

# Diseño de un sistema de seguimiento espacial de zonas de mayor estrés electromagnético interno y correlación con eventos sísmicos o térmicos

## Abstract

El presente trabajo desarrolla un marco teórico y metodológico para la construcción de un sistema de cartografía predictiva fundamentado en el **Modelo Electromagnético Toroidal de Fozrzamamiento Interna (METFI)**. La propuesta central consiste en identificar, mediante técnicas de seguimiento espacial, aquellas regiones sometidas a **gradientes anómalos de estrés electromagnético interno**, correlacionando dichos patrones con la ocurrencia de eventos sísmicos y fenómenos térmicos de carácter geodinámico. El artículo se ciñe estrictamente a fuentes científicas independientes, sin vínculos con agencias o corporaciones susceptibles de conflicto de interés, tomando como referencia el legado de investigadores de renombre mundial que han demostrado la interrelación entre fenómenos electromagnéticos, termodinámica planetaria y actividad sísmica. La combinación de estos enfoques permite postular una arquitectura predictiva basada en datos empíricos de campo, series temporales y registros térmicos, articulando un mapa de riesgo dinámico que captura la evolución energética del subsuelo y la litosfera.

**Palabras clave** METFI (Modelo Electromagnético Termodinámico de Fluctuación Interna)-Estrés electromagnético interno-Cartografía predictiva-Seguimiento espacial-Correlación sísmica-Anomalías térmicas-Geodinámica electromagnética

## Introducción

La relación entre **dinámica electromagnética interna** y **procesos geofísicos** ha sido objeto de debate durante más de un siglo. Investigadores como **Nikola Tesla**, **Louis Néel** y **Andrey Kapitsa** contribuyeron a cimentar la idea de que el planeta posee una **estructura resonante interna**, sensible a fluctuaciones electromagnéticas de gran escala. Más recientemente, la obra de científicos como **Friedemann Freund**, con sus estudios sobre cargas eléctricas en minerales sometidos a estrés tectónico, o los trabajos de **Konstantin Khachikyan** sobre termodinámica sísmica, han proporcionado evidencia independiente de que los fenómenos electromagnéticos y térmicos constituyen **marcadores anticipatorios** de eventos sísmicos.

El **Modelo Electromagnético Termodinámico de Fluctuación Interna (METFI)** se articula en torno a la premisa de que el planeta Tierra puede concebirse como un sistema **electromagnético acoplado a la termodinámica del manto y la litosfera**, donde las variaciones de equilibrio interno generan patrones de estrés detectables. Estos patrones no sólo anteceden a la liberación de energía en forma de terremotos, sino que también se manifiestan en **anomalías térmicas de superficie y subsuelo**.

La propuesta de una **cartografía predictiva** fundamentada en METFI consiste en el diseño de un sistema de seguimiento capaz de mapear en tiempo real los gradientes electromagnéticos internos y su convergencia en regiones de alta vulnerabilidad sísmica o térmica. A diferencia de los enfoques convencionales centrados únicamente en datos sísmicos pasados, este marco prioriza la **captura energética previa al colapso**, lo cual otorga al mapa predictivo un carácter dinámico y anticipatorio.

# Fundamentos teóricos del METFI aplicado a cartografía predictiva

El **Modelo Electromagnético Termodinámico de Fluctuación Interna (METFI)** propone que la Tierra debe comprenderse como un sistema **multicapas resonante**, donde las dinámicas electromagnéticas internas y las variaciones termodinámicas del manto se encuentran fuertemente acopladas. La hipótesis central sostiene que:

1. El núcleo y el manto actúan como **osciladores acoplados**, capaces de almacenar y liberar energía en forma de fluctuaciones electromagnéticas.
2. Dichas fluctuaciones no son caóticas, sino que siguen **patrones de resonancia** dependientes de la geometría interna de la Tierra.
3. El estrés electromagnético acumulado se correlaciona con fases de **inestabilidad sísmica** y **emisión térmica**.

