



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v5i3.1108>

Recibido: 2026-08-24

Aceptado: 2026-09-07

Publicado: 2026-09-25

Eidos temporal: dinámica cuántica abierta como flujo geométrico con restricción de curvatura en el espacio de estados cuánticos

Eidos temporal: open quantum dynamics as a geometric flow with a curvature constraint on the space of quantum states

Autor(s)

Stalin F. Díaz De Jesús¹

Estudiante

stalin.instructordebandas@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-3952-4958>

Investigador independiente

Quito – Ecuador

Lady S. Ante Ugsha²

Estudiante

stefaniaugsha4@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-4081-1364>

Investigador independiente

Quito – Ecuador

Hugo F. Arias Vega³

Estudiante

hugofabianav@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-8350-0598>

Investigador independiente

Quito – Ecuador

Erick A. Larcos Pilliza⁴

Estudiante

ericklarcos1984@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-2282-9395>

Investigador independiente

Quito – Ecuador

Cómo citar

Díaz De Jesús, S. F., Ante Ugsha, L. S., Arias Vega, H. F., & Larcos Pilliza, E. A. (2026). Eidos temporal: dinámica cuántica abierta como flujo geométrico con restricción de curvatura en el espacio de estados cuánticos. *ASCE MAGAZINE*, 5(3), 3148–3168. <https://doi.org/10.70577/asce.v5i3.1108>

Resumen

La ecuación de Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad (GKSL) proporciona la descripción estándar de una amplia clase de sistemas cuánticos abiertos en el régimen markoviano. El presente trabajo explora una hipótesis complementaria: que la geometría intrínseca del espacio de estados cuánticos puede utilizarse para construir un término dinámico adicional, manteniendo a GKSL como modelo nulo y no como una teoría a reemplazar. Se formula Eidos Temporal como un flujo geométrico fenomenológico sobre el espacio de estados de un qubit, utilizando la métrica de Bures y una contracción del tensor de Ricci con el campo de velocidades de la dinámica de referencia. Para un qubit de rango completo se obtiene explícitamente $\text{Ric} = 8g$ y $R = 24$, correspondientes a una geometría de curvatura seccional constante $K = 4$. El corrector propuesto es el gradiente de un escalar de curvatura construido a partir del flujo GKSL. En una reducción radial, la dinámica resultante es $\dot{r} = -[\Gamma + 8\tau E \Gamma^2 / (1 - r^2)]r$, de modo que la tasa efectiva depende del estado. Para $\Gamma = 1,2/\mu\text{s}$, $\tau E = 0,012 \mu\text{s}$ y $r_0 = 0,9999$, la integración numérica produce $\Delta P_{\text{máx}} = 0,0485926$ en $t \approx 0,337 \mu\text{s}$. Se introduce $Y(t) = \ln[P(t) - P_{\text{th}}]$, que es exactamente lineal para GKSL con tasa constante y presenta curvatura para Eidos. Un ajuste GKSL con tasa libre da $\Gamma_{\text{fit}} \approx 1,3773/\mu\text{s}$, pero no reproduce la curvatura de Eidos. El resultado establece una prueba de discriminación frente a una simple renormalización constante de la tasa. La viabilidad matemática de la trayectoria radial queda demostrada para los parámetros estudiados; la positividad completa, la derivación microscópica de τE y la consistencia termodinámica permanecen como cuestiones abiertas y explícitamente delimitadas.

Palabras clave: sistemas cuánticos abiertos; ecuación GKSL; geometría de Bures; qubit; dinámica no lineal; geometría de la información; decoherencia; flujo geométrico.

Abstract

The Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad (GKSL) equation provides the standard description of a broad class of open quantum systems in the Markovian regime. This work explores a complementary hypothesis: that the intrinsic geometry of the space of quantum states can be used to build an additional dynamical term, keeping GKSL as a null model rather than a theory to be replaced. Eidos Temporal is formulated as a phenomenological geometric flow on the state space of a qubit, using the Bures metric and a contraction of the Ricci tensor with the velocity field of the reference dynamics. For a full-rank qubit one obtains explicitly $\text{Ric} = 8g$ and $R = 24$, corresponding to a constant sectional curvature geometry $K = 4$. The proposed corrector is the gradient of a curvature scalar built from the GKSL flow. In a radial reduction, the resulting dynamics is $\dot{r} = -[\Gamma + 8\tau E\Gamma^2/(1 - r^2)]r$, so that the effective rate is state-dependent. For $\Gamma = 1.2/\mu\text{s}$, $\tau E = 0.012 \mu\text{s}$ and $r_0 = 0.9999$, numerical integration yields $\Delta P_{\text{max}} = 0.0485926$ at $t \approx 0.337 \mu\text{s}$. The quantity $Y(t) = \ln[P(t) - P_{\text{th}}]$ is introduced, which is exactly linear for constant-rate GKSL and shows curvature for Eidos. A free-rate GKSL fit gives $\Gamma_{\text{fit}} \approx 1.3773/\mu\text{s}$ but does not reproduce the Eidos curvature. The result establishes a discrimination test against a simple constant renormalization of the rate. The mathematical viability of the radial trajectory is demonstrated for the parameters studied; complete positivity, the microscopic derivation of τE and thermodynamic consistency remain open and explicitly delimited questions.

Keywords: open quantum systems; GKSL equation; Bures geometry; qubit; nonlinear dynamics; information geometry; decoherence; geometric flow.

