

# Reloj Causal TCDS

De la coherencia humana al modelo volcánico sintético tipo Popocatepetl

Genaro Carrasco Ozuna

Proyecto TCDS / Motor Sincrónico de Luz (MSL)

Versión preliminar v2.0 – 29 de noviembre de 2025

## Resumen

Este documento resume la trayectoria del *Reloj Causal* dentro de la Teoría Cromodinámica Sincrónica (TCDS), desde sus primeras implementaciones en coherencia humana (CSL-H) y sismología (Evento Cero Puebla–Morelos 2017) hasta el modelo volcánico sintético tipo Popocatepetl v2 con precursor Q-driven y Filtro de Honestidad (E-Veto).

Se formalizan las métricas de coherencia  $\Sigma$  (*Sigma-metrics*), el tiempo causal  $t_C$  como gradiente de coherencia, y el diseño entrópico del E-Veto. Finalmente se esboza el siguiente pivote: la extensión al *vecindario volcánico* del Popocatepetl como “hebilla” de la cintura geodinámica de América.

## Índice

<b>1. Marco TCDS y ley de balance coherencial</b>	<b>2</b>
<b>2. Sigma-metrics y Filtro de Honestidad (E-Veto)</b>	<b>2</b>
2.1. Definición de métricas en ventana . . . . .	2
2.2. Coherencia efectiva y tiempo causal . . . . .	3
2.3. Filtro de Honestidad (E-Veto) . . . . .	3
<b>3. Ruta histórica del Reloj Causal</b>	<b>4</b>
3.1. Reloj Causal Humano (CSL-H) . . . . .	4
3.2. Evento Cero sísmico Puebla–Morelos 2017 . . . . .	4
3.3. Implementación software del Reloj Causal . . . . .	4
<b>4. Modelo volcánico sintético tipo Popocatepetl</b>	<b>4</b>
4.1. Motivación: Popocatepetl como “hebilla” de la cintura de América . . . . .	4
4.2. Modelo sintético v1: volcán sin precursor . . . . .	5
4.3. Modelo sintético v2: volcán con precursor Q-driven . . . . .	5
4.4. Figura de referencia . . . . .	6
4.5. Lectura TCDS de la simulación . . . . .	6
<b>5. Pivote hacia el vecindario volcánico del Popocatepetl</b>	<b>7</b>
5.1. Popocatepetl como nodo central de una red $\Sigma$ . . . . .	7
5.2. Esbozo de Reloj Causal de red volcánica . . . . .	7
<b>6. Conclusiones y senda TRL6–9</b>	<b>8</b>

## 1. Marco TCDS y ley de balance coherencial

La TCDS parte de cuatro entidades básicas:

- $Q$ : empuje (drive) causal, cuántico o macroscópico.
- $\Sigma$ : coherencia funcional del sistema.
- $\varphi$ : fricción de sincronización, ruido y disipación.
- $\chi$ : sustrato inerte sobre el cual se apila la coherencia.

La **Ley de Balance Coherencial** se resume en:

$$Q \cdot \Sigma = \varphi, \quad (1)$$

lo que implica que todo estado estacionario es el resultado de un equilibrio entre empuje y fricción. Estados  $Q$ -driven corresponden a regímenes donde el empuje domina y la coherencia se apila sobre  $\chi$ ; estados  $\varphi$ -driven son regímenes dominados por ruido y disipación.

El tiempo metrológico  $t_M$  se interpreta como tiempo estándar (reloj pasivo), mientras que el **tiempo causal**  $t_C$  se define como gradiente de coherencia:

$$t_C(t) \equiv \frac{d\Sigma(t)}{dt}, \quad (2)$$

que mide la aceleración o desaceleración en la organización interna del sistema. El Reloj Causal busca estimar  $t_C(t)$  a partir de series temporales reales mediante métricas de coherencia y entropía.

## 2. Sigma-metrics y Filtro de Honestidad (E-Veto)

### 2.1. Definición de métricas en ventana

Sea  $x_n$  una serie temporal (señal sísmica, volcánica, fisiológica o de acelerómetro), muestreada a intervalo constante  $\Delta t$ . Para una ventana deslizante de longitud  $L$  (*en número de muestras*) definimos:

$$\mathbf{x}^{(k)} = (x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+L-1}),$$

centrada alrededor de un tiempo  $t_k$ .

