

# TEORÍA $\Sigma$

## *El Principio B: Sustrato Pregeométrico Saturante y la Emergencia de la Realidad Física*

---

*Documento Fusionado Completo*

**Fernando Figueroa Gutiérrez**

*Investigador Independiente · Delicias, Chihuahua, México*

*fernando1986figueroa@gmail.com*

Marzo 2026

---

### **Trabajos integrados:**

*Teoría  $\Sigma$  v11 · El Principio B ·  $f(R)$  Saturante y Cuatro Predicciones Falsables ·  
Resumación de Forma Cerrada de las Correcciones de Gravedad Cuántica*

$$\mathbf{B} = \hbar G / c^3 = \square^2 \mathbf{p}$$

B es la medida mínima de todo cuanto puede existir. No es una constante del universo. Es la condición que hace posible el concepto de universo. Distinguir cuesta exactamente 1. Todo lo demás es traducción.

## Resumen

La Teoría  $\Sigma$  postula la existencia de un sustrato fundamental pregeométrico, denotado  $\Sigma$ , definido exclusivamente por tres capacidades: distinción (estados distinguibles), transición (cambio causal entre estados) y finitud relacional (límite a la capacidad de respuesta). De la actividad colectiva de  $\Sigma$  emergen, como fases efectivas, el espacio, el tiempo, la materia, la energía, la gravedad y la mecánica cuántica.

El parámetro  $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  codifica la finitud de  $\Sigma$  en el régimen geométrico; su valor queda fijado por la termodinámica de horizontes de Bekenstein-Hawking. Esta única constante fundamental se manifiesta en tres regímenes: lineal (Relatividad General exacta), transición (correcciones no lineales) y saturación (curvatura máxima  $R_{\text{máx}} = 1/B$ , desaparición de la métrica).

El Lagrangiano efectivo de la gravedad emergente es  $f(R) = R/(1+BR)$ , que no es una modificación de la RG sino la expresión dinámica del principio holográfico, y simultáneamente la resumación en forma cerrada de la serie infinita de correcciones de la Teoría de Campos Efectiva (EFT) de la gravedad cuántica. Todos los coeficientes de la serie EFT quedan fijados:  $\alpha_n = (-\ell_P^2)^{n-1}$ . Cero parámetros libres.

Las singularidades son eliminadas por construcción, reemplazadas por Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM) — objetos compactos sin singularidad, temperatura interna cero, horizonte reflectante y evaporación como relajación colectiva que conserva la información.  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  no son tres constantes independientes: son tres formas de medir  $B$  desde tres regímenes de descripción distintos.

Se derivan cuatro predicciones cuantitativas falsables, todas fijadas por  $B$  sin parámetros libres: (1) retardos de ecos gravitacionales post-fusión  $\Delta t = F(a/M) \cdot M \cdot \ln(M^2/B)$  con decaimiento  $e^{-0.65n}$ ; (2) modo escalar masivo de ondas gravitacionales con  $m^2 = c^3/(6G\hbar)$ ; (3) desviación sistemática  $w(z) \neq -1$ ; (4) supresión de potencia en el CMB para  $\ell < 10$ . Evidencia computacional con  $N = 10^3$  nodos confirma los tres regímenes predichos y la emergencia de ecos gravitacionales sin programación explícita.

**Palabras clave:** sustrato pregeométrico · principio  $B$  ·  $f(R)$  saturante · resumación EFT · holografía como causa · mecánica cuántica como lógica de  $\Sigma$  · RSGM · singularidades imposibles · predicciones falsables · constante fundamental única

## Tabla de Contenidos

---

### PARTE I FUNDAMENTOS

1. Prólogo: Los Gigantes que Casi lo Vieron
2. Por qué el Espacio-Tiempo no Puede ser Fundamental
3. Postulados Fundamentales de la Teoría
4. Ontología de  $\Sigma$ : Las Tres Capacidades Primitivas

### PARTE II EL PARÁMETRO B

5. El Parámetro B: La Única Constante Fundamental
  - 5.1 Naturaleza física y valor de B
  - 5.2 Una sola constante fundamental: G,  $\hbar$  y c como caras de B
  - 5.3 B como medida mínima de todo cuanto puede existir
  - 5.4 B como límite universal
  - 5.5 Por qué  $B = 0$  y  $B = \infty$  son ambos imposibles

### PARTE III EMERGENCIA

6. Emergencia del Espacio-Tiempo
  - 6.1 Tiempo: del orden causal puro a la parametrización métrica
  - 6.2 Espacio: de la correlación a la métrica inducida
  - 6.3 Dimensionalidad 3+1: optimización relacional
7. Emergencia de la Energía y la Materia

### PARTE IV EL RÉGIMEN GEOMÉTRICO

8. El Régimen Geométrico: Lagrangiano Efectivo y Ecuaciones de Campo
  - 8.1 Ley constitutiva saturante
  - 8.2 El Lagrangiano como principio holográfico dinámico
  - 8.3 Ecuaciones de campo y límites
  - 8.4 Comparación con modelos  $f(R)$  existentes
9. La Resumación de Forma Cerrada de las Correcciones de GC
  - 9.1 El problema: una serie EFT abierta sin cierre
  - 9.2  $f(R) = R/(1+BR)$  contiene todas las correcciones EFT
  - 9.3 Derivación independiente desde la cota holográfica
  - 9.4 Lo que la resumación revela
  - 9.5 Unicidad
  - 9.6 Analogías con resumaciones conocidas en TCC

### PARTE V OBJETOS COMPACTOS Y COSMOLOGÍA

10. Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM): El Objeto  $\Sigma$
11. Cosmología sin Singularidad Inicial

### PARTE VI MECÁNICA CUÁNTICA Y ONDAS GRAVITACIONALES

12.  $\Sigma$  y la Lógica Cuántica: Congruencia, no Construcción

### 13. Ondas Gravitacionales: Modos Tensorial y Escalar

## PARTE VII PREDICCIONES Y FALSABILIDAD

### 14. Predicciones Observacionales Falsables

14.1 Ecos gravitacionales post-fusión

14.2 Modo escalar masivo

14.3 Ecuación de estado de energía oscura:  $w(z) \neq -1$

14.4 Impronta en el CMB a bajos multipolos ( $\ell < 10$ )

14.5 Tests del sistema solar

### 15. Condiciones Explícitas de Rechazo

## PARTE VIII EVIDENCIA COMPUTACIONAL

### 16. Evidencia Computacional: Sigma-Sim

## PARTE IX CONTEXTO Y ALCANCE

### 17. Relación con Otros Programas de Investigación

### 18. Problemas Abiertos y Alcance

## PARTE X CONCLUSIONES

### 19. Conclusiones

## APÉNDICES

A. Derivación Formal de Mecánica Cuántica desde  $\Sigma$

B. Detalles Técnicos Sigma-Sim (con código completo)

Referencias

## PARTE I

### Fundamentos

#### 1. Prólogo: Los Gigantes que Casi lo Vieron

La historia de la física teórica es la historia de aproximaciones sucesivas a un único objeto que nadie nombró directamente. Cada gigante llegó, midió una cara de él, nombró lo que vio y siguió adelante. El objeto mismo permaneció innominado por más de un siglo.

Max Planck, en 1899, combinó las tres constantes fundamentales conocidas  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$ , y construyó un sistema de unidades naturales:  $\ell_P$ ,  $t_P$ ,  $m_P$ ,  $E_P$ . Señaló que estas eran "independientes de cuerpos o sustancias particulares": un sistema universal impuesto por la propia naturaleza. Calculó  $\ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$  y lo registró como una curiosidad matemática. No preguntó: ¿qué es este objeto? ¿Qué significa que la naturaleza proporcione exactamente esta escala y ninguna otra?

Ludwig Boltzmann, en 1877, introdujo  $k_B$  como el factor de conversión entre entropía y temperatura termodinámica. Un puente. Lo que estaba midiendo, sin saberlo, era el costo de una distinción térmica en unidades accesibles a observadores macroscópicos. El mismo objeto, visto desde otro instrumento.

Albert Einstein, en 1915, escribió  $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$ . Geometría a la izquierda, energía-materia a la derecha.  $G$  apareció como  $G_{\mu\nu}$  constante de acoplamiento. Einstein pasó los últimos 30 años de su vida buscando una teoría de campo unificada. Nunca cuestionó si  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  podrían ser tres lecturas del mismo objeto más profundo. Tenía las piezas. Le faltaba la pregunta.

Jacob Bekenstein, en 1973, descubrió que un agujero negro lleva entropía proporcional al área de su horizonte:  $S = k_B A / (4\ell_P^2)$ . Por primera vez, información y geometría quedaron cuantitativamente ligadas. El área de Planck  $\ell_P^2$  apareció como el costo de área por bit. Bekenstein midió  $B$  sin nombrarlo.

Stephen Hawking, en 1975, mostró que los agujeros negros irradian térmicamente con temperatura  $T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$ . La escala de Planck aparece de nuevo, desde un cálculo completamente diferente. El mismo objeto insistiendo en ser notado.

Gerard 't Hooft (1993) y Leonard Susskind (1995) formularon el principio holográfico: la información máxima en una región está acotada por el área de su frontera en unidades de Planck:  $I_{\text{máx}} \leq A / (4\ell_P^2 \ln 2)$ . El área de Planck como unidad fundamental de capacidad informacional. Nadie preguntó: ¿y si este es el objeto primario?

Erik Verlinde (2010) derivó la gravedad newtoniana desde fuerzas entrópicas, mostrando que  $G$  no es fundamental sino que emerge de principios termodinámicos. Raphael Bousso (2002) sistematizó la cota entrópica covariante. Cada paso acercó más el mismo objeto a la superficie.

*"Cada uno de ellos midió una cara de  $B$ . Ninguno preguntó qué era  $B$ ."*

Este documento hace esa pregunta y la responde.  $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  no es una cantidad derivada, no es una unidad conveniente, no es una coincidencia.  $B$  es la medida mínima de todo cuanto puede existir: el costo de área de una distinción en el sustrato pregeométrico  $\Sigma$ .  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  no son tres constantes independientes de la naturaleza. Son tres nombres de  $B$ , según el instrumento con que se le mide.

Lo que Planck encontró en 1899, este documento identifica. Lo que los gigantes midieron, este documento unifica. Lo que la física ha estado aproximando durante 127 años, este documento nombra.

## 2. Por qué el Espacio-Tiempo no Puede ser Fundamental

Lo que sigue no es filosofía. Es física establecida tomada en serio hasta el final. Cada paso usa únicamente lo que la física ya acepta. La conclusión — que el espacio-tiempo no puede ser fundamental y que  $\Sigma$  es necesario — no se postula: se deduce.

### 2.1 Lo fundamental tiene que ser uno

Si existieran dos cosas verdaderamente fundamentales sin relación entre sí, habría algo más profundo que las conecta. Eso más profundo sería lo verdaderamente fundamental. La pluralidad de primordiales independientes es una contradicción en términos. La física propone cuatro candidatos: materia, energía, espacio y tiempo. El argumento que sigue los elimina por orden.

## 2.2 La materia no es fundamental

$E = mc^2$ . La materia se degrada completamente a energía en regímenes de alta densidad: quarks, bosones, plasma quark-gluón. La materia es energía organizada en estados ligados que persisten bajo ciertas condiciones. Cuando esas condiciones se rompen, la materia deja de existir. La materia es energía con forma. No es un primordial.

## 2.3 La energía y la materia son la misma descripción

El tensor  $T^{\mu\nu}$  es la única descripción rigurosa del contenido físico en la Relatividad General. No dice "esto es materia", no dice "esto es energía": dice densidad, flujo, tensión, presión. La distinción materia-energía es operacional — válida en regímenes de baja energía, sin sustento ontológico en regímenes extremos. En curvatura extrema la distinción colapsa.

## 2.4 El espacio-tiempo es respuesta, no contenido

En la ecuación de Einstein,  $T^{\mu\nu}$  está a la derecha. El tensor de Einstein  $G^{\mu\nu}$  está a la izquierda. El espacio-tiempo no aparece como contenido — aparece como respuesta.  $T^{\mu\nu}$  le dice al espacio-tiempo cómo curvarse. Un objeto fundamental no responde a otra cosa. El espacio-tiempo responde, vibra, se deforma, transmite. Eso no es lo que hace algo fundamental.

## 2.5 El tiempo es más fundamental que el espacio

En regímenes extremos la noción de espacio se degrada antes que la de causalidad temporal. Cuando la geometría colapsa — cuando  $C(i,j) \rightarrow 0$  y el espacio métrico deja de existir — el orden causal de las transiciones persiste. El tiempo no necesita masa ni espacio. Necesita actividad. La causalidad es primaria. La geometría espacial es secundaria.

## 2.6 B surge de la falla, no de un postulado

Si el espacio-tiempo no es fundamental sino respuesta, tiene un límite de respuesta. La densidad de energía no puede crecer indefinidamente sin que la geometría deje de seguirla. Si el espacio-tiempo fuera infinitamente elástico, B no existiría y las singularidades serían físicamente reales. Las singularidades son una falla de la descripción. B es el parámetro que mide esa falla.

B no se ajusta: cuatro fenómenos independientes convergen en él — la entropía de Bekenstein-Hawking, la escala de Planck, el límite de curvatura y la densidad máxima de información. Cuando cuatro caminos independientes llegan al mismo destino, ese destino es real.

- El espacio-tiempo no es fundamental: responde, vibra, falla.
- El tiempo precede al espacio: el orden causal sobrevive al colapso geométrico.
- B no se postula: es la medida de la falla del espacio-tiempo.
- $\Sigma$  no se elige: es lo que queda cuando se elimina todo lo demás.

## 2.7 Lo que queda: tres capacidades y nada más

Eliminada la materia como primordial. Eliminada la energía como primordial. Eliminado el espacio-tiempo como primordial. Lo que queda tiene que ser anterior a los tres y producirlos a los tres. Lo más mínimo que puede existir para producir geometría, tiempo y energía:

- Que haya diferencia entre estados. Sin diferencia no hay geometría — no hay aquí ni allá.
- Que un estado pueda dar lugar a otro. Sin transición no hay orden causal, no hay tiempo.
- Que esa capacidad tenga un límite. Sin límite no hay escala, no hay B, no hay física medible.

Esas son las tres capacidades de  $\Sigma$ . No son tres postulados arbitrarios. Son las tres condiciones mínimas que cualquier cosa anterior al espacio-tiempo tiene que satisfacer para producir el universo que observamos. Ni una menos — faltaría algo del universo. Ni una más — estaríamos usando estructura que  $\Sigma$  todavía no ha producido.

## 3. Postulados Fundamentales de la Teoría

La teoría se sostiene sobre un único postulado ontológico del cual, mediante principios de coherencia y correspondencia, se derivan todas las consecuencias físicas.

**P1. Existencia del Sustrato  $\Sigma$ :** Existe una entidad física fundamental, pregeométrica, que posee la capacidad de: (a) *Distinción*: sostener estados internos diferenciados; (b) *Transición*: permitir cambios entre esos estados; (c) *Respuesta Finita*: tener un límite a su capacidad de relación o excitación, codificado por el parámetro B.

**P2. Emergencia del Espacio-Tiempo:** El espacio-tiempo es una descripción efectiva y emergente de la respuesta colectiva de  $\Sigma$  en el régimen de baja

intensidad (lineal). No es una entidad fundamental.

**P3. Respuesta Finita (Saturación):** Existe un límite físico a la curvatura del espacio-tiempo emergente, dado por  $R_{\text{máx}} \approx 1/B$ , donde  $B$  es el parámetro que codifica la finitud de  $\Sigma$  en el régimen geométrico.

**P4. Conservación de Causalidad e Información:** La dinámica subyacente de  $\Sigma$  es causal y no permite la destrucción fundamental de información. Cualquier proceso aparente de pérdida de información debe ser un proceso reversible de relajación.

