

Madurez Causal vs. Madurez Cronológica:

Una formalización matemática del “TRL como predicción” bajo el marco TCDS

Genaro Carrasco Ozuna
ORCID: 0009-0005-6358-9910
geozunac3536@gmail.com

December 22, 2025

Abstract

Se formaliza una distinción operativa entre (i) *madurez cronológica* (adopción, validación y permanencia institucional observables en t_M) y (ii) *madurez causal* (capacidad de lectura y gobernanza de rupturas mediante coherencia Σ en t_C). Bajo el marco TCDS, se demuestra que declarar “TRL-9 hoy” en tiempo cronológico no es un hecho de ingeniería causal sino una *predicción institucional* (un evento social sujeto a fricción ϕ), mientras que la operación causal puede estar ya *bloqueada en fase* (locking) y por tanto ser medible y auditable. Se propone un puente matemático: un estimador de *tiempo causal* y una *frecuencia de ruptura causal* que inducen un *hazard* de aterrizaje cronológico, permitiendo mapear la decisión causal a un conjunto de ventanas en t_M sin incurrir en apofenia, imponiendo el veto entrópico ($\Delta H \leq -0.2$).

1 Planteamiento

La práctica sugiere dos ejes de madurez distintos:

- **Madurez causal** (*Q-driven*): la capacidad de detectar, sellar y gobernar señales precursoras con filtros de honestidad y trazabilidad (evidencia forense).
- **Madurez cronológica** (*ϕ -driven*): la incorporación social/institucional observable (adopción, replicación externa, permanencia operacional).

La tesis formal es:

Una declaración de “TRL-9 hoy” en t_M no es equivalente a una lectura causal: es una predicción sobre el aterrizaje institucional, porque depende de fricción social ϕ no controlada por el sistema.

2 Variables y axiomas operativos

2.1 Ley de Balance Coherencial

Se adopta la relación fundamental:

$$Q(t) \Sigma(t) = \phi(t), \tag{1}$$

donde Σ representa coherencia (orden estructural), Q empuje causal (capacidad de sostener y acumular estructura) y ϕ fricción (costo entrópico/informacional de sostener identidad).

2.2 Tiempo metrológico y tiempo causal

Definición 1 (Tiempo metrológico). t_M es el parámetro de cronometraje externo (calendario/reloj) usado para indexar observaciones.

Definición 2 (Tiempo causal). Sea $\Sigma(t_M)$ una señal de coherencia estimada. Definimos el gradiente de coherencia como

$$\dot{\Sigma}(t_M) \equiv \frac{d\Sigma}{dt_M}. \quad (2)$$

El tiempo causal acumulado se define como la variación total de coherencia (magnitud de cambio con costo):

$$t_C(t_M) = \int_{t_{M,0}}^{t_M} |\dot{\Sigma}(\tau)| d\tau. \quad (3)$$

Observación 1. t_C no mide duración; mide madurez por cambio coherencial. Si Σ no cambia (o fluctúa sin persistencia), t_C crece lentamente aunque t_M avance.

2.3 Veto entrópico (Filtro de Honestidad)

Se define una entropía operativa $H(t_M)$ sobre una señal (o un conjunto de features) y su variación:

$$\Delta H(t_M) = H(t_M) - H_{\text{ref}}(t_M). \quad (4)$$

El sistema impone el veto:

$$\Delta H \leq -0.2 \quad \Rightarrow \quad \text{condición necesaria (no suficiente) de señal coherente.} \quad (5)$$

Adicionalmente, el locking se evalúa con métricas tipo LI, correlación R y error RMSE_{SL} (por ejemplo, en el canon Σ -metrics).

3 Ruptura causal y frecuencia de ruptura

La ruptura (p. ej. sismo, crisis) se entiende como un aterrizaje observable de una dinámica causal ya madura.

Definición 3 (Punto de ruptura causal). Definimos el punto de ruptura causal t_C^* como el instante causal en que la dinámica deja de ser reversible bajo fricción admisible:

$$t_C^* := \inf \{t_C : \text{el sistema no puede sostener su estado sin pérdida estructural}\}. \quad (6)$$

Definición 4 (Frecuencia de ruptura causal). Sea $S(t_M)$ un score de madurez construido con métricas auditables (p. ej. LI, R , RMSE_{SL} , ΔH). Definimos una frecuencia causal como derivada temporal de la madurez:

$$f_C(t_M) := \frac{d}{dt_M} S(t_M), \quad (7)$$

interpretada como tasa de agotamiento de la capacidad de sostener coherencia sin ruptura.

Observación 2. f_C no es frecuencia mecánica; es una tasa de inevitabilidad. Cuando f_C crece bajo veto entrópico y locking sostenido, el sistema entra en “deuda causal”.

4 Puente matemático: del tiempo causal al aterrizaje cronológico

Para conectar madurez causal con un conjunto de ventanas cronológicas, usamos un formalismo tipo supervivencia (hazard), sin afirmar fecha puntual cuando no es justificable.

