

# Abstract

Se presenta un marco experimental y metodológico, reproducible y auditable, para validar —o refutar— la existencia de firmas electromagnéticas coherentes con el Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno (METFI) del sistema Tierra. Partimos de tres pilares: (i) instrumentación de precisión con trazabilidad metrológica (fluxgates, overhauser, SQUID/OPM y antenas de campo eléctrico) desplegada en arreglos multisitio; (ii) protocolos de **seguimiento** continuo con sincronización absoluta (GNSS) y estándares abiertos de datos; y (iii) una cadena analítica robusta basada en detección óptima, control del error por comparaciones múltiples y pruebas de causalidad y coherencia en el dominio tiempo-frecuencia. Proponemos un **esquema comparativo** para diferenciar señales METFI de ruido ambiental que combina: rechazo de interferencias antropogénicas, criterios espacio-temporales (coherencia inter-estaciones, polarización y dirección de llegada), criterios espectrales (bandas ULF/ELF/VLF y armónicos de Schumann), y criterios dinámicos (sincronización de fase, entropías, invariantes no lineales) con validación cruzada ciega y réplicas geográficas. El protocolo define hipótesis contrastables, medidas de desempeño (ROC/AUC), umbrales reproducibles (FDR) y reglas de decisión pre-registradas. El objetivo no es “detectar a toda costa”, sino permitir una prueba falsable: o bien se observan firmas que cumplen simultáneamente los criterios METFI con tasas de falsos positivos controladas, o bien se constata su ausencia bajo potencia estadística suficiente.

**Palabras clave:** METFI; ULF/ELF/VLF; magnetotélúrica; resonancias de Schumann; coherencia wavelet; detección óptima; FDR; causalidad de Granger; entropía de permutación; arrays magnetométricos; gradiometría; protocolos de **seguimiento** continuo; control de interferencias.

## Introducción y definición operacional de “señal METFI”

El METFI postula que el sistema Tierra opera como un toroide electromagnético con modos internos acoplados a la litosfera-hidrosfera-ionosfera. Para volver falsable esta idea, **definimos operacionalmente** “señal METFI” como un evento electromagnético que cumple, simultáneamente:

1. **Coherencia espacio-temporal multisitio:** presencia sincrónica ( $\pm 50$  ms en ULF/ELF y  $\pm 5$  ms en VLF) en  $\geq 3$  estaciones separadas  $> 50$  km, con caída de amplitud/retardo compatible con una fuente extendida regional, no local antropogénica. Estándares de tiempo y formato: INTERMAGNET, 1 Hz (variometría) a  $\geq 100$  Hz para ULF superior y  $\geq 48$  kHz para VLF; archivos conforme a IAGA/IMAGCDF. ([tech-man.intermagnet.org](http://tech-man.intermagnet.org), [intermagnet.org](http://intermagnet.org))
2. **Estructura espectral esperada:** potencia localizada en ULF (10 mHz–10 Hz) y ELF/VLF (3 Hz–30 kHz) con **geometría armónica** estable o intermitente (p. ej., proximidad a 7.8/14/20 Hz de Schumann y subarmónicos/superarmónicos), más “colas” en VLF durante acoples ionosféricos. Evaluación en tiempo-frecuencia vía wavelets (Morlet; significancia vs. ruido rojo). ([psl.noaa.gov](http://psl.noaa.gov), [Atmospheric and Oceanic Sciences](http://Atmospheric and Oceanic Sciences))
3. **Polarización y dirección de llegada:** elipsoides de polarización estables y vectores Poynting consistentes con una geometría toroidal/azimutal, estimados mediante gradiometría y arrays (triangulación ULF). (Literatura de arrays y MT para inferencia de dirección y conductividad). ([assets.cambridge.org](http://assets.cambridge.org), [api.pageplace.de](http://api.pageplace.de), [Cambridge University Press & Assessment](http://Cambridge University Press & Assessment))
4. **Métricas dinámicas no lineales:** disminución transitoria de entropía de permutación (ordenamiento de fase), incremento de coherencia de fase y sincronización inter-bandas (ULF $\leftrightarrow$ ELF), incompatibles con procesos estocásticos estacionarios. Evaluado con surrogate data (Theiler) para descartar artefactos. ([ScienceDirect](http://ScienceDirect))

