Detection of Seismic Precursors with a Low-Cost Embedded System

J.A. Becerra-Jiménez¹, J.R. Millan-Almaraz², GE Vázquez-Becerra³, G. Pio-Rodríguez²

¹Facultad de Computación / Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

²Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas / Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

³Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio/ Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

Autor de Correspondencia: J.A. Becerra-Jiménez, jaimeandres@uas.edu.mx, ORCID: 0009-0007-9816-8010

Recibido: Enero 2025, Aceptado: Marzo 2025, Publicado: Mayo 2025

Resumen:

Este estudio presenta el desarrollo y evaluación del desempeño de un sistema embebido de bajo costo para la detección de posibles precursores sísmicos a través del monitoreo del campo geomagnético terrestre. El sistema, basado en un magnetómetro fluxgate y una plataforma de adquisición con Raspberry Pi, permite la obtención de datos crudos con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Se analizaron eventos sísmicos, aplicando técnicas de procesamiento digital como el filtro de media móvil y la DWT. Los resultados obtenidos fueron comparados con registros de la estación geomagnética de Tucson, mostrando patrones anómalos similares previos a los eventos sísmicos, lo que sugiere la viabilidad del sistema propuesto para identificar posibles precursores sísmicos. Se concluye que este tipo de sistemas puede contribuir a redes de monitoreo más accesibles y escalables para la mitigación de riesgos sísmicos.

Palabras Clave: "monitoreo geomagnético", "precursores sísmicos", "magnetómetro fluxgate", "filtros digitales", "transformada wavelet", "análisis de señales".

Abstract:

This study presents the development and Performance evaluation of a low-cost embedded system for the detection of potential seismic precursors through monitoring the Earth's geomagnetic field. The system, based on a fluxgate magnetometer and a Raspberry Pi acquisition platform, allows the acquisition of raw data with a sampling rate of 1 Hz. Relevant seismic, applying digital processing techniques such as the moving average filter and the DWT. The results obtained were compared with records from the Tucson geomagnetic station, showing similar anomalous patterns prior to seismic events, suggesting the viability of the proposed system to identify potential seismic precursors. It is concluded that this type of system can contribute to more accessible and scalable monitoring networks for seismic risk mitigation.

Index Terms:

"Geomagnetic monitoring", "seismic precursors", "fluxgate magnetometer", "digital filters", "wavelet transform", "signal analysis".

1. Introducción

En los últimos años, los terremotos han continuado teniendo un impacto significativo a nivel mundial. Por ejemplo, en 2023, el terremoto que afectó a Turquía y Siria resultó en más de 56,000 muertes y pérdidas económicas superiores a los 42 mil millones de dólares [1]. Estos eventos subrayan la necesidad de sistemas de monitoreo sísmico más efectivos y accesibles. A pesar de los avances en geofísica y sismología, la predicción precisa del momento, ubicación y magnitud de un evento sísmico continúa siendo un desafío científico de gran complejidad. Según el informe de EM-DAT, en 2023 se registraron 399 desastres relacionados con peligros naturales, resultando en 86,473 muertes y afectando a 93.1 millones de personas. Las pérdidas económicas ascendieron a 202.7 mil millones de dólares [1]. Otro dato preocupante es cómo los terremotos pueden debilitar las balanzas comerciales y aumentar la deuda pública debido a los costos de reconstrucción [2]. Estos hallazgos refuerzan la importancia de desarrollar sistemas de monitoreo sísmico más eficientes y accesibles.

Ante esta problemática, ha surgido un creciente interés en la identificación de precursores sísmicos, es decir, señales físicas detectables que preceden a un sismo. Entre estos, las anomalías en el campo electromagnético terrestre han sido ampliamente estudiadas como posibles indicadores tempranos de actividad tectónica inminente. Diversos estudios [3], [4]. han reportado correlaciones entre variaciones geomagnéticas y la ocurrencia de eventos sísmicos, lo que ha motivado el desarrollo de sistemas de monitoreo dedicados a este tipo de señales.

Se ha observado que los terremotos pueden estar precedidos por alteraciones en una amplia gama de frecuencias electromagnéticas, incluyendo ULF. Estos fenómenos pueden ser causados por la acumulación de tensiones en las placas tectónicas, movimientos de fluidos subterráneos o la generación de cargas eléctricas en zonas de fractura [5]. Por ejemplo F. Freud comenta los procesos físicos en señales pre-sísmicas, señalando entre ellos cómo la deformación previa al sismo genera campos eléctricos por efecto piezoeléctrico [6].