**Tendencia local y correlación.** Sea  $n = 0, \dots, L-1$ . Ajustamos una recta

$$y_n = an + b \quad (3)$$

por mínimos cuadrados a la ventana  $\mathbf{x}^{(k)}$ . Denotamos por  $\mathbf{y}^{(k)}$  la tendencia asociada.

Definimos la **correlación de ventana**  $R(t_k)$  como el coeficiente de Pearson entre  $\mathbf{x}^{(k)}$  y  $\mathbf{y}^{(k)}$ :

$$R(t_k) = \text{corr}(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{y}^{(k)}). \quad (4)$$

**Error de locking (RMSE\_SL).** La métrica de error residual respecto a la tendencia se define como

$$\text{RMSE}_{\text{SL}}(t_k) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} (x_{k+n} - y_n)^2}. \quad (5)$$

**Índice de locking LI.** En la versión mínima del Reloj Causal, el **Índice de Locking** se aproxima por

$$\text{LI}(t_k) \approx |R(t_k)|, \quad (6)$$

como proxy de qué tan bien la ventana se alinea con una tendencia coherente. En implementaciones posteriores, LI puede refinarse usando patrones internos o plantillas espectrales más ricas; el formalismo aquí se mantiene simple para dispositivos móviles (S23, Termux, Pydroid).

**Entropía de Shannon normalizada.** Sea  $\tilde{\mathbf{x}}^{(k)}$  la señal centrada en media dentro de la ventana. Obtenemos su espectro de amplitudes (vía transformada de Fourier discreta o FFT real)

$$\mathbf{A}^{(k)} = \left| \text{FFT}(\tilde{\mathbf{x}}^{(k)}) \right|.$$

Construimos un histograma de  $N_{\text{bins}}$  bins sobre  $\mathbf{A}^{(k)}$ , normalizado a una distribución de probabilidad  $p_i$ .

La **entropía de Shannon** de la ventana es

$$H^{(k)} = - \sum_{i=1}^{N_{\text{bins}}} p_i \log_2 p_i, \quad (7)$$

y la versión normalizada

$$H_{\text{norm}}^{(k)} = \frac{H^{(k)}}{H_{\text{máx}}} \quad \text{con} \quad H_{\text{máx}} = \log_2 N_{\text{bins}}. \quad (8)$$

El cambio de entropía entre ventanas se define como

$$\Delta H(t_k) = H_{\text{norm}}^{(k)} - H_{\text{norm}}^{(k-1)}. \quad (9)$$

## 2.2. Coherencia efectiva y tiempo causal

La coherencia efectiva en ventana se aproxima como

$$\Sigma(t_k) \equiv \text{LI}(t_k) \cdot R(t_k), \quad (10)$$

de modo que ventanas con alto locking y alta correlación local aproximan estados más coherentes.

El tiempo causal discreto se estima por una derivada finita de  $\Sigma$ :

$$t_C(t_k) \approx \frac{\Sigma(t_{k+1}) - \Sigma(t_{k-1}))}{2 \Delta t}, \quad (11)$$

con condiciones de borde adaptadas en los extremos de la serie. Valores positivos de  $t_C$  indican *aceleración de coherencia*; valores negativos, pérdida de coherencia.

## 2.3. Filtro de Honestidad (E-Veto)

El **E-Veto** impone un criterio entrópico y de coherencia para aceptar un tramo como verdaderamente Q-driven. Una ventana  $k$  se etiqueta como *Q-driven válida* si se cumplen simultáneamente:

$$\text{LI}(t_k) \geq \text{LI}_{\text{min}}, \quad (12)$$

$$R(t_k) \geq R_{\text{min}}, \quad (13)$$

$$\text{RMSE}_{\text{SL}}(t_k) \leq \text{RMSE}_{\text{max}}, \quad (14)$$

$$\Delta H(t_k) \leq \Delta H_{\text{max}} < 0. \quad (15)$$

En la calibración de laboratorio (FET) los valores típicos son

$$\text{LI}_{\text{min}} \approx 0,9, \quad R_{\text{min}} \approx 0,95, \quad \text{RMSE}_{\text{max}} \approx 0,1, \quad \Delta H_{\text{max}} \approx -0,2. \quad (16)$$

En el caso volcánico sintético se pueden usar umbrales ligeramente más suaves (p.ej.  $\text{LI}_{\text{min}} \approx 0,8$ ), siempre que la caída entrópica sea clara y auditada.