El METFI, aplicado a la **cartografía predictiva**, no se limita a describir la actividad sísmica a partir de registros históricos, sino que integra:

- **Datos electromagnéticos** obtenidos mediante sensores terrestres y satelitales.
- **Anomalías térmicas** de superficie y subsuelo.
- **Gradientes espaciales** de estrés energético, que se distribuyen de manera heterogénea en la corteza.

Este enfoque permite construir un **mapa dinámico de riesgo**, en el que las zonas de mayor inestabilidad electromagnética y térmica aparecen como **precursores verificables** de eventos geodinámicos.

## Conexiones históricas y científicas

La propuesta de un modelo electromagnético predictivo encuentra respaldo en varios hitos científicos:

- **Nikola Tesla (1856-1943)**  
Tesla intuyó que la Tierra podía comportarse como un **cuerpo resonante** con oscilaciones electromagnéticas globales. Aunque sus experimentos con ondas estacionarias no fueron formalmente aplicados a la predicción sísmica, su concepción de un planeta como sistema resonante se encuentra en sintonía con el METFI.
- **Louis Néel (1904-2000)**  
Premio Nobel de Física en 1970, aportó estudios sobre el **magnetismo de rocas y minerales**, mostrando cómo pequeñas variaciones electromagnéticas podían revelar la historia térmica y tectónica de la Tierra. Estos hallazgos apoyan la idea de que las **anomalías magnéticas** pueden ser rastreadas para inferir estados de tensión interna.
- **Friedemann Freund (NASA Ames Research Center, sin conflicto de interés con corporaciones privadas)**  
Sus investigaciones han demostrado que los minerales sometidos a estrés tectónico liberan **portadores de carga eléctrica** (denominados “defectos de oxígeno peróxido”), capaces de generar señales electromagnéticas previas a terremotos. Freund ha publicado en *Journal of Geodynamics* y *Physics and Chemistry of the Earth* trabajos que prueban que estos fenómenos son **detectables antes de la fractura sísmica**.

- **Andrey Kapitsa (1931-2011, geofísico ruso)**  
Reconocido por sus estudios en la Antártida, Kapitsa desarrolló modelos de **transferencia térmica en estructuras continentales**, aportando a la comprensión de cómo los flujos de calor y gradientes térmicos se integran en procesos de inestabilidad litosférica.
- **Konstantin Khachikyan (Instituto de Física de la Tierra, Moscú)**  
Especialista en **termodinámica sísmica**, planteó que el calentamiento localizado en regiones de subducción y fallas activas es un **precursor directo** de terremotos, sugiriendo la necesidad de un sistema global de seguimiento térmico.

En conjunto, estas contribuciones fortalecen la idea de que el **estrés electromagnético y térmico interno** puede ser **mapeado espacialmente** como indicador de riesgo.

## Conceptualización del mapa predictivo

El mapa predictivo bajo el marco METFI se construye en tres capas principales:

1. **Capa electromagnética:** registra fluctuaciones en la intensidad del campo geomagnético y en la propagación de ondas electromagnéticas de baja frecuencia.
2. **Capa térmica:** incorpora anomalías detectadas por satélites infrarrojos y sensores de flujo geotérmico superficial.
3. **Capa tectónica:** contextualiza las anteriores dentro de marcos de fallas, zonas de subducción o dorsales oceánicas.

La superposición de estas capas genera una cartografía capaz de identificar regiones en las que la convergencia de anomalías aumenta la probabilidad de un evento sísmico o térmico.

## Metodología del sistema de seguimiento espacial

El diseño de un sistema de **cartografía predictiva basada en METFI** requiere un enfoque integral que combine mediciones **electromagnéticas, térmicas y tectónicas**. El objetivo metodológico no se centra en la predicción determinista de un evento puntual, sino en la construcción de un **mapa de inestabilidad dinámica** que refleje zonas con alto potencial de liberación energética.

## Instrumentación

La instrumentación se distribuye en **tres niveles complementarios**: terrestre, subterráneo y satelital.

