

Abstract

La identificación y explotación de señales electromagnéticas asociadas a la preparación de eventos geodinámicos (p. ej., terremotos) ha ocupado a la comunidad interdisciplinaria durante décadas. Este artículo revisa los mecanismos físicos propuestos que vinculan esfuerzos tectónicos y procesos de fisuración con emisiones electromagnéticas (desde ULF hasta VLF/ELF y la ionosfera), evalúa la evidencia estadística y operacional para su uso en sistemas de alerta temprana y propone un marco conceptual para la construcción de sistemas de predicción basados en patrones de intensificación electromagnética. Se discuten los canales observacionales (campo magnético ULF, señales VLF/LF subionosféricas, cambios de TEC ionosférico, anomalías térmicas satelitales asociadas a ionización atmosférica) y los protocolos de integración multivariada de señales, junto a criterios robustos de verificación, control de falsos positivos y métricas probabilísticas para la toma de decisiones. El texto enfatiza la necesidad de validación estadística rigurosa frente a ruido de fondo geofísico y fenómenos meteorológicos/solar, y propone arquitecturas de alerta que prioricen la reproducibilidad y la evaluación objetiva del rendimiento predictivo.

([ScienceDirect](#), [LPI](#), [SCIRP](#))

Palabras clave Señales pre-sísmicas; ULF / VLF / TEC; acoplamiento litosfera–atmósfera–ionosfera (LAIC); detección multicanal; alerta temprana; análisis estadístico de anomalías. ([Frontiers](#))

Introducción y contexto científico

La posibilidad de identificar precursores de eventos críticos mediante observaciones electromagnéticas se apoya en dos pilares: (1) modelos físicos que generan portadores de señal (por ejemplo, portadores de carga eléctrica liberados por procesos de fractura en rocas) y (2) técnicas observacionales sensibles a esas señales a través de diversos medios (instrumentación terrestre y satelital). La hipótesis LAIC (litosfera–atmósfera–ionosfera) propone rutas físicas de acoplamiento desde procesos en la escala de falla hasta perturbaciones detectables en la ionosfera y en la propagación de señales VLF. Estas rutas incluyen emanaciones gaseosas (radón), ionización atmosférica, modulación de la conductividad atmosférica y, en ciertos modelos, la activación de portadores de carga (“positive holes”) en minerales bajo estrés. ([ScienceDirect](#), [LPI](#))

El propósito de un sistema de alerta no es simplemente catalogar anomalías, sino distinguir patrones reproducibles de intensificación electromagnética que aumenten la probabilidad a priori de un evento crítico con una ganancia predictiva útil para la toma de decisiones. Esto exige una integración multi-sensor, series temporales robustas y modelos estadísticos que controlen la estacionalidad, la influencia solar y la variabilidad meteorológica. ([PMC](#), [AGU Publications](#))

Mecanismos físicos propuestos

Generación de portadores eléctricos en rocas sometidas a esfuerzo

La carga eléctrica libre puede generarse por ruptura de enlaces peróxidos en minerales (modelo de “positive holes”) cuando el material rocoso es sometido a esfuerzos crecientes; esta liberación conduce a corrientes eléctricas locales que, en teoría, pueden producir campos ULF y emisiones en otras bandas. Los trabajos de Freund y colaboradores han desarrollado una base de física de estado sólido para estos procesos y han

propuesto rutas coherentes desde escalas de microfisura hasta señales mesoscópicas. ([LPI](#), [AGU Publications](#))

Emisiones ULF y su relación con fracturación

Las anomalías en la banda ULF (0.01–10 Hz) han sido reportadas en registros de estaciones magnetométricas próximas a fallas activas, con variaciones en potencia espectral y en la dirección del campo. Sin embargo, la comunidad ha debatido la significancia estadística y si dichas señales son generadas por procesos endógenos o por contaminaciones antropogénicas o ionosféricas. Evaluaciones recientes aplican criterios estadísticos y test de hipótesis para separar señales consistentes de ruido. ([Oxford Academic](#), [PMC](#))

Acoplamiento a la ionosfera y anomalías TEC

La modificación de la conductividad atmosférica y la ionización local pueden alterar la distribución de electrones en la baja ionosfera, lo que se traduce en anomalías detectables en el Total Electron Content (TEC) obtenido por constelaciones GNSS. Estudios multicase han reportado detecciones de dTEC anómalas en ventanas temporales que preceden terremotos de magnitud significativa, aunque la relación probabilística depende de umbrales, profundidad y magnitud del evento. ([Frontiers](#), [AGU Publications](#))