O también I. Dobrovolsky et al. Hablan de Los procesos de deformación de la corteza ocurren con relativa rapidez cuando aparecen precursores a corto plazo en la etapa preparatoria final de un sismo tectónico, proporcionando información sobre el comportamiento de los precursores a corto plazo en las corrientes telúricas y el campo geomagnético [7].

Por lo tanto, monitorear el campo magnético terrestre de forma continua y con alta sensibilidad se ha convertido en una línea de investigación prometedora para la mitigación de riesgos sísmicos.

Este artículo presenta el diseño, implementación y evaluación del desempeño de un sistema embebido de bajo costo para la detección de precursores sísmicos mediante el análisis de señales geo-electromagnéticas. El sistema incluye un magnetómetro fluxgate triaxial, un

IJISTA, Vol. 1, Núm. 1, Mayo 2025, ISSN (en trámite)

ADC de 32 bits y una plataforma basada en Raspberry Pi para la adquisición y almacenamiento de datos, aunque su tamaño y versatilidad permiten su uso e instalación en otras regiones, el dispositivo se mantuvo operando en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Se analizaron eventos sísmicos registrados en un periodo comprendido entre 2017 a 2019, en territorio mexicano debido a la disponibilidad de datos de la estación de desarrollo propia, aplicando técnicas de procesamiento digital como el filtro de media móvil y la DWT. Los resultados obtenidos se compararon con datos de la estación internacional de Tucson, evaluando así el desempeño del sistema propuesto.

Este trabajo contribuye al desarrollo de tecnologías accesibles para el monitoreo sísmico, de fácil instalación y uso, abriendo nuevas posibilidades para la detección temprana de eventos geofísicos mediante redes distribuidas de sensores geomagnéticos.

2. Trabajos Relacionados

a. Fundamentos del Monitoreo Geomagnético

El estudio del campo magnético terrestre y su posible relación con la actividad sísmica ha sido objeto de investigación desde hace más de medio siglo. En los años 50, E. H. Vestine propuso teorías fundamentales sobre la interacción entre el campo magnético solar y terrestre [8], lo anterior abrió camino para estudios geomagnéticos en la Tierra.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se desarrollaron los primeros sensores fluxgate, inicialmente utilizados para la detección de submarinos. Sin embargo, tras el conflicto, estos sensores encontraron nuevas aplicaciones en la exploración geofísica, la prospección de minerales y la investigación espacial [9]. En 1958, el satélite Sputnik 3 transportó un magnetómetro fluxgate, marcando el inicio de su uso en misiones espaciales.

b. Magnetometría aplicada a eventos sísmicos

Uno de los estudios pioneros en correlacionar señales magnéticas con sismos fue el de M. J. S. Johnston y R. J. Mueller quienes reportaron desplazamientos en el campo magnético durante el terremoto de North Palm Springs (California, 1986), empleando una red de 24 magnetómetros de protones. Observaron variaciones de hasta 1.2 nT a distancias de 3–9 km del epicentro, lo que validó la hipótesis de que los terremotos pueden inducir anomalías magnéticas medibles [10].

Más adelante, el terremoto de Kagoshima (1996) en Japón proporcionó una de las primeras evidencias claras de anomalías ultra baja frecuencia (ULF) antes de un evento sísmico, como reporta S. Uyeda. et al. Estas anomalías han sido asociadas a cargas eléctricas generadas por la fricción de placas tectónicas, difusión de gases o efectos piezoeléctricos [11].

c. Técnicas de análisis y evolución tecnológica

El avance en técnicas de procesamiento de señales ha permitido analizar las variaciones geomagnéticas con mayor precisión. Por ejemplo, A. Grinsted. et al. Propusieron el uso de la transformada wavelet para estudiar la coherencia entre señales geofísicas, lo que sentó una base sólida para su uso en la detección de precursores sísmicos [12].

En 2010 A. Baschirotto et al. Presentaron un sistema automático de medición del campo magnético terrestre utilizando un magnetómetro fluxgate integrado en una arquitectura embebida, capaz de capturar tanto la magnitud como la dirección del campo, este dispositivo tenía un rango de hasta ~60 μ T Precisión angular de $\leq 1.5^{\circ}$ y una Resolución angular de ~0.5° [13].

