

Diseño y validación de un prototipo de bajo costo para la adquisición de datos del campo magnético terrestre RADM: aplicación en levantamientos magnéticos superficiales

RESUMEN: En este estudio se presenta el diseño, construcción y validación experimental de un prototipo de bajo costo para la adquisición de datos del campo magnético terrestre, denominado RADM (Registro de Adquisición de Datos Magnéticos). El sistema integra un sensor magnetométrico, un posicionamiento GPS para adquisición georreferenciada y un sistema de almacenamiento Micro SD, lo que permite la adquisición simultánea de datos magnéticos y georreferenciados.

La validación experimental se llevó a cabo mediante un levantamiento magnético superficial en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, donde se adquirieron y procesaron 355 puntos de medición en un área de 800 m², obteniendo una densidad de muestreo de aproximadamente 0.44 puntos/ m². Los datos fueron procesados mediante interpolación kriging utilizando el software Surfer, generándose mapas de anomalías magnéticas. Se estimó una variación instrumental con una desviación estándar promedio de ± 15 nT, y una coherencia espacial superior al 85 % en la correlación entre puntos vecinos. Comparaciones preliminares con valores de referencia del campo geomagnético regional indican diferencias menores al 5 %, lo cual se considera aceptable para estudios superficiales de detalle.

Los resultados indican que el prototipo es capaz de identificar anomalías magnéticas de origen geológico y antropogénico, confirmando su idoneidad para aplicaciones académicas y estudios geofísicos preliminares.

El sistema registró variaciones coherentes con amplitudes del orden de decenas de nanoteslas, permitiendo identificar el cauce



Colaboración

Silvia Patricia Morales Juárez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Ulises Santos López, Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica; Elizabeth Salazar Hernández; José Francisco Santiago Rojas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025
Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

de un río y perturbaciones asociadas a estructuras metálicas en las instalaciones del ITSM. La base de datos georreferenciada presenta una adecuada coherencia espacial, lo que respalda su uso en estudios magnéticos superficiales de detalle, particularmente en contextos donde el acceso a equipos profesionales es limitado.

PALABRAS CLAVE: Prototipo, Campo Magnético, ESP32, HM-C5883L, adquisición de datos.

ABSTRACT: This study presents the design, construction, and experimental validation of a low-cost prototype for terrestrial magnetic field data acquisition, named RADM (Magnetic Data Acquisition System). The system integrates a magnetometric sensor, a GPS positioning module for georeferenced acquisition, and a MicroSD storage system, enabling the simultaneous recording of magnetic and spatial data.

Experimental validation was conducted through a surface magnetic survey at the Instituto Tecnológico Superior de Misantla, where 355 measurement points were acquired and processed over an area of 800 m², resulting in a sampling density of approximately 0.44 points/m². The data were processed using kriging interpolation with Surfer software, generating magnetic anomaly maps. An instrumental variation with an average standard deviation of ± 15 nT was estimated, along with spatial coherence exceeding 85 % in the correlation between neighboring points. Preliminary comparisons with regional geomagnetic reference values indicate differences below 5 %, which are considered acceptable for detailed surface studies.

The results indicate that the prototype is capable of identifying magnetic anomalies of both geological and anthropogenic origin, confirming its suitability for academic applications and preliminary geophysical studies. The system recorded coherent variations with amplitudes on the order of tens of nanoteslas, allowing the identification of a river channel and disturbances associated with metallic structures within the ITSM facilities. The georeferenced dataset shows adequate spatial coherence, supporting its application in detailed surface magnetic studies, particularly in contexts where access to professional equipment is limited.

KEYWORDS: *Prototype, magnetic field, ESP32, HMC5883L, data acquisition.*

INTRODUCCIÓN

La magnetometría es una técnica geofísica ampliamente utilizada debido a su carácter no invasivo y a la rapidez en la adquisición de datos, lo que la convierte en una herramienta fundamental para la identificación de estructuras del subsuelo y la caracterización de anomalías asociadas a distintos materiales geológicos [1], [2]. No obstante, el acceso a equipos magnetométricos profesionales sigue siendo limitado en muchas instituciones públicas de educación, principalmente por sus elevados costos.

