



# Método Magnetométrico Resistivo (MMR)

---

Facultad de Ingeniería

Colegio de Geofísica

Asignatura: Prospección Electromagnética

Docente:

González Hernández Julio César

Integrantes:

García Velásquez Elvira

Paredes Román Clarise

Ramírez Rodríguez Ricardo Uriel

Torres Mora Carlos Alberto

Diciembre 01 -2022

## Introducción

La resistividad magnetométrica es un método de exploración eléctrica basado en la medición de campos magnéticos estáticos de bajo nivel y baja frecuencia asociados con el flujo de corriente no inductiva en el suelo. El método de resistividad magnetométrica (MMR) se diferencia del método tradicional en que los electrodos de potencial se reemplazan por una bobina o magnetómetro de alta sensibilidad y se registran uno o más componentes del campo magnético. La MMR se ha utilizado con éxito para explorar sulfuros masivos y recursos geotérmicos, mapear la geología regional, estudiar sitios de roca dura para la eliminación de desechos nucleares, ubicar estructuras de arrecifes en fondos sedimentarios y obtener perfiles de conductividad del fondo marino con profundidad, tanto en aguas someras como profundas. (Jardani A., 2018).

El presente reporte muestra los valores de dos tendidos realizados (uno con inyección de corriente y el otro sin corriente).

Se pretende encontrar lo que sucede cuando los valores de las mediciones se les inyecta corriente, encontrando los parámetros  $H_N$  (campo primario normalizado) y MMR (parámetro asociado al campo magnético background). Estas diferencias serán visibles mediante gráficos realizados en Matlab para su correspondiente interpretación.

Para llegar a ello, es necesario realizar un proceso algo elaborado ya que, necesitamos obtener la corrección diurna y posteriormente a las lecturas corregidas para cada estación, restarles el valor de dicha corrección diurna.

Es por esto que, necesitamos conocer ciertos conceptos para poder aplicar lo anterior que se muestran más adelante.

## Objetivos

### General:

- ⌚ Realizar una normalización del campo primario (utilizando los valores con corriente) para encontrar en qué partes de la zona de estudio es una zona conductora y en qué partes es zona resistiva con ayuda de los parámetros Hn y MMR y con apoyo de un radargrama proporcionado, encontrar la composición del subsuelo en la que se realizó el levantamiento del tendido.

### Específicos:

- ⌚ Obtener la tasa de variación diurna de cada loop (ciclo), a través de realizar ciertos cálculos en la herramienta Excel, para realizar la corrección diurna correspondiente.
- ⌚ Realizar el procesamiento del radargrama dado, a través del software prism2 para su correcta interpretación y compararlo con las anomalías (parámetros) del método MMR.
- ⌚ Obtener y graficar en el software Matlab las anomalías Hn y MMR para realizar una comparación entre ambos gráficos y deducir si existe o no alguna estructura mineralizada.

## Marco teórico

### ¿En qué consiste el método?

Los métodos Magnetométricos utilizan una corriente alterna de baja frecuencia (normalmente una onda cuadrada) que se introduce en el suelo mediante un gran dipolo de corriente, normalmente de hasta 2 km de longitud, y orientado en paralelo a la dirección geológica.

Se basa en inyectar corriente de baja frecuencia (1-5Hz) entre dos electrodos (a, b) colocados en la superficie del suelo. Mide el campo magnético asociado al flujo de corriente con el propósito de determinar la conductividad eléctrica de la tierra (R. Edwards y Nabighian M., 1978).

Para el autor Sóstenes D., una medición de la intensidad y dirección del campo magnético se realiza con...

“(...) una bobina o un magnetómetro vectorial y éstos deben estar orientados para la medición. Las lecturas del estudio se realizan en la región entre los electrodos de corriente ya sea en la superficie o en el fondo del pozo con trayectorias perpendiculares al dipolo de corriente (perpendicular al rumbo), es decir, perpendicular a la dirección dominante del flujo de corriente. Para detectar las variaciones del campo magnético debidas a la canalización de la corriente es necesario tener en cuenta otros campos magnéticos presentes en la zona de estudio, es decir, el campo creado por el cable que conecta los electrodos de corriente y el campo geomagnético. Los campos magnéticos y los métodos utilizados para su eliminación dependen de las características específicas del método de prospección que se emplee.” (Sóstenes D., 1997).

Las mediciones MMR pueden realizarse en el dominio de la frecuencia o el dominio del tiempo utilizando las mismas formas de onda transmitidas, con las mismas frecuencias y anchuras de pulso, respectivamente, utilizadas para las mediciones eléctricas. Se mide la intensidad de uno o más componentes del campo magnético alterno. Los estudios de superficie suelen medir la componente del campo magnético paralelo a la superficie y perpendicular a la orientación del dipolo de corriente (denominada componente Y). La dirección dominante del flujo de corriente es paralela a la superficie del suelo, por lo que...