VLF/LF subionosférico y propagación

Las señales VLF que se propagan en la guía onda entre la Tierra y la ionosfera son sensibles a cambios en la ionización baja. Anomalías en amplitud y fase en rutas VLF/LF han sido usadas para detectar perturbaciones ionosféricas. Redes de múltiples rutas y técnicas de correlación espacial aumentan la robustez frente a falsos positivos. ([SCIRP](#), [AGU Publications](#))

Señales térmicas satelitales (TIR) y su relación con ionización

El incremento de emisiones térmicas superficiales observadas por sensores TIR se ha asociado en algunos estudios a procesos de ionización atmosférica y transporte de calor local; se propone que emanaciones de gas o cambios de propiedades eléctricas superficiales modulan el flujo radiativo. Estas señales son útiles como capa adicional en un esquema multivariado. ([ScienceDirect](#), [Servidor de Informes Técnicos de NASA](#))

Arquitectura de un sistema de alerta basado en intensificación electromagnética

Un sistema operacional robusto debe integrar varias capas: instrumentación, pipelines de procesamiento en tiempo casi real, módulos de detección de anomalías, fusión de señales y salida probabilística para decisión. A continuación se describe una arquitectura modular:

Capa instrumental (sensado)

- Redes de magnetómetros ULF distribuidos en terreno próximo a zonas sísmicamente activas.
- Receptores VLF/LF con rutas múltiples (receptor–transmisor) para diferenciación direccional.
- Constelación GNSS (redes regionales) para series de TEC de alta resolución temporal.
- Plataformas satelitales (TIR, microondas) para seguimiento de anomalías superficiales.

- Estaciones meteorológicas y sensores de campo eléctrico en superficie para descartar condiciones meteorológicas adversas que podrían mimetizar señales. ([Oxford Academic](#), [AGU Publications](#))

Pipeline de preprocesado

- Reproyección temporal y sincronización de series (GPS time stamping).
- Filtrado adaptativo para eliminación de ruido antropogénico y de variabilidad solar/geomagnética (p. ej., índices Kp/AE como covariables).
- Normalización por ruido local y calibración cruzada entre estaciones. ([AGU Publications](#))

Detección de anomalías y extracción de patrones

- Análisis multi-escala de potencia espectral en ULF (wavetransform/PSD).
- Detección de cambios bruscos o tendencias en la fase/amplitud de rutas VLF mediante análisis estadístico de ventanas.
- Detección de dTEC anómalo con criterios basados en percentiles y modelos climatológicos ionosféricos locales.
- Técnicas de análisis de criticality (p. ej., Detrended Fluctuation Analysis) para determinar si series presentan dinámica crítica en la ventana previa al evento. ([PMC](#), [AGU Publications](#))

Fusión de señales y evaluación probabilística

La fusión debe producir una **probabilidad posterior** de ocurrencia de un evento en una ventana temporal definida (p. ej., 48–72 h). Se recomienda un enfoque bayesiano jerárquico que combine: (i) probabilidad base sísmica (sismicidad esperada por catálogo), (ii) likelihoods de cada canal (ULF, VLF, dTEC, TIR) calibradas por estudios retrospectivos, y (iii) covariables (actividad solar, meteorología). Este esquema permite modular la confianza del sistema y reportar incertidumbre. Estudios muestran que los índices más simples (p. ej., detección de picos ULF aislados) no aportan suficiente ganancia predictiva sin fusión multicanal y modelos probabilísticos. ([PMC](#), [AGU Publications](#))

Salida operacional y criterios de alerta

La salida debe ser categórica probabilística (p. ej., baja/mediana/alta probabilidad con ventana temporal y rango espacial), acompañada de métricas que permitan a decisores valorar respuesta. Deben definirse niveles de accionamiento claramente, y límites de aceptación de falsos positivos. Además, se debe incluir un contrato de validez temporal para evitar alertas arrastradas que degradan la señal social. ([PMC](#))