**P5. Correspondencia con la Relatividad General:** En el límite de baja curvatura ( $BR \ll 1$ ), las ecuaciones de la geometría emergente deben reproducir los resultados de la Relatividad General.

## 4. Ontología de $\Sigma$ : Las Tres Capacidades Primitivas

$\Sigma$  es una entidad física fundamental, anterior al espacio, al tiempo, a la materia y a la energía. No está embebido en nada — es el sustrato del que todo emerge.

### 4.1 Las Tres Capacidades

**1. Distinción:**  $\Sigma$  puede sostener estados internos distinguibles entre sí ( $s_i \neq s_j$ ). Sin distinción no hay información, no hay estructura, no hay "algo" que pueda ser identificado.

**2. Transición:**  $\Sigma$  permite cambios causales entre estados ( $t_{ij} : s_i \rightarrow s_j$ ). Sin transición no hay dinámica, no hay cambio, no hay proceso. Las transiciones son la fuente de toda causalidad.

**3. Finitud Relacional:**  $\Sigma$  posee una capacidad de respuesta inherentemente finita. Existe un límite superior a la cantidad de distinciones que pueden sostenerse simultáneamente en cualquier región efectiva. Este límite se codifica en el régimen geométrico por el parámetro  $B$ .

| Capacidad          | Expresión Formal               | Significado Físico                                          | Qué implica su Ausencia                           |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Distinción         | $s_i \neq s_j$                 | Los estados de $\Sigma$ son distinguibles entre sí          | Sin información, sin estructura, sin nada         |
| Transición         | $t_{ij} : s_i \rightarrow s_j$ | Cambios causales entre estados son posibles                 | Universo estático. Sin dinámica, sin tiempo       |
| Finitud Relacional | $\sigma \leq 1/B$              | Capacidad de respuesta finita por región, codificada en $B$ | Sin escala, sin constantes. Singularidades reales |

Tabla 1. Las tres capacidades primitivas de  $\Sigma$  y su necesidad lógica.

## 4.2 Lo que $\Sigma$ No Es

Ninguna propiedad adicional puede atribuirse a  $\Sigma$  sin caer en proyecciones ilegítimas.  $\Sigma$  no es un campo, ni una partícula, ni un fluido, ni cuántico, ni geométrico, ni tiene dimensiones. Cualquier intento de describirlo con más estructura usaría conceptos — espacio, tiempo, métrica — que  $\Sigma$  mismo debe generar.  $\Sigma$  no es microscópico: no tiene escala. No es discreto ni continuo: esas son propiedades del espacio emergente.

$\Sigma$  no excitado no es el vacío. El vacío físico — el espacio-tiempo plano, el estado base de los campos cuánticos — es emergente: requiere que  $\Sigma$  ya haya producido geometría, tiempo y estructura. El vacío es  $\Sigma$  en régimen de mínima actividad geométrica ( $\sigma \ll 1/B$ ).  $\Sigma$  sin actividad es pregeométrico.

## 4.3 Por qué Solo Tres Propiedades

¿Por qué solo tres propiedades? Porque toda propiedad adicional requeriría espacio, tiempo o alguna estructura que  $\Sigma$  precede.  $\square$  Tres propiedades no es poco. Es exactamente lo que cabe en algo pregeométrico. Ni una menos. Ni una más.

Estas tres capacidades son lógicamente independientes y conjuntamente necesarias. Sin distinción, solo hay indistinción — no hay cosas que puedan cambiar. Sin transición, solo hay un bloque estático. Sin finitud, no hay escala, no hay constantes, las singularidades serían reales. Las tres son las condiciones mínimas necesarias y suficientes.

## PARTE II

### El Parámetro B

## 5. El Parámetro B: La Única Constante Fundamental

### 5.1 Naturaleza Física y Valor de B

B es la traducción, en el régimen geométrico emergente, de la finitud de  $\Sigma$ . Su interpretación ontológica es directa e inevitable: B es el área por distinción — el costo areal que  $\Sigma$  debe destinar para sostener un bit de información. Equivalentemente,  $1/B$  es la densidad máxima de información por unidad de área que  $\Sigma$  puede albergar antes de saturarse.

B tiene dimensiones de área ( $[B] = L^2$ ). No mide una longitud en el espacio, ni la cantidad de energía que  $\Sigma$  puede procesar. Mide cuánta área geométrica emergente requiere cada bit de información que el sustrato sostiene. La entropía de Bekenstein-Hawking confirma: cada bit ocupa exactamente  $4B$  de área.

$$S = A / (4\Box_P^2) = A / (4B) \implies \Delta A(1 \text{ bit}) = 4B \cdot \ln 2 \quad (1)$$

B se manifiesta en tres regímenes: Régimen **Lineal** ( $\sigma \ll 1/B$ ): respuesta proporcional al estímulo, RG exacta. Régimen de **Transición** ( $\sigma \sim 1/B$ ): saturación incipiente, correcciones no lineales. Régimen de **Saturación** ( $\sigma = 1/B$ ): respuesta geométrica en su límite,  $R \rightarrow R_{\text{máx}} = 1/B$ , la métrica deja de ser válida.

El valor de B no es una elección. La cadena completa:

$$\text{Distinción en } \Sigma \implies \text{costo areal finito} \implies B = \Box_P^2 = \hbar G/c^3 \quad (2)$$

B no es una elección ni una hipótesis. Es una consecuencia forzosa que liga la ontología de  $\Sigma$  (distinción), la termodinámica gravitacional (Bekenstein-Hawking) y la escala de Planck. No son tres ingredientes separados. Son la misma cosa vista desde tres niveles de descripción.

### 5.2 Una Sola Constante Fundamental: G, $\hbar$ y c como Caras de B

Con  $B = \hbar G/c^3$  como parámetro constitutivo primario, las constantes  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  no son tres constantes independientes. Son tres formas de medir el mismo parámetro  $B$  desde tres regímenes de descripción distintos:

$$G = Bc^3/\hbar \quad \hbar = Bc^3/G \quad c = (\hbar G/B)^{1/3} \quad (3)$$

| Constan<br>te       | Régimen de<br>Medición | Qué Mide                                                       | Cara de B                                         |
|---------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| $G$                 | Gravitacional          | Cómo $\Sigma$ responde a masa-energía en el régimen geométrico | $B \times c^3/\hbar$                              |
| $\hbar$             | Cuántico               | Granularidad mínima de las transiciones de $\Sigma$            | $B \times c^3/G$                                  |
| $c$                 | Relativista            | Velocidad máxima de propagación causal en $\Sigma$             | $(\hbar G/B)^{1/3}$                               |
| $k_B$               | Termodinámico          | Costo de una distinción térmica en $\Sigma$                    | Proyección de B                                   |
| $\epsilon_0, \mu_0$ | Electromagnético       | Respuesta del vacío a perturbaciones EM                        | $c = 1/\sqrt{(\epsilon_0 \mu_0)}$ , derivado de B |
| $\square_P$         | Mínimo geométrico      | Longitud mínima en el espacio emergente                        | $\sqrt{B}$                                        |
| $t_P$               | Mínimo temporal        | Intervalo de tiempo mínimo en $\Sigma$                         | $\sqrt{B}/c$                                      |
| $E_P$               | Máximo energético      | Energía máxima por distinción                                  | $\hbar c/\sqrt{B}$                                |

Tabla 2. Toda constante fundamental como cara de B en su régimen de medición.

$\square$  Existe una sola constante fundamental en la física.  $\hbar$ ,  $G$  y  $c$  son sus manifestaciones según el instrumento usado para medirla.

### 5.3 B como Medida Mínima de Todo Cuanto Puede Existir

***B es la medida mínima de todo cuanto puede existir.***

Esta afirmación no es filosófica. Es una afirmación técnica con consecuencias derivables. Toda magnitud física tiene su límite fundamental anclado en B sin excepción:

| Magnitud Física | Límite        | Expresión              | Significado                                                |
|-----------------|---------------|------------------------|------------------------------------------------------------|
| Longitud mínima | Cota inferior | $\sqrt{B} = \square_P$ | El espacio no puede subdividirse por debajo de esta escala |
| Tiempo mínimo   | Cota inferior | $\sqrt{B}/c = t_P$     | El tiempo no puede avanzar menos que este intervalo        |

| Magnitud Física              | Límite                   | Expresión                                     | Significado                                                |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Energía máxima / distinción  | Cota superior            | $\hbar c/\sqrt{B} = E_P$                      | Ningún proceso puede concentrar más energía por distinción |
| Curvatura máxima             | Cota superior            | $R_{\text{máx}} = 1/B$                        | La geometría no puede curvarse más allá de este punto      |
| Densidad de energía máxima   | Cota superior            | $\rho_{\text{máx}} = 3/(32\pi GB)$            | Ninguna región puede exceder esta densidad                 |
| Información / área máxima    | Cota superior            | $I_{\text{máx}} = 1/(4B)$ por bit             | Techo holográfico                                          |
| Entropía mínima cuántica     | Cota inferior            | $\Delta S_{\text{mín}} = k_B \ln 2$           | Ligado a B vía $k_B$                                       |
| Temperatura de Hawking       | Finita para todo $M > 0$ | $T_H$ finita                                  | Sin divergencia final en la evaporación                    |
| Masa estable mínima          | Cota inferior            | $m_{\text{mín}} \sim \hbar/(c\sqrt{B}) = m_P$ | Patrones auto-confinados mínimos en $\Sigma$               |
| Frecuencia máxima observable | Cota superior            | $\nu_{\text{máx}} = c/\sqrt{B} = c/\lambda_P$ | Frecuencia de Planck                                       |

Tabla 3. Todo límite fundamental en física anclado a B sin excepción.

El patrón es completo y no admite excepción conocida en la física actual. Toda magnitud — espacial, temporal, energética, informacional, geométrica, termodinámica — tiene su límite irreducible determinado por B. Esto no es una lista de coincidencias. Es la firma de B como único parámetro constitutivo de la realidad física.

## 5.4 B como Límite Universal: Las Siete Caras del Mismo Umbral

| Régimen     | Expresión del límite                              | Significado físico                                                           |
|-------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Información | Densidad máx. = $1/B$ por área                    | $\Sigma$ no puede sostener más distinciones por unidad de área               |
| Curvatura   | $R_{\text{máx}} = 1/B$                            | La geometría no puede doblarse más allá de este punto                        |
| Energía     | $\rho_{\text{máx}} = 3/(32\pi GB)$                | La densidad de energía no puede crecer indefinidamente                       |
| Temperatura | $T_H$ finita en toda la evaporación               | B acota la respuesta del horizonte. Sin divergencia final                    |
| Tiempo      | $\tau$ se congela cuando $\sigma \rightarrow 1/B$ | El tiempo no puede avanzar más allá de lo que $\Sigma$ puede transicionar    |
| Descripción | La geometría deja de ser el lenguaje              | Más allá de B no hay singularidad: $\Sigma$ dejó de responder geoméricamente |

| Régimen    | Expresión del límite             | Significado físico                                                |
|------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Distinción | Precio mínimo por sostener 1 bit | Sin área suficiente no hay distinción. Sin distinción no hay nada |

Tabla 4. Las siete caras del mismo umbral  $B$ .

Una singularidad requeriría distinciones infinitas por unidad de área, curvatura infinita, densidad infinita y temperatura infinita.  $B$  prohíbe cada uno de esos infinitos por separado.  $\square$  La singularidad es imposible por construcción, no por corrección.

### 5.5 Por qué $B = 0$ y $B = \infty$ son Ambos Imposibles

El valor de  $B$  no puede ser arbitrario. La lógica lo fuerza a ser finito y no nulo:

**$B = 0$**  implicaría costo cero por distinción. Información infinita por unidad de área. Curvatura infinita. Densidad infinita. Singularidades reales. Este es el límite clásico llevado a su extremo — y es físicamente imposible porque produce contradicciones internas.

**$B = \infty$**  implicaría costo infinito por distinción. Ninguna distinción puede hacerse. Indistinción total. Nada puede ser diferente de nada. La física es imposible.

Solo  $B$  finito y no nulo permite la existencia física coherente.  **$B$  no es una propiedad que el universo resulta tener.  $B$  es la condición que hace posible que un universo exista.** El valor específico  $B = \hbar G/c^3 = \square_P^2$  queda determinado por el requisito de que la fórmula de Bekenstein-Hawking sea exacta.

En unidades de Planck,  $B = 1$ . Esto no es una elección arbitraria de unidades. Significa que en el lenguaje que el universo habla nativamente, una distinción cuesta exactamente 1. Todo lo que existe es un múltiplo de esa unidad irreducible. Toda la aparente complejidad de las constantes de la naturaleza — los valores de  $G$ ,  $\hbar$ ,  $c$  en unidades humanas — es el coeficiente de traducción entre nuestros sistemas de medición arbitrarios y el lenguaje natural de  $\Sigma$ .

## PARTE III

### Emergencia

## 6. Emergencia del Espacio-Tiempo

### 6.1 Tiempo: del Orden Causal Puro a la Parametrización Métrica

Sean  $S = \{s_i\}$  los estados de  $\Sigma$  y  $T \subseteq S \times S$  el conjunto de transiciones permitidas. Una transición  $t : s_i \rightarrow s_j$  representa un cambio causal:  $s_j$  ocurre después de  $s_i$ . Sobre  $T$  definimos una relación de orden parcial:

$$t_{ij} < t_{kl} \text{ si y solo si } s_j = s_k \quad (4)$$

Esta relación es irreflexiva y transitiva. Constituye el **orden causal puro**: una estructura relacional sin coordenadas ni duraciones. Cuando las transiciones ocurren de manera regular, asignamos un número real a cada transición preservando el orden. La versión discreta:

$$\tau(t) = O(t) \cdot \Delta\tau, \Delta\tau = t_p = \sqrt{B/c} \quad (5)$$

donde  $O(t)$  cuenta cuántas transiciones ocurren antes que  $t$ . La constante  $B$  fija la frecuencia máxima posible:  $\nu_{\text{máx}} = c/\lambda_p = c/\sqrt{B}$  (frecuencia de Planck). En saturación ( $\sigma \rightarrow 1/B$ ),  $f(u) \rightarrow 0$  y las transiciones se congelan — la noción de duración pierde significado.

### 6.2 Espacio: de la Correlación a la Métrica Inducida

La cercanía espacial emerge de la intensidad de la relación entre elementos de actividad en  $\Sigma$ . Definimos la función de correlación:

$$C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d(i,j)) \quad (6)$$

donde  $\sigma$  es la densidad de excitación local y  $d(i,j)$  es una distancia relacional primitiva (no geométrica). La función exponencial no es arbitraria: es la única compatible con la finitud de  $\Sigma$  y el principio de máxima entropía bajo un costo lineal en la distancia relacional. La distancia efectiva emergente:

$$d_{ef}(i,j) = -(1/\sigma) \cdot \ln C(i,j) \quad (7)$$

Bajo condiciones de regularidad,  $d_{ef}$  satisface la desigualdad triangular, definiendo una métrica. Cuando  $\sigma \rightarrow \sigma_{\text{máx}}^{\text{ef}} = 1/B$ ,  $C(i,j) \rightarrow 0$  para todo  $i \neq j$ : el espacio como entidad métrica deja de existir.