“(...) los campos magnéticos asociados son horizontales y están orientados perpendicularmente a la dirección del flujo. Para un estudio en el que la topografía es plana y los electrodos de corriente están en la superficie, el campo magnético debido a la corriente en el cable que conecta los dos electrodos es vertical en la superficie del suelo, por lo que se excluye automáticamente de las mediciones, si la topografía es significativa o las mediciones se realizan en el fondo del pozo, entonces los campos asociados a los cables del transmisor tienen que calcularse y eliminarse de los datos. Este proceso no tiene que ser exacto porque estos campos aumentan gradualmente hacia los cables y aparecen como un componente "regional" fácilmente reconocible en los datos finales, en los que se superponen las variaciones de longitud de onda más cortas debidas a la geología local.” (Sóstenes D., 1997).

## ¿Para qué se utiliza este método?

Este método es utilizado para medir pequeños contrastes de conductividad en áreas cercanas del punto de medición con el fin de detectar dichos contrastes de conductividad horizontalmente (lateralmente), preferentemente de estructuras que no sean tan profundas. (Peroni J., 2020)

## Fundamento matemático

El Método Magnetométrico Resistivo implica la combinación de las ecuaciones de Poisson y del campo magnético en condiciones cuasiestáticas, al igual que otros métodos electromagnéticos, éste se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell (Jessop M. y Jardani M., 2018).

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon} \dots \dots \dots (\text{Ec.1})$$

$$\nabla \cdot E = 0 \dots \dots \dots (\text{Ec.2})$$

$$\nabla \cdot B = 0 \dots \dots \dots (\text{Ec.3})$$

$$\nabla \cdot B = \mu J + \epsilon \mu \frac{\partial E}{\partial t} \dots \dots \dots (\text{Ec.4})$$

## Parámetro MMR

El parámetro MMR da paso a obtener una mayor resolución, y este es la variación entre el campo primario u observado (Hobs) y el campo de fondo calculado en una estación de

referencia u origen ( $H_{bg}$ ), normalmente el centro del dipolo transmisor, en relación con el valor de fondo de origen, expresado como porcentaje y dado por (Jessop M. y Jardani M., 2018):

$$MMR (\%) = \left( \frac{H_{obs} - H_{bgo}}{H_{bgo}} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (Ec.5)$$

- $H_{obs}$  = campo primario observado
- $H_{bg}$  = campo magnético de fondo calculado en una estación de referencia (campo magnético de la tierra)
- $MMR (\%)$  = Es la variación entre el campo primario observado y el campo de fondo

### **Campo magnético primario normalizado $H_N$**

El  $H_{obs}$  o bien campo magnético primario observado, se normaliza al campo magnético normal, o bien calculado en la estación de estudio ( $H_{bg}$ ). Esta es la fuerza del campo cuando el subsuelo es lateralmente homogéneo, esto debido a que las capas verticales con propiedades eléctricas no influyen en las mediciones.

El campo primario normalizado ( $H_N$ ) se expresa como un porcentaje de la siguiente manera (Jessop M. y Jardani M., 2018).

$$HN (\%) = (H_{obs} - H_{bg}) \times 100 \quad \dots\dots\dots (Ec.6)$$

- $H_{obs}$  = campo primario observado
- $H_{bg}$  = campo magnético de fondo o normal (campo magnético de la tierra)
- $H_N$  = campo magnético primario observado normalizado

Valores de  $H_N$  mayores al 100% indican un flujo de corriente alto.

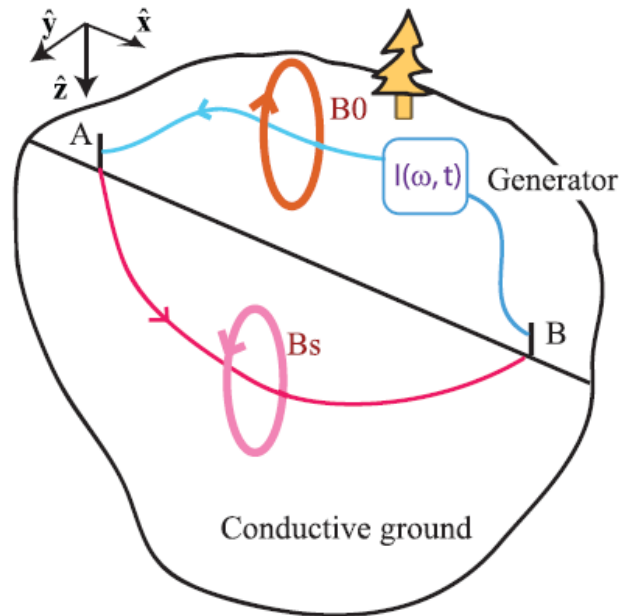
### **Comentario:**

No necesariamente se espera que las anomalías reaccionen igual, basta con ver cómo se comporta  $H_N$  (siendo este mayor al 100%) podemos intuir que hay un flujo anómalo de corriente.

### **Arreglos en el MMR**

Uno o ambos electrodos de corriente pueden moverse con el magnetómetro, ya sea horizontalmente sobre la tierra o verticalmente en un pozo. Alternativamente, los electrodos de corriente pueden mantenerse en posiciones fijas y el magnetómetro en movimiento.