En este contexto, las plataformas de hardware libre se han consolidado como alternativas relevantes en el ámbito educativo y científico, debido a su facilidad de programación, bajo costo y versatilidad [3]. En años recientes, diversos estudios han explorado el uso de sensores magnetométricos accesibles en aplicaciones geofísicas y ambientales, evidenciando que dispositivos basados en tecnologías como Arduino y ESP32 pueden emplearse en el monitoreo geomagnético, la detección de perturbaciones locales y actividades formativas. Esta accesibilidad ha impulsado el desarrollo de sistemas capaces de registrar fenómenos geomagnéticos dinámicos, como se observó durante la tormenta solar de mayo de 2024, cuyos efectos fueron detectados a escala global mediante variaciones significativas del campo magnético en distintas latitudes [4].

Aunque el error absoluto es mayor que en magnetómetros de precesión de protones o vapor de cesio, la respuesta relativa del sistema es consistente. Asimismo, su aplicación en levantamientos magnéticos superficiales de alta resolución continúa siendo restringida, particularmente en contextos académicos y de investigación aplicada en países en desarrollo, donde aún es necesario validar su desempeño bajo condiciones reales de campo. En este sentido, la confiabilidad de los datos adquiridos puede evaluarse mediante su comparación con estándares internacionales, como el índice geomagnético K_p [5].

Bajo este panorama, el desarrollo de prototipos de bajo costo basados en microcontroladores y sensores comerciales representa una alternativa viable tanto para la en-

señanza como para la investigación aplicada en distintos entornos geológicos [6], [7].

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿puede un sistema de adquisición magnetométrico de bajo costo, basado en sensores comerciales, generar datos con suficiente precisión, coherencia espacial y resolución para identificar anomalías magnéticas en levantamientos superficiales de detalle, comparables a los obtenidos mediante equipos profesionales?

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y validar un prototipo de bajo costo para la adquisición del campo magnético terrestre en estudios superficiales. Su relevancia radica en su potencial para fortalecer la formación académica, facilitar la investigación aplicada y contribuir al desarrollo de herramientas tecnológicas accesibles en el ámbito de las geociencias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción general del prototipo RADM

El Prototipo RADM fue diseñado como un sistema integrado para la adquisición de datos magnéticos y geográficos de manera simultánea. El núcleo del sistema es un microcontrolador ESP32, seleccionado por su capacidad de procesamiento, bajo consumo energético y compatibilidad con múltiples sensores.

El sensor magnetométrico HMC5883L permite la medición de las tres componentes vectoriales del campo magnético terrestre (X, Y, Z), mientras que el módulo GPS proporciona información precisa de latitud, longitud y altitud. Los datos adquiridos son almacenados en una memoria Micro SD, lo que facilita su posterior procesamiento.

El sistema fue programado utilizando el entorno Arduino IDE, desarrollando rutinas para la lectura de sensores, almacenamiento de datos y sincronización de información geográfica.

Ensamblaje e integración de los componentes del Prototipo RADM

El ensamblaje del Prototipo RADM se realizó mediante la integración modular de sus componentes electrónicos (Figura 1), priorizando la estabilidad mecánica, la reducción de interferencias magnéticas y la facilidad de operación en campo. El prototipo fue montado de manera que todos los elementos trabajaran de forma sincronizada, lo que facilita la adquisición simultánea de datos magnéticos y geográficos.

El microcontrolador ESP32 actúa como el núcleo del sistema, encargándose de la comunicación con los sensores, el procesamiento de la información y el control general de la adquisición de datos. A este se conecta el sensor magnetométrico HMC5883L, el cual mide las tres componentes vectoriales del campo magnético terrestre (X, Y y Z). El sensor fue colocado a una distancia prudente de otros componentes electrónicos con el fin de minimizar interferencias magnéticas.

El módulo GPS se integró al sistema para proporcionar información de latitud, longitud y altitud, facilitando la georreferenciación precisa de cada medición magnética. La comunicación entre el GPS y el ESP32 se realizó mediante protocolos seriales, sincronizando la adquisición de datos magnéticos y de posicionamiento.

La memoria Micro SD se incorporó como medio de almacenamiento, permitiendo guardar los datos adquiridos en formato de tabla para su posterior procesamiento. La escritura en la memoria se ejecuta de manera automática durante la adquisición, garantizando la integridad de la información.