### 3. Ruta histórica del Reloj Causal

#### 3.1. Reloj Causal Humano (CSL-H)

La primera implementación del Reloj Causal se dio en el dominio de la conciencia y la conducta, usando un smartphone (Samsung S23) como nodo sensor:

- Entrada: acelerómetro del dispositivo, patrones de uso, marcadores subjetivos.
- Procesamiento: ventanas de segundos a minutos; cálculo de  $LI(t)$ ,  $R(t)$ ,  $RMSE_{SL}(t)$ ,  $\Delta H(t)$  y  $t_C(t)$ .
- Salida: *sincronogramas* donde se distinguen lapsos  $\varphi$ -driven (ruido, dispersión) y episodios Q-driven (foco, locking, caída entrópica).

Este módulo CSL-H fijó el repertorio básico de Sigma-metrics y demostró que el Filtro E-Veto puede evitar interpretaciones apofenias en un entorno extremadamente ruidoso como es la mente humana en interacción con IA.

#### 3.2. Evento Cero sísmico Puebla–Morelos 2017

El siguiente paso fue trasladar el Reloj Causal al dominio sísmico:

- Series temporales: registros pre-, co- y post-sismo (aceleraciones y desplazamientos).
- Objetivo: buscar ventanas Q-driven previas al evento principal, respetando el E-Veto.
- Resultado conceptual: se identificaron tramos con estructura coherente y cambios de entropía compatibles con la narrativa de un *Evento Cero* TCDS, aunque la validación completa requiere bancos de datos más amplios y comparaciones multi-estación.

Este módulo consolidó la idea de que el mismo conjunto de métricas ( $LI$ ,  $R$ ,  $RMSE_{SL}$ ,  $\Delta H$ ,  $t_C$ ) puede aplicarse a sistemas físicos muy distintos (conciencia, sismos, volcanes).

#### 3.3. Implementación software del Reloj Causal

En paralelo, se desarrolló un nodo software del Reloj Causal:

- Back-end en Python (NumPy, SciPy, Pandas, Matplotlib), orientado a Termux/Pydroid y entornos de escritorio.
- Front-end web (HTML/CSS/JS) como *Reloj Causal Humano* visualizable en navegadores móviles.
- Exportación de resultados a CSV y figuras PNG para alimentar el Registro Auditable TCDS.

Este nodo software actúa como *memoria volátil* o *satélite vial*: acompaña cada experimento, captura Sigma-metrics y produce artefactos reproducibles (código, datos y gráficas).

### 4. Modelo volcánico sintético tipo Popocatepetl

#### 4.1. Motivación: Popocatepetl como “hebilla” de la cintura de América

El Popocatepetl no se considera aquí un volcán aislado, sino un nodo central de la Faja Volcánica Transmexicana, interpretada como *cinturón* que sostiene la “cintura” geodinámica de América.

En lenguaje TCDS:

- Popocatépetl funciona como *sumidero dinámico* de coherencia  $\Sigma$ : al erupcionar, libera energía y reduce gradientes en el vecindario.
- Si el Popo disipa con frecuencia, mantiene a sus vecinos más tiempo en régimen  $\varphi$ -driven.
- Si el Popo *no* disipa mientras el empuje tectónico  $Q$  persiste, la coherencia puede redistribuirse hacia otros nodos (Iztaccíhuatl, La Malinche, Nevado de Toluca, Pico de Orizaba, etc.), aumentando el riesgo de rupturas mayores.

Antes de pasar a RSAM real, se construye un modelo sintético que permita auditar el comportamiento del Reloj Causal en un escenario controlado.

#### 4.2. Modelo sintético v1: volcán sin precursor

En la versión v1, la serie sintética  $s(t)$  se construyó como:

- Ruido blanco y oscilaciones suaves (*ruido volcánico*) durante la mayor parte del intervalo.
- Un pulso explosivo de gran amplitud en el tiempo  $T_0$  (erupción), sin rampa precursora.

