde el factor geométrico corresponde al dispositivo Schlumberger y la calicata para detectar variaciones horizontales se hizo de la forma Wenner. Para el sondeo vertical se procedió repitiendo la calicata siete veces en la misma línea, aumentando la distancia b en la configuración Schlumberger desde 2 cm hasta 14 cm en pasos de dos centímetros por corrida, mientras la distancia a entre los electrodos detectores permaneció constante.

**Figura 23. Medida de la diferencia de tensión por niveles de profundidad.
Esquema utilizado en el laboratorio.**



Por cada incremento en la distancia inyector-detector, se obtiene un aumento de nivel en profundidad. Estos niveles no son profundidades reales ni están distribuidos en la misma proporción, son sólo una aproximación para detectar los cambios en la resistividad. Para aproximar la profundidad real, la literatura plantea varias aproximaciones pero la más común es la Función de Sensibilidad de Frechet FSF. Esta función valora el grado en el cual un cambio de resistividad del terreno del subsuelo provoca una variación en el potencial medido en los electrodos del dispositivo geoelectrico. Para el caso Schlumberger es una buena aproximación ubicar el punto de estudio en $AB/2$ en profundidad [2, 11,12].

Las tensiones entre M y N no se adquirieron una con respecto a la otra, estas medidas se tomaron por separado y con respecto al electrodo tierra. Posteriormente en forma digital se calculó la diferencia entre ambos. Esto se hizo para evitar problemas de tierra con el circuito además del ruido introducido por la

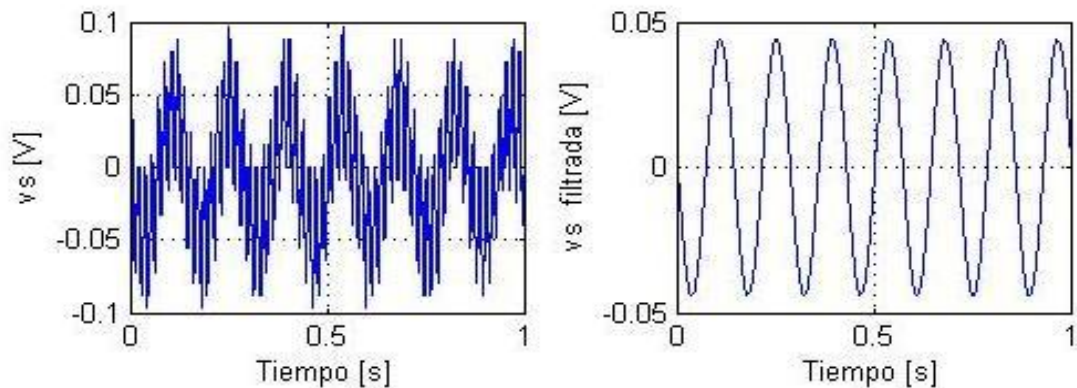
falta de una verdadera tierra para el circuito completo del sistema implementado. Las corrientes inyectadas en la arena fueron medidas en amplitud R.M.S. mediante un amperímetro conectado en serie con el circuito conmutador de inyección.

La adquisición de datos para cada uno de los barridos en las seis posiciones transversales de todo el arreglo de electrodos se realizó de forma automatizada, mientras que el desplazamiento transversal sí se realizaba de manera manual, lo cual significó grandes períodos de tiempo en la adquisición teniendo en cuenta que cada dato se tomó diez veces con el fin de hacer las medidas más confiables.

4.2 TRATAMIENTO Y ANALISIS DE LOS DATOS

Después de adquiridas las señales estas fueron filtradas digitalmente para eliminar la interferencia de la red eléctrica de 60Hz, mediante el uso de una ventana que sólo permitiera el paso de la frecuencia graduada en el generador ya que en la calibración del sistema se había llegado a la conclusión que la arena no introducía nuevas frecuencias (comportamiento lineal).

Figura 24. Señal filtrada digitalmente.



Después de filtrados y promediados los datos, se procedió a efectuar el cálculo de la diferencia de potencial entre los electrodos M y N para todas las tomas y se hallaron los valores de resistividad aparente; se le llama aparente porque es la obtenida en la superficie. Mediante la Ec. (2.23) y reemplazando las amplitudes I y ΔV :

$$|\rho_a| \pm (\sigma_{|\Delta V|} + \sigma_{|I|}) = \frac{|\Delta V| \pm \sigma_{|\Delta V|}}{|I| \pm \sigma_{|I|}} K \quad (4.1)$$

Donde K es el factor geométrico de la configuración Schlumberger para cada nivel de medidas y sigma aquí es la desviación estándar de las medidas experimentales.

4.3 RECONSTRUCCION TOMOGRAFICA DE LA DISTRIBUCION DE RESISTIVIDAD

Para realizar una reconstrucción tomografía con los datos de resistividad aparente se utilizó el software de inversión de datos RES2DINV. El programa construye de manera automática un modelo bidimensional de resistividades del medio a partir de un conjunto de datos que constituyen una pseudosección de resistividades aparentes. El modelo que utiliza el programa se basa en la división del medio en bloques rectangulares a los cuales se les asigna una distribución de resistividad dependiendo de los datos y su ubicación en la sección bidimensional.

El programa utiliza una rutina basada en el método de mínimos cuadrados para el proceso de inversión. El criterio de convergencia está dado por el valor del error cuadrático medio entre la distribución de los datos experimentales y un modelo que se actualiza en cada iteración [5, 7, 9, 11].