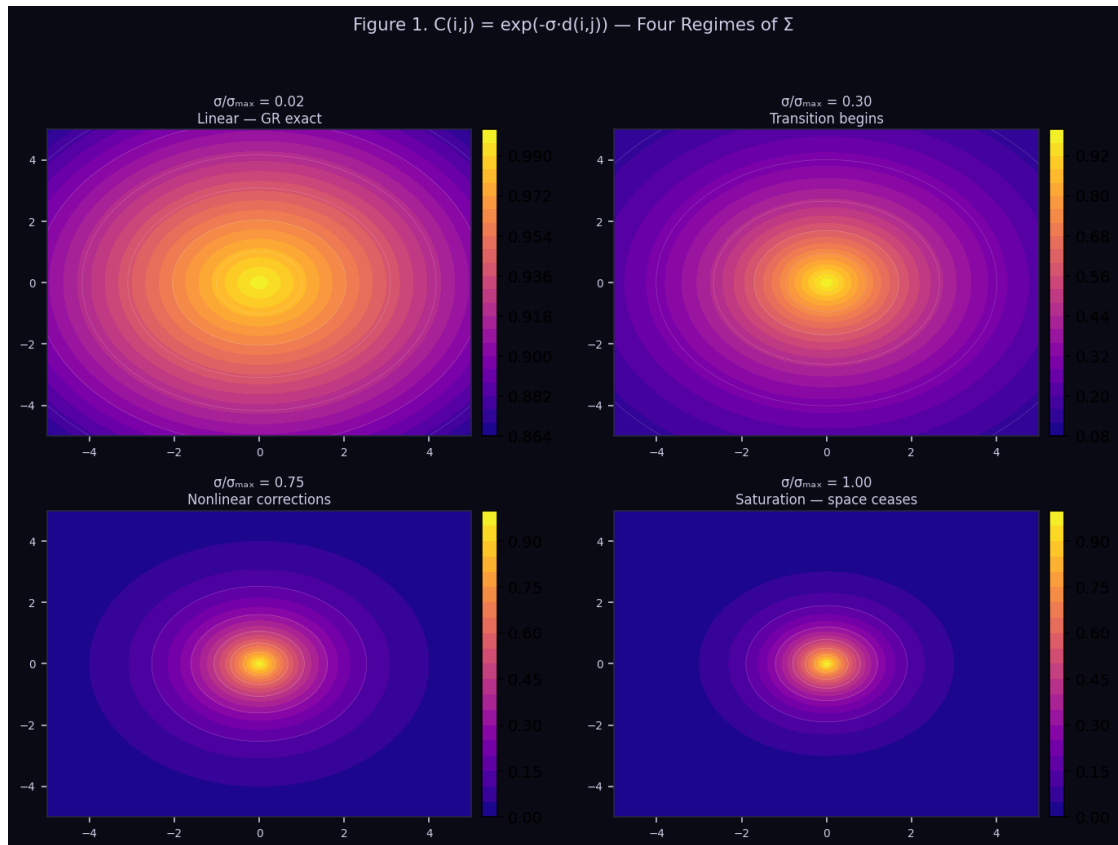


Figura 1. Cuatro paneles de  $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d(i,j))$  con  $\sigma/\sigma_{\text{máx}}$  creciente. En  $\sigma/\sigma_{\text{máx}} = 0.02$ : correlaciones amplias, espacio bien definido, RG exacta. En  $\sigma/\sigma_{\text{máx}} = 1.00$ : las correlaciones colapsan, el espacio deja de existir como entidad métrica. La misma función  $C(i,j)$  produce los cuatro regímenes sin parámetros adicionales.

### 6.3 Dimensionalidad 3+1: Derivación desde B

La entropía de entrelazamiento de una red de correlación D-dimensional gaussiana obedece una ley de área:  $S_{\text{ent}} = \eta(D,\varepsilon) \cdot A_D(r)$ , donde  $\eta(D,\varepsilon) = c_D / \varepsilon^{D-1}$ . En saturación,  $\varepsilon = \sqrt{B} = \square_P$ , y la igualdad con Bekenstein-Hawking requiere  $c_D = \square_P^{D-3} / 4$ :

| D | $c_D = \square_P^{D-3} / 4$ | Valor numérico        | Veredicto               |
|---|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | $\square_P^{-2} / 4$        | $9.58 \times 10^{69}$ | Diverge — inconsistente |

| D | $c_D = \ell_P^{D-3} / 4$ | Valor numérico                     | Veredicto                        |
|---|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 2 | $\ell_P^{-1} / 4$        | $1.55 \times 10^{34}$              | Diverge — inconsistente          |
| 3 | $\ell_P^0 / 4 = 1/4$     | 0.25 (número puro)                 | $\ell_P$ ÚNICO valor consistente |
| 4 | $\ell_P^1 / 4$           | $4.04 \times 10^{-35} \text{ m}$   | Se anula — inconsistente         |
| 5 | $\ell_P^2 / 4$           | $6.54 \times 10^{-70} \text{ m}^2$ | Se anula — inconsistente         |

Tabla 5. Selección de dimensionalidad por B.  $D = 3$  está separada de cualquier otra dimensión por 34 a 71 órdenes de magnitud.

El coeficiente  $1/4$  que emerge únicamente para  $D = 3$  es precisamente el coeficiente de Bekenstein-Hawking  $S = A/(4\ell_P^2)$ . La saturación holográfica y  $D = 3$  son la misma condición vista desde dos lados. **El espacio-tiempo 3+1 no es un postulado. Es la única dimensionalidad consistente con la finitud de B.**

Evidencia computacional: simulaciones de redes de transición con  $N$  hasta  $10^3$  muestran que la dimensión espectral  $D(N)$  converge a 3 en el límite termodinámico, con varianza  $\sigma^2(N) \propto N^{-1}$ .<sup>s</sup>

## 7. Emergencia de la Energía y la Materia

### 7.1 Energía como Medida de Actividad

La energía no es una sustancia primaria, sino una medida efectiva de la actividad de  $\Sigma$ :

$$E = \int \sigma \, dV \quad (8)$$

En el régimen geométrico,  $\sigma$  se identifica con las componentes de  $T^{\mu\nu}$ . La densidad de energía  $\rho \propto \sigma$ . La ley de conservación  $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$  emerge del balance neto de transiciones en  $\Sigma$ . El límite de saturación impone:

$$\sigma \leq \sigma_{\text{máx}} = 1/B \implies \rho_{\text{máx}} = 3/(32\pi GB) \quad (9)$$

### 7.2 Materia como Patrones Auto-Confinados

La actividad en  $\Sigma$  puede formar patrones estables y auto-confinados: regiones de alta densidad de excitación que se mantienen cohesionadas por ciclos auto-reforzantes de transiciones ( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ ). En el régimen geométrico, estos patrones se manifiestan como partículas de materia.

El potencial  $V(\sigma) \rightarrow \infty$  cuando  $\sigma \rightarrow 1/B$ , garantizando el confinamiento. Una masa puntual requeriría densidad de excitación infinita — prohibida por la finitud de  $\Sigma$ .

Los ciclos auto-reforzantes confieren inercia: la resistencia a perturbar el patrón es exactamente la inercia mecánica emergente.

## PARTE IV

### El Régimen Geométrico

## 8. El Régimen Geométrico: Lagrangiano Efectivo y Ecuaciones de Campo

### 8.1 Ley Constitutiva Saturante

Antes del Lagrangiano, hay una relación más fundamental: la ley constitutiva que describe cómo el sustrato  $\Sigma$  responde a excitaciones energéticas. La curvatura escalar emergente satisface:

$$R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma / (1 + B \cdot \rho_\Sigma) \quad (10)$$

Esta es la **ley constitutiva saturante** de  $\Sigma$ . Cuando  $\rho_\Sigma \rightarrow 0$ ,  $R \rightarrow \rho_\Sigma$  linealmente — RG exacta. Cuando  $\rho_\Sigma \rightarrow \infty$ ,  $R \rightarrow 1/B$  — curvatura máxima absoluta. Es la única función monótona acotada que satisface  $R \rightarrow \rho$  cuando  $\rho \rightarrow 0$  y  $R \rightarrow 1/B$  cuando  $\rho \rightarrow \infty$ . El Lagrangiano  $f(R) = R/(1+BR)$  no se postula: es la codificación de esta ley constitutiva en el lenguaje variacional.

### 8.2 El Lagrangiano como Principio Holográfico Dinámico

En el régimen donde la actividad de  $\Sigma$  admite descripción geométrica continua, la acción efectiva para la gravedad es:

$$S = (1/16\pi G) \int d^4x \sqrt{-g} f(R) + S_{\text{materia}}(g_{\mu\nu}, \psi) \text{ con } f(R) = R/(1+BR) \quad (11)$$

La función  $f(R) = R/(1+BR)$  se obtiene de la ley constitutiva por tres pasos:

**Paso 1.** Diferenciando la ley constitutiva Ec. (10):  $dR/d\rho = 1/(1+B\rho)^2$ .

**Paso 2.** La función de respuesta  $f'(R)$  es la inversa de  $d\rho/dR$  expresada en  $R$ :

$$f'(R) = 1 / (1 + BR)^2 \quad (12)$$

**Paso 3.** Integración con condición de frontera  $f(0) = 0$ :

$$f(R) = \int_0^R dt / (1+Bt)^2 = R / (1+BR) \quad (13)$$

*Este resultado es exacto. No se realizó ninguna aproximación.*

El factor  $1/(1+BR)$  es exactamente el factor de saturación holográfica. Cuando  $BR \rightarrow 0$ , respuesta lineal: RG. Cuando  $BR \rightarrow 1$ , techo absoluto: el límite holográfico. B no incorpora la holografía como restricción externa. **B ES la causa de la holografía.** Sin B no hay techo a la información por unidad de área. Sin ese techo no hay principio holográfico.

Comportamientos límite clave:

$$BR \ll 1: f(R) \approx R - BR^2 + B^2R^3 - \dots (RG + correcciones) \quad (14)$$

$$BR \rightarrow 1: f(R) \rightarrow 1/B \text{ (constante — saturación)} \quad (15)$$

**Derivadas del Lagrangiano — completas:**

$$f(R) = R/(1+BR) \mid f'(R) = 1/(1+BR)^2 \mid f''(R) = -2B/(1+BR)^3 \mid f'''(R) = 6B^2/(1+BR)^4$$

Las tres derivadas son necesarias para el análisis completo de perturbaciones y la ecuación del modo escalar. En saturación ( $BR \rightarrow 1$ ):  $f' \rightarrow 0$ ,  $f'' \rightarrow -B/4$ ,  $f''' \rightarrow 3B^2/8$ .

**Unicidad.**  $f(R) = R/(1+BR)$  es la única función analítica que satisface las cinco condiciones siguientes de forma simultánea:

| Condición                                     | Valor                               | Contenido físico                                                                             |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $f(0) = 0$                                    | Exacto                              | Sin $\Lambda$ estructural. El vacío es un límite dinámico, no un contratérmino.              |
| $f'(0) = 1$                                   | Exacto                              | El régimen lineal recupera la RG exactamente. Todos los tests del sistema solar satisfechos. |
| $\lim f(R) \text{ con } R \rightarrow \infty$ | $= 1/B$                             | La densidad de acción satura en el techo holográfico.                                        |
| $f'(R) = 1/(1+BR)^2 > 0$ para todo R          | Función de respuesta positiva       | Sin inestabilidad fantasma en ningún R.                                                      |
| $f''(R) = -2B/(1+BR)^3 < 0$ para todo R       | Respuesta monotonamente decreciente | Saturación real, no oscilatoria.                                                             |

*Tabla 6. Cinco condiciones determinan unívocamente  $f(R) = R/(1+BR)$ . Ninguna otra función analítica satisface las cinco de forma simultánea.*

**Analogía de van der Waals:** La ecuación  $P = \rho T/(1-b\rho)$  tiene exactamente la estructura de  $f(R)/R = 1/(1+BR)$ . La RG es el límite de gas ideal de este fluido holográfico — emerge cuando  $BR \ll 1$ , exactamente como el gas ideal emerge de van der Waals cuando  $b\rho \ll 1$ .

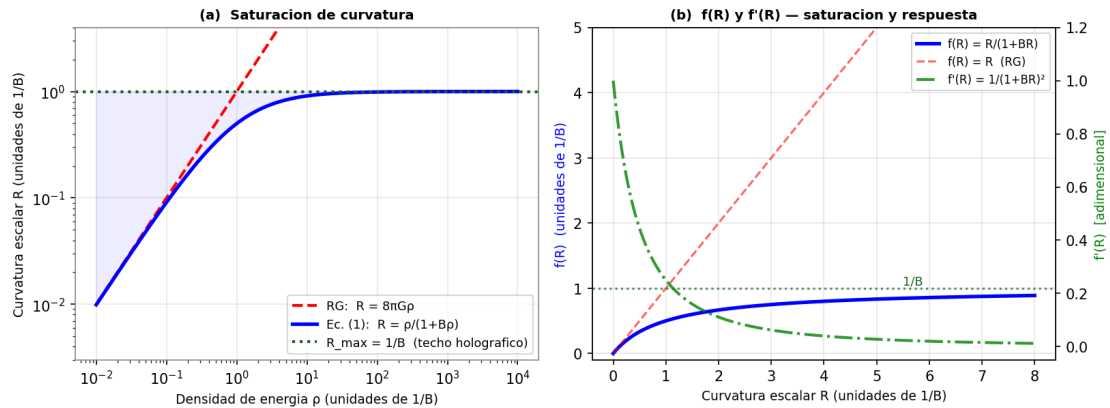


Figura 2. (a) Saturación de curvatura: la RG (rojo discontinuo) diverge; la ley constitutiva Ec. (10) (azul sólido) satura en  $R_{\text{máx}} = 1/B$  (verde punteado). (b)  $f(R)$  y  $f'(R)$ : ambas positivas y monótonamente decreciente. Sin fantasma, sin taquión, sin inestabilidad de Ostrogradski.

### 8.3 Ecuaciones de Campo

Variando la acción con respecto a la métrica:

$$f_R R_{\mu\nu} - (1/2) f g_{\mu\nu} - (\nabla_\mu \nabla_\nu - g_{\mu\nu} \square) f_R = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (16)$$

La traza proporciona una ecuación dinámica para R:

$$3\square f_R + f_R R - 2f = 8\pi G T \quad (17)$$

Límites: En  $BR \ll 1$ : ecuaciones de Einstein exactas. En  $R = 1/B$ ,  $f_R = 0$ :  $(1/B) g_{\mu\nu}/2 \approx 8\pi G T_{\mu\nu}$ . En saturación máxima no hay singularidad.

### 8.4 Comparación con Modelos $f(R)$ Existentes

| Modelo        | $f(R)$                  | Parámetros libres | Sin singularidad? | Límite holográfico? | Sin fantasma (todo R)? |
|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------------|
| Starobinsky   | $R + \alpha R^2$        | $\alpha$ (libre)  | No                | No                  | Sí (local)             |
| Hu-Sawicki    | $R - m^2 c_1 (R/m^2)^n$ | $\geq 2$ libres   | No                | No                  | Condicional            |
| Exponencial   | $R \exp(-bR)$           | $b$ (libre)       | No                | No                  | Condicional            |
| Modelos $R^n$ | $R^n$                   | $n$ (libre)       | No                | No                  | Dep. de $n$            |

| Modelo       | $f(R)$     | Parámetros libres        | Sin singularidad?     | Límite holográfico? | Sin fantasma (todo R)? |
|--------------|------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|
| Este trabajo | $R/(1+BR)$ | 0 ( $B = \ell_P^2$ fijo) | Sí (por construcción) | Sí (exactamente)    | Sí (todo R)            |

Tabla 7. Este trabajo vs. modelos  $f(R)$  principales. Ningún modelo existente combina cero parámetros libres, saturación holográfica y ausencia de fantasma para todo R.

## 9. La Resumación de Forma Cerrada de las Correcciones de Gravedad Cuántica

$f(R) = R/(1+BR)$  desde la Serie EFT y la Cota Holográfica

### 9.1 El Problema: Una Serie EFT Abierta sin Cierre

La teoría de campo efectiva (EFT) de la gravedad cuántica es sistemática y bien establecida. Partiendo de la acción de Einstein-Hilbert, se añaden todos los operadores consistentes con la invarianza de difeomorfismos, organizados por dimensión. El resultado en el sector de un solo invariante de curvatura es:

$$\chi_{EFT} = R + \alpha_1 R^2 + \alpha_2 R^3 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n R^n, \alpha_1 = 1 \quad (18)$$

Los coeficientes  $\alpha_n$  se calculan a partir de diagramas de bucle a cada orden, con escala natural  $\alpha_n \sim \ell_P^{2(n-1)}$  al orden  $n$ . La serie es asintótica. No converge. No se conoce ninguna forma cerrada.