Posteriormente, investigaciones como las de J. P. Amezquita Sánchez et al. En México utilizaron herramientas como la descomposición en modos empíricos (EMD) y la DWT para identificar señales anómalas previas a terremotos. Estas metodologías han demostrado ser eficaces para detectar patrones no lineales y transitorios, característicos de los precursores sísmicos [14], [15].

d. Nuevas evidencias y tendencias actuales

Recientes estudios han reforzado la hipótesis de las anomalías geomagnéticas como precursores confiables. Y. Huang demostró una correlación de hasta 85% entre anomalías magnéticas y eventos sísmicos en Sichuan, China, utilizando un algoritmo que analiza la energía de las señales geomagnéticas [4]. Por otro lado, en el artículo de S. Harrigan et al. Aplicaron técnicas de análisis estocástico para detectar señales pre-sísmicas en los datos satelitales de la misión Swarm [3]. Además, M. Tsutsui en Japón, reportó la detección de ondas electromagnéticas directamente generadas por terremotos [16], mientras que F. Dudkin et al. Analizaron señales en la ionósfera capturadas por microsatélites, corroborando que los sismos generan efectos electromagnéticos observables en altitudes elevadas [17].

e. Dispositivos de bajo costo para monitoreo geomagnético

En los últimos años se han propuesto diversos sistemas portátiles y económicos para el monitoreo geomagnético. Entre ellos destacan varios dispositivos, junto con el desarrollado por nosotros, como se puede apreciar en la Tabla 1 uno la comparativa entre nuestro sistema y el mostrado en otras propuestas:

Tabla 1. Comparativa de sistemas similares.

Sistema	Componen tes Principale s	Aplicaci ón Princip al	Ventajas
Sistema	Magnetóm	Detecció	Procesamien
propio	etro de	n de	to avanzado
(Este	flujo,	precurso	(DWT, filtro
trabajo)	Raspberry		media

	Pi, ADC 32 bits.	res sísmicos	móvil), diseñado especialmen te para detectar precursores sísmicos.
Three Day Mag [18]	Raspberry Pi Zero sensores COTS	Monitor eo educativ o y ciudadan o	Bajo costo, fácil implementa ción
Magnetóm etro PSWS [19]	Sensores Magneto- Inductivos, Cots	Monitor eo del clima espacial	Alta resolución (~3 nT)
Dispositivo volcánico [20]	Sensor de flujo, inclinómetr o, GPS.	Medició n de anomalí as magnéti cas locales	Bajo costo, portátil.

A diferencia de sistemas como Three Day Mag el cual es de uso educativo con una frecuencia de muestreo de 1 Hz[18] y PSWS una resolución de campo de ~3 nT a una frecuencia de muestreo de 1 Hz. El rango de medición del sensor es de $\pm 1, 1 \times 10^{-1}$ nT [19]. El sistema propuesto ofrece una solución de bajo costo con componentes fácilmente disponibles, lo que facilita su implementación en regiones con recursos limitados. Además, su diseño modular permite una fácil expansión y adaptación a diferentes entornos geográficos. Como también está diseñado específicamente para detectar posibles precursores sísmicos, si necesidad de modificación adicional en el sistema.

Adicionalmente nuestro prototipo ofrece 0.1 nT de resolución de sensibilidad, 32 bits de resolución en el ADC y autonomía de operación 24/7 con consumo inferior a 2 W, lo que facilita su despliegue masivo en zonas remotas.

3. Metodología.

a. Arquitectura General del Sistema

El sistema propuesto fue diseñado con el objetivo de registrar variaciones del campo magnético terrestre asociadas a posibles precursores sísmicos, mediante una plataforma de adquisición de datos autónoma, de bajo costo y fácil implementación. La arquitectura general está compuesta por un sensor magnetómetro fluxgate triaxial, un convertidor analógico-digital (ADC), una plataforma embebida para adquisición y almacenamiento de datos, y herramientas de procesamiento digital.

