

### **3. Implementación en campo y adquisición de datos**

El trabajo de campo se planeó con base en los resultados geológicos e hidrogeológicos realizados previamente, como la realización de un mapa geológico-estructural y la modelación de una configuración de elevaciones del nivel estático a través de la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas en la zona, de tal manera que los lugares seleccionados para realizar el estudio de AMT, fueran los más viables para optimizar la caracterización del acuífero.

Los lugares en los que se realizó la campaña fueron ubicados mediante imágenes de satélite y luego corroborados en campo, con ayuda del personal del Comité de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Iguala (CAPAMI).

Debido a que algunas áreas de exploración se encontraban dentro de la ciudad o en los alrededores de la mismas, los espacios viables para la implementación del método se vieron reducidos debido a las áreas habitadas, se trato de reducir estas manifestaciones al mínimo, seleccionando áreas lo más alejadas posibles y libres de materiales que generen ruido. Sin embargo, es de esperarse la inclusión de ruido en las mediciones magnetoteléuricas por efectos antropogénicos.

#### **3.1. Características del equipo**

El instrumento utilizado fue una consola ADU-07-e, de la compañía alemana Metronix Inc., que consiste en una unidad de adquisición, filtrado y amplificación de las señales. Dicho equipo contiene un módulo de preprocesado y almacenamiento de la información. Para medir el campo magnético se utilizan al menos dos bobinas magnéticas y para el campo eléctrico se utilizan cuatro tazas porosas (electrodos) que contienen un electrolito las cuales funcionan como electrodos impolarizables, lo que facilita el paso de la señal al instrumento. Estos cuatro electrodos conforman dos dipolos eléctricos perpendiculares y se utiliza un quinto electrodo para la conexión a tierra del instrumento. Como ya se mencionó, los campos magnéticos horizontales son medidos por las bobinas colocadas en dos

direcciones perpendiculares. Adicionalmente, puede utilizarse una tercera bobina que mediría la componente vertical del campo magnético para posibilitar el cálculo de la función de transferencia geomagnética o *tipper*.

Con base en la teoría dada por Vozoff (1972), las bobinas que se utilizan para MT miden el campo magnético variable mediante una espira o bobina, conectada a un instrumento que mide la tensión inducida en ellas, la espira adopta la forma de solenoide recto.

La bobina se compone por un tubo cilíndrico, de fibra de vidrio reforzado; la parte central de la bobina, es un núcleo de ferrita permeable y varios miles de vueltas de alambre de cobre, el material del centro evita la aparición de corrientes parásitas en el rango de frecuencia de medición de la bobina, para grandes profundidades.

Para el estudio en cuestión se utilizaron bobinas Metronix modelo (MFS-06E) que son conocidas como bobinas de inducción o magnetómetro de inducción las cuales miden las variaciones del campo magnético de la Tierra, estas bobinas cubren un rango de frecuencia de 0.0001 Hz hasta 10 kHz. A pesar del amplio ancho de banda, la muestra de datos contiene poco ruido, gracias a la función de transferencia la cual se mantiene estable a la temperatura y a lo largo del tiempo, esto dependerá del tipo de ruido que se tenga al igual que de las condiciones que se presenten.

Una vez conectadas las bobinas al equipo ADU-07e, éstas envían su tipo y número de serie, así como su función de calibración automáticamente, de tal manera que se configuran los parámetros del sensor.

Su función se explica a partir de la ley de la inducción:

$$U = \frac{\partial \phi}{\partial t} = -nA \frac{\partial B}{\partial t} \cos \alpha = i \omega n A B \cos \alpha \quad (35)$$

Donde

**Cos  $\alpha$** ; indica que la bobina es direccional, ya que mide la variación del campo magnético en dirección ortogonal al plano de cada espira, por lo que para medir al mismo tiempo las componentes x, y, z del campo magnético, es necesario el uso de tres bobinas (magnetómetros direccionales).