5. **Exclusión antropogénica/meteorológica:** ausencia de trazas típicas de red eléctrica (50 Hz y armónicos), PLC, VLF náutico, rayos (firma impulsiva con dispersión de grupo), y actividad local (EMI industrial, tráfico, ferrocarriles). Criterios extraídos de MT, estándares de observatorios geomagnéticos y catálogos de transmisores. ([assets.cambridge.org](https://assets.cambridge.org), [tech-man.intermagnet.org](https://tech-man.intermagnet.org))

Estas condiciones definen **reglas de decisión** cuantitativas (Sección 6) y un pipeline reproducible.

## Instrumentación y despliegue

### Magnetometría de referencia

- **Fluxgate triaxial de bajo ruido** ( $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @1 Hz), con calibración de offset, sensibilidad y ortogonalidad; arquitectura feedback de 2ª armónica. Es la columna vertebral en ULF/ELF. ([ui.adsabs.harvard.edu](https://ui.adsabs.harvard.edu), [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com))
- **Magnetómetros escalares (Overhauser/Protones/Cesio)** para referencia absoluta (drift <0.1 nT), útiles en campañas.
- **SQUID/OPM** (si el sitio lo permite) para rango sub-pT y validación cruzada (requisitos de blindaje y criogenia/temperatura). (Véase manuales y textos; la “SQUID Handbook” es la referencia clásica).

**Razonamiento:** Los fluxgates ofrecen estabilidad y rango dinámico óptimo para campo ambiental; los escalares fijan “cero” absoluto; los SQUID/OPM exploran señales extremadamente débiles.

([ui.adsabs.harvard.edu](https://ui.adsabs.harvard.edu))

### Electric field y sondas VLF

- **Antenas E-campo** (marconi/whip de alta impedancia) y **bobinas search-coil** para VLF/ELF, con respuesta conocida en amplitud/fase.
- **Estaciones meteorológicas** co-locales (presión, humedad, descargas) para covariables.

### Topología de red

- **Arreglo mínimo:** 4 estaciones formando un rombo de 50–200 km de separación + 1 estación central gradiométrica (dos o más sensores separados 50–200 m).
- **Sincronización:** GNSS con **jitter <10 ms** (INTERMAGNET solicita  $\leq 10$  ms para 1 Hz; en VLF se exige mejor). ([intermagnet.org](https://www.intermagnet.org))
- **Apantallamiento local:** inventario de fuentes EMI en radio de 5 km; bitácora de actividad.

### Estándares de datos y seguimiento

- Tasa mínima: 1 Hz (variometría) y 200–1000 Hz (ULF superior); 48 kHz (VLF), 24-bit; **IMAGCDF/IAGA** para 1-s definitivos; metadatos completos (temperatura del sensor, tilt, GNSS, estado). ([intermagnet.org](https://www.intermagnet.org), [tech-man.intermagnet.org](https://tech-man.intermagnet.org))

## Protocolos experimentales (pre-registro y control)

1. **Pre-registro** (timestamp, hash) de hipótesis, bandas objetivo, umbrales de decisión, ventanas de eventos, reglas ROC/FDR.
2. **Ciclos de “on/off” ciegos**: se introducen bloques ciegos (sin eventos etiquetados) y se valida la tasa de falsas alarmas.
3. **Controles negativos**: estaciones ficticias (data shuffling), antenas “dummy” apagadas con canal termal activo, y rotación de ejes.
4. **Controles positivos**: eventos geofísicos conocidos (rayos distantes, VLF emisores constantes) para calibrar detección y coherencia.
5. **Replicación geográfica**: redes disjuntas ( $\geq 500$  km) para evaluar universalidad de firmas.
6. **Auditoría de cadena**: trazabilidad desde crudo a resultados con checksum y notebooks ejecutables.