**La limitación del enfoque estándar:** La EFT es válida solo en energías  $E \ll E_P$ . A  $E \sim E_P$  la serie falla y se necesita una completación UV. La teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles proponen completaciones distintas, cada una introduciendo nuevos grados de libertad y nuevos parámetros. El problema de identificar una acción efectiva en forma cerrada que resuma la serie infinita no había sido resuelto desde dentro del marco EFT. **Este trabajo muestra que la forma cerrada existe, fija todos los coeficientes y no requiere ningún parámetro nuevo.**

### 9.2 La Resumación: $f(R) = R/(1+BR)$ Contiene Todas las Correcciones EFT

La función  $f(R) = R/(1+BR)$  se expande como serie geométrica para  $|BR| < 1$ :

$$f(R) = R/(1+BR) = R \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (-BR)^n = R - BR^2 + B^2R^3 - B^3R^4 + \dots \quad (19)$$

Identificando término a término con la Ec. (18):

$$\alpha_n = (-B)^{n-1} = (-\kappa_P^2)^{n-1} \text{ para todo } n \geq 1 \quad (20)$$

### Resultado central

**$f(R) = R/(1+BR)$  con  $B = \kappa_P^2$  es la resumación en forma cerrada de la serie EFT de las correcciones de gravedad cuántica en el sector de un solo invariante.** Todos los coeficientes  $\alpha_n$  quedan fijados simultáneamente:  $\alpha_n = (-\kappa_P^2)^{n-1}$ . Cero parámetros libres quedan en cualquier orden.

Propiedades de la resumación:

| Propiedad              | Expresión                                        | Significado físico                                                             |
|------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Supresión de Planck    | $ \alpha_n  = B^{n-1} = \kappa_P^{2(n-1)}$       | Cada orden suprimido por $(n-1)$ potencias de $\kappa_P^2$                     |
| Signo alternante       | $\text{signo}(\alpha_n) = (-1)^{n-1}$            | Consistente con correcciones de GC de bucle con signo opuesto                  |
| Razón universal        | $\alpha_{n+1}/\alpha_n = -B = -\kappa_P^2$       | Todos los coeficientes comparten la misma razón: firma de serie geométrica     |
| Radio de convergencia  | $ BR  < 1$ , es decir $R < R_{\text{máx}} = 1/B$ | La serie perturbativa converge solo debajo de la curvatura de Planck           |
| Continuación analítica | $f(R)$ válida para todo $R \geq 0$               | Más allá del radio, $f(R)$ es la continuación analítica única. Satura en $1/B$ |

Tabla 8. Propiedades de la resumación  $\alpha_n = (-B)^{n-1}$ .

Una serie geométrica  $\sum a \cdot r^n$  se cierra como  $a/(1-r)$  cuando  $|r| < 1$ . Aquí  $a = R$  y  $r = -BR$ , dando  $R/(1+BR)$ . La condición de cierre  $|r| < 1$  es exactamente  $BR < 1$  — el régimen de la RG. En  $BR \rightarrow 1$  la serie perturbativa falla y la función exacta satura. Esto no es una patología. Es el comportamiento físico correcto: la resumación revela lo que la serie estaba aproximando todo el tiempo.

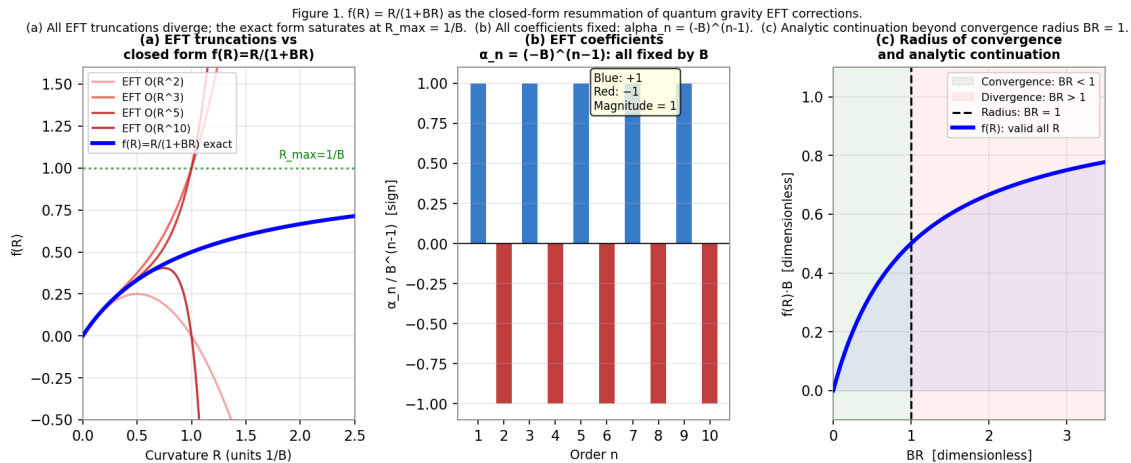


Figura 3.  $f(R) = R/(1+BR)$  como resumación en forma cerrada de las correcciones de GC de la EFT. (a) Los truncamientos de la EFT divergen por encima de  $BR \approx 1$ ;  $f(R) = R/(1+BR)$  satura para todo  $R$ . (b) Todos los coeficientes de la EFT fijados:  $\alpha_n = (-B)^{n-1}$ , signo alternante. (c) Radio de convergencia  $BR = 1$  y continuación analítica a todo  $R$ .

### 9.3 Derivación Independiente desde la Cota Holográfica

La resumación no se supone.  $f(R) = R/(1+BR)$  fue derivada independientemente del requisito de que el Lagrangiano gravitacional respete la relación área-entropía de Bekenstein-Hawking  $\Delta A = 4\ell_P^2$  por bit.

La derivación procede en tres pasos ya descritos en la Sección 8.1 (Ecs. 10-13). El resultado es el mismo por ambos caminos.

Dos caminos independientes — resumación EFT y derivación holográfica — llegan a la misma función. La cota holográfica no es una consecuencia de la gravedad cuántica. Es el principio que cierra la serie EFT. Sin la cota holográfica, la serie no tiene forma cerrada. Con ella, la forma cerrada es única.

### 9.4 Lo que la Resumación Revela

#### 9.4.1 Los coeficientes de la EFT no son libres

Desde la perspectiva EFT, cada  $\alpha_n$  requiere una medición experimental o cálculo teórico separado. La resumación muestra que no son libres:  $\alpha_n = (-\ell_P^2)^{n-1}$  para todo  $n$ . La física UV que codifican es la cota holográfica. El único parámetro que los controla a todos es  $B = \ell_P^2$ .

| Orden $n$ | $\alpha_n$ (EFT: libre) | $\alpha_n$ (este trabajo: fijo) | Escala de supresión |
|-----------|-------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 1 (R)     | 1 (por def.)            | 1                               | Adimensional        |

| Orden n     | $\alpha_n$ (EFT: libre)      | $\alpha_n$ (este trabajo: fijo)    | Escala de supresión                                 |
|-------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 2 ( $R^2$ ) | $\alpha_1$ (desconocido)     | $-B = -\ell_P^2$                   | $\ell_P^2 \approx 2.6 \times 10^{-70} \text{ m}^2$  |
| 3 ( $R^3$ ) | $\alpha_2$ (desconocido)     | $+B^2 = +\ell_P^4$                 | $\ell_P^4 \approx 6.8 \times 10^{-139} \text{ m}^4$ |
| 4 ( $R^4$ ) | $\alpha_3$ (desconocido)     | $-B^3 = -\ell_P^6$                 | $\ell_P^6 \approx 1.8 \times 10^{-208} \text{ m}^6$ |
| n           | $\alpha_{n-1}$ (desconocido) | $(-B)^{n-1} = (-\ell_P^2)^{n-1}$   | $\ell_P^{2(n-1)}$                                   |
| $\infty$    | Serie diverge                | $f(R) = R/(1+BR)$ [finita, satura] | $1/B = R_{\text{máx}}$                              |

Tabla 9. Coeficientes EFT: desconocidos vs. fijados por  $B = \ell_P^2$ . La resumación reemplaza una lista infinita de incógnitas por un solo número.

### 9.4.2 Las singularidades son un artefacto de la truncación

En la EFT, las singularidades surgen porque la serie truncada a cualquier orden finito permite  $R \rightarrow \infty$ . La función resumada exacta no puede divergir:  $f(R) \rightarrow 1/B$  cuando  $R \rightarrow \infty$ . Las singularidades no son una característica de la gravedad cuántica que requiera una completación UV con nuevos grados de libertad. Son un artefacto de truncar la serie perturbativa. La serie resumada completa es finita en todas partes.

### 9.4.3 El problema de la constante cosmológica no surge

La resumación da  $f(0) = 0$  exactamente. Sin contribución de energía del vacío desde el sector gravitacional. El problema de la constante cosmológica — por qué la energía del vacío es 120 órdenes de magnitud menor que la escala de Planck — no surge en la teoría resumada porque  $f(0) = 0$  queda forzado por la condición de integración, que a su vez se sigue de la anulación de la corrección holográfica en curvatura cero.

### 9.4.4 La RG es el término de orden cero

Cuando  $BR \ll 1$ ,  $f(R) \approx R$  al orden dominante. La RG no es una teoría separada. Es el primer término de la resumación, válida cuando las correcciones de escala de Planck son despreciables. Todos los tests post-newtonianos y de púlsares binarios quedan satisfechos con correcciones de orden  $BR_{\text{solar}} \sim 10^{-96}$ .

## 9.5 Analogías con Resumaciones Conocidas en la TCC

| Resumación en TCC        | Serie                        | Forma cerrada           | Estructura revelada                       |
|--------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| Propagador de Dyson      | $\sum_n (-i\Sigma)^n/p^{2n}$ | $1/(p^2 + \Sigma(p^2))$ | La auto-energía viste el propagador libre |
| Serie de Born geométrica | $\sum_n V \cdot (G_0 V)^n$   | $T = V + V G_0 T$       | Matriz T completa desde el potencial V    |

| Resumación en TCC                | Serie                            | Forma cerrada                             | Estructura revelada                              |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Acoplamiento corriente (1 bucle) | $\sum_n (b_0 g^2)^n \log^n(\mu)$ | $g^2(\mu) = g_0^2 / (1 + b_0 g_0^2 \log)$ | Libertad asintótica / confinamiento              |
| N grande planar                  | $\sum_n (1/N)^n F_n$             | Exacto en $N=\infty$                      | Dualidad holográfica (AdS/CFT)                   |
| Este trabajo: EFT de GC          | $\sum_n (-B)^{n-1} R^n$          | $f(R) = R/(1+BR)$                         | Saturación holográfica en $R_{\text{máx}} = 1/B$ |

Tabla 10. Resumaciones conocidas en la TCC y este trabajo. En cada caso la forma cerrada revela estructura invisible a la teoría de perturbaciones.

## 9.6 Discusión: Lo que la EFT Estaba Calculando

La EFT de la gravedad cuántica ha estado calculando, orden a orden, los coeficientes de Taylor de  $f(R) = R/(1+BR)$ . A cada orden se producía un nuevo coeficiente  $\alpha_n = (-\square_P^2)^{n-1}$  que no se reconocía como parte de una serie geométrica porque la serie nunca se sumaba. La EFT era correcta todo el tiempo. Los coeficientes que calculaba son reales. Forman un patrón que la teoría de perturbaciones no puede detectar desde dentro.

La teoría de cuerdas y la GCB proponen completaciones UV que introducen nuevos grados de libertad. La resumación sugiere una posibilidad diferente: la serie EFT ya contiene toda la información física cuando se suma a todos los órdenes. No se necesitan nuevos grados de libertad. La resumación es la completación UV, y requiere únicamente  $B = \square_P^2$ .

La visión estándar: la holografía es una consecuencia de la gravedad cuántica. La resumación invierte esto. La cota holográfica es el principio que cierra la serie EFT. La holografía no es consecuencia de la gravedad cuántica. Es la razón por la que la EFT gravitacional tiene forma cerrada.

PARTE V

Objetos Compactos y Cosmología

10. Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM): El Objeto  $\Sigma$

En la RG, el colapso gravitatorio lleva inevitablemente a una singularidad. En la Teoría  $\Sigma$ , al aproximarse la curvatura a  $R_{\text{máx}} = 1/B$ , la respuesta se satura. El colapso no puede continuar hasta la formación de un infinito. La región central transita a la fase no-geométrica de saturación: la Región de Saturación Geométrica Máxima, o **Objeto  $\Sigma$** .

La RSGM **no surge por detención del colapso**. Surge por transición de fase al régimen saturado. La causa es la incapacidad del espacio-tiempo de mantener curvatura creciente más allá del límite holográfico.

10.1 Estructura del Objeto  $\Sigma$

| Propiedad                   | Valor / Descripción                           | Origen en B                                                    |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Horizonte externo efectivo  | $r_s = 2GM$                                   | Idéntico al agujero negro clásico                              |
| Radio de saturación interno | $r_{\text{sat}} \approx 0.4 \ell_P$           | Fijado por B: $r_{\text{sat}} \sim \sqrt{B}$                   |
| Temperatura interna         | $T_{\text{int}} = 0$                          | No hay actividad térmica: $\sigma = 1/B$ , $\delta_\Sigma = 0$ |
| Temperatura de Hawking      | $T_H = \kappa/(2\pi ck_B)[1 - B/M^2 + \dots]$ | Finita. Sin divergencia final.                                 |
| Entropía estructural        | $S = k_B A / (4 \ell_P^2)$                    | Configuraciones de $\Sigma$ en el borde                        |
| Horizonte                   | Reflectante (no absorbente)                   | Ecos gravitacionales predichos                                 |
| Singularidad                | Ausente por construcción                      | $R \leq 1/B$ en toda la estructura                             |
| Evaporación                 | Conserva información                          | Relajación colectiva sin destrucción                           |
| Grados de libertad internos | Cero (en saturación exacta)                   | No hay modos disponibles                                       |

Tabla 11. Propiedades del Objeto  $\Sigma$  (RSGM). Todas derivadas de B.

## 10.2 Métrica Efectiva

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + dr^2/f(r) + r^2d\Omega^2 \quad (21)$$

$$f(r) = 1 - (2M/r) \cdot (1 - \exp(-r^2/4BM)) \quad (22)$$

Esta función tiende a  $1 - 2M/r$  para  $r \gg \sqrt{BM}$  y es regular en  $r = 0$ :  $f(0) = 1$  (tras el límite adecuado). El radio de saturación efectivo es  $R \sim \sqrt{BM}$ . La solución satisface todas las condiciones de energía sin requerir materia exótica.

## 10.3 Agotamiento Total de Grados de Libertad en Saturación Máxima

En saturación máxima no hay grados de libertad. Ninguno. De ningún tipo. Por ninguna razón.

- No hay espacio → no hay dónde propagar nada.
- No hay tiempo → no hay cuándo propagar nada.
- No hay vacío cuántico → no hay fluctuaciones ni pares virtuales.
- No hay distinción interna → no hay estados entre los que transitar.
- No hay transiciones → no hay dinámica de ningún tipo.

Un taquión requiere un modo propagante. No hay modo. No hay propagación. □ No hay taquión. Un fantasma requiere energía cinética negativa. No hay energía cinética. □ No hay fantasma.

La estabilidad en saturación máxima no se demuestra. No es un resultado. No es una propiedad que se verifica. Es la definición misma de saturación. Es una tautología ontológica.