$\omega$ ; indica la sensibilidad de las bobinas de inducción, la cual varía linealmente con la frecuencia, aunque es posible variar algunos parámetros para incrementar la sensibilidad del instrumento, como lo sería aumentar la sección A de las espiras o el número de estas. Aún con bobinas muy numerosas en espiras, las tensiones inducidas por las fluctuaciones del campo geomagnético son demasiado pequeñas, por lo que las bobinas en su núcleo contiene materiales ferromagnéticos de poca remanencia y permeabilidad muy elevada, haciendo que la sensibilidad del instrumento sea multiplicada por un factor K, entonces el potencial inducido queda expresado como (Orellana,1974).

$$U = i\omega KnAB \cos \alpha \quad (36)$$

En algunos casos, para aumentar la tensión inducida se usa un amplificador de ganancia grande y estabilizada intercalado entre la bobina y el registrador.



Figura 11. Equipo ADU-07e, Metronix.

Los sensores miden el campo eléctrico a partir de dos dipolos cada uno con dos electrodos, que sirven como electrodos de potencial, colocados perpendicularmente entre sí, en la dirección x y y, cada uno mide la diferencia de potencial en una dirección entre los electrodos.

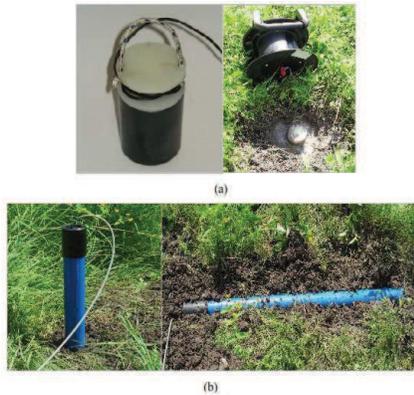


Figura 12. (a) Electrodo (EFP-06) de terreno de banda ancha, de tipo Pb/PbCl<sub>2</sub> y carrete.

(b) Bobina de inducción magnética (MFS-06e).

### **3.2. Implementación en campo**

#### Consideraciones del arreglo

Según Vozoff (1972) así como Simpson y Bahr (2005), la implementación en campo del método MT debe considerar muchas cosas, entre ellas la ubicación en el campo, el tipo de suelo que se tiene, la geología del lugar, entre otras cosas.

Pera empezar, una vez seleccionado el lugar de trabajo, se comienza por tomar las distancias a las cuales se encontraran enterrados los sensores, una vez tomada esta distancia, se dispone a distribuir el arreglo en campo, los electrodos deben ir enterrados bajo la superficie a una profundidad de 20 cm a la cual se considera que se mitigan las variaciones de la temperatura ambiental y se cubren con una mezcla lodosa, la cual salvaguarda la humedad del medio para que se presente una baja resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo, de tal manera que se mantienen estables las condiciones de medición, si la resistencia de contacto excede el rango de k $\Omega$ , entonces esto puede indicar un mal contacto entre el medio y el electrodo. (Matzander y Wilde, 2007).

Existe un quinto electrodo el cual va al centro del arreglo y funciona como descarga a tierra para protección del instrumento. En la Figura 14 (a) se muestra esquemáticamente el desplante de los dipolos eléctricos.

Los dipolos por lo general se alinean norte-sur (NS) y este-oeste (EW), formando una cruz (+), creando en el terreno cuatro cuadrantes, donde se medirán las componentes del campo magnético  $H_x$ ,  $H_y$  y  $H_z$ .

Una ventaja de usar este tipo de arreglo es que si el medio en el que se está trabajando es 1D y uno de los dipolos falla, los campos eléctricos seguirán siendo registrados por el dipolo y el modelado 1D seguiría siendo viable (Matzander y Wilde, 2007).

Puede ser difícil obtener en campo las mediciones precisas de las separaciones de los electrodos con una cinta convencional, sobre todo si hay vegetación, sin embargo, en la práctica, un alto grado de precisión no es necesaria, ya que los errores de menor importancia contribuyen con un cambio insignificante de tipo estático a las magnitudes de impedancia (Simpson y Bahr, 2005).