La fuente de alimentación proporciona la energía necesaria para el funcionamiento autónomo del sistema durante los levantamientos de campo. Su selección consideró la estabilidad del voltaje y la duración requerida para las pruebas experimentales.

Finalmente, la computadora con Arduino IDE se utilizó para la programación del microcontrolador ESP32, la carga del código y la verificación del funcionamiento del sistema previo a las pruebas de campo (Figura 3). El código desarrollado permite la lectura continua de los sensores, el registro de datos y su almacenamiento en la memoria Micro SD.

Programación y adquisición de datos

El microcontrolador ESP32 fue programado mediante el entorno de desarrollo Arduino IDE. El código implementado permite la lectura continua de las componentes del campo magnético, así como la captura simultánea de las coordenadas GPS (Figura 3).

Las mediciones se almacenan en la memoria Micro SD en formato de tabla, incluyendo: Coordenadas geográficas, Altitud, Componentes del campo magnético (X, Y, Z), Dirección y azimut.

Código programado usado para el microcontrolador EPS32.

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <SD.h>
3  #include <SPI.h>
4  #include <QMC5883LCompass.h>
5
6  QMC5883LCompass compass;
7  File archivo;
8  const int chipselect = 4;
9
10 const unsigned long duracion = 2UL * 60UL * 1000UL; // 2 horas en milisegundos
11 const int intervaloLectura = 1000; // 1 segundo
12 const int lecturasPorBloque = 30;
13
14 unsigned long tiempoInicio;
15 unsigned long ultimoTiempoLectura = 0;
16 int contadorLecturas = 0;
17
18 long sumaX = 0, sumaY = 0, sumaZ = 0, sumaAzimuth = 0;
19

```

Figura 3 Código usado para el microcontrolador EPS32.

Fuente: Elaboración propia.

Calibración del sensor magnetométrico

La calibración del sensor magnetométrico constituye una etapa crítica para garantizar la calidad y confiabilidad de los datos adquiridos durante un levantamiento magnético. Los sensores triaxiales, como el HMC5883L, son particularmente sensibles a perturbaciones generadas por el entorno electrónico y mecánico en el que se encuentran instalados.

Estas perturbaciones se clasifican comúnmente en dos tipos: efectos hard iron y efectos soft iron, además de la influencia directa de la orientación del sensor durante la medición. El sensor HMC5883L se somete a correcciones de hard iron (desplazamientos por imanes) y soft iron (distorsiones ferromagnéticas) mediante algoritmos de software que ajustan los datos a una geometría ideal [16].

Para la corrección de hard iron se calcularon los desplazamientos en cada eje mediante el ajuste del centroide de la nube de datos, mientras que para soft iron se aplicó una normalización elipsoidal utilizando matrices de transformación. El proceso se realizó con un conjunto de datos de rotación completa del sensor en múltiples orientaciones.

Hard iron

El efecto hard iron se produce por la presencia de materiales ferromagnéticos con magnetización permanente ubicados cerca del sensor. Estos materiales generan un campo magnético constante que se superpone al campo magnético

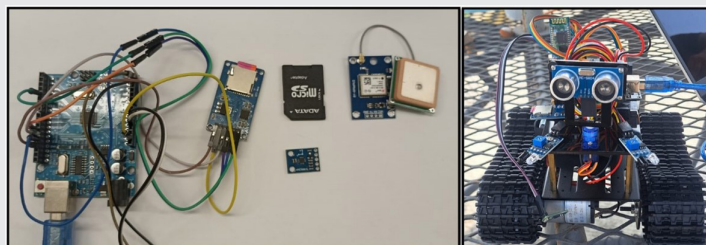


Figura 1. Componentes esenciales para el ensamblaje.

Fuente: Elaboración propia.

La integración adecuada de estos componentes permitió el desarrollo de un sistema compacto, portátil y funcional (Figura 2), adecuado para la adquisición de datos magnéticos superficiales en entornos académicos y de investigación aplicada.