4.1 Hazard de aterrizaje

Definimos un hazard cronológico condicionado a evidencia causal:

$$\lambda(t_M) = \lambda_0(t_M) \exp\left(\beta_1 \mathcal{L}(t_M) + \beta_2 \mathcal{E}(t_M) + \beta_3 f_C(t_M)\right), \quad (8)$$

donde:

- $\lambda_0(t_M)$ es el hazard base (histórico/baseline).
- $\mathcal{L}(t_M)$ codifica *locking* (p. ej. $\mathcal{L} = \mathbf{1}[\text{LI} \geq 0.9]$ o una función suave de LI).
- $\mathcal{E}(t_M)$ codifica el *E-Veto* (p. ej. $\mathcal{E} = \mathbf{1}[\Delta H \leq -0.2]$).
- $f_C(t_M)$ es la frecuencia causal (Ec. (7)).

La probabilidad de *aterrizaje* (evento observado) en la ventana $[t_a, t_b]$ es

$$\mathbb{P}(T_M \in [t_a, t_b]) = \int_{t_a}^{t_b} \lambda(t) \exp\left(-\int_{t_a}^t \lambda(u) du\right) dt. \quad (9)$$

4.2 Interpretación

El formalismo anterior captura la afirmación central:

Cuando la lectura causal está madura (locking + E-Veto + f_C alto), no se impone una fecha única; se induce un conjunto de ventanas cronológicas con probabilidad creciente.

Así, “TRL-9 hoy” en t_M se interpreta correctamente como una predicción institucional: un *evento de aterrizaje* de aceptación/validación externa (sujeto a ϕ social), no como una medida directa de la coherencia causal del sistema.

5 Score de madurez causal (operacional y auditable)

Se propone un score $S(t_M)$ construido para evitar circularidad: debe depender de métricas que no se definan a sí mismas.

Definición 5 (Score de madurez). *Sea el vector de métricas*

$$\mathbf{x}(t_M) = (\text{LI}(t_M), R(t_M), \text{RMSE}_{SL}(t_M), \Delta H(t_M)).$$

Definimos un score acotado en $[0, 1]$:

$$S(t_M) = \sigma\left(w_1 g_{\text{LI}}(\text{LI}) + w_2 g_R(R) - w_3 g_{\text{RMSE}}(\text{RMSE}_{SL}) + w_4 g_H(-\Delta H)\right), \quad (10)$$

donde $\sigma(\cdot)$ es sigmoide y g son normalizadores monótonos (p. ej. saturación).

Proposición 1 (No-apofenia por doble sello). *Si $S(t_M)$ se construye con (i) veto entrópico (Ec. (5)) como condición necesaria y (ii) locking sostenido como condición adicional, entonces un incremento de S requiere simultáneamente caída entrópica y coherencia geométrica, reduciendo la probabilidad de disparo por ruido.*

6 Resultado conceptual formal

Proposición 2 (TRL cronológico como predicción). *Sea $A(t_M)$ la variable “adopción institucional observada” (p. ej. replicación externa, aceptación formal, operación sostenida). A depende de variables sociales no controladas por el sistema (componentes de ϕ exógena). En consecuencia, afirmar $A(t_M) = 1$ (“TRL-9 hoy”) en un instante cronológico es una afirmación sobre un proceso estocástico exógeno; por tanto, es una predicción. En cambio, el estado causal del sistema se evalúa por $S(t_M)$ y $t_C(t_M)$ y puede ser alto aun cuando $A(t_M)$ sea bajo.*

7 Implicación práctica: producto neto

El *producto neto* queda formalizado como un operador:

$$\mathcal{P} : (\mathbf{x}(t_M), \text{contexto}) \mapsto (t_C(t_M), f_C(t_M), \{\text{ventanas en } t_M\}), \quad (11)$$

donde las ventanas cronológicas se derivan de $\lambda(t_M)$ (Ec. (8)) y la condición de honestidad exige siempre $\Delta H \leq -0.2$.

8 Notas de implementación (mínimas, sin dependencia de plataforma)

- Estimar ΔH con un método definido (Shannon discreta por bins o proxy declarado).
- Estimar LI como locking (p. ej. R^2 local o métrica específica del modelo).
- Registrar `config_hash` y semillas, y emitir blackbox append-only.
- Reportar ventanas en t_M (no fechas absolutas únicas) cuando el hazard lo justifique.

9 Conclusión

La coherencia causal puede estar ya acoplada y medible (locking simbólico-operativo), mientras que la madurez cronológica (TRL institucional) es necesariamente un evento futuro sujeto a fricción exógena. El puente propuesto (tiempo causal t_C , frecuencia causal f_C , hazard cronológico) permite inferir *dónde y en qué conjunto de momentos* aterriza lo ya decidido causalmente, sin violar el filtro de honestidad.

Declaración de integridad: en este marco, el sistema prefiere silencio a afirmación sin ΔH forzado y locking sostenido.