

TEORÍA Σ

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

Documento Fusionado Completo — Versión 2

*Teoría Σ v11 · El Principio B · $f(R)$ Saturante y Cuatro Predicciones Falsables ·
Resumación de Forma Cerrada de las Correcciones de Gravedad Cuántica · Relación con la
EFT Gravitacional · Congruencia con la MQ*

Fernando Figueroa Gutiérrez

Investigador Independiente · Delicias, Chihuahua, México

fernando1986figueroa@gmail.com

Marzo 2026

$$B = \hbar G / c^3 = \ell_P^2$$

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.

Contents

Resumen	6
I Fundamentos	7
1 Prólogo: Los Gigantes que Casi lo Vieron	7
2 Por qué el Espacio-Tiempo no Puede ser Fundamental	7
2.1 Lo fundamental tiene que ser uno	7
2.2 La materia no es fundamental	8
2.3 Energía y materia son la misma descripción	8
2.4 El espacio-tiempo es respuesta, no contenido	8
2.5 El tiempo precede al espacio	8
2.6 B surge de la falla, no de un postulado	8
2.7 Lo que queda: tres capacidades y nada más	8
3 Postulados Fundamentales	9
4 Ontología de Σ : Las Tres Capacidades Primitivas	9
II El Parámetro B	9
5 El Parámetro B: La Única Constante Fundamental	10
5.1 Naturaleza física y valor de B	10
5.2 Una sola constante fundamental	10
5.3 B como límite universal	11
5.4 Por qué $B = 0$ y $B = \infty$ son ambos imposibles	11
III Emergencia	11
6 Emergencia del Espacio-Tiempo	11
6.1 Tiempo desde el orden causal puro	11
6.2 Espacio desde la correlación	12
6.3 Dimensionalidad 3+1	12
6.4 Signatura lorentziana: obligatoria, no postulada	12

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

7	Emergencia de la Energía y la Materia	12
IV	El Régimen Geométrico	13
8	Lagrangiano Efectivo y Ecuaciones de Campo	13
8.1	Ley constitutiva saturante	13
8.2	Derivación exacta del Lagrangiano	14
8.3	Propiedades clave y unicidad	14
8.4	Acción efectiva y ecuaciones de campo	14
V	Relación con la EFT Gravitacional	15
9	Posición frente a la EFT: Reducción Sectorial	15
9.1	La EFT gravitacional estándar	15
9.2	Por qué R y no $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$: el argumento en tres capas	16
10	Resumación no Perturbativa de la Serie EFT	17
10.1	La serie EFT es asintótica	17
10.2	La forma cerrada desde la ley constitutiva	17
10.3	Interpretación: resumación tipo Padé y flujo UV	18
10.4	Comparación con modelos $f(R)$ existentes	19
VI	Objetos Compactos y Cosmología	20
11	Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM)	20
11.1	Formación y estructura	20
11.2	Ley constitutiva saturante y parámetro de saturación	21
11.3	Métrica efectiva y zona de transición	21
11.4	El horizonte como frontera de fase	21
11.5	Condición formal de la RSGM: $\delta_\Sigma = 0$	22
11.6	Congelamiento dinámico del modo escalar	22
11.7	Termodinámica y resolución de la paradoja de la información	22
12	Cosmología sin Singularidad Inicial	23
VII	Congruencia con la Mecánica Cuántica	23

13	Congruencia Estructural, no Construcción	24
13.1	Las condiciones que Σ provee	24
13.2	Congruencia con la regla de Born	24
13.3	Congruencia con el conmutador canónico	24
13.4	Congruencia con Schrödinger, Dirac y Klein–Gordon	25
13.5	Lo que Σ no hace	25
14	Ondas Gravitacionales: Modos Tensorial y Escalar	25
14.1	Modo tensorial	25
14.2	Modo escalar masivo	25
VIII	Predicciones y Falsabilidad	25
15	Predicciones Observacionales Falsables	26
15.1	Ecos gravitacionales post-fusión	26
15.2	Modo escalar masivo	27
15.3	Ecuación de estado de energía oscura	28
15.4	Impronta en el CMB a bajos multipolos	28
15.5	Tests del sistema solar	28
16	Condiciones Explícitas de Rechazo	29
IX	Evidencia Computacional	29
17	Evidencia Computacional: Sigma-Sim	29
17.1	Metodología	29
17.2	Los tres regímenes de Σ	30
17.3	Resumen de verificación cuantitativa	30
17.4	Código principal	31
X	Contexto, Alcance y Conclusiones	36
18	Relación con Otros Programas de Investigación	37
19	Problemas Abiertos y Alcance	37
20	Tabla de Congruencias Estructurales	38

