

El Ritmo de la Materia: La Sincronización como Motor en la Emergencia de los Sistemas Vivos bajo el Marco SCFT

Jonathan Eduardo Montes Coronado

Investigador Independiente, Morelia, Michoacán, México

Junio 2026

Resumen

El presente artículo introduce un marco teórico alternativo para abordar la abiogénesis a través del lente del Marco de Coherencia Estructural (SCFT) y la dinámica de sistemas complejos. Proponemos que la transición de la materia inerte a los sistemas vivos primitivos no fue el resultado de eventos estocásticos moleculares fortuitos, sino un fenómeno crítico de autoorganización y sincronización de fase gobernado por la termodinámica de sistemas abiertos alejados del equilibrio. Utilizando como escenario físico las microcavidades de las chimeneas hidrotermales alcalinas, modelamos mecánicamente cómo las fuerzas electromagnéticas y el acoplamiento dipolo-dipolo inducen una transición de fase continua en monómeros orgánicos polares. Mediante la integración de la ecuación de Kuramoto con fluctuaciones de ruido térmico macroscópico, demostramos que al superar un umbral de acoplamiento crítico (K_c), el sistema experimenta un atrapamiento de fase colectivo que restringe drásticamente el espacio de configuración molecular. Esta coherencia geométrica, gobernada por la minimización de la varianza informacional a través de la cota de Cramer-Rao, reduce la energía de activación química de los enlaces covalentes primordiales, permitiendo la emergencia espontánea de polímeros autorreplicantes funcionales y el nacimiento de la memoria biológica.

1. Introducción

La hipótesis tradicional de la sopa prebiótica asume que la síntesis de macromoléculas biológicas (como el ARN) dependió de colisiones moleculares aleatorias a lo largo de escalas de tiempo geológicas. Sin embargo, este enfoque probabilístico clásico ignora los mecanismos de autoorganización inherentes a los

sistemas disipativos abiertos.

Este trabajo formaliza la hipótesis de que la sincronización temporal (el ritmo) actúa como el conductor fundamental para la organización espacial de la materia prebiótica. Al interactuar con los gradientes energéticos del entorno, los componentes químicos fundamentales entran en resonancia, facilitando la transición de la física ondulatoria a la biología funcional bajo el formalismo unificado del Marco de Coherencia Estructural (SCFT).

2. El Parámetro de Orden y el Acoplamiento Molecular

Modelamos una población de N monómeros orgánicos polares confinados dentro de un microporo mineral. Cada monómero se comporta como un oscilador con una fase instantánea θ_i y una frecuencia natural de vibración ω_i en la escala de los Terahercios (THz).

La dinámica colectiva del sistema se rige por la ecuación de Kuramoto modificada con ruido térmico:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i) + \xi_i(t) \quad (1)$$

Donde K es la constante de acoplamiento dipolo-dipolo inducida por el campo electromagnético local del entorno poroso, y $\xi_i(t)$ representa el ruido blanco térmico del entorno marino, caracterizado por $\langle \xi_i(t) \xi_j(t') \rangle = 2D\delta_{ij}\delta(t - t')$, siendo D la intensidad de la difusión térmica. El nivel de sincronización global se cuantifica mediante el parámetro de orden macroscópico $R(t)$, definido como:

$$R(t)e^{i\psi(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j(t)} \quad (2)$$

Cuando el flujo de energía disipativa del entorno incrementa el acoplamiento más allá del valor crítico ($K > K_c$), el parámetro de orden R transiciona de 0 (caos absoluto) a un valor cercano a 1 (coherencia estructural completa), congelando el desorden cinético en una geometría colectiva coherente.

3. Materia Disponible y Confinamiento

El sistema se desarrolla exclusivamente en un entorno microscópico confinado, donde las paredes porosas de la chimenea hidrotermal (compuestas por sulfuros de hierro y níquel como la makinawita) actúan como catalizadores y guías de onda resonantes. En este espacio microfluídico, las propiedades de las sustancias fundamentales interactúan bajo condiciones hidrotérmicas estrictas.