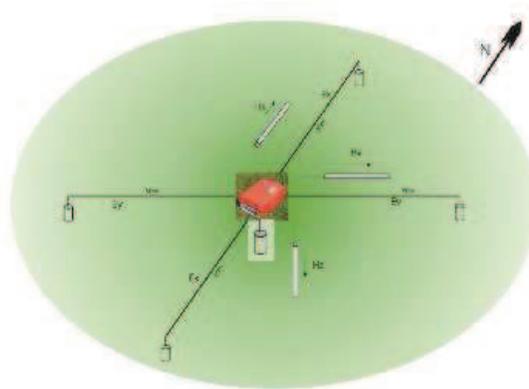


Figura 13. Representación en campo del arreglo, (Matzander y Wilde, 2007).

Para evitar la distorsión de baja frecuencia debido a las vibraciones mecánicas del entorno, las bobinas deben estar enterradas en el suelo unos 15 cm de profundidad y a unos 5 m del equipo; si no se hace esto, el ruido significativo producido por el viento hace que se obtenga una medición de poca calidad. La bobina de la componente z también debe estar enterrada por lo menos a la mitad de su tamaño y a fin de evitar problemas en la adquisición es recomendable que el extremo libre de las bobinas este cubierto, en este caso por una tapa de protección que evita que el cable se doble o sufra algún daño (Simpson y Bahr, 2005).

Cada una de las bobinas, debe estar orientada y nivelada, en la dirección correspondiente para cada una de ellas, en el eje “x” debe ser NS, para “y” debe ser EW y Z en posición vertical. Éstas no deben de tener una desviación más allá de un grado

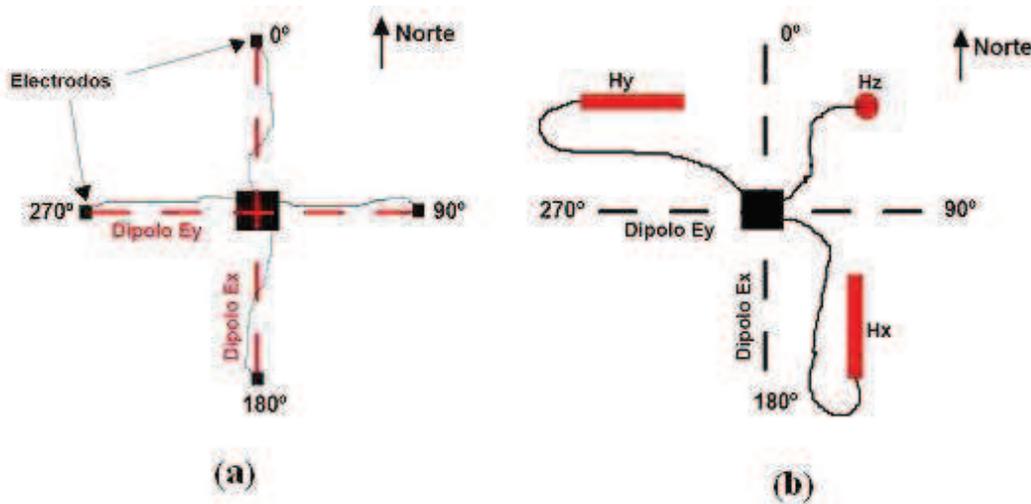


Figura 14. Esquema de (a) ubicación de los dipolos eléctricos y (b) bobinas magnéticas (Corbo, 2006).

La Figura 14 (b) muestra esquemáticamente la colocación de las bobinas en el terreno. Tanto los dipolos como los sensores magnéticos se conectan al equipo central con sus respectivos cables, los cuales deben quedar lo más pegados al suelo, evitando la formación de espiras, para evitar en lo posible ruido en la señal.



Figura 15. Conexiones para los sensores y bobinas.

### 3.3. Consideraciones de la adquisición de datos en campo

El tiempo de duración de esta campaña fue de cuatro días en los que se intentó hacer la mayor cobertura posible en los alrededores y dentro del municipio de Iguala de la Independencia, Gro.