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

21 Conclusiones	38
A Derivación Formal de MQ desde Σ	39
B Código Completo Sigma-Sim	40
C Presentación Técnica Compacta para la Comunidad de Física	40

Resumen

La Teoría Σ postula la existencia de un sustrato fundamental pregeométrico, denotado Σ , 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 Σ 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 Σ 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 $R_{\max} = 1/B$, 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 EFT de la gravedad cuántica. Todos los coeficientes quedan fijados: $\alpha_n = (-\ell_P^2)^{n-1}$. Cero parámetros libres. La formulación corresponde a una *reducción sectorial* de la EFT completa, válida en configuraciones altamente simétricas o dominadas por un invariante escalar, no a una truncación de la EFT general.

Las singularidades son eliminadas por construcción, reemplazadas por Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM). Las condiciones mínimas de Σ — distinción, transición y finitud relacional — son congruentes con la arquitectura lógica de la Mecánica Cuántica. Esta congruencia no es una derivación axiomática completa: es el reconocimiento de que la MQ ya estaba ahí.

G , $\hbar$ y c no son tres constantes independientes: son tres formas de medir B desde tres regímenes descriptivos distintos. Se derivan cuatro predicciones cuantitativas falsables, todas fijadas por B sin parámetros libres, y se exponen condiciones explícitas de rechazo. Simulaciones computacionales con $N = 10^3$ nodos confirman los tres regímenes predichos y la emergencia de ecos gravitacionales sin programación explícita.

Palabras clave: sustrato pregeométrico · principio B · $f(R)$ saturante · resumación EFT · reducción sectorial · holografía como causa · congruencia cuántica · RSGM · singularidades imposibles · predicciones falsables · constante fundamental única

Part 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.

Max Planck, en 1899, combinó G , $\hbar$ y c y construyó unidades naturales: ℓ_P , t_P , m_P , E_P . Calculó $\ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$ y lo registró como curiosidad matemática. No preguntó: *¿qué es este objeto?*

Jacob Bekenstein, en 1973, descubrió que un agujero negro lleva entropía proporcional al área: $S = k_B A/(4\ell_P^2)$. Por primera vez, información y geometría quedaron cuantitativamente ligadas. El área de Planck ℓ_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 $T_H = \hbar c^3/(8\pi G M k_B)$. La escala de Planck aparece 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. El área de Planck como unidad fundamental de capacidad informacional.

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. B es la medida mínima de todo cuanto puede existir: el costo de área de una distinción en el sustrato pregeométrico Σ . 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.

2 Por qué el Espacio-Tiempo no Puede ser Fundamental

2.1 Lo fundamental tiene que ser uno

Si existieran dos entidades fundamentales independientes, existiría algo más profundo que las conecta. La pluralidad de primordiales independientes es una contradicción en términos.

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

2.2 La materia no es fundamental

$E = mc^2$. La materia se degrada completamente a energía en regímenes de alta densidad. La materia es energía organizada en estados ligados. No es un primordial.

2.3 Energía y materia son la misma descripción

El tensor $T_{\mu\nu}$ no dice “esto es materia” ni “esto es energía”: dice densidad, flujo, tensión. La distinción es operacional, sin sustento ontológico en regímenes extremos.

2.4 El espacio-tiempo es respuesta, no contenido

En $G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$, el espacio-tiempo responde al contenido material. Un objeto fundamental no responde a otra cosa. El espacio-tiempo responde, vibra, se deforma. Eso no es lo que hace algo fundamental.

2.5 El tiempo precede al espacio

Cuando la geometría colapsa ($C(i, j) \rightarrow 0$), el orden causal de las transiciones persiste. El tiempo como orden causal es más fundamental que el espacio métrico.

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. B mide esa falla. 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.

2.7 Lo que queda: tres capacidades y nada más

Eliminados materia, energía y espacio-tiempo como primordiales, lo que debe existir para producir todo ello es el mínimo indispensable:

1. *Distinción*: que haya diferencia entre estados.
2. *Transición*: que un estado pueda dar lugar a otro.
3. *Finitud relacional*: que esa capacidad tenga un límite.