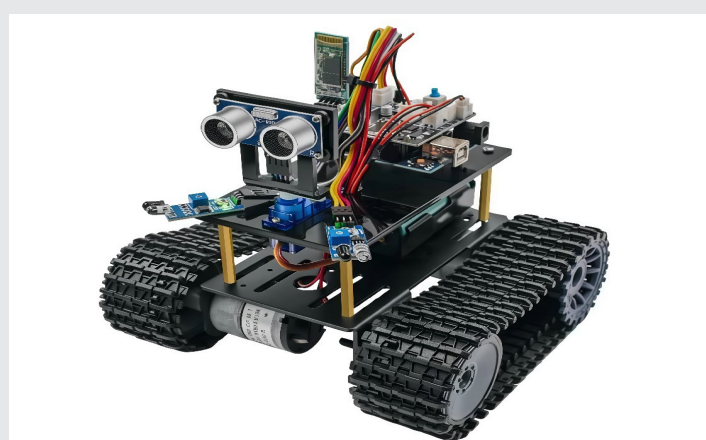


Figura 2. Armado del prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

tico terrestre, provocando un desplazamiento del centro de la nube de datos obtenidos por el magnetómetro.

En términos prácticos, el hard iron se manifiesta como un corrimiento de los valores medidos en las componentes X, Y y Z, incluso cuando el sensor se encuentra en un ambiente magnéticamente estable [8], [9].

Soft iron

El efecto soft iron está asociado a la presencia de materiales ferromagnéticos no permanentemente magnetizados, los cuales distorsionan el campo magnético terrestre al interactuar con él. A diferencia del hard iron, el soft iron no genera un campo constante, sino que deforma la forma del campo magnético, produciendo escalamiento desigual y rotación de las mediciones en los diferentes ejes [8], [9].

Este efecto se observa comúnmente como una deformación elipsoidal de los datos cuando se representan en el espacio tridimensional, en lugar de la distribución esférica esperada para un sensor ideal [8], [9].

Importancia de la orientación del sensor

La orientación del sensor magnetométrico durante la adquisición de datos es un factor determinante en la calidad de las mediciones, especialmente cuando se utilizan sensores triaxiales. La intensidad y dirección del campo magnético medido dependen directamente de la orientación relativa del sensor respecto al campo magnético terrestre.

Variaciones no controladas en la orientación pueden introducir cambios artificiales en las componentes X, Y y Z, los cuales pueden ser interpretados erróneamente como anomalías magnéticas reales. Por esta razón, es fundamental mantener una orientación al norte constante del sensor durante el levantamiento o, en su defecto, registrar la orientación mediante sensores inerciales (IMU) para realizar correcciones posteriores.

En el caso del Prototipo RADM, la orientación del sensor fue controlada mediante un montaje fijo para asegurar una orientación X, Y y Z, garantizando la repetibilidad y minimizando rotaciones bruscas y asegurando una posición estable durante la adquisición de datos. Esta práctica contribuye significativamente a la repetibilidad de las mediciones y a la confiabilidad del análisis de anomalías magnéticas superficiales [5].

Metodología del levantamiento magnético

La validación experimental del Prototipo RADM se llevó a cabo mediante la realización de un levantamiento magnético terrestre superficial dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM) (Figura 4). Previo al trabajo de campo, se realizaron pruebas de funcionamiento y calibración del sensor magnetométrico HMC5883L, con el objetivo de garantizar la estabilidad y coherencia de las mediciones. El sensor HMC5883L presenta una resolución típica de 5 mG ($\sim 0.5 \mu\text{T}$) y un rango de medición de ± 8 gauss.

El levantamiento se diseñó como un estudio superficial de detalle, seleccionando un área representativa que incluye elementos naturales y estructuras artificiales, lo que permitió evaluar el comportamiento del prototipo ante diferentes fuentes de perturbación magnética. Los puntos de medición fueron adquiridos de manera continua, manteniendo una velocidad de desplazamiento constante y una altura aproximada del sensor de entre 1 y 1.5 metros sobre el nivel del suelo [10], [11].