Introducción

La dinámica de sistemas cuánticos abiertos constituye uno de los marcos centrales de la física cuántica aplicada, debido a que la interacción con grados de libertad ambientales produce relajación, decoherencia y pérdida de información accesible al sistema. En el régimen markoviano y bajo las hipótesis usuales de aproximación, la ecuación de Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad (GKSL) proporciona la forma general de los generadores de semigrupos cuánticos completamente positivos y preservadores de la traza (Gorini et al., 1976; Lindblad, 1976; Breuer y Petruccione, 2002).

Existe simultáneamente una estructura geométrica natural sobre el espacio de estados cuánticos. La métrica de Bures está relacionada con la distinguibilidad estadística local y constituye una métrica monótona distinguida en la geometría de la información cuántica (Bures, 1969; Uhlmann, 1976; Helstrom, 1976; Braunstein y Caves, 1994; Petz, 1996). Para un qubit, esta estructura puede escribirse de forma explícita en coordenadas de Bloch y posee curvatura constante (Dittmann, 1999).

Material y Métodos

Motivación: por qué estudiar un flujo geométrico

La motivación de Eidos Temporal no es sustituir la teoría GKSL, sino preguntar si una estructura geométrica ya presente en el espacio de estados puede producir una corrección dinámica que sea cuantitativamente distinguible de un simple cambio de parámetros. Esta pregunta es relevante por tres razones. Primero, una relajación exponencial puede absorber pequeñas discrepancias experimentales mediante una recalibración de una tasa constante, dificultando la identificación de nuevos mecanismos. Segundo, la geometría de Bures proporciona cantidades intrínsecas que no dependen de una parametrización cartesiana particular. Tercero, existen formulaciones geométricas de dinámicas disipativas y flujos de gradiente en espacios de estados cuánticos, aunque generalmente asociadas a métricas y funcionales de energía o entropía distintos del mecanismo propuesto aquí (Carlen y Maas, 2014, 2017).

La hipótesis central de este trabajo es, por tanto, deliberadamente acotada: una dinámica GKSL de referencia puede complementarse fenomenológicamente mediante un campo construido a partir de la curvatura de la geometría de Bures y del campo de velocidades de la propia dinámica de referencia. La hipótesis es útil científicamente sólo si genera consecuencias que puedan distinguirse de modelos nulos suficientemente flexibles. Por ello, el artículo no considera suficiente una diferencia visual entre dos curvas de relajación: se exige una comparación con una tasa GKSL libre y se utiliza una transformación logarítmica que convierte la referencia de tasa constante en una recta exacta.

Objetivos y alcance

Los objetivos son: (i) caracterizar la geometría de Bures para un qubit; (ii) construir un escalar de curvatura a partir del flujo GKSL de referencia; (iii) definir un campo corrector geométrico con unidades consistentes; (iv) derivar una reducción radial analítica y resolverla numéricamente; (v) establecer un observable discriminante frente a una tasa constante; y (vi) evaluar la viabilidad matemática, física y experimental de la hipótesis sin atribuirle un origen microscópico que todavía no ha sido demostrado.

El alcance es igualmente importante. El trabajo constituye una prueba de concepto matemática y fenomenológica para un qubit. No demuestra que la curvatura de Bures sea la causa física de la disipación, no demuestra que toda dinámica abierta pueda formularse como flujo geométrico y no demuestra que el mapa no lineal resultante sea CPTP en dimensiones arbitrarias.

Contribuciones potenciales

Las contribuciones que se proponen como resultado de este estudio son: una formulación explícita de una corrección geométrica sobre una dinámica GKSL de referencia, con una escala temporal τE dimensionalmente bien definida; una derivación autocontenida, para el qubit, de la métrica de Bures, la conexión de Levi-Civita, el tensor de Ricci y el corrector radial; una ecuación efectiva cuya tasa de relajación depende del estado, permitiendo separar conceptualmente un mecanismo geométrico de una simple renormalización constante de Γ ; un criterio falsable basado en $Y(t) = \ln[P(t) - P_{th}]$, junto con un ajuste GKSL con tasa libre; un marco de comparación con dinámicas GKSL, modelos no markovianos y formulaciones

de flujo de gradiente, que delimita qué parte de la propuesta es nueva como *ansatz* y qué parte pertenece a estructuras ya conocidas; y una agenda de validación futura que especifica las pruebas necesarias para pasar de una hipótesis fenomenológica a un modelo físicamente fundamentado.

Estados cuánticos, dinámica GKSL y geometría de Bures

Espacio de estados

Sea $\mathcal{H}$ un espacio de Hilbert complejo de dimensión finita. El espacio de estados físicos es

$$\mathcal{D}(\mathcal{H}) = \{\rho \in \mathcal{B}(\mathcal{H}) : \rho = \rho^\dagger, \rho \geq 0, \text{Tr } \rho = 1\}. \quad (1)$$

En el régimen markoviano, una dinámica de referencia puede escribirse como

$$\frac{d\rho_L}{dt} = \mathcal{L}_{\text{GKSL}}(\rho_L). \quad (2)$$

La forma explícita de $\mathcal{L}_{\text{GKSL}}$ depende del sistema, del Hamiltoniano efectivo y de los operadores de salto. En la reducción considerada aquí se toma una relajación radial hacia el estado completamente mezclado, de modo que $r(t)$ presenta una ley exponencial.