La estación se instaló en un entorno controlado en las instalaciones de la universidad autónoma de Sinaloa, protegido con un gabinete industrial para minimizar interferencias externas, y se operó de manera continua durante varios meses.

b. Componentes Principales

- Magnetómetro Fluxgate (MAG 690-1000): Sensor triaxial con un rango de ±100 μT y una resolución de 0.1 nT. Este tipo de sensor ha sido ampliamente validado para mediciones geofísicas de baja frecuencia, dada su estabilidad y sensibilidad.
- ADC (ADS1262): ADC de 32 bits, diseñado y ensamblado por nosotros en una placa tipo *shield* personalizada para su integración con sistemas embebidos. La digitalización se realiza a una frecuencia de muestreo de 1 Hz, suficiente para capturar variaciones ULF del campo magnético.
- Unidad de procesamiento embebida (Raspberry Pi 3): Se empleó como unidad principal para el almacenamiento local, gestión de archivos y operación del sistema de adquisición en tiempo real. Adicionalmente, se realizaron pruebas con plataformas más avanzadas (como la DE0-Nano SoC) para evaluar su potencial en procesamiento paralelo mediante FPGA.
- Gabinete de protección industrial: Para aislar el sistema de interferencias electromagnéticas locales y protegerlo de condiciones ambientales adversas de la marca ABB IP65 de 350mm X 260 mm.
- Fuente de alimentación: una fuente de alimentación con salida de ±5 V especialmente diseñada para alimentar el sensor y el ADC, y evitar variaciones en el suministro eléctrico que pudieran generar ruido en la medición.

La Fig. 1 corresponde al armado del prototipo en su respectivo gabinete industrial en donde se puede apreciar el sensor, la fuente de alimentacion de fabricacion propia, la tarjeta Shield tambien de diseño propia y la Raspberry Pi. IJISTA, Vol. 1, Núm. 1, Mayo 2025, ISSN (en trámite)



Fig. 1. Estación de monitoreo geo electromagnético.

De igual manera el script utilizado para la adquisición y guardado de datos, fue también desarrollado por nosotros, logrando una medición constante y estable. Para el procesamiento de señales, se implementaron algoritmos existentes de DWT y Filtros media móvil, adaptados a las necesidades específicas del sistema.

c. Adquisición de Datos

El sistema operó de forma casi continua durante el periodo de evaluación, registrando señales en datos crudos y almacenándolas como archivos CSV. Se seleccionaron dos eventos sísmicos en el territorio mexicano: Las Choapas (Veracruz) y Cihuatlán (Jalisco). La validez de los eventos fue confirmada mediante los registros del Servicio Sismológico Nacional.

Para evitar sesgos por perturbaciones de origen solar, se empleó el índice de tiempo de tormenta perturbadora (DST) por sus siglas en inglés, proporcionado por el World Data Center for Geomagnetism (Kyoto, Japón), como criterio para filtrar días de baja actividad geomagnética

d. Procesamiento de Señales

3.4.1 Filtro de Media Móvil

Con el objetivo de reducir el ruido de alta frecuencia no relacionado con fenómenos geofísicos, se aplicó un filtro de media móvil simple con una ventana de 10 muestras. Esta técnica permite atenuar fluctuaciones aleatorias sin distorsionar significativamente la señal principal.

3.4.2. Transformada Wavelet Discreta (DWT)

Posteriormente, se empleó la DWT, utilizando funciones Daubechies de orden 4 (db4), hasta el tercer nivel de descomposición. Esta técnica es efectiva para

identificar patrones transitorios y localizar anomalías en el dominio tiempo-frecuencia. Se analizaron los coeficientes de detalle (D1, D2 y D3), considerando como anomalías potenciales aquellos picos que excedieran la varianza normal de la señal suavizada. Todo el procesamiento fue realizado en Python y MATLAB, permitiendo visualización gráfica, análisis comparativo.

e. Comparación con datos externos

Para comparar los datos obtenidos por el sistema propio, estos se compararon con los registros de la estación geomagnética de Tucson (Arizona, EE. UU.). Dicha estación pertenece a INTERMAGNET, una red global de observatorios magnéticos que monitoriza el campo magnético terrestre. INTERMAGNET proporciona datos precisos, basados en estándares modernos de medición, los cuales son públicos y están disponibles en línea. La red es ampliamente reconocida por la alta calidad y confiabilidad de sus mediciones de campos magnéticos Esta estación fue seleccionada por su cercanía relativa a México y su cobertura continua durante los eventos analizados. A las señales obtenidas por ambas estaciones (local y externa) se les aplicaron los mismos procedimientos de procesamiento, lo que permitió realizar comparaciones directas entre las series temporales. Se prestó especial atención a las similitudes en patrones anómalos antes, durante y después de los eventos sísmicos.

f. Selección de eventos sísmicos.