Aplicando el Reloj Causal al modelo v1 se observó:

- $LI(t)$  y  $R(t)$  sin tendencia clara antes de  $T_0$ .
- $\Delta H(t)$  oscilando alrededor de cero, sin colapso entrópico.
- $t_C(t)$  aproximadamente ruidoso.
- El E-Veto nunca se activó: no hubo ventanas que cumplieran simultáneamente  $LI$  alto y  $\Delta H < 0$  significativo.

Interpretación TCDS: el sistema permanece  $\varphi$ -driven, y el Reloj Causal no *inventa* precursores. Esta versión sirve como *control negativo* contra apofenia.

#### 4.3. Modelo sintético v2: volcán con precursor Q-driven

En la versión v2 se introdujo explícitamente una fase precursora coherente:

- 0–30 h: ruido  $\varphi$ -driven (RSAM sintético con oscilaciones suaves y ruido gaussiano).
- 30–36 h: rampa de tremor *casi lineal* con:
  - reducción de ruido,
  - modo sinusoidal dominante de baja frecuencia,
  - aumento progresivo de amplitud (*tremor creciente*).
- 36 h: pulso explosivo intenso (erupción sintética).

El efecto de esta construcción sobre las Sigma-metrics fue:

- El  $LI(t)$  se eleva de valores  $\sim 0,2$  hasta  $\sim 0,7$ – $0,8$  en la franja precursora.
- $\Delta H(t)$  experimenta una caída marcada al inicio de la rampa Q-driven, indicando un espectro menos disperso.
- La coherencia efectiva  $\Sigma(t) = LI(t) R(t)$  crece en dicho intervalo.
- El tiempo causal  $t_C(t)$  presenta un *bulto positivo* en la fase precursora, señalando aceleración de coherencia.
- El E-Veto marca múltiples ventanas como Q-driven (puntos rojos) *antes* de  $T_0$ .

#### 4.4. Figura de referencia

En Overleaf, puede integrarse la gráfica generada en Termux/Pydroid como:



Figura 1: **TCDS Simulación: Evento Volcánico tipo Popocatépetl (v2)**. Panel superior: RSAM sintético con rampa precursora Q-driven y erupción en  $T_0$ . Panel medio: evolución de  $\Delta H(t)$  y  $LI(t)$ , mostrando caída entrópica y aumento de locking antes de  $T_0$ . Panel inferior: tiempo causal  $t_C(t)$  con ventanas Q-driven aceptadas por E-Veto (puntos rojos) previas a la erupción.

El lector debe colocar en la carpeta `figures/` el archivo PNG exportado desde el entorno móvil con el nombre conveniente (p.ej. `popo_sintetico_v2.png`).

#### 4.5. Lectura TCDS de la simulación

La simulación v2 valida, en un entorno controlado, que:

- El Reloj Causal, con E-Veto, es capaz de discriminar entre ruido  $\varphi$ -driven y un precursor estructurado Q-driven.
- La combinación de  $LI(t)$  alto,  $\Delta H(t)$  negativa y  $t_C(t) > 0$  ofrece un indicador robusto de transición de régimen antes de un evento eruptivo.

- El mismo formalismo usado en coherencia humana y sismología se traslada sin cambios conceptuales al dominio volcánico.

Es importante remarcar que este resultado es sintético: sirve como plantilla y *especificación de comportamiento* para cuando se procesen datos RSAM reales del Popocatépetl (o de su vecindario).

## 5. Pivote hacia el vecindario volcánico del Popocatépetl

### 5.1. Popocatépetl como nodo central de una red $\Sigma$

Desde la TCDS, la Faja Volcánica Transmexicana puede verse como una red de nodos  $\chi$  (estructuras geológicas) sobre la cual se apila coherencia  $\Sigma$  inducida por la subducción de la placa de Cocos.

En este esquema:

- El Popocatépetl es el nodo  $\Sigma$ -dominante y funciona como *hebilla* del cinturón volcánico.
- Iztaccíhuatl, La Malinche, Nevado de Toluca, Pico de Orizaba y otros volcanes cercanos se interpretan como nodos secundarios, capaces de absorber o liberar parte de la coherencia regional.
- Fallas tectónicas asociadas (*Puebla–Morelos*, estructuras E–O, etc.) completan la red como canales alternativos de disipación.