(Jessop M. y Jardani M., 2018)



*Ilustración 1. Configuración para el MMR. (Jessop M. y Jardani M., 2018, p. 223)*

## Reducción de datos magnéticos

Es un proceso donde hay que eliminar todas las variaciones externas del campo magnético y sólo dejar las que utilizemos en los cuerpos anómalos enterrados.

Se van a eliminar:

- ⌘ Variación del campo magnético dipolar interno (se elimina con ayuda del IGRF (Campo Magnético de Referencia Internacional)).
- ⌘ Variación del campo magnético externo con el tiempo (variación diurna) mediante una corrección diurna.

(Peroni J., 2020).

Al final con esto, pensamos llegar a la anomalía magnética residual (Campo magnético observado después de las correcciones).

## **Corrección Diurna**

Tiene un gran efecto en los datos de levantamiento magnético. Consiste en medir un sitio las variaciones del campo magnético a lo largo del tiempo que dure el levantamiento eliminando la variación en los datos del campo magnético visibles causado por el campo magnético externo. Es más compleja a la hora de realizar el levantamiento sobre áreas extensas.

Se necesita de una estación base; Se mide el campo magnético en un punto y después de un cierto periodo, volver a medir el campo magnético para dicha región establecida.

Se van a calibrar las medidas con la finalidad de observar cómo es que se ha dado esta variación diurna para que posteriormente, sea eliminada a nuestras mediciones del campo magnético. (Peroni J., 2020).

### **¿Por qué se da la variación diurna?**

Por ciertos agentes externos como por ejemplo: Campo magnético solar y lunar, principalmente), generando que varíe el campo magnético que sea medido en una cierta región. (Peroni J., 2020).

## **IGRF (Campo Magnético de Referencia Internacional)**

Permite determinar cómo se comporta el campo magnético en cualquier parte del mundo en una fecha específica ya sea de una fecha pasada o incluso, de una futura, siempre y cuando no se salga del rango de renovación de este modelo.

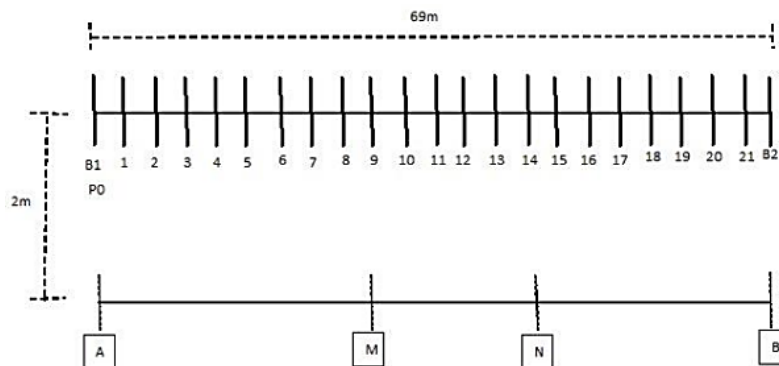
Es descrito mediante un modelo matemático, desarrollado a partir de observaciones en todo el mundo y cada 5 años se publica un nuevo modelo actualizado. (Peroni J., 2020).

## Metodología

Se proporcionaron una serie de datos de dos levantamientos realizados en CU BUAP, en la cancha de usos múltiples. Estos datos contenían las mediciones del campo magnético del terreno estudiado. (Ver ilustración 2).



*Ilustración 2. Imagen satelital de la zona de estudio, Arena BUAP. (Tomado de Google Earth)*



*Ilustración 3. Configuración de las estaciones y electrodos*



Se utilizaron electrodos de corriente y a dos metros de estos, se hicieron las lecturas en 23 estaciones. Este tendido fue de 69 metros de longitud (ilustración 3). Se hicieron dos tipos de mediciones: la primera con electrodos, pero sin inyección de corriente, la segunda con electrodos, pero en este caso ya hubo una inyección de corriente. Se obtuvieron tres lecturas en cada estación para cada tipo de medición de las cuales, se obtuvo un promedio. Se utilizó este promedio para hacer el correspondiente tratamiento de los datos e interpretación.

### **Tasa de variación diurna y base-drift:**

Para llegar a la interpretación de los datos, se deben corregir las lecturas de las mediciones de los campos magnéticos tomadas en cada estación correspondiente. Para ello, se debe calcular la tasa de variación diurna, la cual es la lectura en la base 2 menos la lectura en la base 1, entre la diferencia de sus respectivos tiempos (ecuación 7). También se debe calcular la base-drift, esto es, la lectura de la base menos la lectura 1 (ecuación 8).

$$TVD - L1 = \frac{RB2 - RB1}{tB2 - tB1} \quad \text{Ec.7}$$

*Tasa de variación diurna(TVD)*

$$\text{Base drift} = R_n - R_1 \quad \text{Ec.8}$$

*Variación de la Lectura de la Base en el i-ésimo loop (vuelta), también llamado Base-Drift.*

Comentario:

En cada Loop hay que ir verificando cuál ha sido la variación de cada base con respecto a la base 1.