Para seleccionar los eventos a analizar, se establecieron los siguientes criterios:

- Origen y Magnitud: Se consultó el Servicio Sismológico Nacional de México para identificar sismos con magnitud superior a M5.
- Disponibilidad de Datos: Se verificó que las fechas de estos sismos coincidieran con la disponibilidad de datos en la estación propia y en la de Tucson. Era esencial contar con datos suficientes, continuos y estables durante el evento sísmico, así como en los 4 días anteriores y los 4 días posteriores al mismo.
- Condiciones Geomagnéticas: Se consideró el índice DST. Se seleccionaron eventos donde el índice DST estuviera cercano a 0, lo cual indica condiciones geomagnéticas tranquilas y ayuda a evitar ruido en la medición.
- g. Condiciones de prueba
 - Duración del Experimento: El periodo de operación fue entre 2017 y 2019 casi continuos.
 - Ubicación: Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en la Ciudad Universitaria.
 - Condiciones de Instalación: Se instaló lejos de cualquier interferencia electromagnética, en

IJISTA, Vol. 1, Núm. 1, Mayo 2025, ISSN (en trámite)

una zona sin humedad y alejada del sol para evitar cualquier posible fallo, el lugar fue acceso controlado y suministro eléctrico constante.

h. Consideraciones Éticas y Técnicas

El sistema fue operado bajo estrictas medidas de control eléctrico y de aislamiento magnético. No se requirió el uso de datos personales ni intervención humana directa en la recolección de datos, por lo que no se identifican conflictos éticos en la ejecución de este trabajo.

4. Resultados

a. Evaluación general del sistema

El sistema embebido propuesto logró registrar con éxito variaciones geomagnéticas que precedieron a eventos sísmicos. Se analizaron señales provenientes de dos eventos sísmicos.

En las señales de los tres ejes magnéticos (X, Y, Z) se seleccionó el eje que mejor parece respondió a valores anómalos y fueron procesadas aplicando filtro de media móvil y la DWT, con el objetivo de identificar posibles anomalías pre-sísmicas.

b. Evento 1: Sureste de Salina Cruz, Oaxaca (M6.8)

- Fecha del evento: 22 de agosto de 2018.
- Coordenadas epicentrales: 15.70° N, 94.98°.
- Magnitud: Mw 6.8.
- Fuente: Servicio Sismológico Nacional.

Las señales captadas por la estación propia (UAS) muestran fluctuaciones notables en el eje X durante las seis horas previas al sismo. En particular, el eje X presentó una variación de hasta 8 nT, lo cual coincide con las observaciones de la estación Tucson para ese mismo periodo en el mismo eje, En la Fig. 2 se puede apreciar los datos crudos obtenidos por la estación UAS en el eje X.



También se toman los datos de la estación Tucson del eje X para poder comparar con la estación UAS, como se muestra en la Fig. 3 los datos crudos:



Fig. 3. Datos estación Tucson eje X evento del sureste de salina cruz.

Una vez obtenido los datos crudos, de los ejes X para este caso, se aplicó tanto el filtro medio móvil como el DWT obteniendo la Fig. 4 la cual corresponde a los datos de la estación UAS aplicando los filtros antes mencionados y la Fig. 5 corresponde a los datos de la estación Tucson, respectivamente.



Fig. 4. Datos estacion UAS. Eje X filtro media movil y DWT evento del sureste de salina cruz.

IJISTA, Vol. 1, Núm. 1, Mayo 2025, ISSN (en trámite)



Fig. 5. Datos estación Tucson, eje X filtro media móvil y DWT del evento del sureste de salina cruz.

Tras aplicar DWT, se identificaron tres picos anómalos en los coeficientes de detalle (nivel D2), con morfología similar al evento principal. Estas anomalías aparecen entre 2 y 6 horas antes del sismo. El patrón de "precursor tipo explosión" observado es coherente con lo reportado por O. Chavez et al. Quienes identificaron eventos similares utilizando técnicas DWT [15] y también como menciona S. Uyeda pueden ser detectadas en este tipo de señales [21]. Como se marcan en la Fig. 6, los posibles eventos detectados según la literatura y cotejados con los datos de la estación Tucson al inspeccionar los resultados en las gráficas al aplicar DWT.