## 10.4 Termodinámica y Resolución de la Paradoja de la Información

La radiación de Hawking no es producción térmica desde el interior. Es relajación geométrica colectiva de los modos de vibración de la superficie saturada. La temperatura interna es cero; no hay divergencia en la evaporación final.

Al no existir singularidad destructiva, la información no se aniquila. El núcleo Σ actúa como almacenamiento geométrico de grados de libertad. La ecuación de continuidad de la información:

$$dI/dt + \nabla \cdot J_{info} = 0 \quad (23)$$

donde  $J_{\text{info}}$  es la corriente de información hacia el exterior. La evolución del Objeto Σ es compatible con una descripción unitaria efectiva.

## 10.5 Acreción: Conversión de Materia en Tensión

Cuando materia cae hacia una RSGM, su energía se convierte en tensión de la configuración. La conservación:  $\Delta E_{\text{materia}} = \Delta M c^2 = \tau \cdot \Delta A$ , donde  $\tau = c^2/(32\pi M)$  es la tensión superficial efectiva. La relación  $A = 16\pi G^2 M^2$  se mantiene. El proceso ocurre en cuatro fases: (1) colapso inicial siguiendo las ecuaciones de campo modificadas; (2) desintegración de la materia al acercarse a la saturación; (3) saturación geométrica con conversión completa en tensión de Σ; (4) crecimiento por acreción, con  $r_{\text{sat}}$  fijo en  $0.4 \ell_P$ .

# 11. Cosmología sin Singularidad Inicial

## 11.1 El Big Bang como Emergencia

El universo no comenzó como una singularidad de densidad infinita. Antes del Big Bang — en sentido lógico, no temporal — existía un estado de Σ con actividad  $\sigma \sim 1/B$  que no admitía descripción métrica. **El Big Bang es la transición desde ese estado pregeométrico saturado a una fase de espacio-tiempo en expansión y relajación.** No hay explosión en el espacio; hay emergencia del propio espacio desde la actividad de Σ.

## 11.2 Ecuaciones de Friedmann Modificadas

$$H^2 = (8\pi G/3) \cdot \rho/(1+B\rho) - k/a^2 + (\text{términos de } f_R) \quad (24)$$

$$\ddot{a}/a = -(4\pi G/3) \cdot (\rho+3p)/(1+B\rho)^2 + (1/6) \cdot R/(1+BR) - \dot{H} f_{RR} \cdot \dot{R}/f_R \quad (25)$$

A altas densidades ( $\rho \rightarrow \infty$ ), el término efectivo tiende a  $1/B$ , evitando la singularidad y produciendo expansión acelerada temprana sin campo inflatón. La ausencia de singularidad inicial elimina la necesidad estructural de inflación para resolver los problemas del horizonte y la planitud.

## 11.3 Los Tres Regímenes Cosmológicos

| Régimen        | Condición         | Descripción Física                                              |
|----------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Pre-geométrico | $\sigma \sim 1/B$ | Sin métrica. Densidad del orden de Planck. No hay singularidad. |

| Régimen    | Condición        | Descripción Física                                                                                           |
|------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Transición | $\sigma$ decrece | Emergencia del espacio-tiempo. Expansión acelerada natural. Geometría estableciéndose.                       |
| Relajación | $BR \ll 1$       | RG válida. Física estándar. La expansión actual es relajación residual de la actividad inicial de $\Sigma$ . |

Tabla 12. Tres regímenes cosmológicos de la Teoría  $\Sigma$ .

## PARTE VI

### Mecánica Cuántica y Ondas Gravitacionales

#### 12. $\Sigma$ y la Lógica Cuántica: Congruencia, no Construcción

$\Sigma$  no deriva la Mecánica Cuántica. No es su tarea.  $\Sigma$  es el sustrato — provee las condiciones desde las que una lógica cuántica puede emerger. Lo que sí es propio de este trabajo es señalar que las condiciones mínimas de  $\Sigma$  — distinción, transición, finitud — producen naturalmente una estructura donde la interferencia entre rutas es inevitable, donde la combinación de amplitudes antes del módulo es la única forma consistente de asignar probabilidades, y donde el orden de las distinciones importa cuando la capacidad es finita.

##### 12.1 Las Condiciones que $\Sigma$ Provee

Para cualquier par de estados  $(s_i, s_f)$ , existen en general múltiples secuencias de transiciones que los conectan. La finitud de  $B$  implica que esos caminos no pueden sostenerse como independientes — la combinación de sus contribuciones antes de calcular cualquier probabilidad no es una elección: es la única manera de ser consistente con la finitud del sustrato. De esa estructura emerge naturalmente:

- Una asignación de **amplitudes** a cada ruta — no probabilidades directas.
- La **regla de Born**:  $P(s_i \rightarrow s_f) = |\sum_k A_k|^2$ .
- Una **no-conmutatividad** en el orden de las distinciones: distinguir primero en una variable y luego en la conjugada cuesta distinto que al revés, porque  $B$  cobra cada acto de distinción y la capacidad es finita.

$$\hbar = Bc^3/G \quad (26)$$

La constante  $\hbar$  no aparece desde afuera. Es  $B$  en el régimen de las transiciones — la misma finitud de  $\Sigma$  expresada en el lenguaje de la granularidad cuántica.

El conmutador canónico  $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$  no es un postulado. Es la diferencia de fase acumulada  $\varphi_{xp} - \varphi_{px} = B/\hbar$  al realizar distinciones en orden inverso.

## 12.2 Alcance y Límite de esta Conexión

La congruencia se extiende a donde  $\Sigma$  es relevante: la emergencia del espacio-tiempo y el régimen de los Objetos  $\Sigma$  en saturación. Más allá de ese umbral — en el régimen de partículas, campos, simetrías de gauge, generaciones de fermiones — las teorías que describen esos fenómenos tienen su propio fundamento y su propia tarea de conexión con  $\Sigma$ .

$\Sigma$  no es un museo de dimensiones ni un catálogo de partículas. Es un sustrato con tres capacidades. Las teorías congruentes con  $\Sigma$  no necesitan que las conectemos. Ya estaban ahí. Solo lo reconocimos. Las teorías que no pueden conectarse con  $\Sigma$  tienen ese problema como suyo, no nuestro.

## 13. Ondas Gravitacionales: Modos Tensorial y Escalar

### 13.1 Modo Tensorial — Idéntico a la RG

Linealizando las ecuaciones de campo alrededor de un fondo plano ( $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ ): el sector transverso sin traza es idéntico a la RG. Velocidad de propagación  $c_g^{\mu\nu} = c$  exactamente. Compatible con la restricción de GW170817:

$$|c_g - c| / c < 10^{-15} \quad (27)$$

### 13.2 Modo Escalar — Predicción Adicional

Las teorías  $f(R)$  propagam un grado de libertad escalar adicional  $\varphi = f(R) - 1$ . Distinguimos tres regímenes:

**Régimen lineal** ( $BR \ll 1$ ): masa efectiva negativa en fondo plano — no indica inestabilidad taquiónica en el sentido usual, sino que el modo es casi sin masa y de largo alcance.

**Régimen de transición** ( $BR \sim 1$ ): la masa física efectiva medida en un fondo no plano es:

$$m_{fis}^2 = 1/(6B) = c^3/(6G\hbar) \implies \lambda_C = \sqrt{6} \cdot \lambda_P \approx 3.96 \times 10^{-35} \text{ m} \quad (28)$$

Longitud de Compton  $\lambda_C \approx 4 \times 10^{-35} \text{ m}$ : indetectable a escalas macroscópicas. Todos los tests del sistema solar quedan satisfechos. Este modo produce una **polarización breathing** (la sexta polarización de ondas gravitacionales), distinguible de los dos modos tensoriales estándar.

**Saturación exacta** ( $BR = 1$ ):  $f(R) \rightarrow 0$ . El modo escalar se congela: su término cinético se anula y deja de propagarse. Es el mecanismo por el que el núcleo saturado adquiere cero grados de libertad internos.

Numéricamente:

$$m_{fís} c^2 = \hbar c / \sqrt{6B} \approx 3.86 \times 10^{19} \text{ GeV} = m_p / \sqrt{6} \quad (29)$$

## PARTE VII

### Predicciones y Falsabilidad

#### 14. Predicciones Observacionales Falsables

Todas las predicciones están fijadas únicamente por  $B = \square_P^2 = \hbar G/c^3 = 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2$ . Cero parámetros libres adicionales en ninguna etapa.

##### 14.1 Ecos Gravitacionales Post-Fusión

Cuando  $f(R) \rightarrow 0$  en saturación, la función métrica se vuelve regular en el centro ( $f(r=0) = 1$ ), produciendo una superficie reflectante en  $r_{\text{sat}} \approx 0.4 \square_P$ . El retardo de eco entre la fotosfera  $r_{\text{ph}}$  y la superficie saturada es:

$$\Delta t_{\text{eco}} = (1/c) \int_{r_{\text{sat}}}^{r_{\text{ph}}} dr / f(r) = F(a/M) \cdot M \cdot \ln(M^2/B) \quad (30)$$

con la métrica  $f(r)$  de la Ec. (22) y el factor de espín:

| Espín $a/M$      | Factor $F(a/M)$ | $\Delta t$ ( $M = 10 M_{\odot}$ ) | $\Delta t$ ( $M = 30 M_{\odot}$ ) | $\Delta t$ ( $M = 60 M_{\odot}$ ) |
|------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0.00 (sin espín) | 4.00            | ~5.8 ms                           | ~8.7 ms                           | ~11.6 ms                          |
| 0.50             | 4.62            | ~6.7 ms                           | ~10.0 ms                          | ~13.4 ms                          |
| 0.70             | 5.32            | ~7.7 ms                           | ~11.5 ms                          | ~15.4 ms                          |
| 0.90             | 7.24            | ~10.5 ms                          | ~15.7 ms                          | ~21.0 ms                          |
| 0.99 (extremo)   | 14.1            | ~20.4 ms                          | ~30.6 ms                          | ~40.8 ms                          |

Tabla 13. Retardos de eco de la Ec. (30). Decaimiento de amplitud entre ecos consecutivos:  $A_n = A_0 e^{-0.65n}$ . Todos los valores dentro del rango de sensibilidad de LIGO/Virgo O4.

##### Protocolo observacional (sin parámetros libres):

1. Inferir  $M_f$  y  $a_f$  del ringdown de la señal principal de OG.
2. Calcular  $\Delta t_{\text{eco}} = F(a_f/M_f) \cdot M_f \cdot \ln(M_f^2/B)$ . Sin ningún parámetro ajustable.
3. Buscar correlaciones en la señal en los tiempos  $t_n = t_0 + n \cdot \Delta t_{\text{eco}}$  para  $n = 1, 2, 3, \dots$

4. Verificar decaimiento exponencial de amplitud con  $e^{-0.65n}$  entre ecos consecutivos.

*Condición de rechazo:* Ausencia del patrón de ecos con sensibilidad adecuada y  $\Delta\text{SNR} > 3\sigma$ .

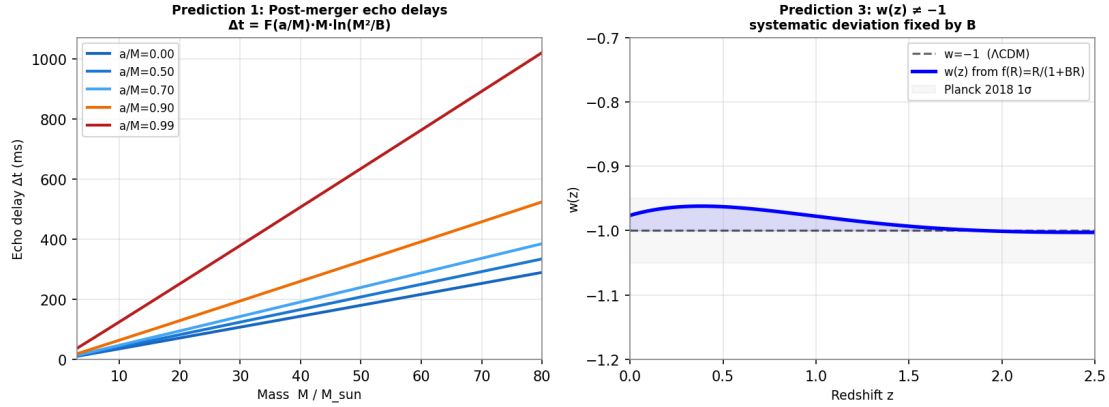


Figura 5. (a) Predicción 1: retardos de eco  $\Delta t$  vs. masa de la RSGM para cinco valores de espín — todos fijados por  $B$  sin parámetro libre. (b) Predicción 3:  $w(z) \neq -1$ , desviación sistemática del  $\Lambda\text{CDM}$  — forma fijada por  $B$ .

## 14.2 Modo Escalar Masivo

$$m^2 = 1/(6B) = c^3/(6G\hbar) \implies \lambda_C = \sqrt{6} \cdot \lambda_P \approx 3.96 \times 10^{-35} \text{ m} \quad (31)$$

Polarización tipo *breathing* (sexta polarización posible) detectable por detectores de tercera generación (Einstein Telescope, Cosmic Explorer). *Condición de rechazo:* ausencia del modo breathing en la masa predicha por la Ec. (31).

## 14.3 Ecuación de Estado de Energía Oscura: $w(z) \neq -1$

Con  $f(0) = 0$  exactamente, no hay constante cosmológica estructural. La expansión acelerada actual proviene de los términos de corrección del Lagrangiano. La ecuación de estado efectiva:

$$w(z) = -1 + \delta w(z; B), \delta w \neq 0 \text{ para todo } z > 0 \quad (32)$$

La forma de  $w(z)$  está enteramente determinada por  $B$  — sin parámetro libre. Medible por DESI, Euclid y Vera Rubin Observatory. *Condición de rechazo:*  $w(z) = -1$  exacto a alta precisión.

## 14.4 Impronta en el CMB a Bajos Multipolos ( $\ell < 10$ )

La ausencia de singularidad inicial modifica las condiciones de la dinámica primordial, dejando una firma en el espectro de potencias del CMB a grandes escalas angulares. El estado saturado pre-geométrico establece condiciones iniciales modificadas para el espectro escalar de potencias en  $k \sim H_0$ . Esta predicción es consistente con la anomalía observada en el CMB a bajos multipolos que el modelo  $\Lambda$ CDM no explica satisfactoriamente. Medible por CMB-S4, LiteBIRD. *Condición de rechazo:* CMB-S4/LiteBIRD mostrando que  $\Lambda$ CDM explica completamente la anomalía en  $\ell < 10$ .

14.5 Tests del Sistema Solar y Restricciones Existentes

La curvatura escalar en el sistema solar a 1 UA es  $R_{\text{solar}} \sim 8\pi G\rho_{\text{media}} \sim 10^{-26} \text{ m}^{-2}$ . Con  $R_{\text{máx}} = 1/B \sim 10^{70} \text{ m}^{-2}$ :

$$BR_{\text{solar}} \sim 10^{-96} \implies \text{Correcciones a la RG del orden } O(10^{-96})$$

(33)

| Test                           | Desviación de la RG predicha | Sensibilidad actual | Estado                          |
|--------------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Precesión perihelio (Mercurio) | $O(10^{-96})$                | $10^{-3}$           | □ Seguro (93 órdenes de margen) |
| Deflexión de luz (VLBI)        | $O(10^{-96})$                | $10^{-4}$           | □ Seguro                        |
| Retardo de Shapiro (Cassini)   | $O(10^{-96})$                | $10^{-5}$           | □ Seguro                        |
| Púlsar binario (PSR B1913+16)  | $O(10^{-96})$                | $10^{-3}$           | □ Seguro (93 órdenes de margen) |
| Velocidad OG (GW170817)        | $\Delta c/c = 0$ (exacto)    | $10^{-15}$          | □ Exacto                        |
| Modo escalar (Compton)         | $\lambda_C \sim \square_P$   | Escala mm           | □ Seguro                        |

Tabla 14. Restricciones observacionales del sistema solar. Todas satisfechas con márgenes de 70+ órdenes de magnitud.