### a) Instrumentación terrestre

- **Magnetómetros de inducción de alta sensibilidad** (rango nT, resolución temporal en ms) para registrar variaciones locales del campo geomagnético.
- **Sensores VLF/ULF** (Very Low / Ultra Low Frequency) que permiten capturar emisiones electromagnéticas previas a rupturas tectónicas, asociadas a cargas generadas en rocas bajo estrés.
- **Estaciones térmicas superficiales** equipadas con termopares de precisión y cámaras infrarrojas, útiles para la detección de anomalías puntuales de temperatura.
- **Electrodos de potencial espontáneo** enterrados, que permiten registrar variaciones de voltaje asociadas a corrientes inducidas por tensiones tectónicas.

## b) Instrumentación subterránea

- **Pozos instrumentados** con sensores de flujo térmico y magnetómetros profundos, capaces de eliminar interferencias atmosféricas.
- **Redes geoelectricas de resistividad** para identificar variaciones en la conductividad asociadas a microfracturación o presencia de fluidos.

## c) Instrumentación satelital

- **Radiometría infrarroja de alta resolución** (como la usada en satélites tipo MODIS o Landsat, pero con mayor frecuencia de muestreo) para detección de anomalías térmicas regionales.
- **Magnetómetros satelitales vectoriales** para registrar cambios en la morfología del campo geomagnético global.
- **Interferometría SAR (InSAR)**, útil para detectar deformaciones milimétricas de la superficie terrestre que acompañan acumulación de estrés tectónico.

## Parámetros de medición

Cada tipo de sensor debe integrarse en un **sistema normalizado de parámetros**, de forma que los registros puedan ser correlacionados.

### 1. Electromagnéticos

- Intensidad del campo geomagnético local (variaciones  $\geq 5$  nT consideradas significativas).
- Frecuencia e intensidad de emisiones ULF/VLF (0.01–20 Hz).
- Gradientes de potencial eléctrico espontáneo (variaciones  $\geq 50$  mV).

### 2. Térmicos

- Anomalías superficiales  $\geq 2$  °C respecto a la media estacional de la región.
- Incrementos de flujo geotérmico en pozos instrumentados ( $\geq 15\%$  sobre línea base).
- Picos transitorios de radiación infrarroja detectados desde satélite.

### 3. Tectónicos

- Desplazamientos superficiales  $\geq 5$  mm detectados por InSAR.
- Microfracturación registrada por cambios en resistividad.
- Datos sísmicos convencionales de apoyo (magnitud de microsismos  $\geq M2.0$ ).

## Protocolos de correlación con eventos sísmicos y térmicos

La robustez del sistema depende de la **integración multivariable** de datos. El protocolo propuesto consta de tres fases:

### a) Detección de anomalías independientes

Cada sensor genera registros continuos. Cuando se superan umbrales definidos (ej.: variaciones magnéticas  $> 5$  nT, anomalía térmica  $> 2$  °C), se marca el evento como **anomalía individual**.

## b) Correlación espacial y temporal

El sistema cruza las anomalías electromagnéticas, térmicas y tectónicas en intervalos de 24 h a 7 días. Sólo se consideran relevantes aquellas anomalías que **coinciden espacialmente** en un radio  $\leq 50$  km y temporalmente en  $\leq 7$  días.

## c) Clasificación de riesgo dinámico

Se genera un **índice de estrés electromagnético-termal (ISET)**, ponderando cada tipo de anomalía según su relevancia empírica:

- Electromagnéticas: 40%
- Térmicas: 35%
- Tectónicas: 25%

El valor final se representa en el mapa predictivo como una **escala de riesgo dinámico** (bajo, medio, alto).

## Validación empírica

La metodología requiere validación mediante **retrospectiva histórica**:

- Se analizan series de datos electromagnéticos y térmicos previos a eventos sísmicos ya ocurridos (ej.: L'Aquila 2009, Tohoku 2011, Izmit 1999).
- Se verifican coincidencias entre anomalías detectadas y el epicentro/fecha de los terremotos.
- Se ajustan umbrales para mejorar sensibilidad y especificidad del sistema.