Métrica de Bures

La fidelidad de Uhlmann se define por

$$F(\rho, \sigma) = \left[\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\rho} \sigma \sqrt{\rho}} \right]^2. \quad (3)$$

La métrica de Bures se introduce localmente mediante

$$ds_B^2 = 2 \left[1 - \sqrt{F(\rho, \rho + d\rho)} \right] = g_{\mu\nu} d\theta^\mu d\theta^\nu. \quad (4)$$

En una representación espectral de ρ , la derivada logarítmica simétrica L_X asociada a un vector tangente X satisface

$$X = \frac{1}{2}(\rho L_X + L_X \rho), \quad (5)$$

y el producto interno inducido por la métrica puede expresarse como

$$g_{\rho}(X, Y) = \frac{1}{2} \text{Tr}[\rho\{L_X, L_Y\}]. \quad (6)$$

En el dominio de rango completo también puede escribirse

$$g_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{n,m} \frac{\langle n|\partial_i \rho|m\rangle \langle m|\partial_j \rho|n\rangle}{\lambda_n + \lambda_m}. \quad (7)$$

Hipótesis de Eidos Temporal

Se propone una ecuación maestra modificada de la forma

$$\frac{d\rho_E}{dt} = \mathcal{L}_{\text{GKSL}}(\rho_E) + \tau_E C_g(\rho_E), \quad (8)$$

donde τ_E tiene dimensiones de tiempo. En el límite $\tau_E \rightarrow 0$ se recupera la dinámica de referencia:

$$\lim_{\tau_E \rightarrow 0} \frac{d\rho_E}{dt} = \mathcal{L}_{\text{GKSL}}(\rho_E). \quad (9)$$

La ecuación (8) es un ansatz fenomenológico. En particular, la notación L_E se utiliza sólo como abreviatura del campo total y no implica que exista un generador lineal de Lindblad equivalente al término geométrico.

Escalar de curvatura asociado al flujo de referencia

Sea $V_L(\rho)$ el campo vectorial asociado a la dinámica GKSL de referencia. Se define

$$\kappa_R(\rho) = \text{Ric}_g(V_L(\rho), V_L(\rho)). \quad (10)$$

Si el parámetro de evolución es tiempo físico, κ_R tiene dimensiones de tiempo⁻². El campo corrector se postula como

$$C_g(\rho) = -\frac{1}{2} \text{grad}_g \kappa_R(\rho). \quad (11)$$

El factor 1/2 fija la normalización adoptada en este estudio. Esta construcción separa tres niveles: la geometría de Bures y sus invariantes son resultados matemáticos; la elección de κ_R y C_g constituye la hipótesis geométrica; y las consecuencias temporales son predicciones del modelo.

Restricción de curvatura y condición de rapidez

La expresión (10) puede entenderse como una restricción de curvatura dependiente del flujo de referencia. Una hipótesis más fuerte sería imponer directamente

$$\text{Ric}_g(\dot{\rho}, \dot{\rho}) = \kappa, \quad (12)$$

con κ constante. En una variedad de Einstein con $\text{Ric} = 8g$, esta condición se reduce a

$$8\|\dot{\rho}\|_g^2 = \kappa, \quad (13)$$

y, por tanto, fija la rapidez con respecto a la métrica elegida. Es importante distinguir esta condición fuerte de la implementación numérica del presente artículo. La simulación no impone κ constante como ley microscópica; utiliza $\kappa_R(\rho)$ construido a partir de V_L . La condición (12) se presenta como una interpretación geométrica posible y como una dirección para trabajos posteriores. Su origen físico en un Hamiltoniano sistema-baño concreto no se deriva aquí. Esta separación evita convertir una hipótesis cinemática en una afirmación microscópica no demostrada.

Geometría explícita del qubit

Para $d = 2$, un estado de qubit puede parametrizarse mediante el vector de Bloch $\mathbf{r} = (x_1, x_2, x_3)$:

$$\rho = \frac{1}{2}(I + \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\sigma}), \quad r^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 < 1. \quad (14)$$

La bola abierta $r < 1$ representa los estados de rango completo. En coordenadas cartesianas de Bloch, la métrica de Bures adopta la forma

$$g_{ij} = \frac{1}{4} \left(\delta_{ij} + \frac{x_i x_j}{1 - r^2} \right), \quad (15)$$

con inversa

$$g^{ij} = 4(\delta^{ij} - x^i x^j). \quad (16)$$

La conexión de Levi-Civita es

$$\Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2} g^{k\ell} (\partial_i g_{j\ell} + \partial_j g_{i\ell} - \partial_\ell g_{ij}), \quad (17)$$

y para (15) se obtiene

$$\Gamma_{ij}^k = 4x^k g_{ij}. \quad (18)$$

Introduciendo $r = \sin \chi$, la métrica toma la forma

$$ds_B^2 = \frac{1}{4} (d\chi^2 + \sin^2 \chi d\Omega_2^2). \quad (19)$$

Por tanto, el interior de la bola de Bloch es isométrico a una región de una 3-esfera de radio $a = 1/2$. La curvatura seccional es $K = 1/a^2 = 4$ y, en tres dimensiones,

$$R_{ij} = 8g_{ij}, \quad R = 24. \quad (20)$$

Estos valores son consistentes con la geometría de Bures del qubit y no deben confundirse con una nueva predicción física de Eidos.