### **Corrección diurna y Lectura corregida (Corrección aplicada):**

Después de obtener los dos parámetros anteriores, se calcula la corrección diurna de cada lectura, utilizando la ecuación 9. Esto es, multiplicando la TVD por la diferencia entre el tiempo observado en cada estación ( $t_{obs}$ ) y el tiempo en la base que le corresponde a cada Loop ( $t_{Bn}$ ), más la base-drift (este proceso debe realizarse para los valores con corriente y sin corriente). Finalmente, se calcula la lectura corregida por variación diurna ( $R_{dc}$ ) de cada estación utilizando la ecuación 10. Nuevamente lo aplicamos tanto para los datos con y sin corriente. *Lo anterior se muestra en las tablas 1 y 2.*

Una vez que se han corregido los valores del campo magnético, se ha graficado en Matlab para observar el comportamiento de dicho campo, en cada caso correspondiente (ver gráfico 1).

$$CD = TVD(t_{obs} - t_{Bn}) + \text{base drift} \quad \text{Ec.9}$$

*Corrección diurna*

$$R_{dc} = R_{obs} - CD$$

Ec.10

Lectura corregida

Valores con corriente:

Estacion	Tiempo	Tiempo en min	Minutos	Hora en minutos	Lectura	Base drift	Correccion Diurna	Corregido
B1	11:33	693	33	11	40136.13	0	0	40136.13
S1	11:35	695	35	11	40081.07	0	0.275	40080.795
S2	11:37	697	37	11	40066.13	0	0.55	40065.58
S3	11:39	699	39	11	40046.93	0	0.825	40046.105
S4	11:40	700	40	11	40027.8	0	0.9625	40026.8375
S5	11:41	701	41	11	39983.6	0	1.1	39982.5
S6	11:43	703	43	11	39937.73	0	1.375	39936.355
S7	11:45	705	45	11	39878.47	0	1.65	39876.82
S8	11:46	706	46	11	39832.47	0	1.7875	39830.6825
S9	11:47	707	47	11	39796.13	0	1.925	39794.205
S10	11:48	708	48	11	39777.6	0	2.0625	39775.5375
S11	11:51	711	51	11	39761.2	0	2.475	39758.725
S12	11:52	712	52	11	39739.4	0	2.6125	39736.7875
S13	11:53	713	53	11	39760.27	0	2.75	39757.52
S14	11:54	714	54	11	39748.47	0	2.8875	39745.5825
S15	11:55	715	55	11	39744.2	0	3.025	39741.175
S16	11:57	717	57	11	39735.47	0	3.3	39732.17
S17	11:58	718	58	11	39714.4	0	3.4375	39710.9625
S18	11:59	719	59	11	39706.67	0	3.575	39703.095
S19	12:01	721	1	12	39676.67	0	3.85	39672.82
S20	12:02	722	2	12	35689.75	0	3.9875	35685.7625
S21	12:04	724	4	12	37987.5	0	4.2625	37983.2375
B2	12:06	726	6	12	40140.67	4.54	4.54	40136.13

Tabla 1. Valores para corrección diurna y Lectura corregida con corriente

## Valores sin corriente:

Estacion	Tiempo	Tiempo en min	Minutos	Hora en minutos	Lectura	Base drift	Correccion Diurna	Corregido
B1	12:10	730	10	12	40141.33	0	0	40141.33
S1	12:10	730	10	12	40084.73	0	0	40084.73
S2	12:11	731	11	12	40069.2	0	0.463	40068.737
S3	12:12	732	12	12	40054.27	0	0.926	40053.344
S4	12:13	733	13	12	40032.13	0	1.389	40030.741
S5	12:13	733	13	12	39988.47	0	1.389	39987.081
S6	12:14	734	14	12	39938.8	0	1.852	39936.948
S7	12:15	735	15	12	39871	0	2.315	39868.685
S8	12:15	735	15	12	39834.07	0	2.315	39831.755
S9	12:16	736	16	12	39796.93	0	2.778	39794.152
S10	12:17	737	17	12	39777.93	0	3.241	39774.689
S11	12:18	738	18	12	39757.93	0	3.704	39754.226
S12	12:18	738	18	12	39748.2	0	3.704	39744.496
S13	12:19	739	19	12	39760	0	4.167	39755.833
S14	12:20	740	20	12	39758.27	0	4.63	39753.64
S15	12:21	741	21	12	39732.73	0	5.093	39727.637
S16	12:21	741	21	12	39734	0	5.093	39728.907
S17	12:22	742	22	12	39730.33	0	5.556	39724.774
S18	12:23	743	23	12	39722.67	0	6.019	39716.651
S19	12:23	743	23	12	39679.67	0	6.019	39673.651
S20	12:24	744	24	12	39629	0	6.482	39622.518
S21	12:25	745	25	12	38038.67	0	6.945	38031.725
B2	12:29	749	29	12	40150.13	8.8	8.797	40141.333

*Tabla 2. Valores para corrección diurna y Lectura corregida sin corriente*

## Cálculo de las anomalías de Hn y MMR:

Utilizando las ecuaciones 5 y 6 se calculan los parámetros Hn y MMR.