4.3.1 Reconstrucción Tomográfica Para Arena Ottawa 20-40 Sola Y Con Esfera De Aluminio Sumergida.

Con el fin de poder realizar un análisis comparativo sobre el cambio en la distribución de resistividad, se tomaron medidas con la arena solamente y con una esfera de aluminio sumergida. La esfera empleada es maciza y de 3 cm de diámetro, esta se trató de ubicar lo más centrada posible y a una profundidad de aproximadamente 6 cm de la superficie. Estas medidas fueron estimativas ya que a medida que se llenaba el recipiente con arena la ubicación de la esfera podía variar y no se tenía visibilidad para determinar su posición exacta.

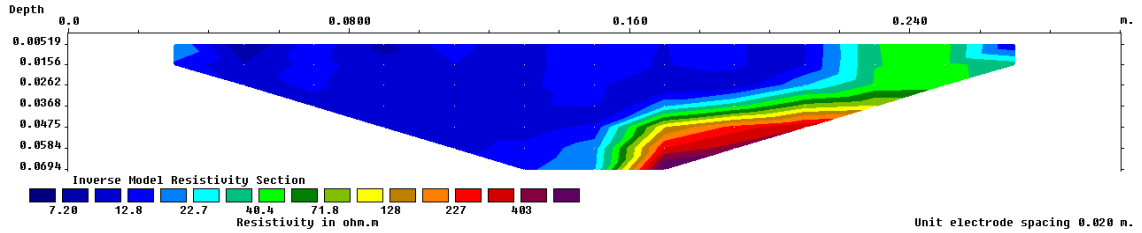
Las distribuciones tomográficas se hicieron a 5,5 cm, 7 cm, 8,5 cm, 10 cm, 11,5 cm y 13 cm de un extremo del recipiente contenedor de la arena con el fin de reducir la influencia de los extremos finitos del vidrio recipiente.

Para las medidas hechas en la arena sin objeto se trató de llenar el recipiente para que la compactación fuera lo más uniforme posible, sin embargo, esto se hizo de forma cualitativa y esto afectó con toda seguridad la homogeneidad de la arena más que todo en el fondo del recipiente. Es importante tener en cuenta que cuando se sumerge la esfera en la arena está afectada la distribución de resistividad de todo el recipiente contenido y no solamente donde está ubicada, efecto que no es tenido en cuenta en el modelo matemático de inversión actual.

Figura 25. Distribución de resistividad a 5,5 cm de uno de los bordes del dispositivo.

LINEA A 5,5cm

Arena sola



Arena con esfera sumergida

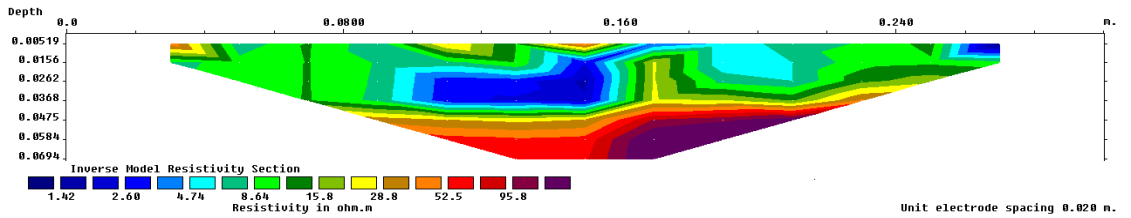
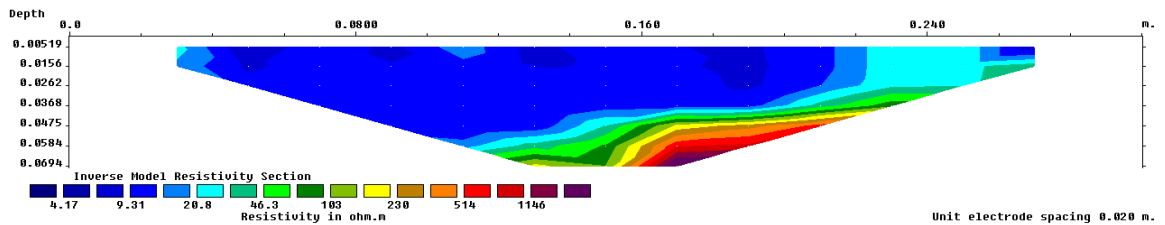


Figura 26. Distribución de resistividad a 7 cm de uno de los bordes del dispositivo.

LINEA A 7cm

Arena sola



Arena con esfera sumergida

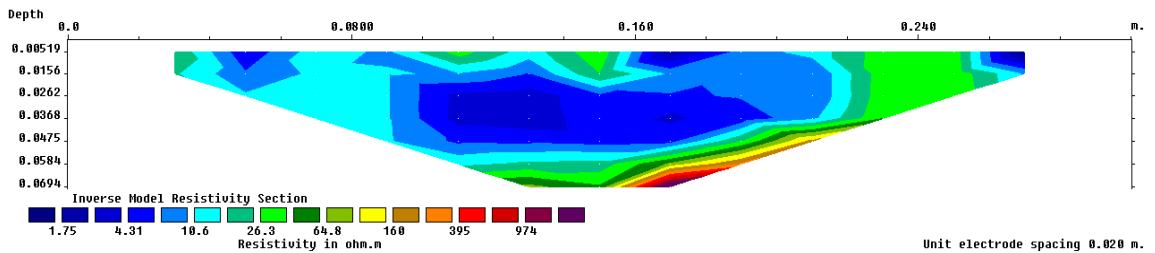
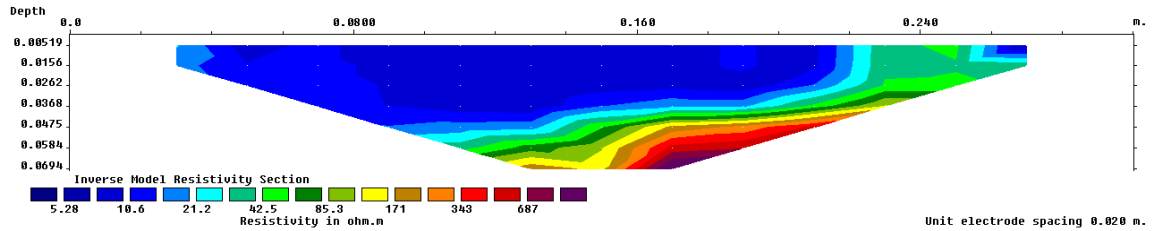