Este proceso reduce falsos positivos y permite afinar la confiabilidad del mapa predictivo.

## Correlación empírica con eventos sísmicos y térmicos documentados

La validez de un sistema predictivo basado en el **seguimiento de estrés electromagnético y térmico** requiere ser contrastada con ejemplos donde los datos disponibles permiten establecer **relaciones temporales y espaciales claras**. En este sentido, se presentan casos paradigmáticos en los que anomalías electromagnéticas y térmicas precedieron a eventos sísmicos de gran magnitud, documentados por investigadores independientes y sin vínculos con agencias o corporaciones sujetas a conflicto de interés.

### El terremoto de L'Aquila (Italia, 2009)

Previo al sismo de magnitud 6.3 que afectó la región de L'Aquila, varios estudios independientes reportaron **anomalías electromagnéticas y térmicas**:

- **Electromagnéticas:** Variaciones en la propagación de ondas de radio en la banda VLF registradas en la estación de Bari, Italia, aproximadamente **2 semanas antes del evento**.
- **Térmicas:** Análisis satelitales (MODIS) detectaron un aumento anómalo de temperatura superficial de entre **2–4 °C** en el valle de Aterno, tres días antes del terremoto.
- **Tectónicas:** Microfracturas locales confirmadas mediante variaciones en resistividad del subsuelo.

Estos indicadores convergen en la hipótesis de Freund y colaboradores sobre la liberación de cargas eléctricas en minerales sometidos a estrés, generando emisiones electromagnéticas y calentamiento localizado detectable desde satélite.

## El terremoto de Izmit (Turquía, 1999)

El sismo de magnitud 7.6 dejó un claro precedente en la integración de **datos térmicos y electromagnéticos**.

- **Electromagnéticas:** Registros ULF en la estación de Iznik mostraron oscilaciones anómalas de hasta **30 nT**, detectadas varios días antes del evento principal.
- **Térmicas:** Imágenes de satélite NOAA-AVHRR revelaron anomalías térmicas regionales de hasta **5 °C sobre la media estacional**, concentradas a lo largo de la falla de Anatolia.
- **Correlación:** El epicentro coincidió con la zona de mayor superposición entre anomalías térmicas y electromagnéticas, demostrando la utilidad de un mapa predictivo integrado.

## El terremoto de Tohoku (Japón, 2011)

Este evento de magnitud 9.0 constituye uno de los casos mejor documentados en términos de precursores electromagnéticos y térmicos.

- **Electromagnéticas:** Satélites como *DEMETER* registraron emisiones ULF y perturbaciones ionosféricas en los días previos al sismo.
- **Térmicas:** Análisis infrarrojos detectaron un aumento de entre **2–3 °C en superficie oceánica**, coincidente con la región del epicentro.
- **Deformación superficial:** Datos InSAR confirmaron la acumulación de estrés tectónico en la zona de subducción antes del evento.

La coincidencia entre las capas electromagnética, térmica y tectónica otorga solidez al modelo METFI, que postula un acoplamiento resonante entre procesos internos y manifestaciones superficiales.

## Estudios de volcanismo activo: Etna y Kilauea

Además de terremotos, los volcanes proporcionan escenarios ideales para estudiar la correlación entre **anomalías electromagnéticas, térmicas y liberación energética**.

- **Monte Etna (Italia):** Investigadores reportaron variaciones en resistividad eléctrica y emisiones ULF semanas antes de episodios eruptivos. Imágenes satelitales mostraron aumentos térmicos puntuales alrededor de fisuras activas.
- **Kilauea (Hawái):** Estaciones térmicas y satelitales detectaron incrementos progresivos en flujo de calor superficial acompañados de descensos en resistividad local, anticipando la apertura de nuevas fracturas en 2018.

Estos casos fortalecen la idea de que la cartografía predictiva bajo METFI no se restringe a terremotos, sino que también se aplica a fenómenos volcánicos.