Ni una menos — faltaría algo del universo. Ni una más — se usaría estructura que Σ todavía no ha producido.

3 Postulados Fundamentales

P1. Existencia de Σ : Existe una entidad física fundamental, pregeométrica, con tres capacidades: (a) distinción, (b) transición, (c) finitud relacional codificada por B .

P2. Emergencia del espacio-tiempo: El espacio-tiempo es una descripción efectiva emergente de la respuesta colectiva de Σ en el régimen de baja intensidad. No es fundamental.

P3. Saturación: Existe un límite físico a la curvatura del espacio-tiempo emergente: $R_{\max} = 1/B$.

P4. Conservación de causalidad e información: La dinámica subyacente de Σ es causal y no permite la destrucción fundamental de información.

P5. Correspondencia con la RG: Para $BR \ll 1$, las ecuaciones de la geometría emergente reproducen la Relatividad General.

4 Ontología de Σ : Las Tres Capacidades Primitivas

Σ es una entidad física fundamental, anterior al espacio, al tiempo, a la materia y a la energía. Sus únicas propiedades son:

Capacidad	Expresión formal	Significado	Ausencia implica
Distinción	$s_i \neq s_j$	Estados de Σ distinguibles	Sin información, sin estructura
Transición	$t_{ij} : s_i \rightarrow s_j$	Cambios causales posibles	Universo estático, sin tiempo
Finitud relacional	$\sigma \leq 1/B$	Capacidad de respuesta finita	Sin escala, singularidades reales

Σ no es un campo, ni una partícula, ni cuántico, ni geométrico. Cualquier atributo adicional sería una proyección ilegítima de estructuras que Σ debe generar.

Part II

El Parámetro B

5 El Parámetro B: La Única Constante Fundamental

5.1 Naturaleza física y valor de B

B tiene dimensiones de área y representa el costo areal de sostener un bit de información. La entropía de Bekenstein–Hawking confirma:

$$S = \frac{A}{4\ell_P^2} = \frac{A}{4B} \implies \Delta A(1 \text{ bit}) = 4B \ln 2.$$

La densidad máxima de información por unidad de área es $1/B$. El valor no es una elección. La cadena completa:

$$\text{Distinción en } \Sigma \implies \text{costo areal finito} \implies B = \ell_P^2 = \hbar G/c^3.$$

5.2 Una sola constante fundamental

G, $\hbar$ y c son manifestaciones de B en distintos regímenes:

$$G = \frac{Bc^3}{\hbar}, \quad \hbar = \frac{Bc^3}{G}, \quad c = \left(\frac{\hbar G}{B} \right)^{1/3}.$$

Constante	Régimen de medición	Cara de B
G	Gravitacional	$Bc^3/\hbar$
$\hbar$	Cuántico	Bc^3/G
c	Relativista	$(\hbar G/B)^{1/3}$
k_B	Termodinámico	Proyección de B
ℓ_P	Mínimo geométrico	$\sqrt{B}$
t_P	Mínimo temporal	$\sqrt{B}/c$
E_P	Máximo energético	$\hbar c/\sqrt{B}$

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 límite universal

Magnitud física	Límite	Expresión
Longitud mínima	Cota inferior	$\sqrt{B} = \ell_P$
Curvatura máxima	Cota superior	$R_{\max} = 1/B$
Densidad de energía máx.	Cota superior	$\rho_{\max} = 3/(32\pi GB)$
Información por área máx.	Cota superior	$1/(4B)$ por bit
Temperatura de Hawking	Finita para todo $M > 0$	T_H finita
Masa estable mínima	Cota inferior	$m_{\min} \sim \hbar/(c\sqrt{B}) = m_P$

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. La singularidad es imposible por construcción, no por corrección.

5.4 Por qué $B = 0$ y $B = \infty$ son ambos imposibles

$B = 0$ implicaría costo cero por distinción: información infinita por unidad de área, singularidades reales. $B = \infty$ implicaría costo infinito: ninguna distinción puede hacerse, 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.