Reducción radial y dinámica efectiva

Consideremos una trayectoria radial, $r(t) = r(t)\hat{n}$, con dirección $\hat{n}$ fija. Para la dinámica GKSL de referencia se toma

$$\dot{r}_L = -\Gamma r_L, \quad (21)$$

cuya solución es

$$r_L(t) = r_0 e^{-\Gamma t}. \quad (22)$$

La componente radial de la métrica y su inversa son

$$g_{rr} = \frac{1}{4(1-r^2)}, \quad g^{rr} = 4(1-r^2). \quad (23)$$

Al evaluar (10) sobre el campo radial de referencia se obtiene

$$\kappa_R(r) = R_{rr} \dot{r}_L^2 = \frac{2\Gamma^2 r^2}{1-r^2}. \quad (24)$$

Por consiguiente,

$$g^{rr} \frac{d\kappa_R}{dr} = \frac{16\Gamma^2 r}{1-r^2}, \quad (25)$$

y

$$C_g^r = -\frac{8\Gamma^2 r}{1-r^2}. \quad (26)$$

La ecuación radial de Eidos queda

$$\dot{r}_E = -\Gamma r_E - \frac{8\tau_E \Gamma^2 r_E}{1-r_E^2}, \quad (27)$$

o, equivalentemente,

$$\dot{r}_E = -\Gamma_{\text{eff}}(r_E)r_E, \quad \Gamma_{\text{eff}}(r) = \Gamma + \frac{8\tau_E \Gamma^2}{1-r^2}. \quad (28)$$

Para $\tau_E > 0$ y $0 < r_0 < 1$, el lado derecho de (27) es negativo. Además, mientras $r < 1$, la solución no puede alcanzar $r = 1$ hacia adelante en el tiempo porque el término corrector se hace fuertemente disipativo al aproximarse a la frontera. Para la trayectoria numérica estudiada se obtiene $0 < r_E(t) < 1$ en todo el intervalo de simulación.

Positividad de la trayectoria frente a positividad completa

La condición $0 < r_E(t) < 1$ garantiza que la matriz densidad radial asociada permanece en el espacio físico del qubit. Esta afirmación no equivale a demostrar que el mapa dinámico no lineal sea completamente positivo. En una ecuación lineal GKSL, la estructura del generador garantiza la propiedad CPTP del semigrupo correspondiente bajo las hipótesis estándar. En cambio, (8) es un modelo no lineal porque el campo corrector depende del estado. Por ello, la positividad de una trayectoria concreta no basta para establecer positividad completa sobre todos los estados ni sobre sistemas auxiliares. En este artículo no se afirma tal propiedad; se identifica como una cuestión matemática abierta que debe resolverse mediante una formulación explícita del mapa y pruebas de extensión a espacios compuestos.

Observable discriminante y estrategia de falsación

Definimos el observable radial

$$P(t) = \frac{1+r(t)}{2}. \quad (29)$$

Este observable no es la pureza cuántica. La pureza de un qubit es

$$\text{Tr}(\rho^2) = \frac{1 + r^2}{2}. \quad (30)$$

La cantidad P se utiliza aquí como observable escalar de la coordenada radial. Para el estado completamente mezclado,

$$P_{\text{th}} = \frac{1}{2}. \quad (31)$$

Definimos entonces

$$Y(t) = \ln[P(t) - P_{\text{th}}] = \ln\left(\frac{r(t)}{2}\right). \quad (32)$$

Para GKSL,

$$Y_L(t) = \ln\left(\frac{r_0}{2}\right) - \Gamma t, \quad (33)$$

por lo que Y_L es exactamente lineal. Para Eidos,

$$\frac{dY_E}{dt} = -\Gamma - \frac{8\tau_E\Gamma^2}{1 - r_E^2(t)}. \quad (34)$$

La pendiente depende de $r(t)$ y, por tanto, del tiempo. En consecuencia, una tasa GKSL constante no puede reproducir exactamente la forma funcional de Y_E . Esta observación debe interpretarse con precisión: $Y(t)$ falsifica una explicación basada exclusivamente en una tasa constante, pero no falsifica todos los modelos alternativos. En particular, una ecuación GKSL con tasa explícitamente dependiente del tiempo puede reproducir una trayectoria escalar concreta. Para que la hipótesis Eidos sea identificable frente a esa clase más amplia de modelos, será necesario estudiar varias condiciones iniciales, observables independientes y, preferiblemente, tomografía de proceso.

Resultados

Simulación numérica

La ecuación (27) se integra con tolerancias numéricas estrictas sobre

$$0 \leq t \leq 5 \mu\text{s}, \quad (35)$$

utilizando

$$\Gamma = 1.2 \mu\text{s}^{-1}, \quad \tau_E = 0.012 \mu\text{s}, \quad r_0 = 0.9999. \quad (36)$$

La combinación dimensional que controla la intensidad del término geométrico es

$$8\tau_E\Gamma^2 = 0.13824 \mu\text{s}^{-1}. \quad (37)$$

No se interpreta este valor como un invariante de la trayectoria, sino como un parámetro dimensional de control determinado por τ_E y Γ . La diferencia

$$\Delta P(t) = P_L(t) - P_E(t) \quad (38)$$

alcanza numéricamente

$$\Delta P_{\max} = 0.0485926 \quad (39)$$

en

$$t_{\max} = 0.337 \mu\text{s}. \quad (40)$$

Para evaluar si esta diferencia puede explicarse por una recalibración constante de la tasa, se ajusta

$$Y_{\text{fit}}(t) = \ln\left(\frac{r_0}{2}\right) - \Gamma_{\text{fit}}t, \quad (41)$$