Antes de eso, se debe calcular el campo magnético background con ayuda de una calculadora magnética en una página del NOAA. El campo magnético Hbg que nos arrojó en la arena buap es de 39, 961.4 nT.

Lo anterior se hizo mediante la introducción de las coordenadas del lugar (ver Anexo 2). Teniendo este valor y con las lecturas corregidas se procedió a calcular las anomalías solo para los valores con corriente (tabla 3). Una vez teniendo estos valores, se procedió a graficar los resultados de los valores para los parámetros Hn y MMR, empleando únicamente los valores del campo magnético con corriente. (ver gráficos 2 y 3).

Estacion	Distancia	Hn	MMR
B1	3	100.437247	0.00437247
S1	6	100.298776	0.00298776
S2	9	100.260702	0.00260702
S3	12	100.211967	0.00211967
S4	15	100.163752	0.00163752
S5	18	100.052801	0.00052801
S6	21	99.937327	-0.0006267
S7	24	99.7883458	-0.0021165
S8	27	99.6728906	-0.0032711
S9	30	99.5816088	-0.0041839
S10	33	99.5348949	-0.0046511
S11	36	99.4928231	-0.0050718
S12	39	99.4379263	-0.0056207
S13	42	99.4898077	-0.0051019
S14	45	99.4599351	-0.0054006
S15	48	99.4489057	-0.0055109
S16	51	99.4263714	-0.0057363
S17	54	99.3733015	-0.006267
S18	57	99.3536137	-0.0064639
S19	60	99.2778531	-0.0072215
S20	63	89.3005813	-0.1069942
S21	66	95.0498168	-0.0495018
B2	69	100.437247	0.00437247

*Tabla 3. Coeficientes de las anomalías Hn y MMR*



*Ilustración 4. Esquema del proceso para obtener la lectura corregida y los parámetros Hn y MMR (Esquema elaborado por el equipo).*

## Resultados

Se observa que, la magnitud del campo magnético calculado a partir de datos donde se inyectó corriente es, menor al campo calculado en donde no se inyectó corriente. Recordemos que se crean dos campos H (primario y secundario), al crearse un campo primario, afecta los valores obtenidos en campo (altera) por lo que, se deben reducir los datos y al reducirlos, el campo H disminuirá de cierta forma. En un caso contrario donde no hay que hacer una reducción, la magnitud del campo magnético no disminuye de la misma forma.

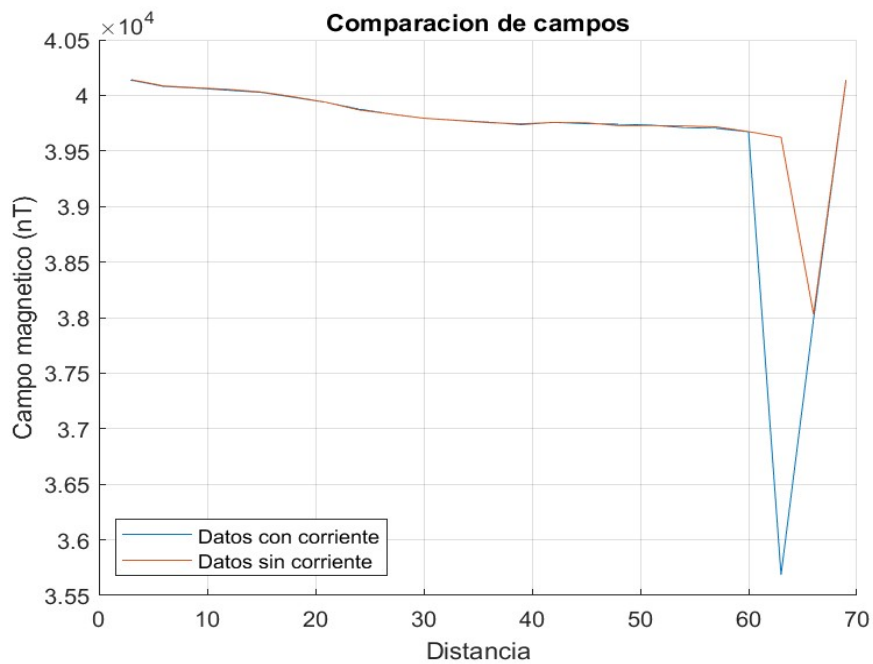


Gráfico 1. Comparación de campos con corriente y sin corriente

Tomando en cuenta que, la normalización del campo primario indica si existe una anomalía o no, valores mayores al 100% indican una estructura mineralógica. En este caso, existe una ligera anomalía en la parte izquierda superior del gráfico, cerca de los 5-18 metros cuyo parámetro  $H_n$  está por arriba del 100%, lo que indica que esta región existe una zona conductora. Por otro lado, entre los 18 y 69 metro aproximadamente, podemos decir que existe un cuerpo resistivo.