Figura 27. Distribución de resistividad a 8,5 cm de uno de los bordes del dispositivo.

LINEA A 8,5cm

Arena sola



Arena con esfera sumergida

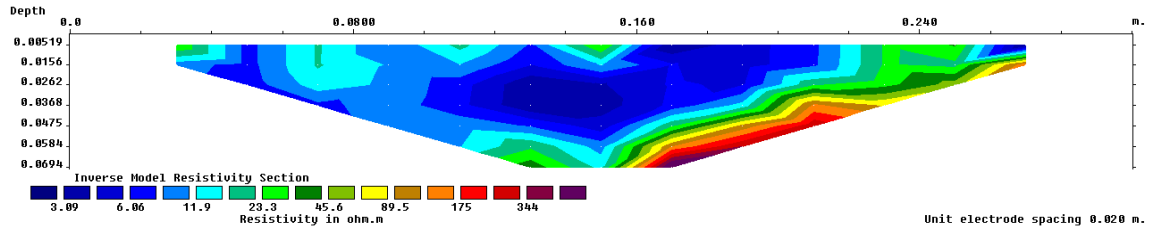
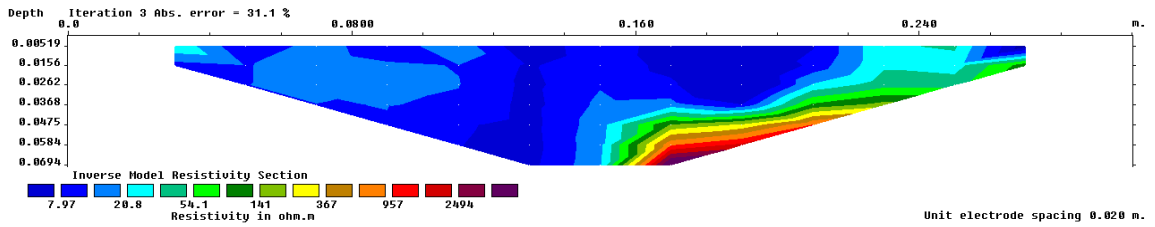


Figura 28. Distribución de resistividad a 10 cm de uno de los bordes del dispositivo.

LINEA A 10cm

Arena sola



Arena con esfera sumergida

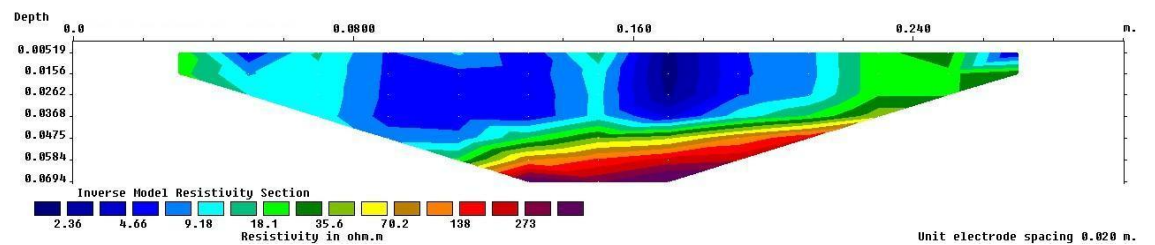
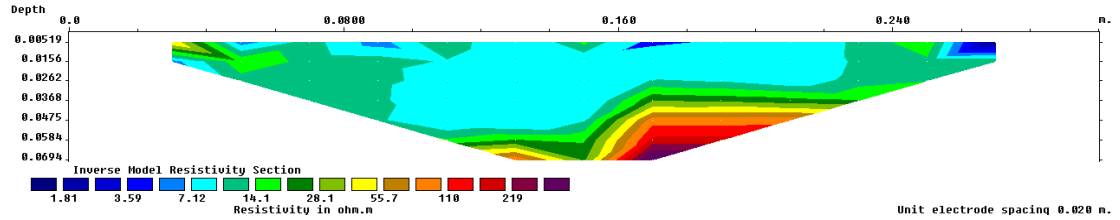


Figura 29. Distribución de resistividad a 11,5 cm de uno de los bordes del dispositivo.