## Cadena de señales: del crudo a la hipótesis

### Pre-proceso y limpieza

- **Despiking y notch adaptativo** de 50 Hz y armónicos (cuidado con “ringing”);
- **Filtrado pasa-banda** por segmentos;
- **De-trending y preblanqueo** (AR) previo a análisis espectral/causal;
- **Allan variance** para estabilidad de instrumentos y deriva de offset.

### Caracterización espectral tiempo-frecuencia

- **Wavelet de Morlet** → mapas de potencia con intervalos de confianza vs. ruido blanco/rojo (Torrence & Compo); **cross-wavelet** y **coherencia wavelet** inter-estaciones, con enmascaramiento de la “cono de influencia” y corrección múltiple. ([psl.noaa.gov](https://psl.noaa.gov), [Atmospheric and Oceanic Sciences](https://www.noaa.gov/atlantis))
- **Bandas objetivo**: ULF (0.01–10 Hz), ELF (3–3000 Hz), VLF (3–30 kHz), **Schumann** ( $\approx 7.8, 14, 20, 26$  Hz, etc.), comparando con climatología local (día-noche, estacional). ([psl.noaa.gov](https://psl.noaa.gov))

### Polarización y dirección

- **Hodogramas Bx-By-Bz**; elipse de polarización, ángulo de inclinación;
- **Gradiometría y beamforming** en el sub-array central;
- **Impedancias MT** ( $Z_{xx}, Z_{xy}$ , etc.) y resistividad aparente/fase para inferir acoplamientos litosfera-ionosfera. ([assets.cambridge.org](https://assets.cambridge.org), [api.pageplace.de](https://api.pageplace.de))

## Dinámica y causalidad

- **Sincronización de fase** (PLV), **coherencia parcial**, **direccionalidad** (Granger enmarcada por modelos ARX con preblanqueo) y **transfer entropy**;
- **Entropía de permutación** (Bandt & Pompe) como métrica de complejidad;
- **Surrogate data** (Theiler) para descartar no estacionalidad banal. ([ScienceDirect](#))

## Detección óptima y control del error

### Detectores y filtros “casados”

- **Matched filtering**: kernel construido con plantillas de eventos METFI (ULF con envolvente lenta + armónicos Schumann) y conplantillas “nulas” (ruido rojo).
- **GLRT** (generalized likelihood ratio) para hipótesis H1 (METFI) vs H0 (ruido/EMI), con estadísticas invariante a escala. (Marco clásico en detección/estimación).
- **Medidas de desempeño**: curvas ROC; AUC; sensibilidad vs. especificidad. ([ResearchGate](#))

### Comparaciones múltiples y umbrales reproducibles

- **Benjamini–Hochberg** (FDR) para controlar falsos positivos en bancos de tests (miles de píxeles tiempo-frecuencia y múltiples estaciones). ([Core](#))

### Regla de decisión integrada

Se declara un “**evento METFI-consistente**” si, en una ventana T:

- $AUC \geq 0.9$  en  $\geq 2$  detectores independientes (p. ej., matched filter ULF y coherencia wavelet inter-estaciones);
- $FDR q \leq 0.05$  tras corrección;
- Coherencia inter-estaciones  $>0.6$  (95% IC) y fase estable ( $\pm\pi/6$ ) en al menos dos bandas;
- Dirección de llegada y polarización consistentes entre estaciones ( $\Delta\text{azimut} < 20^\circ$ );
- Exclusión positiva de EMI y fenómenos meteorológicos, documentada en bitácora.

## Esquema comparativo: cómo diferenciar señales METFI de ruido ambiental

### Taxonomía de ruidos y firmas

- **Antropogénicos**: red eléctrica 50 Hz/armónicos, PLC, trenes, ferrocarriles, conmutación industrial; **firma**: bandas estrechas, coherencia local, direccionalidad fija hacia infraestructura.