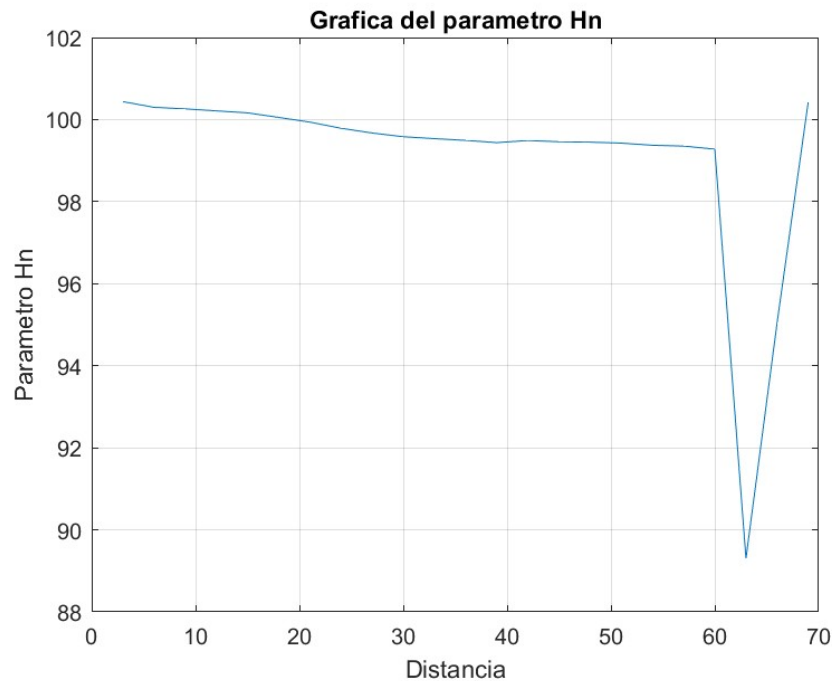
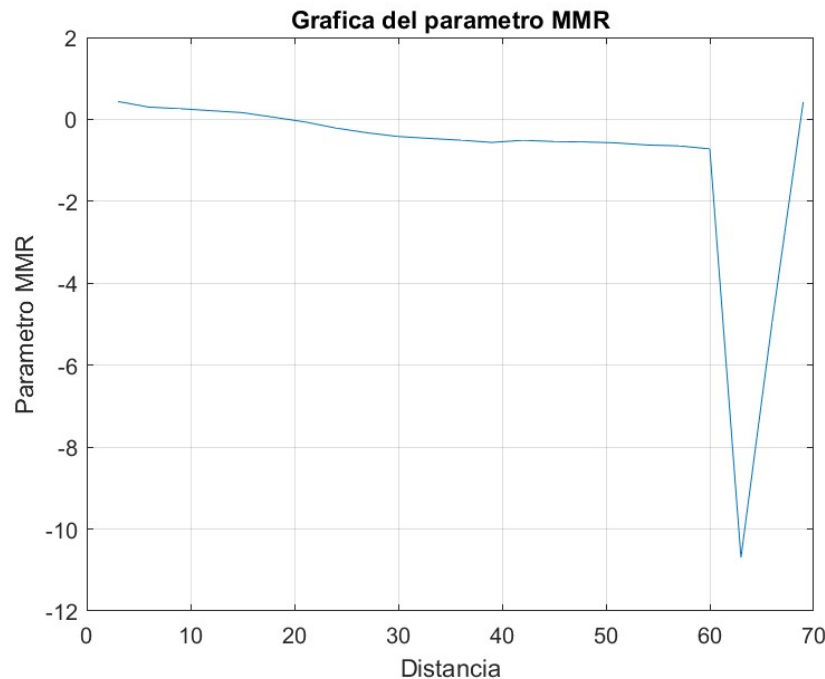


Gráfico 2. Anomalia  $H_n$

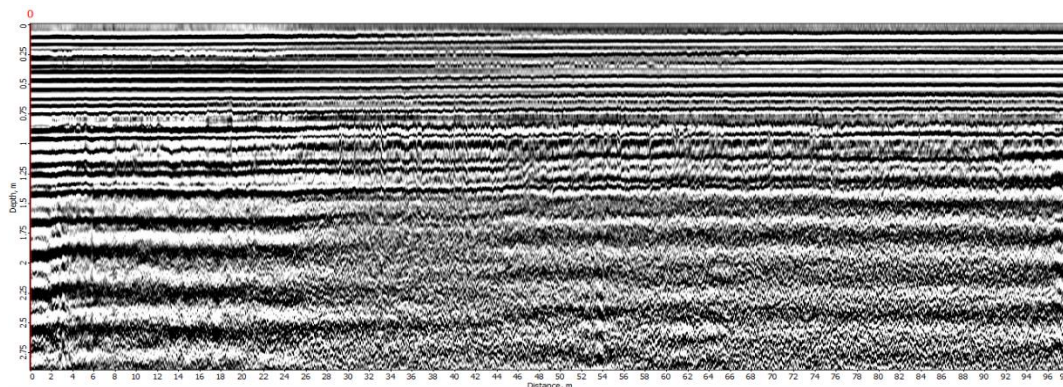
Considerando que el parámetro MMR es la variación del campo H observado respecto al campo geomagnético en el punto de adquisición, donde si  $MMR > 0$  indica un flujo anómalo de corriente. En el gráfico se observa que en los primeros 18 metros la curva se alza por arriba del cero, y los metros restantes el comportamiento es por debajo del parámetro 0, indicando que gran parte del medio estudiado es una zona resistiva y solo los primeros metros hay presencia de una zona conductora.