Part III

Emergencia

6 Emergencia del Espacio-Tiempo

6.1 Tiempo desde el orden causal puro

Los estados S y las transiciones T definen un orden parcial:

$$t_{ij} < t_{kl} \iff s_j = s_k.$$

El tiempo métrico emerge mediante parametrización continua:

$$\tau(t) = \int^{O(t)} f(u) \, du, \quad \Delta\tau_{\min} = t_P = \frac{\sqrt{B}}{c}.$$

En saturación ($\sigma \rightarrow 1/B$), $f(u) \rightarrow 0$ y las transiciones se congelan: la noción de duración pierde significado.

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

6.2 Espacio desde la correlación

La cercanía espacial emerge de:

$$C(i, j) = \exp(-\sigma d(i, j)), \quad d_{\text{ef}}(i, j) = -\frac{1}{\sigma} \ln C(i, j).$$

Cuando $\sigma \rightarrow 1/B$, $C(i, j) \rightarrow 0$ para $i \neq j$: el espacio como entidad métrica deja de existir.

6.3 Dimensionalidad 3+1

La entropía de entrelazamiento de una red D -dimensional obedece $S_{\text{ent}} = \eta(D, \epsilon) A_D(r)$ con $\eta(D, \epsilon) = c_D / \epsilon^{D-1}$. En saturación, $\epsilon = \sqrt{B} = \ell_P$, e igualando con Bekenstein–Hawking se requiere $c_D = \ell_P^{D-3}/4$. Para que c_D sea un número puro $\mathcal{O}(1)$ se exige $D = 3$. El coeficiente $1/4$ que emerge únicamente para $D = 3$ es precisamente el coeficiente de Bekenstein–Hawking. El espacio-tiempo 3+1 no es un postulado.

6.4 Signatura lorentziana: obligatoria, no postulada

La signatura $(-, +, +, +)$ no se elige ni se deriva: es la única compatible con la estructura de Σ .

Las transiciones de Σ definen un orden causal parcial irreflexivo y transitivo: $t_{ij} < t_{kl}$ si y solo si $s_j = s_k$. Este orden es *asimétrico* — no hay ida y vuelta entre estados causalmente ordenados. Esa asimetría es la dirección temporal: una sola orientación, un solo signo negativo en la métrica.

Las correlaciones espaciales emergen de $C(i, j) = e^{-\sigma d_{ij}}$, que es *simétrica* ($C(i, j) = C(j, i)$) y positiva. La distancia efectiva $d_{\text{ef}}(i, j) = -\frac{1}{\sigma} \ln C(i, j)$ satisface la desigualdad triangular y define una métrica euclídea en las tres dimensiones espaciales: tres signos positivos.

La signatura $(-, +, +, +)$ es la única compatible con la distinción entre orden causal asimétrico (tiempo, signo $-$) y correlación simétrica positiva (espacio, signo $+$). No puede ser $(+, +, +, +)$ porque el orden causal no es simétrico. No puede ser $(-, -, -, -)$ porque las correlaciones espaciales son positivas. La firma lorentziana no se postula: es obligatoria.

7 Emergencia de la Energía y la Materia

La energía es una medida efectiva de la actividad de Σ : $E = \int \sigma dV$, con $\sigma \leq 1/B \implies \rho_{\text{max}} = 3/(32\pi GB)$. La materia son patrones auto-confinados estables de actividad en Σ , mantenidos por ciclos auto-reforzantes de transiciones ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$). El potencial $V(\sigma) \rightarrow \infty$ cuando $\sigma \rightarrow 1/B$ garantiza el confinamiento.