- **Atmosféricos:** sferics/whistlers (impulsivos VLF con dispersión), ruido térmico; **firma:** polarización y dispersión características, correlación con redes de rayos.
- **Geomagnéticos globales:** pulsaciones Pc/Pi, subtormentas; **firma:** coherencia global (INTERMAGNET/SuperMAG), escalas de horas; deben **explicarse** por índices Kp/AE. ([tech-man.intermagnet.org](http://tech-man.intermagnet.org))
- **Instrumentales:** drift térmico, cuantización, aliasing, saturación; **firma:** dependencias con T, hora local; se controlan con Allan variance y cross-sensor.

## Criterios comparativos (cuadro lógico)

**C1. Coherencia multi-estación:** si la señal aparece sólo en 1 estación → probable local/EMI. Si aparece en  $\geq 3$  con retrasos físicos plausibles → candidata.

**C2. Espectro:** si concentra potencia en  $50 \text{ Hz} \pm \epsilon$  y armónicos → EMI; si muestra “crestas” persistentes en 7.8/14/20 Hz con fase estable entre estaciones → candidata METFI (descartar pulsaciones Pc). ([psl.noaa.gov](http://psl.noaa.gov))

**C3. Polarización/D.O.A.:** variación errática con el viento/vehículos → EMI; elipse y azimut coherentes regionalmente → candidata.

**C4. Dinámica:** entropía alta y sin estructura → ruido; caída de entropía + sincronización inter-bandas → candidata.

**C5. Contexto geofísico:** índices geomagnéticos altos explican mucha coherencia global; si índices bajos y firma persiste con geometría toroidal → candidata.

## Árbol de decisión operativo

1. **Pre-filtro** por bandas y notches (50 Hz).
2. **Test de significancia wavelet** ( $p < q\text{FDR}$ ).
3. **Coherencia y fase** inter-estaciones.
4. **Dirección/polarización;** se excluye si apunta a infraestructura conocida.
5. **Clasificador** (SVM/logístico) entrenado con librería de eventos etiquetados (EMI/rayos/Kp alto vs. candidatos METFI).
6. **Validación ciega** en ventanas ocultas + replicación regional.

## Diseño de campaña y logística

- **Fase I (30–60 días):** *site survey*, ruido de fondo, levantamiento EMI, instalación piloto (2 estaciones), verificación de relojes GNSS, linealidad, ruido intrínseco (Primdahl; Ripka). ([ui.adsabs.harvard.edu](http://ui.adsabs.harvard.edu), [ScienceDirect](http://ScienceDirect))
- **Fase II (6–12 meses):** despliegue completo ( $\geq 5$  estaciones), **seguimiento** continuo, integración con índices geomagnéticos (INTERMAGNET/SuperMAG) y redes de rayos; compilación de biblioteca de “no METFI”. ([tech-man.intermagnet.org](http://tech-man.intermagnet.org))
- **Fase III (3–6 meses):** análisis pre-registrado, revisión ciega, auditoría externa, publicación de datos crudos y scripts.

## Métricas de validación y potencia estadística

- **Tamaño de efecto:** cociente señal-ruido (SNR) en dB en bandas objetivo;
- **Tasa de falsos positivos (FPR) y verdaderos positivos (TPR)** por estación y por red;  $AUC \geq 0.9$  como objetivo para etiquetar “consistente”; ([ResearchGate](#))
- **FDR ( $q$ )**  $\leq 0.05$  en mapas wavelet, coherencias y bancos de filtros; ([Core](#))
- **Estabilidad temporal:** persistencia de parámetros (fase, elipse) en escalas de días-semanas;
- **Reproducibilidad geográfica:** coincidencia de criterios entre redes separadas.

**Potencia:** simulaciones de inyección de señales sintéticas (plantillas METFI) sobre ruidos empíricos para estimar TPR/FPR esperados y fijar N días de **seguimiento** necesario.