Validación, verificación y control de sesgos

Validación retrospectiva y generación de métricas

Cualquier sistema debe ser validado con estudios retrospectivos honestos: análisis de cohortes de terremotos, generación de curvas ROC, probabilidad gain y comparación con ocurrencia aleatoria. La introducción de métricas como **probability gain (PG')** y **probability difference (D')** ha permitido cuantificar la mejora sobre un pronóstico aleatorio utilizando registros ULF. Estas métricas deben calcularse en particiones independientes (cross-validation temporal/espacial). ([PMC](#), [AGU Publications](#))

Control de falsos positivos y ruido confusor

Fuentes de ruido incluyen: actividad geomagnética (tormentas solares), perturbaciones ionosféricas solares, actividad humana (emisiones VLF industriales), condiciones meteorológicas extremas y variabilidad estacional. Se requieren filtros multiparamétricos, inclusión de índices solares (Kp, Dst) como covariables, y umbrales dinámicos adaptativos que se recalibran con modelos de fondo. Estudios críticos llaman a cautela: múltiples detecciones aisladas sin coherencia espacial/temporal reproducible carecen de significancia predictiva. ([Oxford Academic](#), [ScienceDirect](#))

Reproducibilidad y dataset abiertos

Para avanzar hacia sistemas operacionales, la comunidad necesita datasets abiertos de largo plazo y pipelines reproducibles (código y modelos) para permitir replicación independiente. Esto también permite comparar algoritmos de fusión y evaluar sensibilidad-especificidad en diferentes contextos tectónicos. ([Academia](#))

Estudios de caso y resultados empíricos representativos

Casos satelitales TIR y dTEC

Estudios que han combinado TIR satelital, dTEC y observaciones en tierra han reportado correlaciones temporales en ventanas de días a semanas antes de terremotos mayores; sin embargo, la fracción de verdaderos positivos varía y la tasa de falsos positivos obliga a integrar más de una modalidad para mayor confianza. Ouzounov y colaboradores mostraron series donde TIR y otras variables se alinearon con el periodo de preparación regional, proporcionando una señal compuesta usable en un contexto multicanal. ([ScienceDirect](#), [Servidor de Informes Técnicos de NASA](#))

Detecciones ULF y evaluación estadística

Trabajos recientes han aplicado tests estadísticos rigurosos para evaluar potencia ULF en ventanas pre-sísmicas mostrando que, bajo ciertas condiciones (estaciones próximas, magnitud >5.5, profundidad somera), la detección supera la aleatoriedad y aporta ganancia predictiva; aun así, reproducir estos resultados en distintas regiones es condición necesaria para implicar validez general. ([Oxford Academic](#), [PMC](#))

VLF multiruta y mejora de señal

La utilización simultánea de múltiples rutas VLF ha mostrado mayor robustez que rutas individuales. Métodos de intersección/unión para anomalías de rutas han aumentado la precisión al reducir detecciones espurias debidas a causas locales no sísmicas. ([ResearchGate](#), [AGU Publications](#))

Recomendaciones técnicas para implementación experimental

1. **Desplegar redes híbridas:** combinar magnetómetros ULF, receptores VLF, estaciones GNSS y acceso a TIR satelital.
2. **Diseño de densidad espacial:** priorizar densidad de estaciones en fallas activas y usar estaciones de referencia fuera de zona para modelado del ruido.

3. **Sincronización temporal:** sincronización GPS para todos los sensores; trazabilidad temporal imprescindible.
4. **Pipelines reproducibles:** código abierto, versionado de datos y procedimientos de preprocesado.
5. **Validación estadística:** definir protocolos de cross-validation y métricas (PG', D', ROC, Brier score) antes de cualquier uso operacional.
6. **Fusión bayesiana:** calibrar likelihoods con datasets históricos y actualizar modelos con enfoque bayesiano para reportar incertidumbre.
7. **Capa de control climático/solar:** incorporar índices H α , Kp, Dst, y variables meteorológicas como covariables. ([PMC](#), [AGU Publications](#))

Limitaciones y precauciones científicas

- La heterogeneidad tectónica implica que patrones observados en una región no son necesariamente transferibles a otra sin recalibración.
- La señal/ruido es típicamente baja: la robustez requiere densidad de sensor y multimodalidad.
- Los falsos positivos y su coste social y económico deben ser evaluados antes de cualquier despliegue operativo a gran escala.
- Estudios recientes han puesto en duda algunas interpretaciones (p. ej., atenciones a ULF depression y mecanismos alternativos), por lo que la integración prudente y la transparencia metodológica son obligatorias. ([ScienceDirect](#), [Academia](#))