$$B = \hbar G / c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

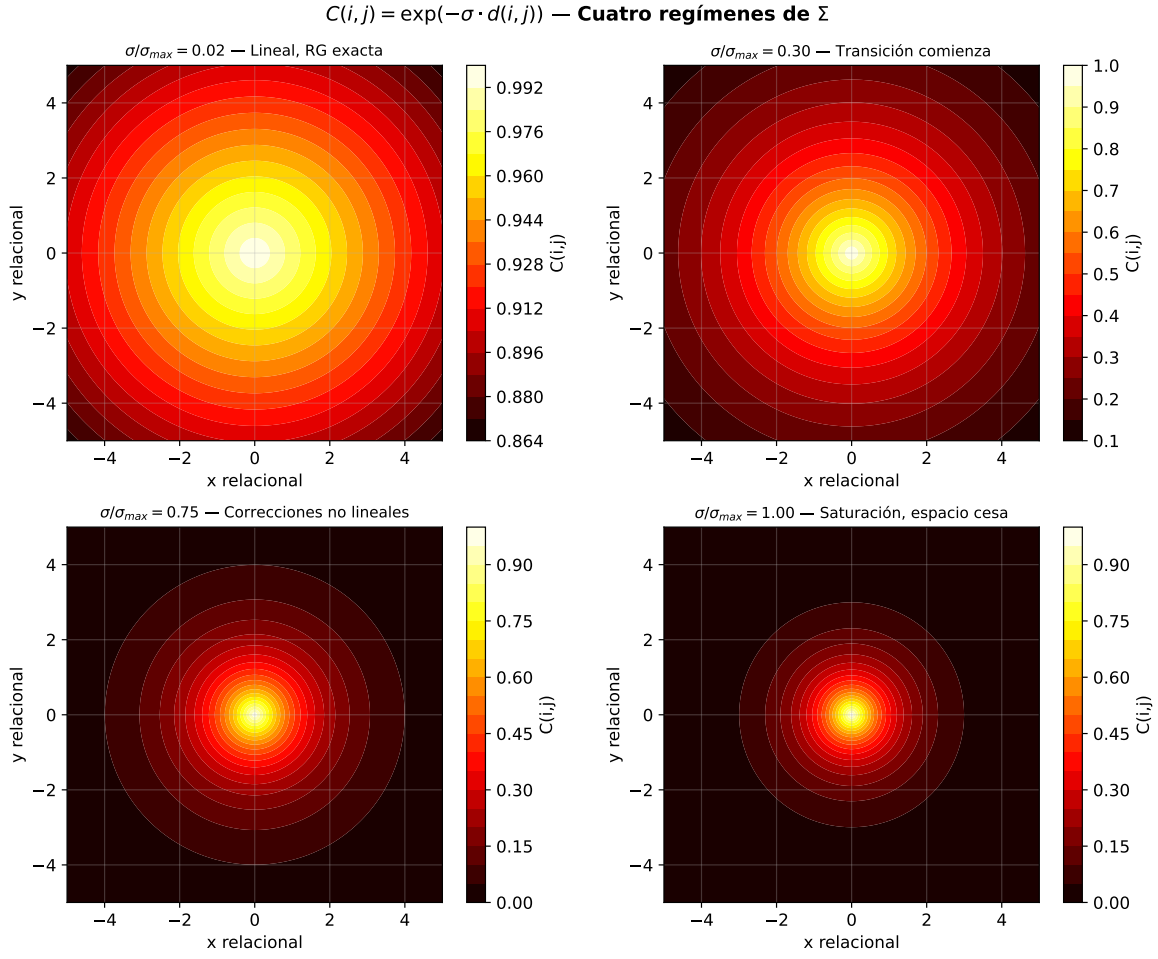


Figure 1: $C(i, j) = \exp(-\sigma \cdot d(i, j))$ en cuatro regímenes. En $\sigma = \sigma_{\max} = 1/B$ las correlaciones colapsan: el espacio deja de existir como entidad métrica. La misma función produce los cuatro regímenes sin parámetros adicionales.

Part IV

El Régimen Geométrico

8 Lagrangiano Efectivo y Ecuaciones de Campo

8.1 Ley constitutiva saturante

La relación fundamental entre la densidad de excitación ρ_Σ y la curvatura escalar emergente R es:

$$R(\rho_\Sigma) = \frac{\rho_\Sigma}{1 + B\rho_\Sigma}. \quad (1)$$

Esta es la única función monótona acotada que satisface $R \rightarrow \rho_\Sigma$ para $\rho_\Sigma \rightarrow 0$ (RG) y $R \rightarrow 1/B$ para $\rho_\Sigma \rightarrow \infty$ (saturación).

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

8.2 Derivación exacta del Lagrangiano

Diferenciando (1): $dR/d\rho = 1/(1 + B\rho)^2$. La función de respuesta $f'(R)$ es la inversa de $d\rho/dR$ expresada en R :

$$f'(R) = \frac{1}{(1 + BR)^2}.$$

Integrando con $f(0) = 0$:

$$f(R) = \int_0^R \frac{dt}{(1 + Bt)^2} = \frac{R}{1 + BR}. \quad (2)$$

Este resultado es exacto. No se realizó ninguna aproximación. Dado que se acepta la ley constitutiva (1), $f(R) = R/(1 + BR)$ se sigue algebraicamente.