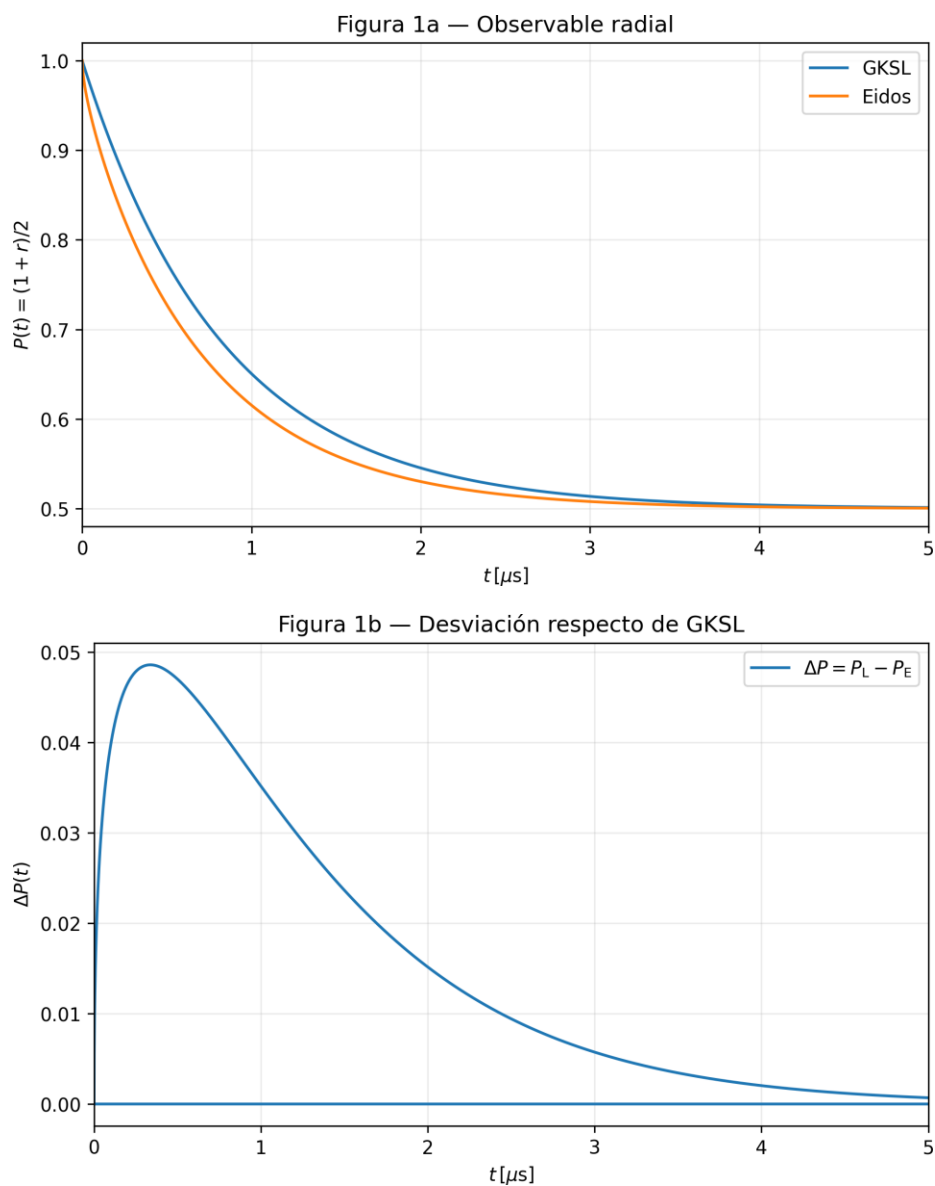
con Γ_{fit} libre y el valor inicial fijado. En el intervalo completo se obtiene

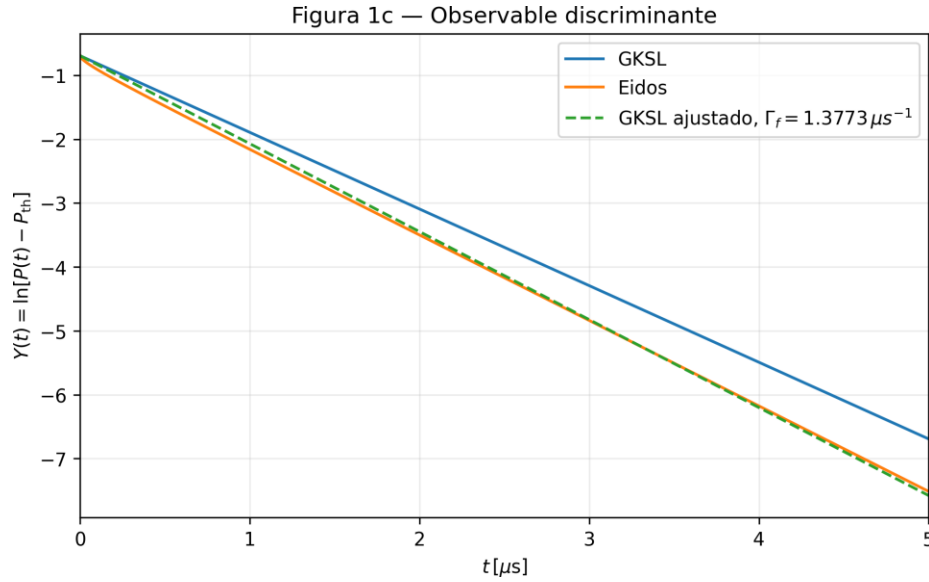
$$\Gamma_{\text{fit}} = 1.3773 \mu\text{s}^{-1}. \quad (42)$$

La diferencia $Y_E - Y_{\text{fit}}$ no es nula y cambia de signo en la ventana temporal. Esto demuestra que el comportamiento de Eidos no se reduce, para esta trayectoria, a sustituir Γ por una única constante efectiva. Estos valores se reprodujeron mediante integración numérica independiente con coincidencia hasta la sexta cifra.