El tiempo de adquisición de los datos por cada sitio fue de 3 horas y 10 minutos, más el tiempo que requiere la implementación del equipo en el campo, de tal manera que se destinó un tiempo más o menos de 4 a 6 horas por sitio de trabajo, así se logró prospectar 6 sitios diferentes.

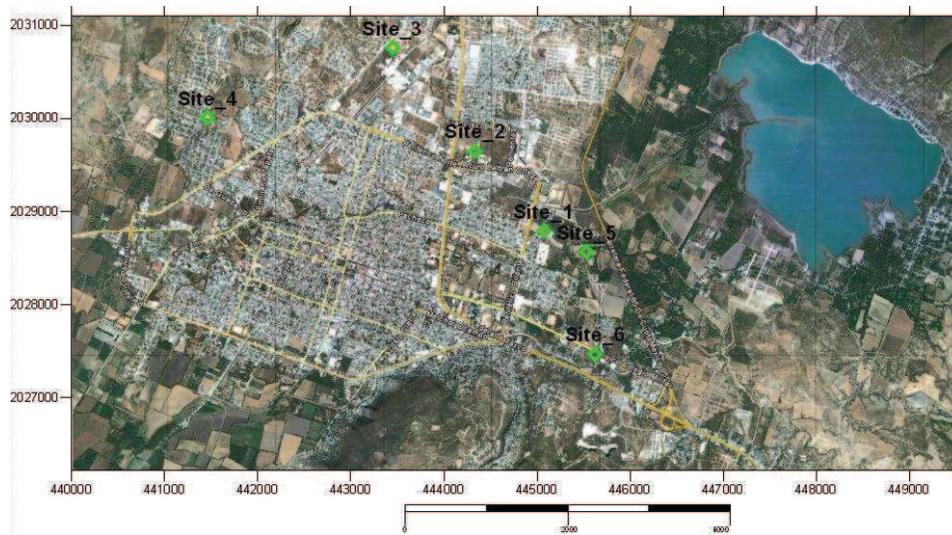


Figura 16. Mapa de ubicación de los sitios adquiridos con MT en el Municipio de Iguala, Gro.

**Tabla 2.** Coordenadas en UTM-WGS\_84 de los sitios de adquisición con MT en el municipio de Iguala, Gro.

Punto	X	Y	Z	Referencia
S_01	445071.63	2028790.63	748.4	Cancha de Futbol
S_02	444335.11	2029653.94	752.7	Tecnológico de Iguala
S_03	443447.36	2030758.06	769.4	Universidad Tecnológica
S_04	441460.39	2030010.39	760.3	Col. Guadalupe
S_05	445532.06	2028564.96	756.4	Canchas de Futbol, "El Edén"
S_06	445627.29	2027469.29	766.5	Av. Colegio Militar Dedicatoria

Para una buena adquisición de datos en campo es recomendable tomar en cuenta el entorno que rodea la zona a prospectar, puesto que si el entorno se encuentra saturado por posibles fuentes generadoras de ruido se presentaran varios problemas, entre ellos, destaca el empalme de dos o más señales, las cuales contiene las mismas características de amplitud, haciendo que no se pueda distinguir la diferencia entre ambas, por lo que el número de muestreo debe de ser alto ya que si este muestreo es numeroso se pueden evitar problemas de empalme de la señal objetivo con las señales de ruido. Por lo general las heterogeneidades del medio a poca profundidad pueden distorsionar la forma en que vemos las estructuras más profundas, por lo que no es prudente interpretar anomalías que sólo son compatibles con los datos de un sitio (Matzander y Wilde, 2007).

Cuando se tienen presentes líneas de alta tensión o tendidos eléctricos se producen campos magnéticos en la frecuencia de 60 Hz, que son registrados por el equipo. Si bien el ruido en dichas frecuencias es relativamente fácil de eliminar por los varios tipos de filtrado que se tienen, puede limitar el rango dinámico de algunas bobinas y producirse la saturación del instrumento.