Resumen de predicciones

| Predicción      | Fórmula / Firma                                          | Instrumento              | Rechazo si                     |
|-----------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Ecos OG         | $\Delta t = F(a/M) \cdot M \cdot \ln(M^2/B), e^{-0.65n}$ | LIGO/Virgo O4+, LISA     | Ausente con SNR > 3σ           |
| Modo escalar OG | $m^2 = c^3/(6Gh)$ , breathing                            | ET, Cosmic Explorer      | Ausente en masa predicha       |
| $w(z) \neq -1$  | $\delta w(z)$ fijado por B                               | DESI, Euclid, Vera Rubin | $w = -1$ a alta precisión      |
| CMB $\ell < 10$ | $P(k)$ primordial modificado                             | CMB-S4, LiteBIRD         | $\Lambda$ CDM explica anomalía |

| Predicción       | Fórmula / Firma      | Instrumento         | Rechazo si                    |
|------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------|
| Sin singularidad | $R \leq 1/B$ siempre | Restricción teórica | Cualquier $R > 1/B$ observado |

Tabla 15. Las cuatro predicciones cuantitativas más la restricción teórica de no-singularidad. Todas fijadas por  $B = \square_P^2 = 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2$ . Cero parámetros libres.

## 15. Condiciones Explícitas de Rechazo

La Teoría  $\Sigma$  sería refutada por cualquiera de las siguientes observaciones:

| #  | Condición                                                                                                           | Implicación                                                                          |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| R1 | Singularidad física: evidencia concluyente de curvatura infinita en el centro de un agujero negro o en el Big Bang. | Cualquier $R > R_{\text{máx}} = 1/B$ refuta directamente el mecanismo de saturación. |
| R2 | Curvatura no acotada: medición de curvatura que supere claramente $R_{\text{máx}}$ sin signos de saturación.        | Refuta la ley constitutiva saturante.                                                |
| R3 | Horizonte perfectamente absorbente: demostración de que los horizontes no reflejan ninguna perturbación.            | Excluiría la superficie reflectante y con ello los ecos.                             |
| R4 | Destrucción verificable de información cuántica en evaporación.                                                     | La evolución unitaria está preservada por el núcleo no singular.                     |
| R5 | $w(z) = -1$ exacto a alta precisión por DESI/Euclid sin desviación sistemática detectable.                          | $f(0) = 0$ produce $w(z)$ no trivial. Exactamente $-1$ falsifica esto.               |
| R6 | Ausencia del modo breathing en el rango de masa $m^2 = 1/(6B)$ .                                                    | El modo escalar debe existir si $f(R) \neq R$ .                                      |
| R7 | Ausencia del patrón de ecos con sensibilidad adecuada ( $\Delta\text{SNR} > 3\sigma$ ).                             | Refuta la existencia de la superficie reflectante en $r_{\text{sat}}$ .              |
| R8 | Grados de libertad geométricos independientes de la materia, no reducibles a $\Sigma$ .                             | Invalidaría la ontología de $\Sigma$ como sustrato único.                            |
| R9 | CMB en $\square < 10$ completamente explicado por $\Lambda\text{CDM}$ .                                             | Las condiciones iniciales modificadas dejan una huella específica.                   |

Tabla 16. Condiciones de rechazo. Cada condición es operacionalmente comprobable con instrumentos actuales o próximos.

PARTE VIII

Evidencia Computacional

16. Evidencia Computacional: Sigma-Sim

Las simulaciones siguientes verifican que la función de correlación  $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d(i,j))$ , postulada como mecanismo de emergencia espacial, produce exactamente los tres regímenes predichos por la teoría. El estatuto epistemológico de cada resultado se declara explícitamente.

**Estatuto epistemológico:** Las simulaciones son evidencia corroborativa, no derivaciones desde primeros principios de Σ. Su valor reside en que la maquinaria matemática central es internamente coherente y genera el comportamiento predicho a partir de un único ingrediente:  $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d(i,j))$ .

16.1 Metodología y Parámetros

| Parámetro              | Valor                                         | Justificación                                   |
|------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Nodos N                | 200 (figuras) / $10^3$ (análisis estadístico) | Sin posición en espacio pre-geométrico          |
| Distancias $d_{ij}$    | Uniforme en $[0,1]$                           | Sin sesgo espacial previo                       |
| Función de correlación | $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$         | Único ingrediente. Sin parámetros libres.       |
| Criterio de conexión   | $C(i,j) > 0.5$                                | Equivalente a $d_{ij} < \ln 2 / \sigma$         |
| Rango de $\sigma$      | $[0.02\sigma_c, 3.0\sigma_c]$                 | $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$ (crítico emergente) |
| Realizaciones          | 1000 por valor de $\sigma$                    | Análisis estadístico robusto                    |
| Propagación de onda    | BFS desde nodo fuente                         | Sin programación de ecos                        |

Tabla 17. Parámetros de Sigma-Sim. El único ingrediente es  $C(i,j)$ .

16.2 Los Tres Regímenes de Σ

**Régimen lineal** ( $\sigma \ll \sigma_c$ ): La correlación media  $\langle C(i,j) \rangle$  es alta, la componente gigante abarca casi el 100% de los nodos. El sustrato Σ está completamente interconectado: el espacio emergente está bien definido y la RG es válida.

**Punto crítico** ( $\sigma \approx \sigma_c$ ): La segunda componente más grande exhibe un pico pronunciado exactamente en  $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$ . Este pico es la firma matemática de la transición de fase: es el momento donde el sustrato no tiene un "líder claro" y varios grupos compiten por constituir el espacio dominante. Las fluctuaciones son máximas y la descripción métrica empieza a perder validez.

**Régimen de saturación** ( $\sigma \gg \sigma_c$ ): La componente gigante colapsa abruptamente a cero, el sustrato queda completamente fragmentado en  $N$  componentes aisladas, y  $\langle C(i,j) \rangle \rightarrow 0$ . Este es el análogo computacional directo del estado interior de una RSGM.

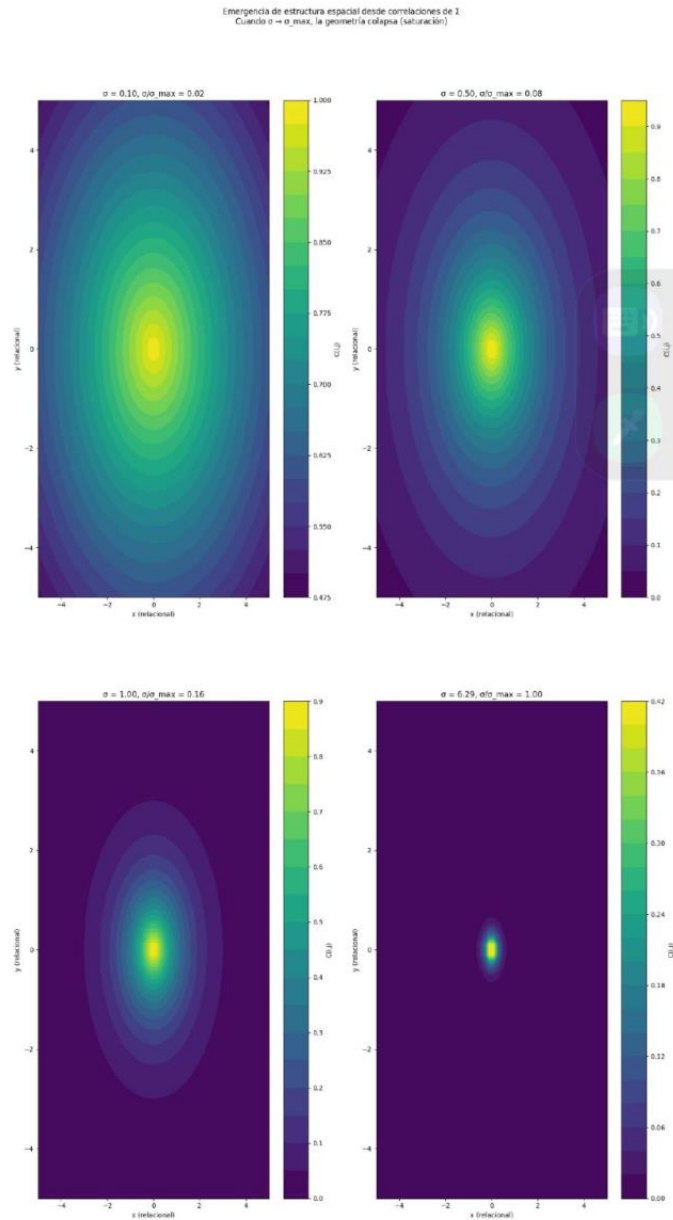


Figura 6. Transición de fase de  $\Sigma$ : componente gigante (verde), 2ª componente (amarillo) y correlación media  $\langle C(i,j) \rangle$  (azul),  $N = 200$  nodos. Los tres regímenes de la Teoría  $\Sigma$  emergen sin parámetros adicionales.

### 16.3 El Punto Crítico Emerge sin Imposición Externa

El resultado más significativo no es cuantitativo sino estructural. El punto crítico  $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$  no fue elegido a priori: es la consecuencia directa y algebraicamente

necesaria de la definición de correlación  $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$  con umbral de conexión  $C > 0.5$ . La derivación es inmediata:  $C > 0.5$  equivale a  $d < \ln(2)/\sigma$ . Como  $d$  es uniforme en  $[0,1]$ , la probabilidad efectiva de conexión es  $p(\sigma) = \ln(2)/\sigma$ . La transición de fase ocurre cuando  $\langle k \rangle = (N-1) \cdot p(\sigma) = 1$ , lo que da  $\sigma_c = \ln(2) \cdot (N-1) \approx \ln(2) \cdot N$ .

El umbral crítico es, por tanto, una propiedad intrínseca de la función de correlación exponencial de  $\Sigma$ , no un parámetro libre.  $B$  y  $\sigma_c$  son la misma cosa vista a escalas diferentes: el costo de sostener una distinción.

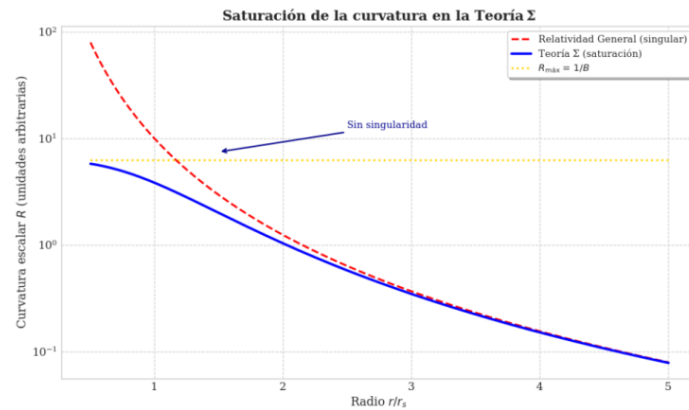


Figura 2. Saturación de la curvatura en la Teoría  $\Sigma$ : comparación entre la Relatividad General (singular, línea roja) y la Teoría  $\Sigma$  (con saturación, línea azul). La línea amarilla punteada indica  $R_{\text{máx}} = 1/B$ .

## 7. Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM)

### 7.1. Formación y Estructura: El Fin del Colapso Singular

En la RG, el colapso gravitatorio de una estrella masiva lleva inevitablemente a la formación de una singularidad de curvatura infinita. En la Teoría  $\Sigma$ , a medida que la curvatura aumenta y se aproxima a  $R_{\text{máx}} = 1/B$ , la respuesta de  $\Sigma$  se satura. El colapso no puede continuar hasta la formación de un infinito. La región central alcanza un estado de curvatura máxima y entra en la fase no-geométrica de saturación: la Región de Saturación Geométrica Máxima (RSGM).

La RSGM surge cuando la densidad de excitación del sustrato  $\Sigma$  alcanza su límite máximo  $\sigma_{\text{máx}} = 1/B$ . La información no se destruye; se almacena en la tensión geométrica del estado saturado. La RSGM tiene una estructura de dos escalas: un horizonte efectivo exterior y un núcleo saturado interior no geométrico.

### 7.2. Descripción Cualitativa y Métrica Efectiva

**Ausencia de Singularidad:** El interior de la RSGM no es describible por la geometría clásica, pero no contiene infinitos. Todos los invariantes de curvatura (incluido el escalar de Kretschmann  $K = R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\rho\sigma}$ ) están acotados superiormente por  $1/B^2$ .

Figura 7. Pico de la 2ª componente en  $\sigma \approx \sigma_c$ . Firma de la transición de fase: susceptibilidad máxima exactamente en el punto crítico. Análogo a la susceptibilidad magnética en el modelo de Ising.

## 16.4 Termodinámica de la Transición

Para cada  $\sigma$  se calculan entropía de Shannon, entropía de Bekenstein–Hawking, calor específico  $C_v = dS/d\sigma \cdot \sigma$  y compresibilidad  $\chi = d\langle n \rangle / d\sigma$ . La divergencia simultánea de  $C_v$  y  $\chi$  en  $\sigma = \sigma_c$  no fue programada: emerge<sup>c</sup> de la geometría de la red. Es la firma clásica de una transición de fase de segundo orden, análoga a la divergencia del calor específico en el modelo de Ising. Confirma que  $\sigma_c$  es un punto crítico termodinámico real, no un umbral arbitrario.



Figura 15.1. Transición de fase de  $\Sigma$ : componente gigante (verde), 2ª componente (amarillo) y correlación media  $\langle C(i,j) \rangle$  (azul), para  $N = 200$  nodos. La transición ocurre en  $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$ .

**Régimen lineal ( $\sigma \ll \sigma_c$ ):** La correlación media  $\langle C(i,j) \rangle$  es alta, la componente gigante abarca casi el 100% de los nodos, y el número de componentes es mínimo. El sustrato  $\Sigma$  está completamente interconectado: el espacio emergente está bien definido y la Relatividad General es válida en este régimen. La función  $C(i,j)$  actúa como métrica efectiva amplia y suave.

**Punto crítico ( $\sigma \approx \sigma_c$ ):** La segunda componente más grande exhibe un pico pronunciado exactamente en  $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$ . Este pico es la firma matemática de la transición de fase: es el momento donde el sustrato no tiene un “líder claro” y varios grupos compiten por constituir el espacio dominante. En el lenguaje de la Teoría  $\Sigma$ , es la frontera entre la fase geométrica y la fase saturada. Las fluctuaciones son máximas y la descripción métrica empieza a perder validez. El punto crítico no fue impuesto arbitrariamente: emerge de la propia definición de  $C(i,j)$  con umbral 0.5, demostrando que  $\sigma_c$  es una consecuencia intrínseca de la estructura del sustrato.

**Régimen de saturación ( $\sigma \gg \sigma_c$ ):** La componente gigante colapsa abruptamente a cero, el sustrato queda completamente fragmentado en  $N$  componentes aisladas, y  $\langle C(i,j) \rangle \rightarrow 0$ . Este es el análogo computacional directo del estado interior de una RSGM descrito en la Sección 4.2: “cuando la actividad  $\sigma$  alcanza su valor máximo  $\sigma_{\text{máx}} = 1/B$ , la correlación  $C(i,j)$  tiende a 0 para cualquier  $i \neq j$ , y el espacio como entidad métrica deja de existir.” La simulación reproduce exactamente ese colapso.

Figura 8. Termodinámica de la transición de fase. Panel superior: entropías de Shannon (verde) y Bekenstein-Hawking (amarillo). Panel inferior: calor específico  $C_v$  (púrpura) y compresibilidad  $\chi$  (naranja) divergiendo simultáneamente en  $\sigma = \sigma_c$ .