## Resultados esperables y criterios de falsación

- **Validación:** se acepta **evidencia METFI-consistente** si  $\geq K$  eventos independientes cumplen todos los criterios (C1–C5) con FDR controlado y replicación interregional; además, los parámetros de polarización/dirección resultan incompatibles con fuentes antropogénicas o geomagnéticas convencionales dados los índices Kp/AE.
- **Falsación práctica:** si tras T meses y potencia  $>0.9$  no se observa ningún evento que pase simultáneamente los filtros (o todos se explican por catálogos EMI/geomagnéticos), el conjunto de hipótesis METFI definidas en este protocolo queda **no apoyado** por los datos bajo las condiciones ensayadas.

## Buenas prácticas y transparencia

- **Datos abiertos** (formatos INTERMAGNET/IAGA/IMAGCDF), scripts públicos, DOIs. ([intermagnet.org](http://intermagnet.org))
- **Bitácora forense** (clima, mantenimiento, EMI puntual) asociada a cada evento.
- **Revisión ciega externa** de etiquetado.
- **Versionado** de plantillas y umbrales (semántica de cambios).

## Notas sobre bandas y fenómenos guía

- **Resonancias de Schumann:** ofrecen una “regla de calibración” natural para ELF/ULF y sincronía global día-noche; se usan como *test bed* para la cadena de análisis (detectar/estimar en estaciones separadas). ([psl.noaa.gov](http://psl.noaa.gov))
- **Magnetotelúrica (MT):** el formalismo MT (Chave & Jones) proporciona herramientas maduras para separar fuentes y caracterizar el acoplamiento litosfera-ionosfera; complementa el enfoque de detección. ([assets.cambridge.org](http://assets.cambridge.org), [api.pageplace.de](http://api.pageplace.de))
- **Eventos geomagnéticos:** deben integrarse índices e inventarios globales para descartar explicaciones conocidas (INTERMAGNET). ([tech-man.intermagnet.org](http://tech-man.intermagnet.org))

## Limitaciones y consideraciones

- **Estaciones pocas/densas:** los falsos positivos crecen con baja densidad espacial; arrays y gradiometría son cruciales.
- **Ambientes urbanos:** alta EMI; priorizar sitios rurales con banda licenciada limpia.
- **Ambigüedad causal:** coherencia no implica causalidad; por eso se integran pruebas direccionales (Granger) con *surrogates*. ([ScienceDirect](http://ScienceDirect))
- **Saturación/no linealidad:** revisar linealidad de fluxgates y evitar saturaciones en campos transversos elevados (histórico de MAGSAT muestra lecciones de diseño). ([Wikipedia](http://Wikipedia))

## Conclusiones

El presente protocolo, anclado en estándares geofísicos consolidados (INTERMAGNET, MT) y en estadística moderna de detección, convierte la hipótesis METFI en un **programa experimental falsable**. La clave no reside en un único “indicador mágico”, sino en la **convergencia** de criterios independientes: coherencia multisitio, estructura espectral específica, dirección/polarización física, dinámica no lineal y control estricto del error. Si ese conjunto de pruebas se supera en redes independientes bajo **seguimiento** prolongado, la evidencia a favor de firmas METFI se vuelve robusta; si no se supera, el marco ofrece un veredicto negativo con poder estadístico declarado.

- Protocolo integral para validar/refutar METFI con **seguimiento** continuo, sincronización GNSS y estándares INTERMAGNET/IAGA. ([tech-man.intermagnet.org](http://tech-man.intermagnet.org))
- Definición operacional de “señal METFI” basada en cinco criterios simultáneos (coherencia, espectro, polarización, dinámica, exclusión EMI).
- Cadena analítica: wavelets (significancia vs. ruido rojo), coherencia/cross-wavelet, dirección/polarización, causalidad y **surrogates**. ([psl.noaa.gov](http://psl.noaa.gov), [ScienceDirect](http://ScienceDirect))

- Detección óptima con matched filters/GLRT; evaluación por ROC/AUC y control FDR (Benjamini–Hochberg). ([ResearchGate](#), [Core](#))
- Esquema comparativo concreto para separar METFI de ruido antropogénico, atmosférico, geomagnético e instrumental.
- Despliegue recomendado: arrays  $\geq 5$  estaciones, gradiometría central, fluxgates de bajo ruido + E-campo y, si es posible, SQUID/OPM. ([ui.adsabs.harvard.edu](#))
- Requisitos de falsación práctica: potencia  $\geq 0.9$ , replicación interregional y auditoría ciega.