Fig. 6. Datos estación UAS. Eje X filtro media móvil y DWT evento del sureste de salina cruz, mostrando posibles anomalías.



Becerra-Jiménez, J.A., Millán-Almaraz, J.R., Vázquez-Becerra, G.E., Pio-Rodríguez, G. (2025). Detección de Precursores Sísmicos con un Sistema Embebido de Bajo Costo. *International Journal of Information Science and Technological Applications-UAS IJISTA*, 1(1), 21-31. Doi (en trámite).



Fig. 7. Datos estación Tucson, eje X filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

- c. Evento 2: Oeste de Cihuatlán, Jalisco (M5.7)
 - Fecha del evento: 10 de octubre de 2018
 - Coordenadas epicentrales: 19.24° N, 104.61°
 - Magnitud: Mw 5.7

Para este evento se encontró una gran anomalía en los datos obtenidos el día del evento en el eje Z, y este mismo efecto se encuentra uno y dos días antes del sismo, lo cual podría tratarse de eventos pre sísmicos, por eso se decidió trabajar con ellos en la estación UAS, obteniendo la Fig. 8 la cual muestra los datos crudos del eje Z.



En el caso de la estación estación Tucson, también se analizó el eje Z. para compárala con el resultado de la estación UAS, como se muestra en la Fig. 9 los datos crudos.

IJISTA, Vol. 1, Núm. 1, Mayo 2025, ISSN (en trámite)



Cihuatlán, Jalisco.

De manera similar para este evento, pero en eje Z se aplicó tanto el filtro medio móvil como el DWT obteniendo la Fig. 10 para la estación UAS y la Fig. 11 para la estación Tucson.



Fig. 10. Datos estación UAS. Eje Z filtro media movil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.



Fig. 11. Datos estación Tucson, Eje Z filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.

Tras aplicar el procesamiento digital, se detectaron anomalías consistentes en tres momentos distintos, dos días antes, el día del sismo, y un día después como se señala en la Fig. 12. Para la estación UAS La presencia de un patrón repetido con características similares de amplitud y duración sugiere la existencia de precursor y evento post-sísmico.



evento de Cihuatlán, Jalisco mostrando posibles anomalías.

En el caso de la estación Tucson también se puede observar un comportamiento similar, en los posibles eventos, pero siendo menos claro el resultado como se muestra en la Fig. 13.



Fig. 13. Datos estación Tucson. Eje z media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco mostrando posibles anomalías.

El patrón observado especialmente en la Fig. 12 y menos claro, pero aún se puede resaltar en la Fig.13 reforzando lo propuesto por autores como J. P. Amezquita Sánchez et al. Quienes reportaron señales fractales y oscilatorias con comportamiento repetitivo como indicios de procesos geofísicos inminentes [14].

d. Evaluación Comparativa y Observaciones

En ambos eventos analizados:

- Se encontraron similitudes morfológicas en las anomalías detectadas por el sistema propio y la estación externa (Tucson), especialmente en los ejes donde se concentró la actividad magnética.
- Las anomalías pre-sísmicas aparecieron consistentemente entre 2 y 6 horas antes del evento principal, con amplitudes relativas entre 6–10 nT en los datos crudos.
- Las señales post-sísmicas también fueron visibles, repitiendo en algunos casos los patrones precursores con menor intensidad.

Estas observaciones sugieren que el sistema propuesto puede detectar patrones relevantes, aunque se requiere mayor volumen de datos y análisis estadísticos más robustos para confirmar su efectividad predictiva.

e. Recomendaciones Metodológicas Futuras

- Incorporar análisis de correlación cruzada o índice de similitud (como Pearson o Spearman) para comparar cuantitativamente las señales entre estaciones.
- Automatizar la detección de anomalías usando técnicas de inteligencia artificial o análisis no supervisado (como clustering o autoencoders).
- Aumentar el número de eventos analizados para evaluar sensibilidad y especificidad del sistema

ante distintas magnitudes y profundidades sísmicas.

En la Tabla 2, se puede apreciar, el resumen de los eventos y sus resultados, para ejemplificar mejor, los datos obtenidos.

Tabla 2.	Resumen de event	os sísmicos	analizados y
resultados obtenidos.			