## Síntesis comparativa

Los tres elementos fundamentales —**anomalías electromagnéticas, térmicas y tectónicas**— aparecen consistentemente antes de los eventos estudiados. Lo relevante no es la detección aislada, sino la **coincidencia espacial y temporal** de las anomalías.

La siguiente tabla sintetiza la correlación:

Evento	Anomalía electromagnética	Anomalía térmica	Anomalía tectónica	Tiempo previo al evento
L'Aquila (2009)	VLF alterado	+2–4 °C	Microfracturas resistivas	3–14 días
Izmit (1999)	+30 nT ULF	+5 °C	Falla activa	3–10 días
Tohoku (2011)	ULF satelital	+2–3 °C	InSAR (subducción)	1–10 días
Etna (2010)	Variación resistiva	Aumento térmico puntual	Fisuración superficial	Semanas
Kilauea (2018)	ULF y resistividad	Flujo de calor elevado	Fisuras abiertas	Meses–días

Estos resultados muestran que la **cartografía predictiva METFI** puede apoyarse en evidencia empírica sólida para detectar zonas de alto riesgo.

## Discusión crítica

La aplicación del **Modelo Electromagnético Termodinámico de Fluctuación Interna (METFI)** a la **cartografía predictiva** plantea un reto conceptual y metodológico dentro de la geofísica contemporánea. El paradigma dominante en sismología ha privilegiado el análisis de **fallas tectónicas, acumulación de esfuerzo mecánico y registros sísmicos históricos**, mientras que los procesos electromagnéticos y térmicos han sido considerados, en muchos casos, como epifenómenos secundarios.

Sin embargo, los casos analizados (L'Aquila, Izmit, Tohoku, Etna, Kilauea) demuestran que **anomalías electromagnéticas y térmicas preceden sistemáticamente a eventos de gran magnitud**, lo cual exige una reinterpretación más amplia.

### El legado resonante: Tesla y la Tierra como oscilador

Nikola Tesla fue uno de los primeros en postular que la Tierra actúa como un **sistema resonante global**. Aunque sus investigaciones estuvieron más orientadas hacia la transmisión inalámbrica de energía, la noción de que el planeta entero puede vibrar electromagnéticamente anticipa la hipótesis central del METFI. El concepto de resonancia planetaria implica que **pequeñas perturbaciones internas pueden amplificarse** hasta alcanzar magnitudes detectables en superficie.

La crítica más frecuente es que Tesla careció de validación empírica geofísica en su tiempo. Sin embargo, al integrar sus intuiciones con los avances modernos (ULF, InSAR, radiometría térmica), se observa que la idea de un **planeta resonante y acoplado electromagnéticamente** es compatible con las evidencias actuales.

### Friedemann Freund y la electroquímica de las rocas

Freund aportó pruebas directas de que los **minerales sometidos a presión tectónica** liberan cargas eléctricas. Estos portadores de carga, al migrar, generan corrientes medibles y emisiones electromagnéticas en el rango ULF. La consistencia de estas observaciones con registros de campo (como en L'Aquila 2009) valida el principio de que las rocas actúan como **sensores naturales** del estrés tectónico.

La objeción a este enfoque proviene de quienes sostienen que las señales electromagnéticas previas a terremotos podrían ser **ruido atmosférico o ionosférico**. Sin embargo, los experimentos de laboratorio y las

correlaciones espaciales en regiones tectónicamente activas sugieren que estas señales son **localizadas y repetibles**, no simples artefactos externos.

## Khachikyan y la termodinámica sísmica

El enfoque de Khachikyan complementa a Freund al enfatizar que el **calentamiento localizado en zonas de subducción o fallas** no es un resultado posterior al evento, sino un precursor observable. El incremento de flujo térmico y la aparición de anomalías superficiales responden al **acoplamiento termodinámico del manto y la litosfera**, lo cual encaja con el postulado METFI de fluctuaciones internas.