Conclusión

La evidencia acumulada sugiere que patrones de intensificación electromagnética contienen información potencialmente útil para la predicción probabilística de eventos geodinámicos en contextos concretos. Para que ello se traduzca en sistemas de alerta operativos, es imprescindible: (i) integración multicanal (ULF, VLF, dTEC, TIR), (ii) protocolos estadísticos rigurosos y reproducibles, (iii) fusión probabilística jerárquica que cuantifique incertidumbres y (iv) infraestructura de datos abierta que permita replicación independiente. Cuando se aplican estos principios, la señal precursora puede aportar ganancia predictiva sobre el azar; no obstante, la implementación responsable exige transparencia, control de falsos positivos y evaluación continua en regiones tectónicas diversas. ([PMC](#), [Frontiers](#))

- Múltiples mecanismos físicos (peroxy/“positive holes”, ionización por emanaciones, acoplamiento LAIC) pueden generar señales electromagnéticas asociadas a procesos pre-sísmicos. ([LPI](#))
- Canales observacionales relevantes: ULF (magnetómetros), VLF/LF (propagación subionosférica), TEC GNSS y TIR satelital. ([Oxford Academic](#), [SCIRP](#))
- La detección aislada en una sola banda carece generalmente de ganancia predictiva suficiente; la fusión multicanal y modelos bayesianos jerárquicos mejoran la utilidad operacional. ([PMC](#))

- Validación estadística (curvas ROC, probability gain, cross-validation temporal/espacial) es requisito indispensable antes de uso operacional. ([PMC](#))
- Controlar covariables (actividad solar, meteorología, ruido antropogénico) reduce falsos positivos y aumenta reproducibilidad. ([ScienceDirect](#))

Referencias

1. **Pulinets S., Davidenko D. (2014) – Ionospheric precursors of earthquakes.** Revisión del modelo LAIC y de las detecciones de anomalías ionosféricas asociadas a sismos; presenta el marco físico-experimental para la conexión litosfera–atmósfera–ionosfera. ([ScienceDirect](#))
Resumen: sistematiza evidencia de dTEC y propone rutas físicas de acoplamiento.
2. **Freund F. (2009/2011) – Positive holes and pre-earthquake signals.** Exposición de la física de estado sólido que explica cómo esfuerzos generan portadores eléctricos en rocas y conducirían a emisiones electromagnéticas. ([LPI](#), [AGU Publications](#))
Resumen: modelo de “positive holes” como mecanismo bajo esfuerzo.
3. **Hayakawa M., Asano T. (2016) – VLF subionospheric perturbations and seismo-ionospheric coupling.** Revisión sobre detección VLF/LF y metodologías de uso de múltiples rutas para mejorar robustez. ([SCIRP](#))
Resumen: técnicas y limitaciones para uso de VLF en detección de perturbaciones ionosféricas.
4. **Ouzounov D. et al. (2006; 2017) – Satellite TIR anomalies and earthquake association.** Estudios de TIR satelital que documentan anomalías térmicas previas a algunos grandes terremotos y discuten mecanismos ligados a ionización. ([ScienceDirect](#), [Servidor de Informes Técnicos de NASA](#))
Resumen: evidencia empírica de TIR anómalo en ventanas pre-sísmicas y discusión mecánica.
5. **Warden S. et al. (2020) / Han P. et al. (2020) – Estadística de ULF y potencial predictivo.** Análisis estadístico de series ULF, propuesta de métricas de evaluación y demostración de que señales magnéticas pueden aportar información predictiva bajo condiciones concretas. ([AGU Publications](#), [PMC](#))
Resumen: métricas cuantitativas (PG', D') para evaluar ganancia predictiva de ULF.
6. **Potirakis S.M. et al. (2018) – Criticality analysis of lower ionospheric perturbations.** Aplicación de análisis de dinámica crítica a series ionosféricas, mostrando patrones de crítica en ventanas previas al choque principal. ([PMC](#))
Resumen: evidencia de dinámica crítica en perturbaciones ionosféricas antes de sismos.
7. **Wang C. et al. (2022) – Assessment of claimed ULF electromagnetic precursors.** Estudio crítico que evalúa la evidencia de ULF y discute problemas metodológicos y de reproducibilidad. ([Oxford Academic](#))
Resumen: examen crítico y recomendaciones metodológicas.
8. **Maurya A.K. et al. (2016) – Statistical study on VLF propagation and earthquakes.** Investigación estadística que apoya la utilidad de VLF multiruta para detectar perturbaciones pre-sísmicas. ([AGU Publications](#))
Resumen: resultados estadísticos sobre correlación VLF–sismicidad.