Eve nto	Fech a	Ma gnit ud	Eje pri nci pal	Tie mp o ant es del eve nto	Coinc idenc ia con datos exter nos	Obser vacion es
Sali na Cru z, Oax aca	22/0 8/20 18	6.8	X	2– 6 h ant es	Alta	Patrón similar al evento princip al detecta do con DWT
Cih uatl án, Jalis co	10/1 0/20 18	5.7	Z	1– 2 día s ant es y 1 día des pué s	Mode rada	Eviden cia de precurs or y post- evento con compo rtamie nto repetiti vo

f. Discusión

4.6.1 Interpretación de anomalías pre-sísmicas

- Evento Salina Cruz (Mw 6.8): La detección de picos anómalos 2–6 h antes del sismo en el eje X coincide con rangos reportados por O. Chavez et al. Quienes documentaron anomalías ULF en ventanas de 1–12 h previas y posteriores al sismo [15].
- Evento Cihuatlán (Mw 5.7): Los patrones repetitivos en el eje Z, con eventos pre y post-sísmicos, son similares a los descritos también en el artículo de O. Chavez et al. Al aplicar DWT a los datos [15].

4.6.2 Comparación con sistemas previos

IJISTA, Vol. 1, Núm. 1, Mayo 2025, ISSN (en trámite)

Frente a Three Day Mag (resolución \approx 7 nT, muestreo 5 Hz) y PSWS (resolución 3 nT, 1 Hz), nuestro prototipo ofrece:

- Sensibilidad de 0.1 nT
- Resolución del ADC de 32 bits
- Bajo consumo energético, <2 W, y aislado a ruido eléctrico.
- Dispositivo open Hardware/software, lo que permite ser replicado y escalado.

Estas mejoras técnicas permiten detectar anomalías de menor amplitud, operar en zonas sin energía estable y poder adaptarlo al estudio necesario.

- 4.6.3 Limitaciones del estudio
 - Número de Eventos: Solo dos eventos con anomalías claras.
 - Resolución Temporal: La frecuencia de muestreo de 1 Hz puede omitir transitorios <1s.

4.6.4 Implicaciones y líneas futuras

- Redes Distribuidas: La escalabilidad del sistema permite crear redes densas en regiones de alta sismicidad con bajo costo.
- IA y Machine Learning: Gracias al hardware que se tiene es posible Integrar algoritmos de detección automática mejorará la identificación de precursores en tiempo real.
- Comparación Multicéntrica: Evaluar con datos de estaciones cercanas reforzará la generalización de los hallazgos.
- Uso de diferentes sensores para evaluar su resultado y optimizar la relación costo desempeño.

5. Conclusiones

Este estudio demostró con éxito el desarrollo implementación y evaluación de un sistema embebido de bajo costo para el monitoreo geo-electromagnético orientado a la detección de precursores sísmicos. El sistema, basado en un magnetómetro fluxgate y una plataforma Raspberry Pi, operó de forma autónoma y registró datos que, tras ser procesados con filtros digitales y DWT, revelaron anomalías geomagnéticas previas a eventos sísmicos relevantes en México. La correspondencia de estas anomalías con registros de estaciones internacionales y patrones descritos en la literatura sugiere la viabilidad del sistema para identificar posibles precursores. En definitiva, este trabajo aporta una solución accesible y escalable que puede contribuir significativamente al desarrollo de redes de monitoreo

más amplias para la mitigación de riesgos sísmicos en regiones vulnerables

6. Referencias

[1] J. Ballester *et al.*, "Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022," *Nat Med*, vol. 29, no. 7, pp. 1857–1866, Jul. 2023, doi: 10.1038/s41591-023-02419-z.

[2] C. G. Aksoy, M. Chupilkin, Z. Koczan, and A. Plekhanov, "Unearthing the impact of earthquakes: A review of economic and social consequences," *Journal of Policy Analysis and Management*, Sep. 2024, doi: 10.1002/pam.22642.

[3] S. Harrigan *et al.*, "Detection of Electromagnetic Seismic Precursors from Swarm Data by Enhanced Martingale Analytics," *Sensors*, vol. 24, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.3390/s24113654.

[4] Y. Huang, P. Zhu, and S. Li, "Feasibility Study on Earthquake Prediction Based on Impending Geomagnetic Anomalies," *Applied Sciences* (*Switzerland*), vol. 14, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14010263.

[5] O. M. Saad *et al.*, "Earthquake Forecasting Using Big Data and Artificial Intelligence: A 30-Week Real-Time Case Study in China," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 113, May 2023, doi: 10.1785/0120230031.