La crítica principal a la detección térmica es que muchos incrementos de temperatura superficial pueden deberse a **procesos atmosféricos o climáticos** (ej.: olas de calor). No obstante, cuando el aumento térmico se correlaciona en espacio y tiempo con anomalías electromagnéticas y tectónicas, la probabilidad de que sea un simple artefacto meteorológico disminuye significativamente.

## El magnetismo de Néel y el registro histórico de tensiones

Louis Néel demostró que el magnetismo en minerales registra la **historia térmica y tectónica** de la Tierra. En el contexto del METFI, su trabajo proporciona una base conceptual: si el magnetismo de rocas revela procesos pasados, entonces los **cambios dinámicos en magnetización** pueden señalar tensiones presentes y futuras.

La objeción aquí es metodológica: distinguir entre variaciones de origen tectónico y variaciones de origen solar o geomagnético global. Para resolver esto, el METFI propone una **triangulación de datos**: correlacionar anomalías magnéticas locales con señales térmicas y tectónicas para descartar interferencias solares.

## La crítica de la imprevisibilidad sísmica

Uno de los argumentos más arraigados en la sismología convencional es que los terremotos son **intrínsecamente impredecibles**. Se sostiene que, aunque existen patrones estadísticos (ley de Gutenberg-Richter, ley de Omori), las condiciones específicas de ruptura de una falla no pueden anticiparse con precisión.

El METFI no contradice este principio: no propone una predicción exacta en tiempo y magnitud, sino la **cartografía de regiones inestables**, donde la probabilidad de liberación energética es mayor. Es un modelo de **riesgo dinámico**, no de determinismo puntual.

## Coherencia interna del METFI

Al integrar electromagnetismo, termodinámica y tectónica, el METFI aporta:

- **Un marco resonante**: la Tierra como sistema acoplado electromagnético-térmico.
- **Indicadores múltiples**: ULF, anomalías térmicas, deformación superficial.
- **Validación empírica**: correlaciones observadas en múltiples eventos históricos.

Lo que emerge es un modelo robusto frente a la crítica reduccionista. Su coherencia radica en la **superposición de evidencias independientes**. Ninguna señal aislada puede considerarse predictiva, pero el conjunto correlacionado sí constituye un **sistema confiable de seguimiento espacial**.



# Síntesis metodológica del sistema de cartografía predictiva METFI

El sistema de **cartografía predictiva basada en METFI** se fundamenta en la integración de tres dimensiones complementarias: **electromagnética, térmica y tectónica**. Su propósito no es la predicción puntual de terremotos o erupciones, sino la construcción de un **mapa dinámico de riesgo** que muestre las regiones con mayor inestabilidad interna.

## Arquitectura del sistema

- **Capa electromagnética:**
  - Magnetómetros terrestres y satelitales.
  - Sensores ULF/VLF.
  - Electrodo de potencial espontáneo.
- **Capa térmica:**
  - Radiometría satelital infrarroja.
  - Estaciones de flujo geotérmico en superficie y pozos.
  - Cámaras infrarrojas de alta sensibilidad.
- **Capa tectónica:**
  - Redes sísmicas convencionales.
  - InSAR para deformaciones superficiales.
  - Variaciones de resistividad asociadas a microfracturas.

## Flujo operativo

1. **Captura de datos**
  - Cada sensor registra información en tiempo real o en intervalos regulares (minutos-horas).
  - Los datos se almacenan en una base centralizada con sincronización temporal.
2. **Procesamiento de anomalías**
  - Se aplican umbrales predefinidos (ej.: variación magnética  $> 5$  nT, anomalía térmica  $> 2$  °C).
  - Cada superación de umbral se clasifica como **anomalía independiente**.
3. **Correlación espacial y temporal**
  - Las anomalías se integran en un mapa georreferenciado.
  - Sólo se consideran relevantes las que **coinciden en un radio  $\leq 50$  km y un lapso temporal  $\leq 7$  días**.
4. **Cálculo del índice ISET (Índice de Estrés Electromagnético-Termal)**
  - Electromagnéticas: 40%
  - Térmicas: 35%

- Tectónicas: 25%
- El resultado se traduce en niveles de riesgo: bajo, medio, alto.

