Proceedings of the
Latin-American Geothermal Congress 2025
LGC 2025
San Salvador, El Salvador
22–26 Sept. 2025

Exploración magnética en Infiernillo Ciego, San Vicente: Una comparación preliminar del método terrestre y con Vehículo Aéreo No Tripulado.

Keren J. Ventura*[1], Jackelyn G. Martínez[2] y Jennifer S. Aguilar[3]

[1] División de Desarrollo Sostenible y Equidad Energética, Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas, El Salvador.
(E-mail: keren.ventura@dgehm.gob.sv)
[2] Escuela de Física, Universidad de El Salvador, El Salvador.
(E-mail: mr18044@ues.edu.sv)
[3] Unidad de Estudios, LAGEO S.A de C.V, El Salvador.
(E-mail: jaguilar@lageo.com)

Palabras clave: Infiernillo Ciego, Magnetometría, Vehículo Aéreo No Tripulado,

ABSTRACT: Esta investigación compara dos metodologías de prospección magnética: terrestre y aérea vehículo aéreo no tripulado (VANT), para evaluar su eficacia en la delimitación de anomalías magnéticas en Infiernillo Ciego, ubicada en San Vicente, El Salvador. Como datos fuente, se empleó información obtenida de una campaña magnética terrestre realizada por LAGEO en 2005 y se adquirieron datos aéreos en 2024 con un magnetómetro fluxgate. Los resultados de ambos métodos evidenciaron una anomalía de baja intensidad magnética en el sector SE, coincidente con la ubicación superficial de la zona de mayor actividad de la fumarola, además de identificar lineamientos estructurales de orientación NE-SO. Los datos adquiridos con VANT permitieron obtener una mejor definición en comparación a los adquiridos por el método convencional, además de ahorrar costo y tiempo. Este primer ejercicio comparativo evidencia la viabilidad del uso de drones como herramienta eficaz para la adquisición de datos magnéticos en zonas de difícil acceso.

1.Introducción.

En El Salvador, el método de adquisición de datos magnéticos convencional es mediante un magnetómetro terrestre portátil ya que este es relativamente de bajo costo y brinda una alta resolución de las anomalías existentes, sin embargo, al depender de un recurso humano constante se ve limitado en zonas de acceso complejo y las campañas de adquisición pueden llegar a durar mucho tiempo dependiendo de la extensión del área de interés. La magnetometría a través de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) podría ayudar a resolver este problema. Esta tecnología es nueva en el país y aunque existen algunos estudios previos utilizando la técnica en conjunto con otros métodos geofísicos [1] [2], no hay estudios previos comparando las dos técnicas de prospección magnética en la misma zona. Este primer ejercicio de comparación se realizó en la fumarola Infiernillo Ciego en San Vicente, El Salvador.

2. Metodología.

El conjunto de datos terrestres fue brindado por LAGEO de sus archivos de investigación y fueron adquiridos en una campaña de exploración en 2005 con un magnetómetro de precesión protónica (GEM Systems). Los datos aéreos se adquirieron en 2024 con un magnetómetro fluxgate (SENSYS MagDrone R3) montado en un dron DJI Matrice 300 RTK. Pese a las diferencias instrumentales y temporales existentes, se procuró propiciar las condiciones para obtener mediciones comparables, principalmente estableciendo un plan de vuelo de seis perfiles, cubriendo la misma área de estudio de 2005, que se acotó a 1.98 Km^2 centrándose en la zona fumarólica más activa, coincidiendo con 138 mediciones terrestres distanciadas a 50 metros, en perfiles de dirección E-O con una separación de 250 m entre sí. Es importante considerar que la distancia del sensor al suelo no pudo mantenerse pues se priorizo la seguridad del equipo considerando las elevaciones de terreno reportadas por el Modelo de Elevación Digital más reciente [3] y la vegetación del lugar, dando un margen de vuelo constante a 60 m.

El procesamiento de los datos magnéticos colectados por el magnetómetro acoplado al dron incluyó una reducción de la cantidad de medidas realizadas, además de correcciones por ladeo y rumbo realizadas mediante python para compensar el movimiento del dron durante del vuelo y hacerlo comparable. Posteriormente para ambos conjuntos de datos se consideró corrección diurna, y se omitió corrección por IGRF considerando que el área de estudio está acotada para este análisis y la variación por IGRF no es significativa. Una vez corregidos los valores de campo magnético se estimó el espectro de potencia para la profundidad máxima de prospección y posteriormente se aplicó una reducción al polo y un filtro polinomial grado 2 para separar la anomalía regional y residual mediante la separación de longitudes de onda y frecuencia. También fue considerado la aplicación de filtro de continuación hacia arriba, utilizando el valor de prospección profunda máxima (170 m), calculado mediante el espectro de potencia; este filtro es un tipo pasa bajo que permite suavizar las longitudes de onda corta (fuentes someras) y resaltar las anomalías profundas (longitud de onda larga) [4]. Tanto para los datos terrestres como aéreos se aplicaron los mismos filtros.