*Gráfico 3. Anomalía del parámetro MMR*

### Radargrama

Se nos proporcionó un radargrama levantado en el mismo perfil con la finalidad de complementar la información del MMR (ilustración 5), al cual se le aplicaron diferentes filtros (pasabajas, Ormsby, stacking entre otros).

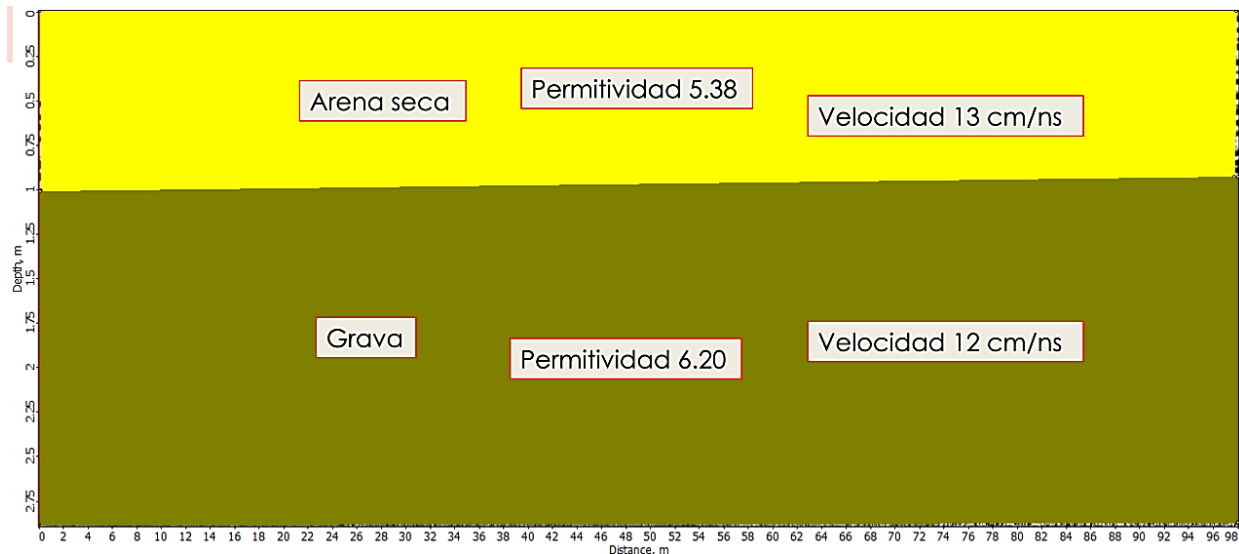


*Ilustración 5. Radargrama con filtros*

En el radargrama se puede observar que efectivamente en los primeros 18-20 metros en la horizontal existen pequeñas perturbaciones las cuales indican que en el medio hay una estructura conductora, con el debido procesamiento se logró obtener un modelo el cual podemos asociarlo con una zona compuesta por gravas y arenas seca.

Geología de la zona:

(Ver anexo 1)



*Ilustración 6. Interpretación de la geología de la zona de estudio debido a los resultados obtenidos.*

## Conclusiones

Se demostró que, al inyectar corriente a nuestras mediciones de campo magnético disminuye ya que, al crearse un campo primario, este altera los valores del campo H haciendo que éstos disminuyan. Tanto el parámetro  $H_n$  como el MMR coinciden que entre los primeros 5-18 metros existe una anomalía no muy notable que demuestra la presencia de una zona conductora mientras que, para los 18-69 metros existe un cuerpo resistivo.

Lo anterior se demostró con la generación del filtrado del radargrama generado en donde nos indica que, entre los primeros 18-20 metros hay perturbaciones muy pequeñas que indican que sí existe una zona conductora, tal como lo indican los parámetros del método MMR.

Asociándolo a una zona geológica, con apoyo del anexo 1, se concluye que estamos ante una zona neovolcánica, compuesta principalmente por gravas y arenas, cumpliendo los objetivos de demostrar si existía o no, alguna zona conductora en esta región de estudio e interpretando la geología del lugar.