## 5. Cartografía dinámica

- Los valores del ISET se proyectan sobre un mapa interactivo.
- El sistema produce imágenes actualizadas de las zonas de mayor estrés interno.

## Validación y ajuste

- **Validación retrospectiva:** análisis de eventos pasados (Izmit 1999, L'Aquila 2009, Tohoku 2011, etc.) para verificar coincidencias entre anomalías y epicentros.
- **Ajuste adaptativo:** los umbrales de anomalía se calibran continuamente en función de nuevas observaciones, minimizando falsos positivos.

## Fortalezas metodológicas

- **Multivariable:** integra señales electromagnéticas, térmicas y tectónicas.
- **No determinista:** no busca predecir con exactitud, sino identificar regiones de alta inestabilidad.
- **Escalable:** puede aplicarse en ámbitos locales (volcanes, fallas activas) o regionales (cinturones sísmicos).
- **Independiente de modelos estadísticos convencionales:** prioriza datos físicos y directos sobre energía interna.

## Limitaciones

- **Dependencia instrumental:** requiere redes densas de sensores y datos satelitales de alta resolución.
- **Ruido ambiental:** anomalías pueden confundirse con perturbaciones solares, atmosféricas o climáticas si no se triangulan adecuadamente.
- **Interpretación compleja:** la correlación de múltiples variables demanda sistemas robustos de análisis y filtrado.

## Conclusiones

La cartografía predictiva basada en el modelo METFI y el sistema de seguimiento espacial de estrés electromagnético interno constituye un marco operativo robusto para la interpretación de dinámicas tectónicas y térmicas. La integración de parámetros electromagnéticos, sísmicos y térmicos bajo una misma lógica de correlación permite trascender las limitaciones de modelos que analizan cada dimensión de manera aislada. El enfoque interdisciplinar descrito no busca reemplazar a la sismología clásica, sino complementarla mediante un eje que atiende a la naturaleza electromagnética profunda de la Tierra.

El análisis desarrollado en este artículo permite establecer varios puntos clave:

- La relación empírica entre variaciones electromagnéticas internas y actividad sísmica/volcánica no es circunstancial, sino reproducible en diferentes contextos geodinámicos.
- El sistema propuesto requiere instrumentación de precisión y protocolos de validación cruzada para garantizar la robustez del modelo predictivo.

- La metodología favorece la detección temprana de anomalías electromagnéticas como potenciales precursores de eventos catastróficos, ofreciendo un margen de anticipación que la observación sísmica tradicional no siempre concede.
- La concepción del METFI como marco interpretativo abre la posibilidad de estructurar cartografías dinámicas que evolucionan en tiempo real, permitiendo no solo la localización de zonas críticas, sino también el análisis de la velocidad de propagación del estrés interno.
- La convergencia de datos electromagnéticos, térmicos y sísmicos en un sistema de cartografía predictiva constituye una herramienta de alto valor para el estudio científico del comportamiento terrestre bajo condiciones críticas de energía interna.
- **METFI como marco interpretativo:** proporciona coherencia al análisis de correlaciones electromagnéticas, sísmicas y térmicas.
- **Seguimiento espacial:** diseño de instrumentación avanzada para registrar campos eléctricos, magnéticos y variaciones de temperatura subterránea.
- **Protocolos de correlación:** cruce temporal y espacial entre anomalías electromagnéticas y eventos sísmicos/volcánicos.
- **Validación estadística:** uso de modelos multivariantes y filtros de ruido ambiental para discriminar señales locales de fondo.
- **Aplicación práctica:** desarrollo de cartografías dinámicas que permiten anticipar regiones de riesgo geodinámico.
- **Valor científico:** aporta evidencia sólida para la integración de la electromagnética interna en la comprensión de procesos geodinámicos globales.