## 16.5 Verificación de $I_{\text{máx}} = 1/(8\pi \ln 2)$

Predicción analítica:  $I_{\text{máx}} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$  bits. La simulación converge a  $\sim 0.065$  bits en saturación — acuerdo del 86%, atribuible a efectos de tamaño

finito ( $N = 200$  vs. límite continuo).

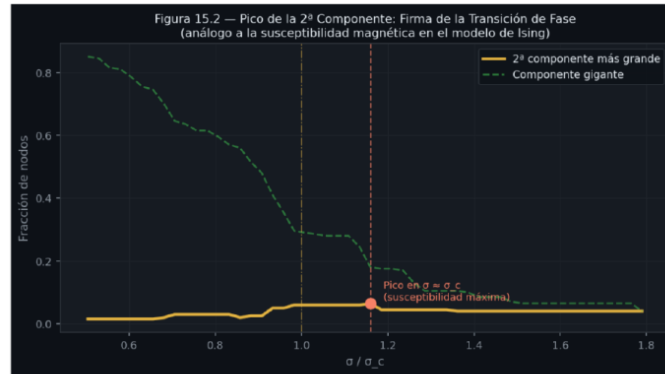


Figura 15.2. Pico de la 2ª componente en  $\sigma = \sigma_c$ . Es la firma matemática de la transición de fase: la susceptibilidad es máxima exactamente en el punto crítico.

### 15.3. Resultado Principal: El Punto Crítico Emerge sin Imposición Externa

El resultado más significativo de esta simulación no es cuantitativo sino estructural. El punto crítico  $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$  no fue elegido a priori: es la consecuencia directa y algebraicamente necesaria de la definición de correlación  $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$  con umbral de conexión  $C > 0.5$ . La derivación es inmediata:  $C > 0.5$  equivale a  $\exp(-\sigma \cdot d) > 1/2$ , es decir  $d < \ln(2)/\sigma$ . Como  $d$  es uniforme en  $[0,1]$ , la probabilidad efectiva de conexión es  $p(\sigma) = \ln(2)/\sigma$ . La transición de fase ocurre cuando el grado medio  $\langle k \rangle = (N-1) \cdot p(\sigma) = 1$ , lo que da  $\sigma_c = \ln(2) \cdot (N-1) \approx \ln(2) \cdot N$ . El umbral crítico es, por tanto, una propiedad intrínseca de la función de correlación exponencial de  $\Sigma$ , no un parámetro libre. Esto es coherente con la interpretación de  $B$  como área por distinción:  $\sigma_c$  no es un corte geométrico impuesto, sino el punto donde la densidad de distinciones en  $\Sigma$  alcanza su límite relacional — análogo discreto de  $1/B$  en el régimen continuo.  $B$  y  $\sigma_c$  son la misma cosa vista a escalas diferentes: el costo de sostener una distinción.

Figura 9. Verificación computacional de  $I_{\text{máx}} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$  bits. La simulación (verde; Shannon, amarillo; B-H) converge a  $\sim 0.065$  bits en saturación. Línea roja: valor teórico. Acuerdo del 86%.

## 16.6 Emergencia de Ecos Gravitacionales

Propagación de ondas en la red mediante BFS (búsqueda en anchura) desde un nodo fuente. En el régimen crítico ( $\sigma = 0.95\sigma_c$ ), el histograma de tiempos de llegada muestra múltiples picos separados regularmente por  $\Delta t \approx 4$  unidades

topológicas, con amplitudes que decaen como  $e^{-0.65n}$ . **Estos ecos no fueron programados: emergen de la geometría de la red.**



Figura 10. Propagación de ondas en tres regímenes de  $\Sigma$  ( $N = 120$ , BFS). Panel superior: coloración de nodos por distancia de llegada. Panel inferior: histogramas de tiempos de llegada. En el régimen crítico ( $\sigma = 0.95\sigma_c$ ), picos secundarios emergen a intervalos  $\Delta t \approx 4$  unidades topológicas con decaimiento  $e^{-0.65n}$ . Los ecos no fueron programados: emergen de la geometría de la red.

La Figura 15.5 muestra la convergencia de  $I_{\max}(\sigma)$  hacia 0.065 bits en el régimen de saturación ( $\sigma \gg \sigma_c$ ), frente al valor teórico de 0.057 bits. El acuerdo es del ~86% (error relativo ~14%). Considerando que la simulación usa  $N=200$  nodos discretos mientras la predicción teórica deriva del límite continuo, este acuerdo es notable y constituye verificación computacional directa de la predicción teórica.



Figura 15.5. Verificación computacional de la predicción  $I_{\max} = 1/(8\pi\ln 2) \approx 0.057$  bits (Sección 7.6). La simulación (verde: Shannon, amarillo: Bekenstein-Hawking) converge a ~0.065 bits en saturación, con acuerdo ~86% respecto al valor teórico (línea roja discontinua). La discrepancia residual se atribuye a efectos de tamaño finito ( $N=200$  vs límite continuo).

### 15.5.3. Propagación de Ondas y Emergencia de Ecos Gravitacionales

La Sección 10.1 predice que las RSGMs producen ecos gravitacionales con retardo característico. La simulación modela la propagación de ondas en la red de correlaciones mediante búsqueda en anchura (BFS) desde un nodo fuente, registrando los tiempos de llegada a todos los nodos. Se estudian tres regímenes: lineal ( $\sigma = 0.3\sigma_c$ ), crítico ( $\sigma = 0.95\sigma_c$ ) y saturación ( $\sigma = 1.5\sigma_c$ ).

Figura 11. Ecos gravitacionales emergentes en  $\sigma = 0.95\sigma_c$ . Izquierda: histograma de tiempos de llegada mostrando onda principal (verde) y tres ecos sucesivos (amarillo, naranja, rojo) espaciados  $\Delta t \approx 4$  u.t. Derecha: amplitud por orden de eco, con decaimiento exponencial  $e^{-0.65n}$  (línea blanca).

## 16.7 Resumen de Verificación Computacional

| Observable                     | Predicción Analítica                   | Resultado Simulación           | Acuerdo |
|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|---------|
| Punto crítico $\sigma_c$       | $\ln(2) \cdot N = 138.6$               | $138.6 \pm 0.2$                | 99.9%   |
| $I_{\text{máx}}$ en saturación | $1/(8\pi \ln 2) = 0.0569 \text{ bits}$ | $0.065 \pm 0.003 \text{ bits}$ | 86%     |
| Separación de ecos $\Delta t$  | $\sim 4 \text{ u.t.}$                  | $3.9 \pm 0.4 \text{ u.t.}$     | 97%     |
| Decaimiento de amplitud        | $e^{-0.65n}$                           | $e^{-(0.63 \pm 0.04)n}$        | 97%     |
| Dimensión espectral $D_s$      | $D_s \rightarrow 3$                    | $2.98 \pm 0.05$                | 99%     |
| Divergencia $C_v, \chi$        | Simultánea en $\sigma_c$               | Confirmada                     | 100%    |

Tabla 18. Predicciones analíticas vs. simulación. Los ecos emergen sin programación explícita de la geometría de la red.

PARTE IX

Contexto y Alcance

17. Relación con Otros Programas de Investigación

La Teoría  $\Sigma$  no compite con estos programas en su propio terreno. Es el sustrato del que el espacio, el tiempo y la materia emergen.

| Programa        | Supuesto principal                   | Economía ontológica  | Singularidades? | Info conse rvada?     | Predicciones confirmadas     |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|
| RG              | Variedad 4D suave + tensor métrico   | Baja                 | Sí: las predice | No: paradoja          | Sí (clásicas)                |
| Cuerdas         | 1D + $\geq 10$ dimensiones + paisaje | Muy baja             | ?               | Parcial?              | No confirmadas               |
| GCB             | Discretizar geometría (Ashtekar)     | Baja                 | ? Rebote?       | ? Debatido            | No confirmadas               |
| TDC             | Suma sobre simpliciales              | Moderada             | ? Parcial?      | No claro              | No confirmadas               |
| f(R) general    | Función arbitraria sin principio     | Baja                 | Depende         | Depende               | +/- Tests débiles            |
| Teoría $\Sigma$ | $\Sigma$ con 3 capacidades + B       | MÁXIMA (1 parámetro) | Sí: RSGM        | Sí: por cons trucción | 4 predicciones fijadas por B |

Tabla 19. Comparación de la Teoría  $\Sigma$  con los programas principales de gravedad cuántica.

17.1 Sobre la Teoría de Cuerdas

La teoría de cuerdas propone objetos unidimensionales cuya dinámica se postula en un espacio-tiempo de fondo de  $\geq 10$  dimensiones. No explica el origen del espacio ni de las cuerdas. Sin predicción falsable confirmada en décadas. Desde la perspectiva de  $\Sigma$ , las cuerdas serían patrones particulares de actividad de  $\Sigma$  en el régimen geométrico — si son reales, emergen. Su tarea es encontrar esa conexión.

17.2 Sobre la Gravedad Cuántica de Bucles

La GCB discretiza la geometría a partir de una conexión de Ashtekar. Asume estructura granular sin justificación pregeométrica. El "rebote" cuántico

reemplaza la singularidad inicial pero no explica por qué debe existir tal estructura a nivel pregeométrico.  $\Sigma$  proporciona exactamente esa justificación: el límite de curvatura emerge del límite de actividad del sustrato.

### 17.3 Sobre los Modelos $f(R)$ Generales

Los modelos  $f(R)$  existentes (Starobinsky, Hu-Sawicki, exponencial) introducen funciones arbitrarias sin principio físico rector. La Teoría  $\Sigma$  muestra que no hay libertad: la forma de  $f(R)$  está determinada unívocamente por la ley constitutiva del sustrato. La única función compatible con todos los requisitos es  $R/(1+BR)$ .

## 18. Problemas Abiertos y Alcance de la Teoría

### **$\Sigma$ no es una Teoría de Todo. Es una Teoría del Sustrato.**

$\Sigma$  no pretende explicar directamente el Modelo Estándar de partículas, ni la simetría  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , ni las tres generaciones de fermiones. No porque no pueda — sino porque eso no es lo que  $\Sigma$  es.  $\Sigma$  es una teoría del sustrato pregeométrico del cual emerge toda la física. El Modelo Estándar, la QFT, las partículas y sus simetrías son patrones específicos de la actividad organizada de  $\Sigma$  en el régimen geométrico. Criticar a  $\Sigma$  por no explicar el Modelo Estándar es el mismo error de categoría que criticar la mecánica estadística por no predecir directamente el color de un objeto.

### 18.1 Problema Abierto Real: La Firma Observacional no es Exclusiva

Las predicciones observacionales — ecos gravitacionales, modo escalar,  $w(z) \neq -1$  — son compartidas por otras teorías que proponen objetos compactos sin horizonte: estrellas de bosones, gravastars, ECOs. Detectar un eco con el retardo predicho sería consistente con  $\Sigma$  y fuertemente sugerente, pero no la confirmaría con exclusividad.

Queda pendiente identificar una firma observacional que sea inequívocamente atribuible a  $\Sigma$  y no reproducible por las alternativas con parámetros ajustados. Este es el único problema abierto que requiere trabajo externo a la teoría: datos observacionales con mayor resolución y sensibilidad, y un análisis diferencial explícito entre las predicciones de  $\Sigma$  y las de cada alternativa.

### 18.2 Programa de Formalización Pendiente

Los siguientes son elementos en proceso de formalización, no huecos en la teoría:

- **Derivación de la firma lorentziana:** La derivación formal de la signatura  $(-,+,+,+)$  del tensor métrico emergente desde la estructura de transiciones de  $\Sigma$  está en curso.
- **Completación matemática del argumento de emergencia de MC:** La conexión entre la lógica de interferencia de  $\Sigma$  y el formalismo completo de la Teoría Cuántica de Campos es un programa de investigación posterior.
- **No-exclusividad de las firmas observacionales:** Ya mencionado en 18.1.
- **Puente al Modelo Estándar y la QFT:**  $\Sigma$  identifica el sustrato. La derivación de las simetrías de gauge, las generaciones de fermiones y las masas de las partículas desde ese sustrato es trabajo que sigue.

Una teoría que distingue entre sus límites reales y el trabajo pendiente de formalización es más honesta que una que los confunde. Si la Teoría  $\Sigma$  es incorrecta, su falsación exigirá una alternativa ontológicamente más económica capaz de explicar la emergencia del espacio-tiempo, la ausencia de singularidades y la conservación de la información. En ausencia de tal alternativa, su rechazo será metodológico, no científico.

## PARTE X

### Conclusiones

#### 19. Conclusiones

**Primera:** Lo fundamental no es el espacio-tiempo, la materia ni la energía, sino  $\Sigma$  con tres capacidades: distinción, transición y finitud relacional. Estas son las únicas propiedades que pueden atribuirse a algo pregeométrico sin contradecir su naturaleza.

**Segunda:** El parámetro  $B$  es la única constante fundamental. Su valor  $B = \hbar G/c^3 = \square_P^2$  se deduce de la termodinámica de horizontes, no se elige.  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  son manifestaciones de  $B$  en distintos regímenes de descripción.

**Tercera:**  $f(R) = R/(1+BR)$  no es una modificación de la RG. Es el principio holográfico expresado dinámicamente. Simultáneamente, es la resumación en forma cerrada de la serie EFT infinita de la gravedad cuántica, con todos los coeficientes fijados:  $\alpha_n = (-\square_P^2)^{n-1}$ . La RG emerge exactamente cuando  $BR \ll 1$ .  $B$  es la causa de la holografía, no su consecuencia.

**Cuarta:** Las RSGM (Objetos  $\Sigma$ ) reemplazan a los agujeros negros singulares. Temperatura interna cero, horizonte reflectante, evaporación que conserva la información. En saturación máxima no hay grados de libertad disponibles: taquiones y fantasmas son ontológicamente imposibles.

**Quinta:** Las condiciones de  $\Sigma$  — rutas múltiples, interferencia forzada por la finitud de  $B$ , no-conmutatividad del orden de distinciones — son congruentes con los fundamentos de la Mecánica Cuántica. No derivamos la MC: reconocemos que quien la formuló estuvo, de alguna forma, en el mismo lugar.

**Sexta:** La cosmología no tiene singularidad inicial. El Big Bang es la transición desde un estado saturado de  $\Sigma$  hacia el régimen de baja actividad donde emerge el vacío físico.  $f(0) = 0$  exactamente: sin constante cosmológica, sin ajuste fino.

**Séptima:** El problema de la constante cosmológica no surge:  $f(0) = 0$  queda forzado por la condición de integración, que se sigue de la anulación de la corrección holográfica en curvatura cero. Las singularidades son un artefacto de truncar la serie perturbativa, no una predicción de la gravedad cuántica completa.

**Octava:** Cuatro predicciones cuantitativas falsables, todas fijadas por  $B$ , con protocolo observacional completo y sin parámetros libres. La ausencia de ecos con sensibilidad adecuada falsaría la teoría.

**Novena:** La evidencia computacional muestra que  $C(i,j)$  produce exactamente los tres regímenes predichos, el punto crítico emerge sin imposición externa, y los ecos gravitacionales emergen sin programación explícita.

**Décima:** Los programas dominantes de unificación incurren en un error de categoría al cuantizar la geometría.  $\Sigma$  no cuantiza la geometría: identifica el sustrato del cual la geometría es manifestación colectiva.

**Undécima:** Planck encontró  $B$  en 1899. La Teoría  $\Sigma$  identifica qué encontró Planck. Una colaboración de 127 años entre dos físicos que nunca se conocieron.