## Bibliografía

Jessop M. y Jardani, A., (october 2018). Geophysical Journal International, Magnetometric resistivity: a new approach and its application to the detection of preferential flow paths in mine waste rock dumps. Recuperado de: <https://doi.org/10.1093/gji/ggy275>

Jessop M. y Jardani M., (2018). Magnetometric resistivity: a new approach and its application to the detection of preferential flow paths in mine waste rock dumps. Recuperado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02324208/file/2018-GJI-MMR%20approach.pdf>

NOAA, (s.f.). Calculadoras de campo magnético. Recuperado de: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>

Peroni J., (2020). CHARLAS SEGEMAR: Magnetometría en la exploración regional. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=9B72or9Tjzk>

R. Edwards y Nabighian M., (october 1978). SEG Library, On the theory of magnetometric resistivity (MMR) methods. Recuperado de: <https://library.seg.org/doi/10.1190/1.1440887#:~:text=The%20Magnetometric>

Sóstenes D., (1997). Inversión y modelado de campos eléctricos y magnéticos para números de inducción pequeños. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/312591613\\_Inversion\\_y\\_modelado\\_de\\_campos\\_electricos\\_y\\_magneticos\\_para\\_numeros\\_de\\_induccion\\_pequenos](https://www.researchgate.net/publication/312591613_Inversion_y_modelado_de_campos_electricos_y_magneticos_para_numeros_de_induccion_pequenos)

## Anexos

Material	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)	$v$ (cm/ns)	$\alpha$ (dB/m)
Aluviones	9-23	10-100	6.3-10	-
Arcilla seca	3	0.25	17.3	0.28
Arcilla húmeda	8-15	50-1000	8.6-11	20
Arcilla limosa	30-50	>1000		
Arena seca	3-6	0.01	12-17	0.01
Arena húmeda	20-30	0.1-1	5.5-6	2.3
Arena costera seca	10		9.5	0.03-0.3
Limos secos	3-10			
Limos saturados	10-40	1-100	7-9.5	6
Grava	<8	<0.8	>10.6	-
Grava arenosa satura.	15-22	<0.8	7.7-6.4	-
Suelo agrícola	9-25	1-100	6-10	-
Suelo agrícola medio	15	-	7.7	-
S. agr. grueso seco	8-15	0.8	10.6-7.7	-
S.agr. areno-limoso (saturado)	10-15	0.8-1.5	9.5-7.7	-
S.agr. húmedo	15-22	1.5-2	7.7-6.4	-
S.agr. saturado	20-26	0.8-1.5	6.7-5.9	-
Suelo arcilloso seco	2-3	0.1-1	21.2-17.3	-
Suelo arenoso seco	2-3	0.1-1	21.2-17.3	-
Suelo de bosque	12			
Suelo de marismas	12	-	8.6	-
Suelo de pastoreo	13	-	8.3	-
Suelo limoso seco	2-3	0.1-1	21.2-17.3	-
Suelo promedio	16	-	7.5	-
Turba	50-78	1-2	3.4-4.2	-

Anexo 1. Parámetros electromagnéticos para diferentes tipos de suelos y para materiales no compactados.  
(Sóstenes D., 1997).

## Magnetic Field Calculators

Magnetic Field

Model Used:	IGRF2020						
Latitude:	19° 0' 2" N						
Longitude:	98° 12' 15" W						
Elevation:	0.0 km Mean Sea Level						
Date	Declination (+ E   - W)	Inclination (+ D   - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N   - S)	East Comp (+ E   - W)	Vertical Comp (+ D   - U)	Total Field
2019-10-04	4° 6' 41"	46° 42' 0"	27,406.2 nT	27,335.7 nT	1,964.8 nT	29,082.8 nT	39,061.4 nT
Change/year	-0° 6' 48"/yr	-0° 1' 40"/yr	-49.9 nT/yr	-45.8 nT/yr	-57.7 nT/yr	-81.0 nT/yr	-93.1 nT/yr

Latitude: 19° 0' 2" ☐ S ☒ N  
Longitude: 98° 12' 15" ☒ W ☐ E  
Elevation: ☐ GPS ☒ Mean sea level  
0  Kilometers

Model: ☐ WMM (2019-2024) ☒ IGRF (1590-2024)  
☐ EMM (2000-2019)

Start Date: Year 2019 Month 10 Day 4  
End Date: Year 2019 Month 10 Day 4  
Step size: 1.0

Enter a street address, street name, or street intersection. For best results, include as much location information as possible with the street address in your search, such as city, state, zip code.  
Location:   
Get & Add Lat / Lon

Anexo 2. Cálculo del campo magnético HBG. Fuente : <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?#igrfwmm>

### Códigos empleados en Matlab para los gráficos 1, 2 y 3:

```
clear all; close all; clc;
```

```
HnY=xlsread('MMR.xlsx','C:C');
```

```
MMRY=xlsread('MMR.xlsx','E:E');
```

```
CC=xlsread('MMR.xlsx','F:F');
```

```
SC=xlsread('MMR.xlsx','G:G');  
X=3:3:69;  
figure (1)  
hold on  
plot(X,CC)  
plot(X,SC)  
grid on  
title('Comparacion de campos')  
xlabel('Distancia')  
ylabel('Campo magnetico (nT)')  
legend('Datos con corriente','Datos sin corriente')
```

```
figure (2)  
plot(X,HnY)  
grid on  
title('Grafica del parametro Hn')  
xlabel('Distancia')  
ylabel('Parametro Hn')
```

```
figure (3)  
plot(X,MMRY)  
grid on  
title('Grafica del parametro MMR')  
xlabel('Distancia')  
ylabel('Parametro MMR')
```