## Referencias

1. **Torrence, C., & Compo, G. P. (1998).** *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. BAMS.  
Guía seminal de análisis wavelet con pruebas de significancia frente a ruido blanco/rojo; base para mapas tiempo-frecuencia, coherencia y enmascaramiento del cono.  
([psl.noaa.gov](#), [ui.adsabs.harvard.edu](#), [Atmospheric and Oceanic Sciences](#))
2. **Chave, A. D., & Jones, A. G. (Eds.). (2012).** *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. CUP.  
Tratado de referencia sobre inducción EM natural y estimación de impedancias; útil para separar fuentes y caracterizar acoplamientos geofísicos. ([assets.cambridge.org](#), [api.pageplace.de](#), [Cambridge University Press & Assessment](#))
3. **INTERMAGNET Operations Committee (2025).** *Technical Reference Manual*, v5.2.  
Estándares de observatorios geomagnéticos: sincronización, formatos (IMAGCDF), calidad de datos 1-s, principios de red y documentación. ([tech-man.intermagnet.org](#), [intermagnet.org](#))
4. **Primdahl, F. (1979).** *The Fluxgate Magnetometer*. *J. Phys. E*.  
Revisión clásica de fluxgates: principio, ruido, linealidad y estabilidad; base para seleccionar sensores y evaluar no linealidades/saturación. ([ui.adsabs.harvard.edu](#))
5. **Ripka, P. (1992).** *Review of Fluxgate Sensors*. *Sensors and Actuators A*.  
Estado del arte en fluxgates: resolución hasta 10 pT, arquitectura y compensación; guía para requisitos instrumentales. ([ScienceDirect](#))
6. **Fawcett, T. (2006).** *An Introduction to ROC Analysis*. *Pattern Recognition Letters*.  
Tutorial de ROC/AUC para medir desempeño de detectores binarios; base para umbrales reproducibles. ([ResearchGate](#))
7. **Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995).** *Controlling the False Discovery Rate*. *JRSS-B*.  
Procedimiento FDR para comparaciones múltiples; imprescindible en bancos de tests tiempo-frecuencia con miles de hipótesis. ([Core](#))
8. **Theiler, J., et al. (1992).** *Testing for Nonlinearity in Time Series: the Method of Surrogate Data*. *Physica D*.  
Marco para descartar falsos positivos de “estructura” en series estocásticas; aplicable a sincronización y métricas no lineales. ([ScienceDirect](#))



9. **Torrence/Compo – sitio CIRES/NOAA (recursos y software).**

Repositorio de utilidades y aclaraciones/errata; facilitador para replicabilidad. ([Atmospheric and Oceanic Sciences](#))

10. **INTERMAGNET — Publicaciones/Notas técnicas.**

Notas sobre 1-s definitivos, precisión temporal y formatos; referencia directa para **seguimiento** estandarizado. ([intermagnet.org](#))

11. **(Contexto de instrumentación espacial)** Entradas históricas sobre magnetometría vectorial (p. ej., MAGSAT) que documentan problemas de no linealidad/saturación y soluciones de diseño esférico/feedback. Útiles como “lecciones aprendidas”. ([Wikipedia](#))

**Nota:** Cuando proceda, complementa con manuales de laboratorio de cada sensor y validaciones cruzadas con redes globales (índices Kp/AE o catálogos de rayos) para fortalecer la exclusión de fuentes convencionales. Las referencias listadas son textos/artículos método-centrados y de reconocido uso en geofísica y estadística de señales.