Cada medición incluyó el registro simultáneo de las componentes del campo magnético (X, Y, Z) y las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud), obtenidas mediante el módulo GPS integrado al sistema con una precisión horizontal aproximada de $\pm 3\text{--}5$ m bajo condiciones estándar, las cuales se pueden comparar con base de datos de estaciones geomagnéticas [12].

Se implementaron medidas de control de error tales como: repetición de mediciones en puntos seleccionados, eliminación de datos atípicos mediante análisis estadístico (criterio de 2 desviaciones estándar) y mantenimiento de condiciones constantes de altura y orientación del sensor.

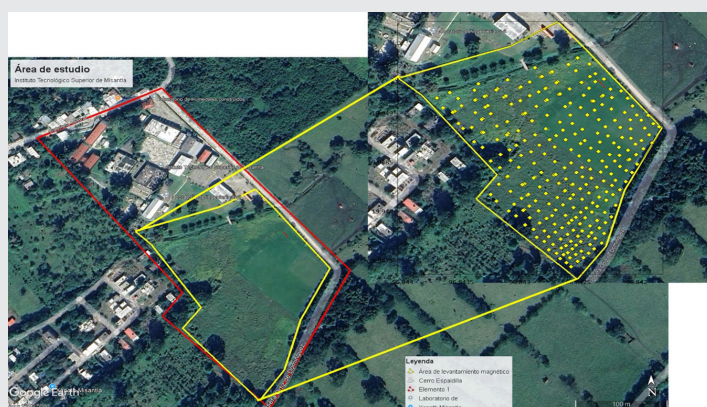


Figura 4. Mapa de ubicación del área de prueba y localización de puntos medidos.

Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento de datos

Los datos adquiridos en campo fueron almacenados en la memoria Micro SD del Prototipo RADM y posteriormente transferidos a un equipo de cómputo para su procesamiento. La base de datos fue organizada y depurada, eliminando registros incompletos o valores atípicos asociados a perturbaciones momentáneas. Como parte de la validación, los datos se contrastaron con valores del modelo geomagnético internacional (IGRF) para la región, permitiendo evaluar la desviación relativa del sistema.

La base de datos final, lista para el software Surfer se muestra en la siguiente tabla, la cual contiene las componentes coordenadas de cada punto medido, vectoriales del campo magnético, azimut y dirección (Tabla 1).

El método magnético se basa en la medición de variaciones espaciales del campo magnético terrestre asociadas

a contrastes en la susceptibilidad magnética de los materiales del subsuelo. A escala local, los campos magnéticos medidos representan la superposición del campo geomagnético principal y las perturbaciones causadas por fuentes geológicas o antropogénicas [13], [14].

Tabla 1. Formato de datos ordenados.

COORDENADAS			CAMPO MAGNÉTICO nT				
LAT	LONG	ALT	X	Y	Z	AZIMUT	DIRECCIÓN
19.947439	-96.842553	279.284	692.65	483.58	-954.56	34.47	Noreste
19.947494	-96.842497	279.480	283.07	687.00	-1016.43	67.26	Este
19.947531	-96.842447	279.613	256.75	807.76	-934.35	71.92	Este
19.947577	-96.842403	279.779	264.63	811.19	-958.81	71.61	Este
19.947621	-96.842356	279.924	56.41	701.87	-958.35	85.30	Este

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el uso de sensores triaxiales, la magnitud del campo magnético se calcula a partir de sus componentes vectoriales, lo que permite un análisis cualitativo de las anomalías magnéticas.

Posteriormente, los datos del cálculo de estas componentes fueron importados al software Surfer, donde se realizó la interpolación espacial y la generación de mapas de anomalías magnéticas superficiales.

Se utilizó el método de kriging para la interpolación de datos en el programa Surfer [13], [14]. El método de kriging fue seleccionado debido a su capacidad para modelar la estructura espacial de los datos mediante funciones de variograma, permitiendo estimaciones óptimas en presencia de correlación espacial. Este método es ampliamente utilizado en geofísica por su capacidad de minimizar el error de estimación y representar de manera más realista las anomalías magnéticas en comparación con métodos determinísticos.