LINEA A 11,5cm

Arena sola



Arena con esfera sumergida

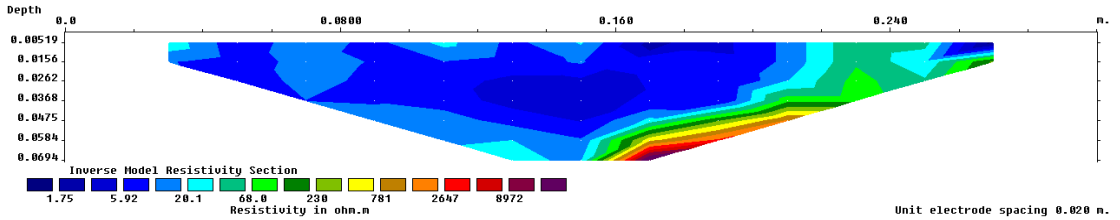
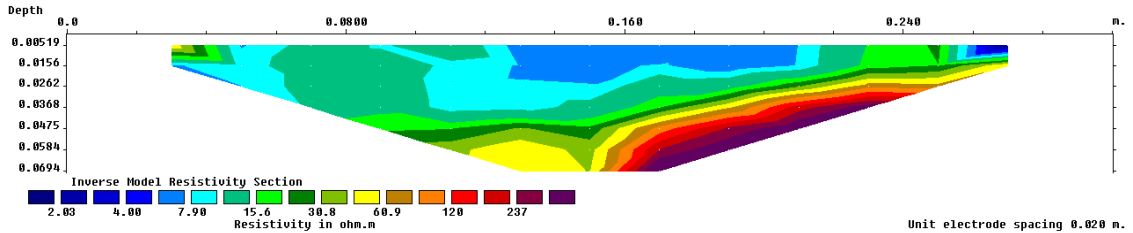


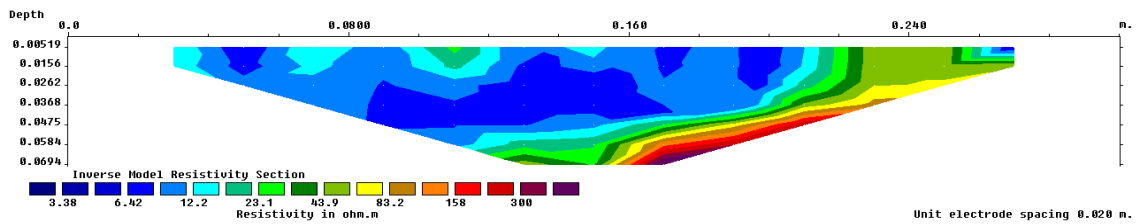
Figura 30. Distribución de resistividad a 13 cm de uno de los bordes del dispositivo.

LINEA A 13cm

Arena sola



Arena con esfera sumergida



Un aspecto para recalcar, es que al observar los resultados de las distribuciones, en todos está presente un cambio abrupto debido al electrodo 13, pues la diferencia de potencial de éste con respecto a sus dos electrodos vecinos no va de acuerdo con la encontrada en los otros electrodos. Esto trajo como consecuencia un cálculo de resistividades aparentes más altas en todos los niveles donde estaba implicado el potencial del electrodo 13 y por ende un cambio en la distribución en la reconstrucción tomográfica. Este problema se identificó como un problema electrónico en la línea de conexión de este electrodo en el circuito conmutador.

Las observaciones con respecto a la distribución de resistividad de la arena sólo comparada con distribución debido a la esfera de aluminio sumergida fueron:

- En la línea a 5,5 cm, a pesar de no estar encima de donde se encuentra la esfera, se logra observar un cambio en la resistividad debido a ésta ya que el cambio en la distribución de resistividad en todo el medio da en forma radial y para la distancia a la cual se encuentra la línea es perceptible.

Para el caso de las líneas a 7 cm y 13 cm del borde del recipiente, estas se encuentran aproximadamente a la misma distancia de la esfera y es posible identificar un cambio más significativo en el área transversal de la arena pero no se logra determinar una posible geometría del objeto que se encuentra sumergido.

- Las líneas a 8,5 cm y 11,5 cm se encuentran aproximadamente en los límites donde empieza y termina respectivamente la esfera sumergida. Para estos casos ya es posible tener una visión más clara de la geometría del objeto, se podría decir que son ubicaciones óptimas para el estudio.

- En la línea a 10 cm, que es la que se encuentra encima de la mayor porción de la esfera, se observa un cambio grande en toda el área trasversal de la arena estudiada por esta línea, pero es difícil identificar una posible geometría. El cambio debido a los electrodos del centro se debe a que las líneas de campo no atraviesan la esfera y toman resistividades cerca de la superficie.

CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo es importante resaltar que aunque se trata de un tema del cual la investigación en el mismo se ha venido haciendo y perfeccionando en las últimas décadas, es un tema nuevo en el grupo de *Óptica y Tratamiento de Señales GOTS* de la universidad. Donde no se partió de un trabajo previo o conocimientos a priori en la implementación y necesidades del método. Respecto a los resultados obtenidos a lo largo del trabajo realizado hasta su culminación, se tienen las siguientes conclusiones:

- El diseño y construcción del sistema de adquisición permitió la medición de datos para la determinación de parámetros óptimos en la implementación del método resistivo de prospección eléctrica y posteriormente la adquisición para la reconstrucción tomográfica de distribuciones de resistividad como validación del método. Los equipos utilizados fueron los disponibles en los laboratorios de la escuela de física exceptuando el sistema de conmutación, y el mecanismo diseñado para variar la profundidad de los electrodos en forma micrométrica . Los cables requeridos para las conexiones de estos equipos son los que se utilizan en los laboratorios de física II. Así, a pesar de las imprecisiones incorporadas por estas condiciones, llevar a cabo el trabajo de medición se logró completar de forma satisfactoria.
- La automatización en la toma de datos por medio de la adquisición interfazada mediante una rutina con el programa MATLAB™ facilitó las 1176 medidas en la arena necesarias para la reconstrucción y las más de 1000 para la determinación de parámetros óptimos, las cuales de haberse realizado de forma manual hubiera requerido mucho más tiempo y hubieran acarreado un error debido a la manipulación de las conexiones.