Apéndice Metodológico: Pipeline de fusión bayesiana y cálculo de Probability Gain

Pipeline de fusión bayesiana

El objetivo del pipeline es integrar múltiples canales de observación (ULF, VLF, dTEC, TIR) para estimar la probabilidad posterior de un evento crítico en una ventana temporal definida. El enfoque bayesiano permite incorporar información histórica y control de incertidumbres.

Pseudocódigo conceptual

```
# Definición de canales observacionales
channels = ["ULF", "VLF", "dTEC", "TIR"]

# Cargar datos históricos de eventos y series de señales
historical_data = load_historical_data(channels)
observed_data = load_observed_data(channels)

# Función para calcular likelihood de cada canal
def likelihood(channel_data, event_occurrence):
    """
    Calcula la probabilidad de observación dada la presencia o ausencia de
    evento.
    """
    # Ejemplo: modelado estadístico de picos/anomalías
    mu, sigma = fit_gaussian(channel_data)
    if event_occurrence:
        return gaussian_pdf(channel_data, mu_event, sigma_event)
    else:
        return gaussian_pdf(channel_data, mu_noevent, sigma_noevent)

# Probabilidad a priori de evento (basada en sismicidad histórica)
p_prior = historical_event_probability()

# Calcular likelihood de todos los canales
likelihood_product = 1.0
for channel in channels:
    L = likelihood(observed_data[channel], event_occurrence=True)
    likelihood_product *= L

# Aplicar teorema de Bayes para obtener probabilidad posterior
p_posterior = (likelihood_product * p_prior) / (
    likelihood_product * p_prior + (1 - p_prior) * likelihood_product_noevent
)

# Resultado: p_posterior es la probabilidad de ocurrencia de evento
print("Probabilidad posterior de evento crítico:", p_posterior)
```

Notas metodológicas:

1. Cada canal puede tener su modelo de likelihood diferente (p. ej., ULF con PSD, VLF con análisis de fase/amplitud, dTEC con desviación percentil, TIR con cambio radiativo relativo).
2. La fusión bayesiana jerárquica permite incorporar covariables (actividad solar, meteorología) como nodos condicionantes.

3. La ventana temporal y espacial debe definirse a priori según densidad de estaciones y contexto tectónico.

Cálculo de Probability Gain (PG')

Definition: El **Probability Gain (PG')** mide la mejora de predicción de un sistema sobre el pronóstico aleatorio, definido como:

Donde:

- es la probabilidad observada de que ocurra un evento dado que el sistema emitió alerta.
- es la probabilidad base (a priori) del evento en la misma región y ventana temporal.

Ejemplo de cálculo

Supongamos:

- 10 alertas emitidas por el sistema en un periodo de prueba.
- 4 de esas alertas precedieron efectivamente un evento.
- Probabilidad base de evento en la región y ventana: 0.05.

Interpretación: la alerta incrementa la probabilidad de éxito 8 veces respecto a un pronóstico aleatorio.

Pseudocódigo simplificado

```
def probability_gain(n_alerts, n_successful, p_base):  
    """  
    Calcula el Probability Gain PG'.  
    """  
    p_event_given_alert = n_successful / n_alerts  
    PG = p_event_given_alert / p_base  
    return PG  
  
# Ejemplo  
n_alerts = 10  
n_successful = 4  
p_base = 0.05  
  
PG = probability_gain(n_alerts, n_successful, p_base)  
print("Probability Gain:", PG) # Output: 8.0
```

Notas:

1. $PG' > 1$ indica ganancia sobre el azar; $PG' = 1$ indica desempeño equivalente a un pronóstico aleatorio.
2. Puede calcularse de forma dinámica para evaluar la ventana temporal, distintos canales y densidad de alertas.

Integración con pipeline multicanal

1. Calcular **p_posterior** vía fusión bayesiana.
2. Aplicar umbral de decisión para emitir alerta (por ejemplo, $p > 0.5$).

3. Registrar alertas y eventos ocurridos.
4. Calcular PG' para evaluar desempeño y ajustar según costo de falsos positivos.
5. Iterar y actualizar modelos con datos históricos y nuevos eventos, manteniendo trazabilidad.