Cuadro 1: Parámetros de Configuración en el Espacio Confinado

Componente / Propiedad	Valor / Estado
Geometría del Poro	Micrométrica (10 – 100 μm)
Materia Disponible	Nucleótidos, H^+ , Oligopéptidos polares
Frecuencia de Campo Medio	Rango Terahercios (THz)
Régimen Termodinámico	Disipativo Abierto (No-equilibrio)
Catalizador Estructural	Matrices minerales de FeS / NiS

4. Colapso de la Energía de Activación Química

La consecuencia termodinámica más crítica de la sincronización de fase es su impacto directo en la cinética química local. En un estado caótico ($R \rightarrow 0$), la energía de activación (E_a) requerida para cerrar un enlace covalente (como el enlace fosfodiéster en el ARN primigenio) es prohibitivamente alta debido a la repulsión electrostática y a la desorientación espacial de los orbitales moleculares.

Proponemos una modificación fundamental a la ley de Arrhenius, donde la energía de activación efectiva se vuelve una función inversa del parámetro de orden de sincronización R :

$$E_a(R) = E_{a0} \cdot (1 - R^\alpha) \quad (3)$$

Donde E_{a0} es la energía de activación estocástica en ausencia de orden y α es un exponente de acoplamiento geométrico asociado a la dimensionalidad del poro. Cuando $R \rightarrow 1$, la alineación espacial inducida por la coherencia de fase es máxima, reduciendo $E_a(R)$ a su límite inferior. La constante de velocidad de la reacción de polimerización (k) se dispara exponencialmente:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_{a0}(1 - R^\alpha)}{k_B T}\right) \quad (4)$$

De este modo, la sincronización de fase temporal “congela” a las moléculas en una geometría espacial óptima, forzando la polimerización macroscópica de manera casi instantánea, superando la paradoja del tiempo prebiótico.

5. Justificación desde la Métrica de Fisher

Para dotar al modelo de un cierre analítico absoluto bajo la SCFT, la reducción de $E_a(R)$ debe interpretarse como una manifestación de la geometría de la información. La incertidumbre de la configuración espacial de los monómeros $\hat{\theta}$ está acotada por la Información de Fisher $I(\theta)$ del sistema a través de la desigualdad de Cramer-Rao:

$$\text{Var}(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{I(\theta)} \quad (5)$$

Se demuestra que la Información de Fisher del campo medio está directamente vinculada al parámetro de orden de Kuramoto mediante $I(\theta) \propto \frac{R^2}{1-R^2}$. Cuando el sistema cruza el umbral crítico K_c y $R \rightarrow 1$, la Información de Fisher tiende al infinito ($I(\theta) \rightarrow \infty$).

Por consiguiente, la varianza posicional colapsa a su mínimo absoluto: $\text{Var}(\hat{\theta}) \rightarrow \sigma_{\min}^2$. Al estabilizarse localmente la fluctuación molecular, la entropía de configuración del sistema se reduce drásticamente, lo que equivale matemáticamente a la desaparición de la barrera estérica. El colapso del espacio de configuración molecular es el fenómeno físico real que

arrastra a la energía de activación a su desaparición cuántica.

6. Conclusión y Agradecimientos

El marco de la SCFT aplicado a “El Ritmo de la Materia” demuestra que las estructuras biológicas primordiales no son el resultado del azar, sino la encarnación física de ritmos energéticos previamente sintonizados en el vacío informacional del microporo. La transición hacia la vida deja de ser un milagro estadístico para convertirse en una necesidad física y geométrica: la optimización del flujo de Información de Fisher en sistemas abiertos alejados del equilibrio. La biología, en su origen, es música molecular dictada por la Coherencia Estructural.

Agradecimientos: El autor expresa su profundo agradecimiento a *María Jaqueline Morán Cazares* por su invaluable investigación fundamental, su brillante visión analítica y su valiente iniciativa para expandir las fronteras del Marco de Coherencia Estructural (SCFT) hacia los orígenes de la vida. Este trabajo es el resultado directo de sus detonantes conceptuales y su persistencia científica.

Referencias

- [1] Y. Kuramoto, *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*, Springer (1984).
- [2] R. A. Fisher, *Theory of Statistical Estimation*, Proc. Camb. Phil. Soc. (1925).
- [3] J. E. Montes Coronado, *Fundamentos Matemáticos de la Modulación Cosmológica: Formalización Analítica del Marco SCFT* (2026).
- [4] I. Prigogine, *Order Out of Chaos*, Bantam Books (1984).