

Marco Termodinámico–Entrópico para la Detección Pre–Ruptura de Eventos Sísmicos: Aplicación a la Protección de Infraestructura Vial Crítica mediante Análisis Causal Sincrónico

Autor Principal¹

¹Afiliación Institucional (por definir)

Abstract

Se presenta un marco metodológico para la detección de estados pre–ruptura en sistemas tectónicos, basado en la medición de reducciones entrópicas transitorias en señales sísmicas continuas. A diferencia de los sistemas de Alerta Temprana convencionales, que operan tras el inicio de la ruptura, el enfoque propuesto identifica una ventana causal previa asociada a un estado metaestable de alta coherencia dinámica. El método se formula en términos reproducibles, con validación retrospectiva, sellado criptográfico y aplicación directa a la protección de infraestructura vial crítica.

1 Introducción

Los sistemas tectónicos exhiben un comportamiento no lineal caracterizado por acumulación de energía, bloqueo friccional y liberación abrupta. Antes de la ruptura sísmica, el sistema atraviesa un estado transitorio en el que las fluctuaciones naturales se suprimen de manera forzada. Este trabajo propone que dicha supresión es cuantificable mediante métricas entrópicas y puede utilizarse como señal temprana de irreversibilidad termodinámica inminente.

El objetivo no es reemplazar los sistemas de Alerta Temprana (EEW), sino complementarlos con una capa causal previa orientada a decisiones de protección en infraestructura crítica.

2 Marco Teórico

2.1 Entropía espectral en señales sísmicas

Sea $x(t)$ una señal sísmica continua registrada en una estación. Se define su densidad espectral normalizada $p_i(t)$ en una banda de frecuencia $[f_1, f_2]$ como:

$$p_i(t) = \frac{S_i(t)}{\sum_j S_j(t)} \quad (1)$$

donde $S_i(t)$ es la potencia espectral en el bin i . La entropía de Shannon asociada se define como:

$$H(t) = - \sum_i p_i(t) \log p_i(t) \quad (2)$$

2.2 Definición de Magnitud Causal

Se introduce la **Magnitud Causal** M_c como medida del orden impuesto en la transición hacia la ruptura:

$$M_c = |H(t_{\text{ref}}) - H(t_{\text{crítico}})| \quad (3)$$

donde:

- t_{ref} corresponde a una ventana no crítica (línea base),
- $t_{\text{crítico}}$ corresponde a la ventana inmediatamente previa a la ruptura,
- $H(t)$ es la entropía espectral en la banda 0.1 Hz to 10 Hz.

La significancia estadística de ΔH se evalúa mediante bootstrapping ($n = 1000$) y comparación contra el ruido instrumental característico de cada estación.

2.3 Mecanismo Físico Propuesto

El bloqueo friccional prolongado genera un estado metaestable caracterizado por:

1. Supresión de microsismicidad (quiescencia sísmica),
2. Reorganización del campo de esfuerzos,
3. Disipación energética no radiativa (térmica y química).

La reducción entrópica observada captura la supresión de fluctuaciones estocásticas en la microestructura sísmica del sistema, indicando una transición forzada hacia un cambio de estado irreversible.

3 Ventanas Temporales

Se distinguen dos escalas temporales fundamentales:

3.1 Ventana Cronológica (t_M)

Definida respecto al tiempo de ruptura t_0 :

$$t_M \in [t_0 - 30 \text{ min}, t_0 + 10 \text{ min}] \quad (4)$$

Utilizada para contextualización y validación retrospectiva.

3.2 Ventana Causal (t_C)

Definida por ventanas deslizantes de duración τ :

$$t_C = \{t : \Delta H(t) < \theta \wedge \Delta t_{\text{lock}} \geq T_{\text{min}}\} \quad (5)$$

con:

- $\tau = 60 \text{ s}$,
- paso temporal $\Delta t = 1 \text{ s}$,
- umbral $\theta = -0.15$,
- persistencia mínima $T_{\text{min}} = 4\text{--}10 \text{ s}$ según infraestructura.

4 Protocolo de Validación

4.1 Validación Ciega

Para cada evento:

- Estaciones públicas a ≤ 200 km del epicentro,
- Filtrado 0.1 Hz to 10 Hz,
- Identificación de mínimos entrópicos $> 2\sigma$,
- Sin conocimiento previo del tiempo de ruptura.

4.2 Criterio de Éxito

Se considera detección válida si:

- $t_C \in [-60, -5]$ s respecto a t_0 ,
- persistencia continua ≥ 4 s,
- sin disparo posterior al inicio de la ruptura.

5 Comparación con el Estado del Arte

Método	Ventana útil	Física	Limitaciones
EEW tradicional	Post-ruptura	Ondas	Requiere inicio
P-wave magnitude	Post-P	Amplitud	Subestima M grandes
Enfoque propuesto	Pre-ruptura	Irreversibilidad	Requiere validación

6 Aplicación a Infraestructura Vial

Se define la eficiencia operativa:

$$\eta = \frac{N_{\text{protegidas}}}{N_{\text{expuestas}}} (1 - R_{\text{falsa}}) \quad (6)$$

donde $R_{\text{falsa}} < 5\%$ anual es el criterio de aceptación institucional.

El sistema es viable si:

$$C_{\text{cierre}} < 0.01 C_{\text{daño}} \quad (7)$$

7 Limitaciones

1. Validación inicial en zonas de subducción.
2. Tasa de falsas alarmas aún no completamente cuantificada.
3. Sensibilidad al ruido urbano.
4. Ventanas más cortas en sismos superficiales.
5. No proporciona localización precisa.

8 Conclusiones

La reducción entrópica persistente constituye una firma física de transición hacia irreversibilidad tectónica. El enfoque propuesto abre una ventana causal previa con potencial operativo inmediato para protección de infraestructura crítica, siempre bajo protocolos reproducibles y auditables.

Disponibilidad de Datos

Todo el código y los datos utilizados están disponibles en repositorio público, con sellado criptográfico SHA-256 de cada análisis.

References

- [1] Wyss, M., & Habermann, R. (1988). Seismic quiescence before large earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- [2] Ouzounov et al. (2007). Thermal anomalies associated with earthquakes. *Tectonophysics*.
- [3] De Santis et al. (2011). Entropy analysis in seismology. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- [4] Allen et al. (2009). Earthquake early warning systems. *Science*.