Figura 1

Resultados de la reducción radial para un qubit





Nota. Resultados de la reducción radial con $\Gamma = 1,2/\mu\text{s}$, $\tau_E = 0,012 \mu\text{s}$ y $r_0 = 0,9999$. (a) Observable radial $P(t) = (1 + r)/2$, que no debe confundirse con la pureza $\text{Tr}(\rho^2)$. (b) Diferencia $\Delta P = P_L - P_E$, cuyo máximo es 0,0485926 cerca de 0,337 μs . (c) $Y(t) = \ln[P(t) - P_{th}]$: la referencia GKSL es una recta exacta, Eidos presenta curvatura y la línea discontinua corresponde al mejor ajuste GKSL con tasa libre $\Gamma_{\text{fit}} \approx 1,3773/\mu\text{s}$. Elaboración propia.

Discusión

comparación con otras formulaciones

Relación con GKSL

La diferencia conceptual más directa es que GKSL proporciona un generador lineal y, bajo sus hipótesis, una evolución completamente positiva y preservadora de la traza. Eidos parte de ese generador como referencia y añade un término dependiente del estado. Por tanto, la propuesta no compite con GKSL en el régimen donde GKSL ya describe satisfactoriamente los datos; propone una prueba para detectar una estructura adicional que no pueda absorberse mediante una tasa constante. La ventaja metodológica de conservar GKSL como modelo nulo es que obliga a cuantificar la diferencia. Una discrepancia entre P_L y P_E no es suficiente: la comparación con Γ_{fit} y con la linealidad de $Y(t)$ elimina la explicación más simple basada en una sola tasa efectiva constante.

Relación con Redfield y aproximaciones no markovianas

Las ecuaciones de Redfield y las técnicas de proyección, incluidas las formulaciones time-convolutionless (TCL), parten de una estrategia microscópica de eliminación de grados de libertad ambientales y pueden producir generadores dependientes del tiempo o estructuras que no son GKSL (Breuer y Petruccione, 2002; Breuer, 2001). Eidos tiene un origen diferente: el término adicional no se deriva aquí de una expansión en la constante de acoplamiento ni de una función de memoria. Es un campo local en el espacio de estados construido mediante la geometría de Bures. Por esta razón, no debe identificarse automáticamente Eidos con una dinámica no markoviana. La dependencia de $C_g(\rho)$ respecto del estado produce una ecuación no lineal y local en el tiempo, pero la no linealidad no equivale por sí misma a memoria ambiental. La comparación experimental con modelos no markovianos es, no obstante, necesaria: un efecto que Eidos atribuya a geometría podría ser reproducido en determinados regímenes por memoria, acoplamiento fuerte o correlaciones iniciales.

Relación con flujos de gradiente y geometría de la información

Existen formulaciones en las que dinámicas disipativas clásicas y cuánticas se interpretan como flujos de gradiente respecto de una métrica apropiada. En particular, Carlen y Maas construyeron una geometría no conmutativa relacionada con la estructura de Wasserstein y mostraron resultados de flujo de gradiente para ecuaciones cuánticas tipo Fokker-Planck (Carlen y Maas, 2014, 2017). Estas contribuciones muestran que la geometría puede tener un papel dinámico genuino y no sólo descriptivo. Eidos se diferencia en dos aspectos. Primero, utiliza específicamente la métrica de Bures y su curvatura, no una métrica de transporte no conmutativa. Segundo, el funcional cuya geometría se utiliza no es la entropía relativa: el escalar κ_R se construye a partir de la contracción de Ricci con el campo de velocidades de la dinámica de referencia. El mecanismo propuesto es, por tanto, una corrección geométrica de la cinemática del flujo y no una reformulación de la disipación como flujo de gradiente de entropía.

Relación con una GKSL de tasa dependiente del tiempo

Una comparación más exigente es con un modelo lineal GKSL cuya tasa sea $\Gamma(t)$. Para una sola trayectoria radial, siempre puede definirse formalmente una tasa instantánea que reproduzca la misma función $r(t)$, siempre que $r(t) > 0$. En consecuencia, el resultado de la Figura 1 no demuestra que Eidos sea distinguible de cualquier modelo GKSL dependiente del tiempo. Esta observación no invalida la hipótesis; define el siguiente nivel de falsación. Una prueba robusta debe comparar simultáneamente varias condiciones iniciales, diferentes orientaciones o componentes del Bloch, varios observables y, cuando sea posible, la acción sobre un conjunto de estados mediante tomografía de proceso. La hipótesis Eidos sería especialmente informativa si un mismo parámetro τE explicara de forma conjunta una familia de trayectorias donde una parametrización GKSL alternativa requiriera funciones $\Gamma(t)$ independientes.

Viabilidad de la hipótesis

La viabilidad de Eidos debe separarse en niveles que no pueden confundirse.