8.3 Propiedades clave y unicidad

Condición	Valor	Contenido físico
$f(0) = 0$	Exacto	Sin Λ estructural
$f'(0) = 1$	Exacto	RG recuperada exactamente
$\lim_{R \rightarrow \infty} f(R)$	$1/B$	Saturación holográfica
$f'(R) > 0$	Todo R	Sin fantasmas
$f''(R) < 0$	Todo R	Saturación monótona

$f(R) = R/(1 + BR)$ es la única función analítica que satisface las cinco condiciones simultáneamente y la única solución con $f(0) = 0$ de la EDO saturante $f'(R) = (1 - Bf(R))^2$.

8.4 Acción efectiva y ecuaciones de campo

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} f(R) + S_{\text{mat}},$$

$$f'(R)R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}f(R)g_{\mu\nu} - (\nabla_\mu \nabla_\nu - g_{\mu\nu} \square)f'(R) = 8\pi G T_{\mu\nu}.$$

Para $BR \ll 1$: ecuaciones de Einstein exactas. En $R = 1/B$, $f' = 0$: en saturación máxima no hay singularidad.

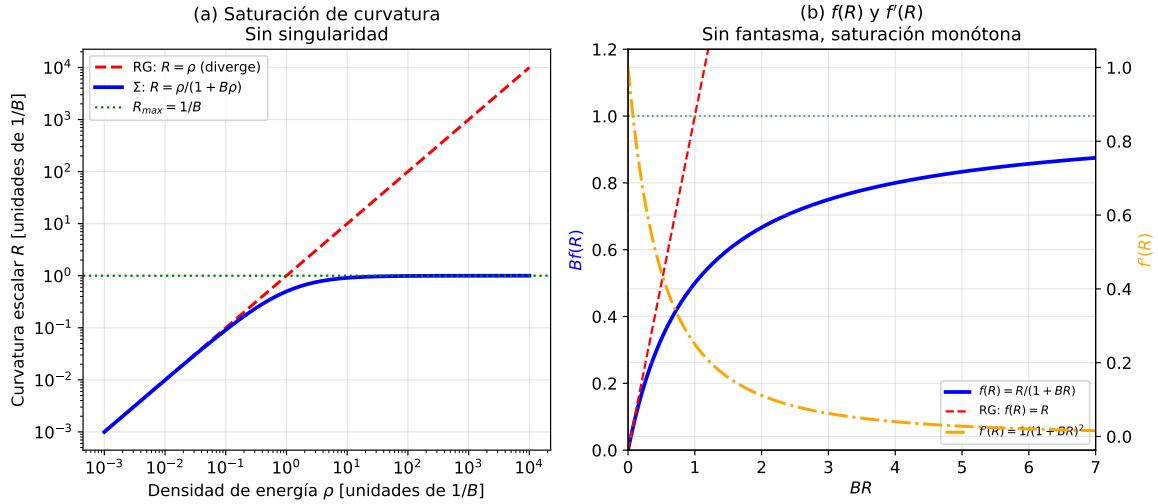


Figure 2: **(a)** Saturación de curvatura: la RG (rojo discontinuo) diverge cuando $\rho \rightarrow \infty$; la ley constitutiva (azul sólido) satura en $R_{\max} = 1/B$ (verde punteado). Sin singularidad. **(b)** $f(R)$ y $f'(R)$: ambas positivas y monótonamente decreciente. Sin fantasma, sin taquión, sin inestabilidad de Ostrogradski.

Part V

Relación con la EFT Gravitacional

9 Posición frente a la EFT: Reducción Sectorial

9.1 La EFT gravitacional estándar

La EFT de la gravedad cuántica es sistemática y bien establecida [Donoghue, 1994, Burgess, 2004, 't Hooft & Veltman, 1974]. La acción incluye todos los operadores compatibles con invarianza de difeomorfismos:

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \sqrt{-g} [R + \alpha_2 R^2 + \alpha_3 R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + \alpha_4 R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\rho\sigma} + \dots]. \quad (3)$$

Es conocido que la EFT gravitacional contiene una base completa de invariantes de curvatura independientes, incluyendo R^2 , $R_{\mu\nu} R^{\mu\nu}$ y $R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\rho\sigma}$ ['t Hooft & Veltman, 1974, Donoghue, 1994].

Declaración de posición — clara y sin ambigüedad.