- El estudio de las variables implícitas en el proceso experimental mediante la respuesta impulsional del sistema permitió establecer parámetros como la frecuencia y amplitud de la señal inyectada como también las características de los electrodos utilizados; el material, la forma de las puntas y la profundidad. El criterio utilizado para esto fue la atenuación en la amplitudes medidas en el dominio de Fourier y sus diferencias de fase, así se determinó en qué condiciones iba a ser posible realizar las medidas con menores pérdidas y con unas diferencias de fase bajas, ya que se buscó que el comportamiento de la Arena Ottawa 20-40 fuera típicamente resistivo. Los resultados de este estudio fueron confiables debido al análisis estadístico de los datos y posteriormente a los resultados obtenidos en la implementación de los mismos en la prospección eléctrica.
- Sí el medio tiene comportamiento principalmente resistivo a la frecuencia utilizada, sólo interesa detectar la parte real de la impedancia [8-9]. La frecuencia escogida para el sistema en el laboratorio de 7 Hz se consideró apropiada para realizar el análisis tomando en cuenta esta aproximación, pues de todas las medidas a bajas frecuencias ésta fue la que presentó la mejor relación atenuación-diferencia de fase. Los resultados obtenidos en la implementación del método bajo este criterio fueron favorables y permitieron un análisis más sencillo.
- Debido al acceso cada vez mayor y más fácil a computadores que permiten la implementación de métodos numéricos para llevar a cabo problemas de inversión de datos de manera más rápida y confiable, fue posible la implementación del software RES2DINV que implementa el método de mínimos cuadrados para con los valores de resistividad encontrados experimentalmente, establecer un mapeo de la distribución de resistividad bajo la configuración electródica de Wenner-Schlumberger. Las gráficas de esta

distribución se acercaron lo suficiente a la realidad como para concluir que la implementación del software fue apropiada.

La culminación de este trabajo es sólo el principio de un gran número de posibilidades para la investigación en este campo en la universidad. Si bien se hizo para unas condiciones particulares y con un sistema experimental, queda abierta la puerta para mejorar y probar nuevas variables en cuanto al tratamiento de señales involucrado, como a la toma de datos. Finalmente queda todo un estudio encaminado a los campos de la industria y de la investigación donde puede ser éste método aplicado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] D.H. Griffiths, R.F. Applied geophysics for geologists and engineers. Oxford Pergamon Press (1981).
- [2] E. Orellana, Prospección Geoelectrica en corriente continua. 2 ed. Madrid (1982).
- [3]A. Hirose, Electromagnetic Fields and Waves in Matter. Physics Department, University of Saskatshewan,EP225 Note No. 13
- [4] D.J. Griffiths, Introduction to electrodynamics. 3 ed., Prentice Hall, New Jersey (2003).
- [5] S. Y. Fazzito, Método de procesamiento de datos para determinar la resistividad dieléctrica del subsuelo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (2004).
- [6] F. J. Sánchez San Román, Sondeos Verticales. Universidad Salamanca, España (2004).
- [7] M. Gasulla Forner, Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en el subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Universitat Politècnica de Catalunya (1999).
- [8] V. Lakubovskii, L. Liajov, Exploración Eléctrica. Editorial Reverté (1980).

- [9] W.L. Molina, Comparación de los métodos 1-D y 2-D de resistividad eléctrica por comparación de sondeos tipo Wenner, dipolo-dipolo y Wenner Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD y RES2DINV. Universidad Simon Bolivar. (2006)
- [10] L. Marescot, S. Rigobert, S. Palma Lopes, R. Lagabrielle, D. Chapellier, A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures. *Journal of Applied Geophysics* 60 (2006) 55–67.
- [11] M. H. Loke, R. D. Barker, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, Vol.44, pp. 131-152.
- [12] P.H. Giao,, S.G. Chung, D.Y. Kim, H. Tanakad, Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics* Vol.52 (2003), pp.157– 175.
- [13]R. García Márquez, La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T., Editorial Marcombo, Barcelona, España (1991).

BIBLIOGRAFIA

A. Hirose, Electromagnetic Fields and Waves in Matter. Physics Department, University of Saskatchewan, EP225 Note No. 13

D.H. Griffiths, R.F. Applied geophysics for geologists and engineers. Oxford Pergamon Press (1981).

E. Orellana, Prospección Geoelectrica en corriente continua. 2 ed. Madrid (1982).

[4] D.J. Griffiths, Introduction to electrodynamics. 3 ed., Prentice Hall, New Jersey (2003).

F. J. Sánchez San Román, Sondeos Verticales. Universidad Salamanca, España (2004).

L. Marescot, S. Rigobert, S. Palma Lopes, R. Lagabrielle, D. Chapellier, A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures. Journal of Applied Geophysics 60 (2006) 55–67.

M. Gasulla Forner, Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en el subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Universitat Politècnica de Catalunya (1999).

M. H. Loke, R. D. Barker, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, Vol.44, pp. 131-152.

P.H. Giao,, S.G. Chung, D.Y. Kim, H. Tanakad, Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. Journal of Applied Geophysics Vol.52 (2003), pp.157– 175.

R. García Márquez, La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T., Editorial Marcombo, Barcelona, España (1991).

S. Y. Fazzito, Método de procesamiento de datos para determinar la resistividad dieléctrica del subsuelo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (2004).