3. Resultados

Los datos colectados con los dos métodos comparten similitud en la distribución espacial de las anomalías de campo total observándose una tendencia E-O de una anomalía alta de valores de campo magnético; al sur, la zona de estudio está limitada por un área con valores más bajos de campo magnético que mantienen una tendencia E-O. La Tabla 1 presenta un resumen de los resultados de cada análisis realizado a los datos tras el filtrado detallado en la sección anterior, comparando los resultados individuales de cada método.

Filtro / Análisis	Método Aéreo con VANT (2024)	Método Terrestre (2005)
Reducción al Polo (RTP)	Bajo magnético central y S-SE delimitado por 35,900 nT. Gradiente simétrico (círculos concéntricos).	Bajo magnético central y S-SE , delimitado por 38,000 nT. Gradiente elongado al oeste, menos simétrico.
Espectro de Potencia Profundidades estimadas (Z1, Z2, somera)	Z1: 166.9 m	Z1: 169.2 m
	Z2: 63.4 m	Z2: 62.6 m
	Somera: 7.0 m	Somera: 10.9 m
Separación regional/residual (filtro polinómico)	Bajo regional centrado al S y SE delimitado por 35,700 nT.	Bajo regional al S-SE, delimitado por 37,000 nT.
Continuación hacia arriba (170 m)	Bajo magnético delimitado por 35,900 nT. Contrastes bien conservados en profundidad profundidad, altos magnéticos al norte y nornoreste y bajos magnéticos al sur-sureste	Bajo magnético delimitado por 37,800 nT. Contraste de altos magnéticos al norte y nornoreste y bajos magnéticos al sur-sureste.
Anomalía residual (superficial)	Mejor definida. Continuidad permite observar alineamiento NE-SO vinculado a traza de falla.	Discontinua. Interrupciones por baja densidad de adquisición. Menor definición.
Correlación con geología superficial	Alta correlación: valores positivos con andesitas (S2); negativos con piroclastitas y tierra blanca (S4).	Misma correlación, pero menos clara por menor resolución espacial.

Tabla 1: Resumen de resultados obtenidos tras el análisis cualitativo de las anomalías magnéticas resultantes de cada método.

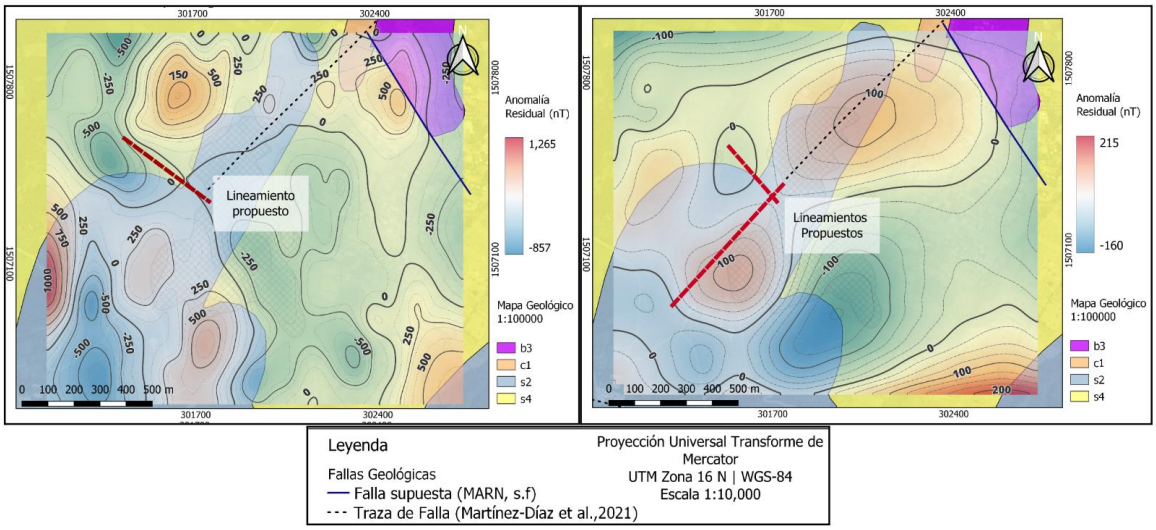


Figura 1: Mapas de anomalía magnética residual, a la izquierda los resultados de la prospección con método terrestre (2005) y a la derecha los resultados del método aéreo con VANT (2024)

4. Discusión

Tarduno et al. [5] y Livermore et al. [6], indican que el Campo Magnético de la Tierra tiene una tendencia decreciente que corresponde con una disminución en la media del campo magnético global de alrededor del 9% en los últimos 200 años. Considerando esta variabilidad, se decidió recolectar una muestra de datos con magnetometría terrestre el día en el que se desarrolló la campaña aérea y las mediciones obtenidas confirman esta disminución de la intensidad del campo magnético. Considerando esto y las diferencias tecnológicas presentes entre los sensores empleados, los resultados presentados se limitan a un análisis cualitativo preliminar para comparar los métodos.