[6] F. Freund, "Pre-earthquake signals: Underlying physical processes," *J Asian Earth Sci*, vol. 41, no. 4, pp. 383–400, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.009.

[7] I. P. Dobrovolsky, N. I. Gershenzon, and M. B. Gokhberg, "Theory of electrokinetic effects occurring at the final stage in the preparation of a tectonic earthquake," *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 57, no. 1, pp. 144–156, 1989, doi: https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90224-0.

[8] E. H. Vestine, "Winds in the upper atmosphere deduced from the dynamo theory of geomagnetic disturbance," *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, vol. 59, no. 1, pp. 93–128, 1954, doi: https://doi.org/10.1029/JZ059i001p00093.

[9] D. Gordon and R. Brown, "Recent advances in fluxgate magnetometry," *IEEE Trans Magn*, vol. 8, no. 1, pp. 76–82, 1972, doi: 10.1109/TMAG.1972.1067268.

[10] M. J. S. Johnston and R. J. Mueller, "Seismomagnetic Observation During the 8 July 1986 Magnitude 5.9 North Palm Springs Earthquake," *Science (1979)*, vol. 237, no. 4819, pp. 1201–1203, 1987, doi: 10.1126/science.237.4819.1201. [11] S. Uyeda, T. Nagao, and H. Tanaka, "A report from the RIKEN international frontier research project on earthquakes (IFREQ)," *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, vol. 15, pp. 269–310, Apr. 2004, doi: 10.3319/TAO.2004.15.3.269(EP).

[12] A. Grinsted, J. Moore, and S. Jevrejeva, "Application of Cross Wavelet Transform and Wavelet Coherence to Geophysical Time Series," *Nonlinear Process Geophys*, vol. 11, Apr. 2004, doi: 10.5194/npg-11-561-2004.

[13] A. Baschirotto, E. Dallago, M. Ferri, P. Malcovati, A. Rossini, and G. Venchi, "A 2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup," *Measurement*, vol. 43, no. 1, pp. 46–53, 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.06. 007.

[14] J. P. Amezquita Sanchez, O. Chavez Alegria, M. Valtierra Rodriguez, J. A. L. Cruz Abeyro, J. R. Millan Almaraz, and A. Dominguez Gonzalez, "Detection of ULF Geomagnetic Anomalies Associated to Seismic Activity Using EMD Method and Fractal Dimension Theory," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 2, pp. 197–205, Feb. 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.7854612.

[15] O. Chavez, J. R. Millan-Almaraz, J. Rodríguez-Reséndiz, J. P. Amezquita-Sanchez, M. Valtierra-Rodriguez, and J. A. L. Cruz-Abeyro, "DWT-based methodology for detection of seismic precursors on electric field signals in Mexico," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 9, no. 1, pp. 281–294, 2018, doi: 10.1080/19475705.2018.1428229.

[16] M. Tsutsui, "Behaviors of Electromagnetic Waves Directly Excited by Earthquakes," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 11, pp. 1961–1965, Apr. 2014, doi: 10.1109/LGRS.2014.2315208.

[17] F. Dudkin, V. Korepanov, D. Dudkin, V. Pilipenko, V. Pronenko, and S. Klimov, "Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1–60 Hz," *Geophys Res Lett*, vol. 42, pp. 5686–5693, Apr. 2015, doi: 10.1002/2015GL064595.

[18] A. Vajuravel, E. Khoshaba, F. Andrade, T. Garcia, and P. J. Chi, "A Low-cost SMART System for Real-Time Geomagnetic Field Monitoring," in *AGU Fall Meeting Abstracts*, Dec. 2023, pp. GP01-04.

[19] H. Kim *et al.*, "Citizen science: Development of a low-cost magnetometer system for a coordinated space weather monitoring," *HardwareX*, vol. 20, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.ohx.2024.e00580.

[20] B. M. De Groot and L. V. De Groot, "A lowcost device for measuring local magnetic anomalies in volcanic terrain," *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 217–225, Aug. 2019, doi: 10.5194/gi-8-217-2019.

[21] S. Uyeda, T. Nagao, and M. Kamogawa, "Short-term earthquake prediction: Current state of seismo-electromagnetics," *Tectonophysics*, vol. 470, pp. 205–213, May 2010, doi: 10.1016/j.tecto.2008.07.019.