V. Lakubovskii, L. Liajov, Exploración Eléctrica. Editorial Reverté (1980).

W.L. Molina, Comparación de los métodos 1-D y 2-D de resistividad eléctrica por comparación de sondeos tipo Wenner, dipolo-dipolo y Wenner Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD y RES2DINV. Universidad Simon Bolivar. (2006)

APENDICE A

RESULTADOS DEL ANÁLISIS MINERALÓGICO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS-X Y DEL ANÁLISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZAJE (LAB. D.R.X, ECOPEPETROL I.C.P.)

1. ANALISIS DE LABORATORIO

1.1 ANÁLISIS MINERALÓGICO

La difracción de Rayos X es la técnica analítica más precisa para identificación de minerales y/o compuestos cristalinos pues se basa en la dispersión de rayos X generada por la red cristalina en direcciones y ángulos específicos para cada sistema cristalino. Ésta técnica permite conocer la composición en términos de fases cristalinas sin incluir material amorfo, tomando como 100% el total de las fases detectadas.

El análisis en bloque "Bulk" se llevó a cabo sobre la muestra representativa seleccionada mediante cuarteo y pulverizada manualmente en mortero de ágata, sin ningún tratamiento químico, y con montaje desorientado o de distribución de partículas al azar.

La identificación de las fases cristalinas consiste en la comparación del difractograma o perfil de difracción de la muestra con el difractograma de materiales de referencia o materiales puros reportados en las Bases de Datos cristalográficas, el difractograma de una sustancia pura es como su huella digital y permite la identificación inequívoca de la

estructura cristalina que posee el compuesto. Este análisis se basa en el Método de Hanawalt, en el que cada compuesto se identifica por los tres picos de difracción más intensos. La evaluación de los difractogramas se realizó con ayuda del Software Diffrac Plus, con base en los materiales de referencia de la JCPDF (Joint Committee Powder Diffraction Files) comercializados por el International Center for Diffraction Data, ICDD¹.

Este análisis calcula la fracción en peso de cada componente con una incertidumbre de alrededor del 2% en fases bien cristalizadas que se encuentren en un porcentaje superior al 5%.

1.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Para establecer la distribución de tamaño de partícula para fracciones mayores de 53 micras se pasa por un set de tamices: que van desde 1180 μm (16 Mesh) hasta 250 μm (60 Mesh) y se calculan las curvas de distribución de tamaño de partícula con ayuda de la rutina Sieving del software Graintest.

Para cada una de las distribuciones se calcularon los siguientes parámetros:

- Tamaño de partícula promedio X_m , el cual representa el tamaño que posee la mayor concentración de la distribución de densidad.
- Percentiles X_{10} , X_{40} , X_{50} , X_{60} y X_{90} , representan el tamaño máximo al cual se encuentran el 10%, 40%, 50%, 60% y 90% de las partículas respectivamente.

¹ PDF-2, release 2008 database

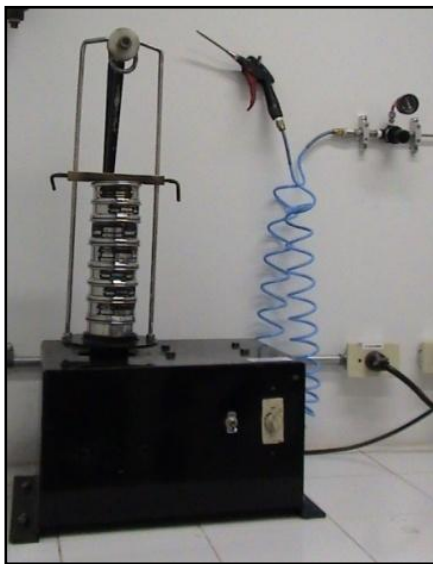
El coeficiente de uniformidad es un modelo básico para comparar arenas, generalmente se rige por la siguiente regla²:

- $U < 3$ se considera arena uniforme
- $3 < U < 5$ se considera arena no uniforme
- $U > 5$ se considera arena altamente no uniforme

1.4 EQUIPOS USADOS

Para el análisis granulométrico, la distribución de tamaño de partícula fue obtenida mediante el sistema vibratorio o máquina tamizadora.

Para el análisis mineralógico, los difractogramas fueron obtenidos en un Difractómetro de Rayos-X marca Bruker modelo D4, equipado con lámpara de Cu y monocromador de grafito.



² Penberthy, W.L. and Shaughnessy, C.M. Sand Control. Series on Special Topics Volume 1. Society of Petroleum Engineers.

Fotografía 1. Máquina tamizadora
de rayos-x D4

Fotografía 2. Difractómetro

1.5 CONDICIONES DE MEDICIÓN

VARIABLE	VALOR
Análisis Mineralógico	
Radiación	Cu
Corriente	30mA
Voltaje	40kV
Tamaño de paso	0.05° 2θ
Tiempo por paso	2 s
Rango de Medición	2-65° 2θ
Análisis Granulométrico	
Densidad	2650 Kg/m ³