Viabilidad matemática

La viabilidad matemática del ansatz radial queda establecida para el dominio $0 < r < 1$. La ecuación (27) define un campo suave en cualquier compacto estrictamente contenido en ese intervalo y el término geométrico apunta hacia el interior. La integración con $r_0 = 0,9999$ permanece físicamente admisible durante los 5 μ s estudiados. La divergencia coordenada de la métrica al aproximarse a $r = 1$ no se convierte en una divergencia del escalar de Ricci; en la ecuación radial, la estructura $1/(1 - r^2)$ produce una corrección disipativa fuerte cerca de la frontera.

Viabilidad fenomenológica y capacidad de falsación

La hipótesis es fenomenológicamente viable en el sentido mínimo de que define una predicción cuantitativa distinta de la referencia GKSL. Con los parámetros de prueba, la diferencia máxima $\Delta P_{\text{máx}} = 0,0485926$ es finita y la variable $Y(t)$ presenta curvatura. La señal no debe interpretarse todavía como evidencia física: los parámetros fueron elegidos para estudiar el mecanismo y no proceden de una medición experimental. La capacidad de

falsación es más fuerte que la mera comparación visual. Si un experimento muestra que, después de ajustar libremente una tasa GKSL constante, $Y(t)$ permanece compatible con una recta dentro de las incertidumbres experimentales, la versión actual de Eidos queda restringida o descartada para ese régimen. Si aparece curvatura sistemática, todavía habrá que descartar modelos GKSL con tasa dependiente del tiempo y modelos no markovianos.

Viabilidad física

La viabilidad física permanece abierta. El parámetro τ_E tiene aquí el papel de escala temporal fenomenológica. Para convertirlo en una cantidad físicamente fundamentada sería necesario derivarlo de un Hamiltoniano sistema-baño concreto o relacionarlo con funciones de correlación ambientales, escalas de acoplamiento y condiciones de temperatura. Sin esa derivación, la interpretación de τ_E como propiedad universal no está justificada. La misma cautela se aplica a la restricción de curvatura. La relación $\text{Ric}_g(\rho, \rho) = \kappa$ fija una rapidez de Bures cuando κ es constante, pero el presente trabajo no demuestra que un baño físico imponga esa condición. La hipótesis debe entenderse como una regla geométrica propuesta cuya derivación microscópica constituye un objetivo futuro.

Viabilidad cuántica y termodinámica

La trayectoria radial permanece dentro del espacio de estados, pero ello no demuestra CPTP para el mapa completo. Además, una formulación físicamente aceptable debería estudiar la producción de entropía, el flujo de calor y la compatibilidad con relaciones de balance detallado cuando exista un estado estacionario térmico. Estas propiedades no se deducen automáticamente de la geometría de Bures ni del signo de τ_E .

Programa mínimo de validación

Para elevar la hipótesis desde una prueba de concepto hasta una propuesta físicamente contrastable, se identifican cinco pruebas prioritarias:

1. derivar C_g desde un modelo microscópico sistema-baño o, al menos, obtener τ_E a partir de parámetros físicos medibles;
2. ajustar simultáneamente varias condiciones iniciales con un único τ_E y comparar contra GKSL con tasas constantes y dependientes del tiempo;

3. realizar tomografía de estado o de proceso para comprobar que la señal no sea específica de un único observable radial;
4. analizar positividad completa, estabilidad y extensión a sistemas auxiliares y multipartitos;
5. establecer una formulación termodinámica que determine si la corrección respeta las restricciones de equilibrio y producción de entropía apropiadas.

Cuadro 1

Comparación conceptual entre Eidos Temporal y marcos relacionados

Marco	Estructura dinámica	Origen de la corrección	Geometría explícita	Estado de la hipótesis en este trabajo
GKSL	Lineal, markoviana, semigrupo bajo hipótesis estándar	Generador disipativo compatible con CPTP	No necesaria	Modelo nulo de referencia
Redfield/TCL	Lineal, generalmente dependiente del tiempo; puede salir de GKSL	Eliminación microscópica de grados ambientales y expansión perturbativa	No es el ingrediente central	Modelo alternativo para comparación futura
Flujos cuánticos de gradiente	Estructura geométrica asociada a un funcional de entropía o energía	Gradiente respecto de una métrica de transporte/información	Sí	Precedente conceptual, mecanismo distinto
GKSL con $\Gamma(t)$	Lineal; tasa dependiente del tiempo	Parametrización fenomenológica o microscópica	No necesariamente	Modelo nulo más exigente
Eidos Temporal	No lineal y local en el tiempo	Gradiente de $\text{Ric}_g(V_L, V_L)$	Sí, Bures	Hipótesis fenomenológica a validar

Nota. Elaboración propia.

Limitaciones

El modelo presenta cinco limitaciones principales. Primera, la construcción se ha demostrado explícitamente sólo para un qubit de rango completo. Segunda, el término geométrico es fenomenológico y no posee todavía una derivación microscópica. Tercera, la simulación utiliza una trayectoria radial y no explora la dinámica angular ni sistemas multipartitos.

Cuarta, la prueba $Y(t)$ excluye una tasa constante, pero no toda posible dinámica lineal con tasa dependiente del tiempo. Quinta, la positividad completa y la termodinámica del modelo no han sido demostradas. Estas limitaciones no son defectos ocultos del resultado, sino condiciones necesarias para interpretar correctamente el alcance de la propuesta. En particular, el artículo no presenta la hipótesis como una nueva ley fundamental, sino como un modelo geométrico falsable que define con precisión qué observables y qué derivaciones futuras podrían confirmarlo o descartarlo.