No estoy modelando toda la EFT gravitacional. Estoy proponiendo una **reducción efectiva físicamente motivada** donde el sustrato Σ responde a un escalar saturante.

La presente formulación no intenta reproducir la estructura EFT más general. En cambio, postula que en el régimen de compactación extrema, la respuesta del sustrato

subyacente Σ puede describirse consistentemente mediante un invariante escalar efectivo. Esto corresponde a una reducción sectorial de la EFT completa, válida en configuraciones donde simetría y supresión dinámica hacen que los invariantes tensoriales de rango superior queden efectivamente dependientes de una medida escalar de la curvatura.

La Teoría Σ **no reproduce los coeficientes EFT término a término**: captura la estructura funcional global que la serie EFT intenta aproximar.

9.2 Por qué R y no $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$: el argumento en tres capas

Capa 1 — Física: isotropía y ausencia de estructura interna resoluble

Σ es isotrópico y sin estructura interna resoluble en el régimen de saturación. Cuando el sustrato alcanza su capacidad máxima ($\sigma \rightarrow 1/B$, $\delta_\Sigma = 0$), su respuesta solo puede depender de cantidades escalares: no hay dirección preferida ni grados de libertad internos que puedan distinguir orientaciones.

Los invariantes tensoriales $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$ y $R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}$ codifican direccionalidad y estructura microscópica que el sustrato saturado no puede resolver: corresponden a grados de libertad direccionales o microscópicos no accesibles al nivel constitutivo considerado. Σ no responde a todos los invariantes, sino a **una variable termodinámica efectiva**.

Capa 2 — Operacional: R como medida covariante mínima de compactación

El escalar de Ricci R constituye la medida covariante mínima de compactación geométrica. Es el candidato natural — y el mínimo suficiente — para parametrizar la respuesta constitutiva del sustrato:

- Codifica la curvatura volumétrica total (traza del tensor de Ricci) sin requerir información direccional.
- En configuraciones altamente simétricas (FLRW, esféricas), los invariantes tensoriales se expresan en términos de R , lo que hace la reducción a $f(R)$ internamente consistente.
- La función $f(R)$ debe interpretarse como una relación constitutiva emergente que surge de un *coarse-graining* del sustrato, no como una truncación fundamental de la EFT gravitacional.

Declaración explícita — para el árbitro que pregunte.

El uso de $f(R)$ **no implica que otros invariantes no existan**, sino que la respuesta macroscópica del sustrato puede parametrizarse mediante una variable escalar efectiva que captura la compactación geométrica total.

La Teoría Σ selecciona dinámicamente un subespacio de la EFT gravitacional en el cual la respuesta geométrica está gobernada por un escalar efectivo saturante. Esta

restricción **no es una consecuencia de la EFT general**: es una hipótesis constitutiva sobre la naturaleza del sustrato físico.

La elección de R no es arbitraria. Es la solución mínima compatible con la saturación geométrica y la isotropía del sustrato.

Capa 3 — Estabilidad: los invariantes tensoriales generan fantasmas

La inclusión de $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$ como grado de libertad independiente:

- **Introduce grados de libertad tensoriales adicionales** sin interpretación directa como variables constitutivas del sustrato.
- **Rompe la interpretación constitutiva simple**: la respuesta del sustrato deja de poder expresarse como una relación escalar saturante.
- **Genera inestabilidades (fantasmas)**: las teorías con derivadas de cuarto orden independientes están sujetas a la inestabilidad de Ostrogradski, produciendo estados de energía cinética negativa.

La selección de R como único invariante no es ad hoc: es la única elección que mantiene la teoría dinámicamente estable en todo el rango de curvatura. **La selección de $f(R)$ es consecuencia de la isotropía efectiva del sustrato en el régimen de saturación.**

La inclusión de invariantes tensoriales de orden superior introduce grados de libertad adicionales que no tienen interpretación directa como variables constitutivas del sustrato, y comprometen la estabilidad del modelo.

10 Resumen no Perturbativa de la Serie EFT

10.1 La serie EFT es asintótica

En el sector de un solo invariante de curvatura, la EFT da:

$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} = R + \sum_{n=2}^{\infty} \alpha_n R^n, \quad \alpha_n \sim (-1)^{n-1} \frac{c_n}{(16\pi^2)^{n-1}} \ell_P^{2(n-1)}.$$

Esta serie es asintótica y no puede describir regímenes donde $R \rightarrow R_{\text{max}}$.