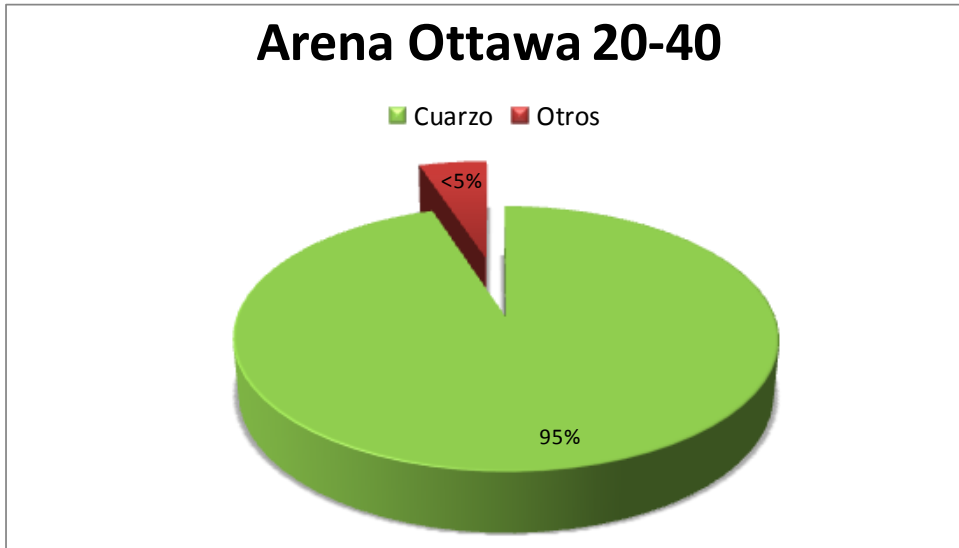
2. RESULTADOS

2.1 Análisis Mineralógico

Tabla 1. Resultados análisis mineralógicos

Nombre del compuesto	Fórmula	Arena 20/40
		%Peso
Cuarzo	SiO ₂	95
Otros		<5

Gráfico 1. Análisis Mineralógico



2.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

En la Tabla 2 se reportan las distribuciones de acuerdo a la fracción en peso y al porcentaje acumulado pasante de estas fracciones (Q3(x)). En la Tabla 3 se reportan los parámetros estadísticos de las distribuciones obtenidas como son el tamaño promedio y percentiles. Adicionalmente en el Gráfico 2 se presentan los resultados de la distribución granulométrica acumulada obtenida de la muestra analizada.

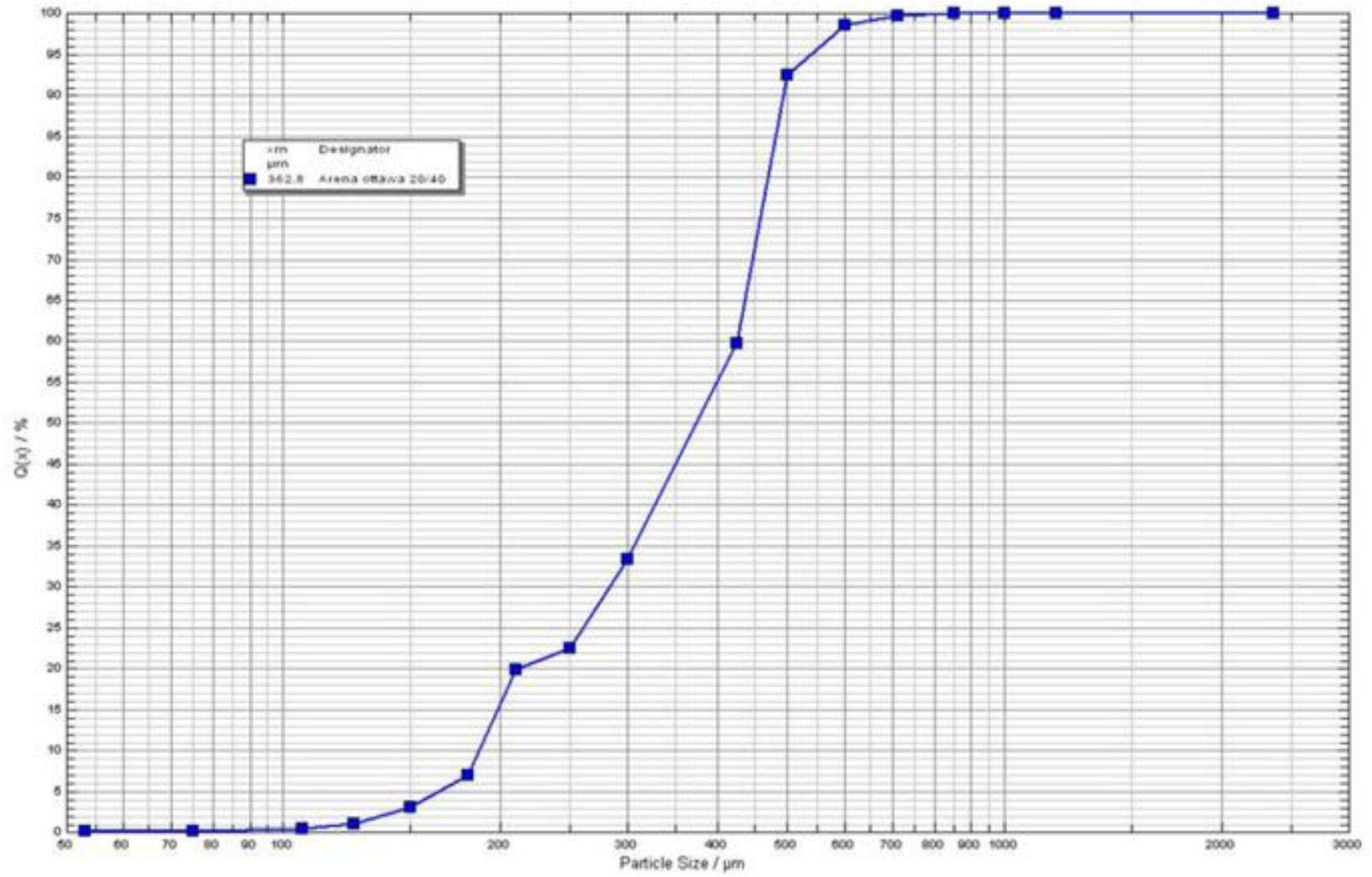
Tabla 2. Distribución Granulométrica Tamaño de Partícula