El análisis del espectro de potencia de los datos evidenció que la profundidad de prospección no está limitada por la densidad de datos, si no que está

principalmente limitada por la extensión del área de estudio. La separación de anomalías profundas confirma que la fuente se mantiene a los 170 m, mientras que el análisis de anomalía residual permite proponer un lineamiento con dirección NE-SO como continuación del trazo de falla [7] y el contacto de materiales de los miembros s2 y s4 de la Formación San Salvador.

La diferencia en la magnitud de la anomalía residual obtenida mediante los dos métodos puede atribuirse a variaciones en la densidad de datos y la diferencia de altura del sensor durante la adquisición de los datos. Walter et al. [8] reportaron un incremento en la amplitud de la anomalía residual con la variación en la elevación del vuelo, observando diferencias de 275 nT entre el vuelo más bajo (35 m) y el más alto (70 m), así como una diferencia de 1 550 nT respecto a los datos de magnetometría terrestre obtenidos en el mismo año. Adicionalmente, factores geológicos locales pueden influir en la distribución y magnitud de las anomalías; Infiernillos Ciegos además de tener una fumarola activa ha experimentado cambios significativos a lo largo del tiempo, incluyendo fenómenos de deslizamiento de tierra severos que han modificado la estructura superficial y subsuperficial del área [9] por lo que más estudios de este tipo podrían ser de interés para una comparación cuantitativa.

5. **Conclusiones**

A partir de los mapas de intensidad de campo magnético corregidos con la reducción al polo, tanto en los datos aéreos como en los datos terrestres, es posible delimitar contrastes de anomalía magnética altos y bajos, que delimitan las anomalías de campo resaltando la zona fumarólica con alteración hidrotermal al SE, por lo que se establece que la distribución de anomalías es coherente para datos magnéticos terrestres y aéreos adquiridos con VANT.

Este estudio preliminar muestra que pese a las diferencias de tecnología y a la variabilidad del campo magnético en el tiempo, es posible obtener resultados comparables al analizar los métodos terrestre y aéreo con VANT por lo que este último puede ser una alternativa viable para estudios preliminares.

Agradecimientos: Agradecemos especialmente a LAGEO por el acompañamiento en la adquisición de datos en campo y su permiso para el uso de datos históricos en el marco de proyecto final del Diplomado en Geotermia para América Latina 2024; a la Dirección General de Energía Hidrocarburos y MINAS (DGEHM) por su apoyo instrumental y a nuestros colegas de diplomado.

Referencias:

[1] Alvarenga, K. ' Implementación de métodos geofísicos de exploración en Laguna de Aramuaca y sus alrededores, departamento de San Miguel, El Salvador. Santa Ana, Santa Ana', 2023,

[2] Delgado, A., Mayén, L., Morán, G., Ventura, K. 'Avances en la exploración geofísica onshore de hidrocarburos en el oriente de El Salvador'. XV Congreso Geológico de América Central, Guatemala, 2024.
[3] MARN, 'Modelo de Elevación Digital a 2m. San Salvador: Informe Interno', 2014.
[4] Ravat, D. 'Upward and Downward Continuation. En D. Ravat, Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism', pp. 974-975. Springer, 2007.
[5] Tarduno, H. V., Huffman, J. A., Watkeys, T., Thebe, M., Manyanga, P. C., Bono, M., . . . D, R. (2018). New Archeomagnetic Directional Records From Iron Age Southern Africa (ca. 425–1550 CE) and Implications for the South Atlantic Anomaly. Geophysical research letter, 45, 1361-1369. doi:10.1002/2017GL076007
[6] Livermore, P. W., Finlay, C. C., & Bayliff, M. (2020). Recent north magnetic pole acceleration.
[7] Martínez Díaz, J., Álvarez Gómez, J., Staller, A., Alonso Henar, J., Canora, C., Insúa Arevalo, J., . . . Mixco, L. (2021). Active Faults of El Salvador. Journal of South American Earth Sciences.
[8] Walter, C., Braun, A., & Fotopoulos, G. (2020). High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets. *Geophysical Prospecting*. https://doi.org/10.1111/1365-2478.12914
[9] ArcGIS StoryMaps, "Deslizamientos significativos → Volcán de San Vicente, noviembre de 2009," en *Deslizamientos en El Salvador*, 2022. [En línea]. Disponible en: https://storymaps.arcgis.com/stories/4cbbc746d2e743679e8dd90923bd43bb