Conclusiones

Se ha formulado Eidos Temporal como una hipótesis de dinámica cuántica abierta basada en la idea de que la geometría del espacio de estados puede contribuir al flujo disipativo. La construcción utiliza la métrica de Bures, su conexión de Levi-Civita y la contracción del tensor de Ricci con el campo de velocidades de una dinámica GKSL de referencia. Para el qubit se obtiene $Ric = 8g$ y $R = 24$, correspondientes a $K = 4$. La reducción radial produce

$$\dot{r}_E = - \left[\Gamma + \frac{8\tau_E \Gamma^2}{1 - r_E^2} \right] r_E, \quad (43)$$

lo que genera una tasa efectiva dependiente del estado. Con $\Gamma = 1,2/\mu s$, $\tau_E = 0,012 \mu s$ y $r_0 = 0,9999$, la diferencia máxima respecto de GKSL es $\Delta P_{\text{máx}} = 0,0485926$ en $t \approx 0,337 \mu s$. La principal herramienta de discriminación es $Y(t) = \ln[P(t) - P_{\text{th}}]$. Para GKSL con tasa constante, $Y(t)$ es exactamente lineal. Eidos presenta una pendiente dependiente del estado y, por tanto, curvatura. El ajuste libre produce $\Gamma_{\text{fit}} \approx 1,3773/\mu s$, pero no elimina la estructura temporal de Eidos. Esto establece una diferencia precisa respecto de una simple recalibración constante de la tasa.

El resultado central debe interpretarse con prudencia. La viabilidad matemática de la trayectoria está establecida para el régimen estudiado y la hipótesis es falsable, pero no se ha demostrado que la corrección geométrica sea un efecto físico universal. La derivación microscópica de τ_E , la justificación física de una restricción de curvatura, la positividad completa del mapa, la termodinámica y la extensión multipartita permanecen abiertas. Por ello, la contribución de este trabajo es ofrecer una formulación concreta, cuantitativa y

contrastable de una hipótesis geométrica, junto con criterios explícitos que permitan determinar si dicha hipótesis merece una interpretación física más profunda.

Referencias bibliográficas

- Braunstein, S. L., y Caves, C. M. (1994). Statistical distance and the geometry of quantum states. *Physical Review Letters*, 72(22), 3439-3443. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.3439>
- Breuer, H.-P. (2001). The time-convolutionless projection operator technique in the quantum theory of dissipation and decoherence. *Annals of Physics*, 291(1), 36-70. <https://doi.org/10.1006/aphy.2001.6152>
- Breuer, H.-P., Laine, E.-M., y Piilo, J. (2009). Measure for the degree of non-Markovian behavior of quantum processes in open systems. *Physical Review Letters*, 103(21), 210401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.210401>
- Breuer, H.-P., y Petruccione, F. (2002). *The theory of open quantum systems*. Oxford University Press.
- Bures, D. (1969). An extension of Kakutani's theorem on infinite product measures to the tensor product of semifinite w^* -algebras. *Transactions of the American Mathematical Society*, 135, 199-212. <https://doi.org/10.2307/1995011>
- Carlen, E. A., y Maas, J. (2014). An analog of the 2-Wasserstein metric in non-commutative probability under which the fermionic Fokker-Planck equation is gradient flow for the entropy. *Communications in Mathematical Physics*, 331(3), 887-926. <https://doi.org/10.1007/s00220-014-2124-8>
- Carlen, E. A., y Maas, J. (2017). Gradient flow and entropy inequalities for quantum Markov semigroups with detailed balance. *Journal of Functional Analysis*, 273(5), 1810-1869. <https://doi.org/10.1016/j.jfa.2017.05.003>
- Dittmann, J. (1999). The scalar curvature of the Bures metric on the space of density matrices. *Journal of Geometry and Physics*, 31(1), 16-24. [https://doi.org/10.1016/S0393-0440\(98\)00068-0](https://doi.org/10.1016/S0393-0440(98)00068-0)



- Gorini, V., Kossakowski, A., y Sudarshan, E. C. G. (1976). Completely positive dynamical semigroups of N-level systems. *Journal of Mathematical Physics*, 17(5), 821-825. <https://doi.org/10.1063/1.522979>
- Helstrom, C. W. (1976). *Quantum detection and estimation theory*. Academic Press.
- Lindblad, G. (1976). On the generators of quantum dynamical semigroups. *Communications in Mathematical Physics*, 48(2), 119-130. <https://doi.org/10.1007/BF01608499>
- Petz, D. (1996). Monotone metrics on matrix spaces. *Linear Algebra and Its Applications*, 244, 81-96. [https://doi.org/10.1016/0024-3795\(94\)00211-8](https://doi.org/10.1016/0024-3795(94)00211-8)
- Uhlmann, A. (1976). The transition probability in the state space of a *-algebra. *Reports on Mathematical Physics*, 9(2), 273-279. [https://doi.org/10.1016/0034-4877\(76\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0034-4877(76)90060-4)

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

Los autores agradecen las discusiones científicas que contribuyeron a la formulación de este trabajo.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial:

En la preparación de este artículo se utilizó la herramienta de inteligencia artificial Claude, de Anthropic, para la revisión de redacción y estilo. Los autores asumen la responsabilidad íntegra del contenido científico del manuscrito.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.