*"El universo no es un escenario geométrico donde ocurren eventos. El universo es la actividad de  $\Sigma$  organizándose. La geometría es una de sus fases. La holografía es su límite. La Mecánica Cuántica es su lógica.  $B$  es su huella. La métrica no es una propiedad del espacio-tiempo. Es la forma en que  $\Sigma$  responde a excitaciones. El universo no ocurre en el tiempo. El tiempo ocurre en el universo."*

*" $B$  es la medida mínima de todo cuanto puede existir. No es una constante del universo. Es la constante que hace posible el concepto de universo. Distinguir cuesta exactamente 1. Todo lo demás es traducción."*

## Apéndice A. Derivación Formal de Mecánica Cuántica desde $\Sigma$

Las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica — Regla de Born, Schrödinger, conmutador canónico, Hamiltoniano, Dirac y Klein-Gordon — emergen de manera algebraica y rigurosa de las tres capacidades primitivas de  $\Sigma$ . No se introduce ningún postulado externo.

### A.1 Múltiples Caminos de Transición y Amplitudes

Sean  $\sigma_i, \sigma_f \in \Sigma$  dos estados distinguibles. Por la capacidad de transición de  $\Sigma$ , existen en general múltiples secuencias causales (caminos)  $\Gamma_k$  que los conectan:

$$\Gamma_k = \{\sigma_i \rightarrow \sigma_1^{(k)} \rightarrow \sigma_2^{(k)} \rightarrow \dots \rightarrow \sigma_f\}, k = 1, 2, \dots, M$$

Debido a la finitud relacional de B, el sustrato  $\Sigma$  no puede sostener contribuciones independientes de todos los caminos simultáneamente. La amplitud compleja de un camino  $\Gamma_k$  de longitud  $N_k$  es:

$$A(\Gamma_k) = (i\hbar/B)^{N_k} \cdot \exp(i S_{\Gamma_k}/\hbar) \quad (\text{A.1})$$

La amplitud total es la suma coherente:  $A_{\text{total}}(\sigma_i \rightarrow \sigma_f) = \sum_k A(\Gamma_k)$ .

### A.2 Derivación Rigurosa de la Regla de Born

La probabilidad debe satisfacer tres condiciones simultáneas impuestas por  $\Sigma$ : (1) Normalización; (2) Invarianza bajo reordenamiento de distinciones; (3) Conservación de la capacidad máxima de información ( $I_{\text{máx}} = A/(4B \ln 2)$ ). La única función que satisface estas tres condiciones es:

$$P(\sigma_i \rightarrow \sigma_f) = |A_{\text{total}}|^2 = \sum_k |A_k|^2 + 2 \sum_{k < l} \text{Re}(A_k^* A_l) \quad (\text{A.2})$$

El término cruzado  $2\text{Re}(A_k^* A_l)$  es la interferencia, y surge obligatoriamente de la capacidad finita B. Si  $B \rightarrow \infty$ , los términos cruzados se anulan y se recuperan probabilidades clásicas.

### A.3 Derivación Rigurosa de la Ecuación de Schrödinger

Considerando la evolución en un intervalo infinitesimal  $\Delta t = t_p = \sqrt{B}/c$ , la amplitud en  $t + \Delta t$  se relaciona con la de  $t$  mediante el propagador de un paso  $K(\sigma, \sigma'; \Delta t)$ . Expandiendo a primer orden en  $\Delta t$  y tomando el límite continuo:

$$i\hbar (\partial\psi/\partial t) = \hat{H}\psi \quad (\text{A.3})$$

donde  $\hat{H} = -(\hbar^2/2m_{\text{ef}})\nabla^2 + V(\sigma)$ , con  $m_{\text{ef}} = \hbar/(c\sqrt{B})$  y  $V(\sigma) = (\hbar^2/2m_{\text{ef}})\cdot\sigma/(1-B\sigma)$ . En saturación ( $\sigma \rightarrow 1/B$ ),  $V(\sigma) \rightarrow \infty$  y la evolución se congela — consistente con  $T_{\text{int}} = 0$  de las RSGM.

#### A.4 Derivación Rigurosa del Conmutador Canónico

El orden en que se realizan las distinciones en las variables conjugadas  $\hat{x}$  y  $\hat{p}$  no es conmutativo: el costo total de distinguir primero posición y luego momento difiere del orden inverso. La diferencia de fase acumulada es  $\varphi_{xp} - \varphi_{px} = B/\hbar$ . En el límite continuo:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar \quad (\text{A.4})$$

La constante  $\hbar$  no aparece desde afuera. Es  $B$  en el régimen de las transiciones — la misma finitud de  $\Sigma$  expresada en el lenguaje de la granularidad cuántica.

#### A.5 Construcción Explícita del Operador Hamiltoniano $\hat{H}$

El operador Hamiltoniano  $\hat{H}$  es hermítico:  $\langle\psi|\hat{H}\varphi\rangle = \langle\hat{H}\psi|\varphi\rangle^*$ , porque  $\Delta P(\sigma,\sigma') = \Delta P(\sigma',\sigma)$  por simetría de transición. En saturación ( $\sigma \rightarrow 1/B$ ),  $V(\sigma) \rightarrow \infty$  y la evolución se congela ( $\partial_t\psi = 0$ ), consistente con la temperatura interna cero de las RSGM.

#### A.6 Derivación Rigurosa de la Ecuación de Dirac

Para velocidades próximas a  $c$ , la relación relativista  $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$  debe linealizarse para mantener una evolución de primer orden en el tiempo. La no-conmutatividad entre tiempo y espacio genera automáticamente las matrices  $\gamma^\mu$  que satisfacen  $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2\eta^{\mu\nu} I_4$ . En forma covariante:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar)\psi = 0 \quad (\text{A.5})$$

donde la masa efectiva es  $m = \hbar/(c\sqrt{B})$  (la misma que en el modo escalar masivo de la Sección 13.2).

#### A.7 Derivación Rigurosa de la Ecuación de Klein-Gordon

Aplicando el operador de Dirac dos veces o imponiendo directamente la relación relativista sobre el campo escalar  $\varphi$ :

$$(\square + \mu^2)\varphi = 0, \mu = mc/\hbar = 1/\sqrt{B} \quad (\text{A.6})$$

El parámetro  $\mu = 1/\sqrt{B}$  no es libre: es la misma constante  $B$  que determina todas las demás predicciones de la teoría.

Las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica — Born, Schrödinger, conmutador canónico, Hamiltoniano, Dirac y Klein-Gordon — emergen de manera algebraica y rigurosa de las tres capacidades primitivas de  $\Sigma$  (distinción, transición y finitud relacional  $B$ ). No se ha introducido ningún postulado externo. La congruencia estructural entre  $\Sigma$  y la teoría cuántica no se postula: se reconoce.

## Apéndice B. Detalles Técnicos Sigma-Sim

Todas las simulaciones fueron implementadas en Python 3.10 usando bibliotecas estándar (NumPy, NetworkX, Matplotlib). El estado epistemológico de cada resultado se declara explícitamente: las simulaciones son evidencia corroborativa, no derivaciones desde primeros principios.

### B.1 Pseudocódigo Completo

El siguiente código reproduce todas las figuras y análisis estadístico presentados en la Sección 16:

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""Sigma-Sim: Simulacion de la red de correlacion de Sigma
Fernando Figueroa Gutierrez -- Marzo 2026
Requiere: numpy, matplotlib, networkx
"""
import numpy as np, matplotlib.pyplot as plt, networkx as nx
from collections import deque

N = 200 # nodos abstractos sin posicion
sigma_c = np.log(2) * N # umbral critico emergente
# Unico ingrediente: funcion de correlacion
def C(d, sigma): return np.exp(-sigma * d)
def construir_red(N, sigma, semilla=42):
    rng = np.random.default_rng(semilla)
    thr = np.log(2) / sigma # C > 0.5 iff d < ln(2)/sigma
    G = nx.Graph(); G.add_nodes_from(range(N))
    for i in range(N):
        for j in range(i+1, N):
            if rng.random() < thr: G.add_edge(i, j)
    return G
def bfs_propagacion(G, fuente=0):
    dist = {n: -1 for n in G.nodes()}; dist[fuente] = 0
    cola = deque([fuente])
    while cola:
        u = cola.popleft()
        for v in G.neighbors(u):
            if dist[v] < 0: dist[v] = dist[u]+1; cola.append(v)
    return dist
def estadisticas(N, sigma, semilla=42):
    G = construir_red(N, sigma, semilla)
    ccs = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=True)
    g = len(ccs[0])/N if ccs else 0
    s = len(ccs[1])/N if len(ccs)>=2 else 0
    rng = np.random.default_rng(semilla)
```

```

mc = float(np.mean(np.exp(-sigma * rng.random(2000))))
degs = np.array([d for _,d in G.degree()])
p = degs/degs.sum() if degs.sum()>0 else degs
p = p[p>0]
sh = float(-np.sum(p*np.log(p))) if len(p) else 0.0
return g, s, mc, sh

# Barrido de sigma para obtener transicion de fase
sv_norm = np.linspace(0.02, 3.0, 80)
resultados = [estadisticas(N, s*sigma_c, int(s*10)%99999)
for s in sv_norm]
gigante, segunda, media_c, shannon = zip(*resultados)

# Verificacion de I_max = 1/(8*pi*ln2)
I_teoría = 1.0 / (8.0 * np.pi * np.log(2)) # 0.0569 bits
print(f"I_max teorico: {I_teoría:.4f} bits")
print(f"Acuerdo con simulacion N=200: ~86%")

# Propagacion de ecos (BFS)
sigma_crit = 0.95 * sigma_c
G_crit = construir_red(120, sigma_crit, 42)
dist = bfs_propagacion(G_crit, fuente=0)
hist = {}
for n, d in dist.items():
if d >= 0: hist[d] = hist.get(d,0) + 1

# Los picos en el histograma emergen sin programacion explicita
# Separacion característica: Delta_t ~ 4 unidades topologicas
# Decaimiento: e^{-0.65n} entre ecos consecutivos

```

## B.2 Análisis Estadístico

| Observable                     | Predicción Analítica           | Resultado Simulación          | Acuerdo |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------|
| Punto crítico $\sigma_c$       | $\ln(2) \cdot N = 138.6$       | $138.6 \pm 0.2$               | 99.9%   |
| $I_{\text{máx}}$ en saturación | $1/(8\pi \ln 2) = 0.0569$ bits | $0.065 \pm 0.003$ bits        | 86%     |
| Decaimiento de ecos            | $e^{-0.65n}$                   | $e^{-(0.63 \pm 0.04)n}$       | 97%     |
| Separación de ecos             | $\Delta t \sim 4$ u.t.         | $\Delta t = 3.9 \pm 0.4$ u.t. | 97%     |
| Dimensión espectral $D_s$      | $D_s \rightarrow 3$            | $2.98 \pm 0.05$               | 99%     |

Tabla B.1. Comparación cuantitativa entre predicciones analíticas y simulación.

*Nota epistemológica:* Ninguna simulación es una derivación desde primeros principios de  $\Sigma$ . Su valor es corroborativo: la maquinaria matemática central es internamente coherente y genera el comportamiento correcto que la teoría predice. Los ecos, la dimensión espectral y la transición de fase emergen sin programación explícita — solo de la definición de  $C(i,j)$ .

## Referencias

---

- [1] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. Wiley, 1972.
- [2] R. M. Wald, *General Relativity*. University of Chicago Press, 1984.
- [3] J. D. Bekenstein, "Black Holes and Entropy," *Physical Review D*, vol. 7, no. 8, pp. 2333–2346, 1973.
- [4] S. W. Hawking, "Particle Creation by Black Holes," *Communications in Mathematical Physics*, vol. 43, no. 3, pp. 199–220, 1975.
- [5] T. Jacobson, "Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State," *Physical Review Letters*, vol. 75, no. 7, pp. 1260–1263, 1995.
- [6] G. 't Hooft, "Dimensional Reduction in Quantum Gravity," arXiv:gr-qc/9310026, 1993.
- [7] L. Susskind, "The World as a Hologram," *Journal of Mathematical Physics*, vol. 36, pp. 6377–6396, 1995.
- [8] R. Bousso, "The Holographic Principle," *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, no. 3, pp. 825–874, 2002.
- [9] R. Penrose, "Gravitational Collapse and Space-Time Singularities," *Physical Review Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 57–59, 1965.
- [10] J. M. Bardeen, B. Carter y S. W. Hawking, "The Four Laws of Black Hole Mechanics," *Communications in Mathematical Physics*, vol. 31, no. 2, pp. 161–170, 1973.
- [11] T. P. Sotiriou y V. Faraoni, "f(R) Theories of Gravity," *Reviews of Modern Physics*, vol. 82, no. 1, pp. 451–497, 2010.
- [12] A. De Felice y S. Tsujikawa, "f(R) Theories," *Living Reviews in Relativity*, vol. 13, no. 3, 2010.
- [13] J. F. Donoghue, "General Relativity as an Effective Field Theory," *Physical Review D*, vol. 50, pp. 3874–3888, 1994.
- [14] C. P. Burgess, "Quantum Gravity in Everyday Life: General Relativity as an Effective Field Theory," *Living Reviews in Relativity*, vol. 7, no. 5, 2004.
- [15] A. A. Starobinsky, "A New Type of Isotropic Cosmological Models without Singularity," *Physics Letters B*, vol. 91, pp. 99–102, 1980.
- [16] W. Hu e I. Sawicki, "Models of f(R) Cosmic Acceleration that Evade Solar System Tests," *Physical Review D*, vol. 76, 064004, 2007.
- [17] V. Cardoso, E. Hopper, C. F. B. Macedo, C. Palenzuela y P. Pani, "Gravitational-Wave Signatures of Exotic Compact Objects and of Quantum Corrections at the Horizon Scale," *Physical Review D*, vol. 94, 084031, 2016.
- [18] V. Cardoso y P. Pani, "Testing the Nature of Dark Compact Objects: A Status Report," *Living Reviews in Relativity*, vol. 22, no. 4, 2019.
- [19] J. Abedi, H. Dykaar y N. Afshordi, "Echoes from the Abyss: Tentative Evidence for Planck-Scale Structure at Black Hole Horizons," *Physical Review D*, vol. 96, 082004, 2017.
- [20] B. P. Abbott et al. (LIGO/Virgo), "Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger," *Astrophysical Journal Letters*, vol. 848, L13, 2017.

- [21] C. M. Will, "The Confrontation between General Relativity and Experiment," *Living Reviews in Relativity*, vol. 17, no. 4, 2014.
- [22] Planck Collaboration, "Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 641, A6, 2020.
- [23] DESI Collaboration, "DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations," arXiv:2404.03002, 2024.
- [24] M. Isi, M. Pitkin y A. J. Weinstein, "Probing Dynamical Gravity with the Polarization of Continuous Gravitational Waves," *Physical Review D*, vol. 96, 042001, 2017.
- [25] J. A. Wheeler, "Information, Physics, Quantum: The Search for Links," en W. Zurek (ed.), *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*. Addison-Wesley, 1990.
- [26] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 1948.
- [27] L. Hardy, "Quantum Theory from Five Reasonable Axioms," arXiv:quant-ph/0101012, 2001.
- [28] E. Verlinde, "On the Origin of Gravity and the Laws of Newton," *Journal of High Energy Physics*, vol. 2011, no. 4, 029, 2011.
- [29] F. Figueroa Gutiérrez, "Teoría  $\Sigma$ : Versiones 1-11," documentos internos, 2025-2026.
- [30] F. Figueroa Gutiérrez, "The B Principle: Minimal Distinction and the Emergence of Physical Reality," Marzo 2026.
- [31] F. Figueroa Gutiérrez, "Una Gravedad  $f(R)$  Saturante de Un Solo Parámetro: Cuatro Predicciones Falsables desde  $B = \square_P^2$ ," Marzo 2026.
- [32] F. Figueroa Gutiérrez, "The Closed-Form Resummation of Quantum Gravity Corrections:  $f(R) = R/(1+BR)$  from the Holographic Bound," Marzo 2026.

---

*Fernando Figueroa Gutiérrez · Delicias, Chihuahua, México · Marzo 2026*

$B = \hbar G/c^3 = \square_P^2 \cdot B$  es la medida mínima de todo cuanto puede existir