El ruido de la línea de alta tensión es altamente polarizado, por lo tanto, los efectos del ruido en la línea alta tensión suelen ser más frecuentes en una dirección ortogonal de medición. Algunos generadores de ruido son más difíciles de eliminar que las líneas eléctricas, esto se logra utilizando filtros pasa bajas o pasa altas, debido al amplio ancho de banda del ruido, las mediciones del campo eléctrico son también susceptibles a la contaminación de las corrientes de fuga a tierra derivados de las tuberías y cercas eléctricas, los espectros de ruido que se abarcan en estos casos suman un amplio rangos de frecuencias y esto hace difícil el filtrado.

Otra fuente que genera ruido son los automóviles que representan una doble fuente de ruido, pues crean perturbaciones magnéticas y sísmicas. En general, las perturbaciones magnéticas pueden ser omitidas si se colocan los sensores a más de 50 m cualquier carretera o camino, el ruido sísmico, aunque reducido considerablemente cuando el camino está sobre un lecho de roca, por lo general se presenta en un rango mayor que el ruido

magnético, por lo tanto las vibraciones sísmicas generan ruido en la componentes telúricos modulando el potencial entre los electrodos y el suelo, existe un movimiento de rotación de los sensores ,en que el campo magnético se transforma en un ruido sísmico provocando la perturbación del campo magnético H (Simpson y Bahr, 2005).

Una fuente de ruido que siempre va a estar presente es el viento, el cual provoca la vibración de los cables de conexión, el viento puede generar cambios de voltaje de periodo corto que son comparables a señales electromagnéticas, creando información falsa o sólo ruido, al igual que los autos generan ruido sísmico los árboles y arbustos al ser movidos por el viento sus raíces se mueven, generando ruido sísmico también, lo que produce movimiento de los sensores y perturba el campos. La medición de las altas frecuencias del campo magnético en sentido vertical son generalmente peores a medida que la vibración del viento aumenta. Otra fuente de ruido corresponde a descargas atmosféricas -rayos-, las cuales se superponen al campo original y pueden provocar la saturación de los amplificadores telúricos.

Ya una vez dispuesto el arreglo y después de haber considerado las condiciones del medio, se dispone a programar el equipo para iniciar la adquisición de datos. Los parámetros a considerar son:

Rango de frecuencias a las cuales se va a muestrear: El equipo pose dos tarjetas para adquisición de datos, por lo tanto se puede hacer la adquisición de las bajas frecuencias y altas frecuencias al mismo tiempo.

La autocalibración del equipo: Las frecuencias de muestreo que se emplearon para la adquisición de datos se muestran a continuación.

**Tabla 3.** Frecuencias de muestreo en campo.

Banda espectral	Frecuencia de muestreo (Hz)	Tiempo (min)
Alta	8192	5
	4096	10
Baja	1024	20
	512	30
	128	120

Estas frecuencias de muestreo y tiempos de muestreo, son iguales para cada punto de adquisición.

Como se puede observar las frecuencias utilizadas corresponden a valores de altas y bajas frecuencias, los intervalos de frecuencias fueron elegidos en consideración del objetivo, ya que al utilizar estos intervalos se logra caracterizar el acuífero de Iguala a la profundidad objetivo.

Para poder entender el medio y darle una explicación a través de la información adquirida en campo, existe una función de transferencia teórica del equipo (ADU-07) la cual se utiliza para modelar matemáticamente a través de un cociente la relación que existe entre la respuesta del medio a una señal de entrada (bobina), con esto se obtienen parámetros conocidos como  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\rho$  y  $\delta$ , con los cuales se puede hacer una buena interpretación del medio. Para ello se tiene que distinguir entre los canales de baja frecuencia (LF) y los canales de alta frecuencia (HF), ya que para cada una de estos canales ya sea el de bajas o altas frecuencias existe una función de transferencia, la cual ayuda a entender la información obtenida por cada uno de ellos (Matzander y Wilde, 2007).

El equipo incorpora un paso de autocalibración, el cual, al momento que el sistema está encendido, automáticamente se calibra, el equipo tiene un generador de calibración con una fuente de voltaje de precisión.