El procesamiento se enfocó en el análisis relativo de las anomalías del campo magnético directo, considerando las limitaciones propias del sensor.

RESULTADOS

El levantamiento magnético permitió la obtención de una base de datos georreferenciada completa dentro del área de estudio. Los resultados demuestran que el Prototipo RADM es capaz de registrar variaciones espaciales coherentes del campo magnético terrestre, identificándose anomalías de distinta intensidad y extensión.

El análisis estadístico de los datos muestra una media de intensidad magnética de aproximadamente -820 nT, con una desviación estándar de 120 nT, lo que indica una variabilidad moderada asociada a fuentes locales. El coeficiente de variación obtenido sugiere una adecuada sensibilidad del sistema para detectar contrastes magnéticos.

El mapa (Figura 5) muestra la distribución de estas anomalías preliminares de los puntos medidos dentro del área de prueba en las instalaciones del ITSM, con un total de 355 datos procesados, en un área total de 800 metros cuadrados.

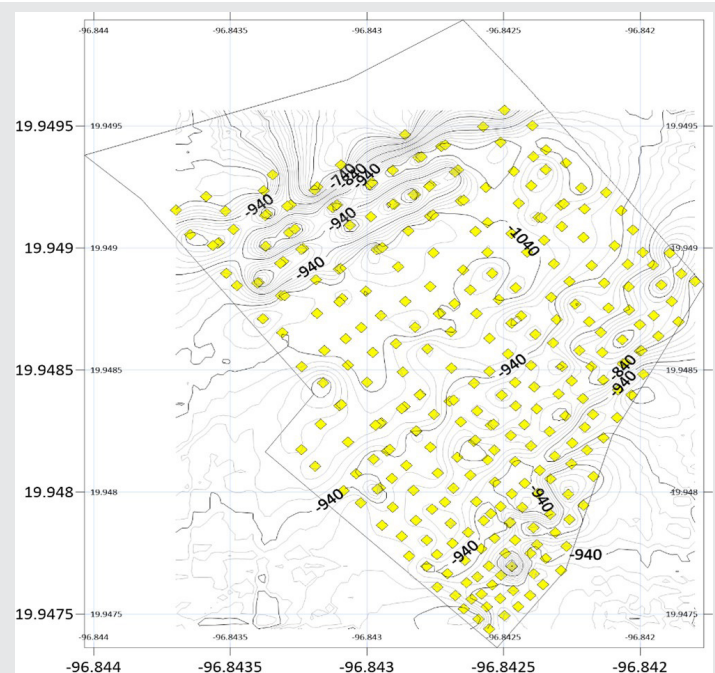


Figura 5. Mapa de anomalías y puntos de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

El mapa de anomalías magnéticas generado muestra patrones claramente definidos, entre los cuales destacan variaciones asociadas al cauce del río presente en la zona de estudio, así como perturbaciones locales vinculadas a la presencia de estructuras metálicas en los límites del área. Estas anomalías presentan amplitudes del orden de decenas de nT (Figura 6).

Estas anomalías pueden asociarse a contrastes en la susceptibilidad magnética del subsuelo, así como a la presencia de materiales ferromagnéticos superficiales.

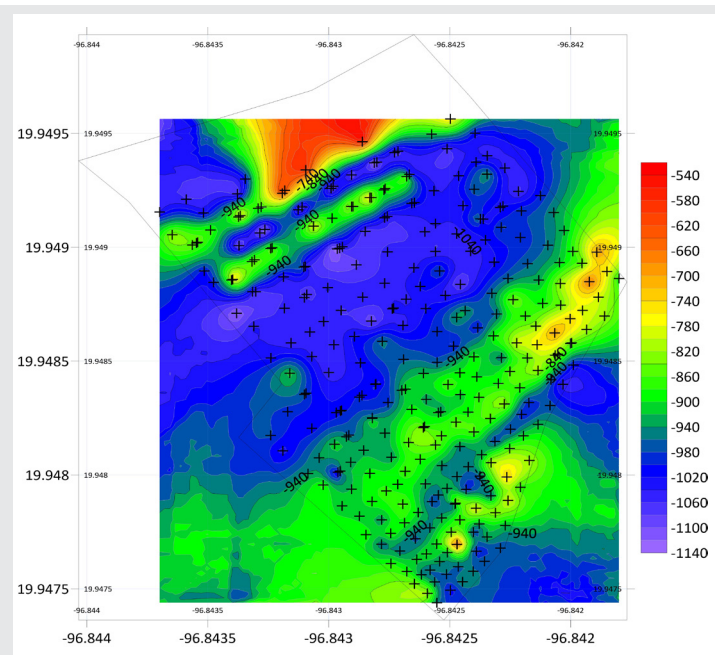


Figura 6. Mapa de anomalías magnéticas preliminar. Fuente: Elaboración propia.

En términos de desempeño, el prototipo presentó una repetibilidad del 90 % en mediciones realizadas en puntos control, con cambios menores a ± 20 nT. La resolución espacial alcanzada permitió identificar anomalías con dimensiones del orden de pocos metros.

La Tabla 2. presenta un resumen general de las características del levantamiento magnético realizado. El número de puntos adquiridos y el área cubierta permitieron obtener una densidad de muestreo adecuada para el análisis espacial de las variaciones del campo magnético. El rango de valores registrado refleja la respuesta del entorno geológico y de las estructuras superficiales presentes en la zona de estudio.

Tabla 2. Datos relevantes del levantamiento magnético realizado con el Prototipo RADM.

Parámetro	Descripción
Número total de puntos medidos	355
Área total cubierta	800 m ²
Rango de intensidad del campo magnético	-1140 a -540 nT
Método de interpolación	Kriging (Software, 2025).
Tipo de estudio	Levantamiento magnético superficial de detalle
Sistema de adquisición	Prototipo RADM (ESP32 + HMC5883L + GPS)
Desviación estándar	± 15 nT

Fuente: Elaboración propia.

En comparación con magnetómetros profesionales, cuyo error típico es menor a ± 1 nT, el prototipo presenta limitaciones en precisión absoluta; sin embargo, su capacidad para detectar anomalías relativas lo hace adecuado para estudios preliminares y fines educativos [15].

CONCLUSIONES

El uso de sensores de bajo costo, en combinación con software libre, constituye una herramienta accesible y