Grain size [μm]	Q3 (x) [%]	Fraction p[%]
53	0,03	0,03
75	0,06	0,03
106	0,29	0,23
125	0,95	0,66
150	3,03	2,08

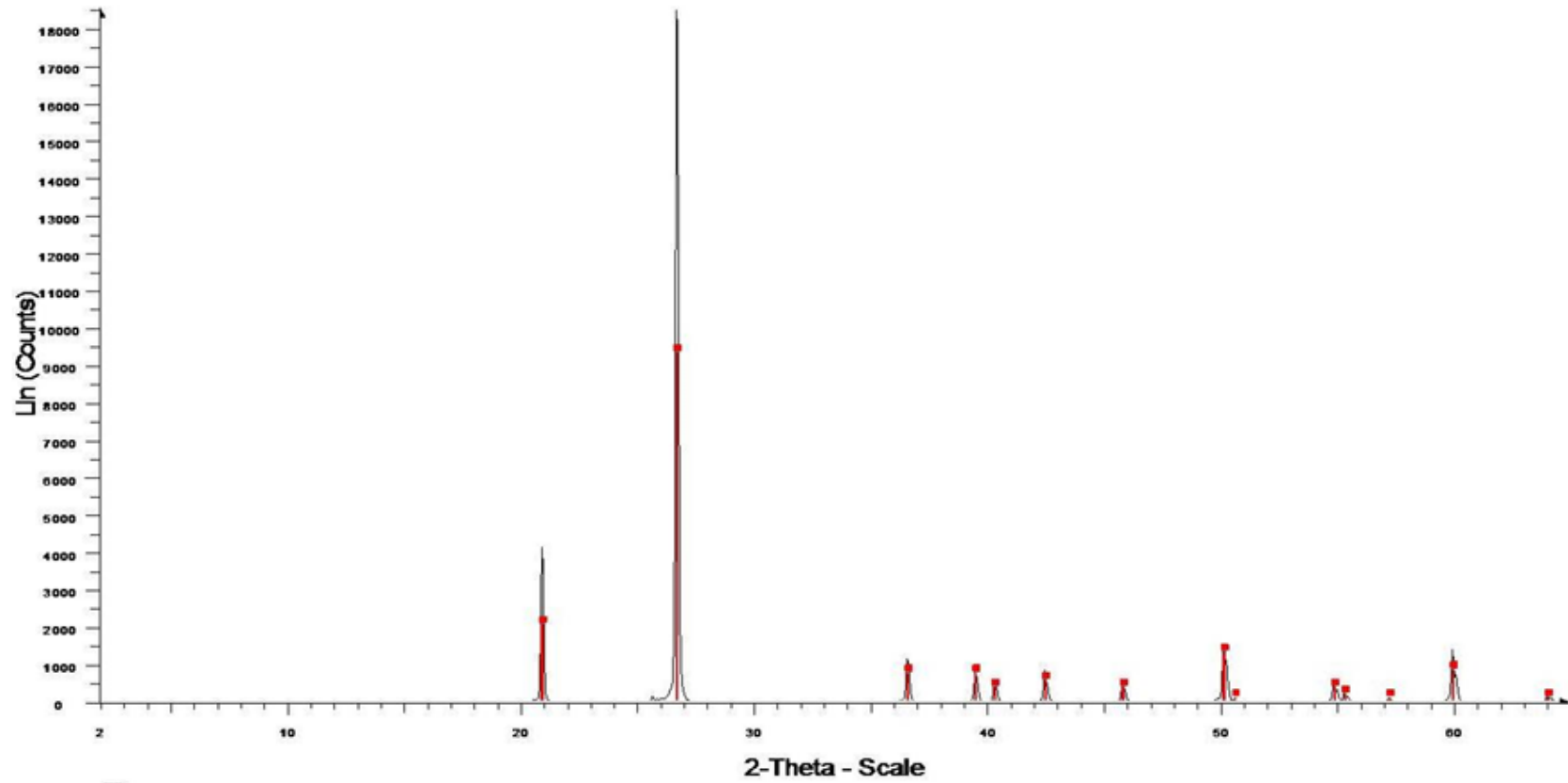
Grain size [μm]	Q3 (x) [%]	Fraction p[%]
180	6,86	3,83
210	19,83	12,97
250	22,44	2,61
300	33,27	10,83
425	59,57	26,30
500	92,44	32,87
600	98,48	6,04
710	99,57	1,09
850	99,90	0,33
1000	99,94	0,04
1180	99,97	0,03
2360	100,00	0,03

Tabla 3. Parámetros Estadísticos

VARIABLE		Arena Ottawa 20/40
Diámetro promedio	X_m [μm]	362.80
Área superficial específica	S_v [cm^2/cm^3]	193.41
Coeficiente de uniformidad	U	2.27
Percentil 10	X_{10} [μm]	187.30
Percentil 40	X_{40} [μm]	332.00
Percentil 50	X_{50} [μm]	379.50
Percentil 60	X_{60} [μm]	426.00
Percentil 90	X_{90} [μm]	494.40



Arena Ottawa 20-40



Arena Ottawa 20-40 - File: 1-4882.raw
Operations: Displacement 0.094 | Background 1.000,1.000 | Import
00-833-1161 (A) - Quartz, syn - SiO2