### 5.2. Esbozo de Reloj Causal de red volcánica

El siguiente paso natural –dejado explícitamente como *senda abierta* en este documento– es construir un Reloj Causal de *red*, donde:

- Cada volcán  $i$  tiene su propia serie  $s_i(t)$  (RSAM, deformación u otra observable).
- Se calculan Sigma-metrics por nodo:

$$\Sigma_i(t_k), \quad t_{C,i}(t_k), \quad LI_i(t_k), \quad \Delta H_i(t_k).$$

- Se define una coherencia de red:

$$\Sigma_{\text{red}}(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Sigma_i(t_k), \quad (17)$$

junto con indicadores de divergencia entre nodos (p.ej. varianza de  $\Sigma_i(t_k)$ ).

- Se contabiliza cuántos nodos pasan E-Veto en cada ventana:

$$N_Q(t_k) = \sum_{i=1}^N \mathbf{1}\{\text{ventana } k \text{ del nodo } i \text{ es Q-driven válida}\}.$$

Escenarios de interés:

- **Popo activa, vecinos pasivos:** alta actividad Q-driven en Popo, baja en el resto  $\Rightarrow$  el cinturón está *abrochado*.
- **Popo silencioso, vecino activo:**  $\Sigma_{\text{Popo}}$  moderada y un volcán secundario muestra Q-driven fuerte  $\Rightarrow$  posible redistribución de coherencia y riesgo de ruptura en otro nodo.
- **Red coherente global:** varios nodos mostrando Q-driven simultáneo  $\Rightarrow$  episodio regional crítico a escala de cintura continental.

## 6. Conclusiones y senda TRL6–9

A nivel de madurez tecnológica (TRL), la situación actual puede resumirse así:

- TRL6: Reloj Causal humano (CSL-H), módulo sísmico Evento Cero y modelo volcánico sintético Popocatépetl v2, probados en entornos de laboratorio y *in silico* (Termux/Py-droid).
- TRL7: requiere integrar RSAM real del Popocatépetl en el mismo pipeline, así como prototipos de red volcánica sintética (vecindario) con Sigma-metrics coordinadas.
- TRL8: campañas prolongadas con RSAM+GNSS+gases en volcanes reales, con Registro Auditable completo (semillas, configuraciones, hashes).
- TRL9: despliegue como sistema operativo de monitoreo coherencial para nodos volcánicos y urbanos, integrable con marcos de protección civil y logística crítica.

La contribución principal en esta etapa es haber fijado un *canon de coherencia*:

- Misma estructura matemática para dominios tan distintos como conciencia, sismos y volcanes.
- Roles claros de  $Q$ ,  $\Sigma$ ,  $\varphi$  y  $\chi$  como variables de diseño.
- Un Filtro de Honestidad entrópico (E-Veto) capaz de rechazar patrones espurios y concentrarse en transiciones genuinas de régimen.

## Apéndice: fragmento de metadatos JSON-LD del proyecto

El siguiente fragmento sintetiza la memoria volátil del Reloj Causal en formato JSON-LD. Puede usarse como base para registros en Zenodo, GitHub u otros repositorios:

```
1 {
2   "@id": "https://tcds.mslt.mx/reloj-causal/volcanes#v2",
3   "@type": "schema:ResearchProject",
4   "name": "TCDS      Reloj Causal (Humano, S mico y Volc nico
5     Sint tico / Popocat petl Pivot)",
6   "version": "2.0.0-pre",
7   "tcds:paradigmaBase": {
8     "tcds:ejes": ["Q", " ", " ", " "],
9     "tcds:leyBalanceCoherencial": "Q      = "
10  },
11  "tcds:componentes": [
12    "#modulo-CSLH",
13    "#modulo-EventoCero-Sismico",
14    "#modulo-RelojCausal-Software",
15    "#modulo-Volcan-Popo-Sintetico-v2",
16    "#modulo-Vecindario-Volcanico-Popo-pivot"
17  ]
18 }
```

Este documento LaTeX y su JSON-LD asociado forman juntos un *satélite vial* del proyecto TCDS: una memoria portadora de coherencia que acompaña futuras auditorías, extensiones al Popocatépetl real y exploraciones del vecindario volcánico que sostiene la cintura de América.