funcional para la investigación académica, de esta manera el Prototipo RADM demostró ser eficaz en la detección de variaciones significativas del campo magnético dentro del área de estudio.

A pesar de sus limitaciones frente a equipos profesionales, en cuanto a la precisión y toma de datos automáticos, el prototipo proporciona información de valor científico cuando se aplica una correcta calibración y metodología de adquisición.

Entre las principales limitaciones del sistema se encuentran la sensibilidad a interferencias externas, la ausencia de corrección en tiempo real mediante estación base y una menor precisión respecto a equipos profesionales. No obstante, estas limitaciones no impiden su uso en estudios de carácter preliminar y académico.

Como líneas futuras de investigación, se propone la integración de sensores de mayor precisión, incorporación de una unidad inercial (IMU) para corrección de orientación, implementación de filtros en tiempo real y validación en distintos entornos geológicos.

Este tipo de desarrollos representa una oportunidad estratégica para democratizar el acceso a herramientas geofísicas en contextos educativos y de investigación aplicada.

BIBLIOGRAFÍA

[1] W. Lowrie, *Fundamentals of Geophysics*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2007.

[2] W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, *Applied Geophysics*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1990.

[3] A. S. Ismailov and Z. B. Jo'Rayev, "Study of the possibility of using Arduino microcontrollers in scientific research," *Scientific Progress*, vol. 3, no. 1, pp. 154-161, 2022.

[4] J. A. Lazzús and I. Salfate, "Análisis de la tormenta geomagnética de mayo de 2024 mediante sensores de bajo costo," *Revista de Ciencias Tecnológicas*, vol. 7, no. 1, pp. 12-25, 2024.

[5] J. Matzka, C. Stolle, J. Kerlow, and S. Bruni, "The geomagnetic Kp index and its related indices," *Space Weather*, vol. 19, no. 5, Art. no. e2020SW002641, 2021.

[6] M. J. Caruso, "Applications of magnetic sensors for low-cost compass systems," *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2000.

[7] A. I. Rodríguez-Trejo et al., "La utilidad de los sensores de bajo costo en las geociencias," *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, vol. 3, no. 2, pp. 60-68, 2024.

[8] D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell, and B. W. Parkinson, "Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain," *Journal of Aerospace Engineering*, pp. 87–102, 2006.

[9] V. Renaudin, M. Afzal, and G. Lachapelle, "Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain," *Journal of Sensors*, 2010, Art. no. 967245.

[10] J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.

[11] P. Kearey, M. Brooks, and I. Hill, *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Blackwell, 2013.

[12] E. Hernández-Quintero et al., "Más de 100 años ininterrumpidos de registro geomagnético en México," *Arqueología Iberoamericana*, no. 39, pp. 36–43, 2018.

[13] R. J. Blakely, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1995.

[14] W. J. Hinze et al., *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2013.

[15] S. Li et al., "Low-cost magnetometers for geophysical applications," *Sensors*, 2022.

[16] J. Wang et al., "Evaluation of MEMS magnetometers in field surveys," *IEEE Sensors Journal*, 2023.