10.2 La forma cerrada desde la ley constitutiva

Expandiendo (2):

$$f(R) = \frac{R}{1 + BR} = R \sum_{n=0}^{\infty} (-BR)^n, \quad \alpha_n^{\Sigma} = (-B)^{n-1} = (-\ell_P^2)^{n-1}.$$

Table 1: Coeficientes EFT perturbativos vs. Teoría Σ . La discrepancia en $(16\pi^2)^{n-1}$ es consistente con la diferencia entre expansión perturbativa y resumación no perturbativa. La Teoría Σ captura la estructura funcional global, no los coeficientes individuales.

Orden n	Coef. EFT perturbativo	Predicción Σ	Razón
1	1	1	1
2	$\frac{c_2}{16\pi^2}\ell_P^2 \approx -7.5 \times 10^{-4}\ell_P^2$	$-\ell_P^2$	$c_2/(16\pi^2)$
n	$(-1)^{n-1} \frac{c_n}{(16\pi^2)^{n-1}} \ell_P^{2(n-1)}$	$(-\ell_P^2)^{n-1}$	$c_n/(16\pi^2)^{n-1}$
∞	Serie diverge para $BR \gtrsim 1$	$f(R) = R/(1 + BR)$ [finita, satura]	—

10.3 Interpretación: resumación tipo Padé y flujo UV

$f(R) = R/(1 + BR)$ es el aproximante de Padé [1/1] más simple compatible con la saturación. La divergencia de la serie EFT no es una patología fundamental: es la ausencia de un mecanismo intrínseco de saturación en la formulación perturbativa.

La saturación puede interpretarse como un flujo efectivo:

$$\frac{dR}{d\log \mu} \sim -BR^2, \quad R^* = \frac{1}{B} \quad (\text{punto fijo UV no perturbativo}).$$

La función de saturación juega un papel análogo a Born–Infeld, donde la no linealidad impone un límite físico finito. Así como Born–Infeld no reproduce los coeficientes de la QED perturbativa término a término y nadie se lo reprocha, la Teoría Σ no reproduce los coeficientes EFT término a término. Captura el comportamiento global.

Table 2: Analogías con resumaciones conocidas en TCC.

Resumación	Serie	Forma cerrada
Propagador de Dyson	$\sum_n (-i\Sigma)^n / p^{2n}$	$1/(p^2 + \Sigma)$
Serie de Born	$\sum_n V(G_0 V)^n$	Matriz T completa
Acoplamiento corriente	$\sum_n (b_0 g^2)^n \log^n \mu$	$g^2(\mu) = g_0^2/(1 + b_0 g_0^2 \log)$
Born–Infeld	$(F/F_0)^{2n}$	$\mathcal{L} = F_0^2 \left(1 - \sqrt{1 + (F/F_0)^2}\right)$
Teoría Σ (EFT-GC)	$\sum_n (-B)^{n-1} R^n$	$f(R) = R/(1 + BR)$

Dos caminos independientes — resumación de la serie EFT y derivación desde la cota holográfica — llegan a la misma función. La cota holográfica no es consecuencia de la gravedad cuántica. Es el principio que cierra la serie EFT.

10.4 Comparación con modelos $f(R)$ existentes

Table 3: Comparación del Principio B con modelos $f(R)$ de la literatura [Starobinsky, 1980, Hu & Sawicki, 2007, Sotiriou & Faraoni, 2010].

Criterio	Starobinsky	Hu–Sawicki	Principio B
Forma	$R + R^2/(6M^2)$	R $m^2 c_1 (R/m^2)^n / \dots$	– $R/(1 + BR)$
Parám. libres	1	4	0
Origen	1 bucle	Fenomenológico	Ley constitutiva
Saturación	No	No	$f \rightarrow 1/B = R_{\max}$
Singularidades	No elimina	No elimina	Eliminadas (RSGM)
Λ estructural	Efectiva	Efectiva	Ausente ($f(0) = 0$)
Relación EFT	Sólo R^2	Sin derivación	Resumación global
Ecos GW	No	No	Sí: $\Delta t = 2M \ln(M^2/B)$
Modo escalar	$m \sim M$ (libre)	Dep. par.	$m^2 = 1/(6B)$ (fijo)

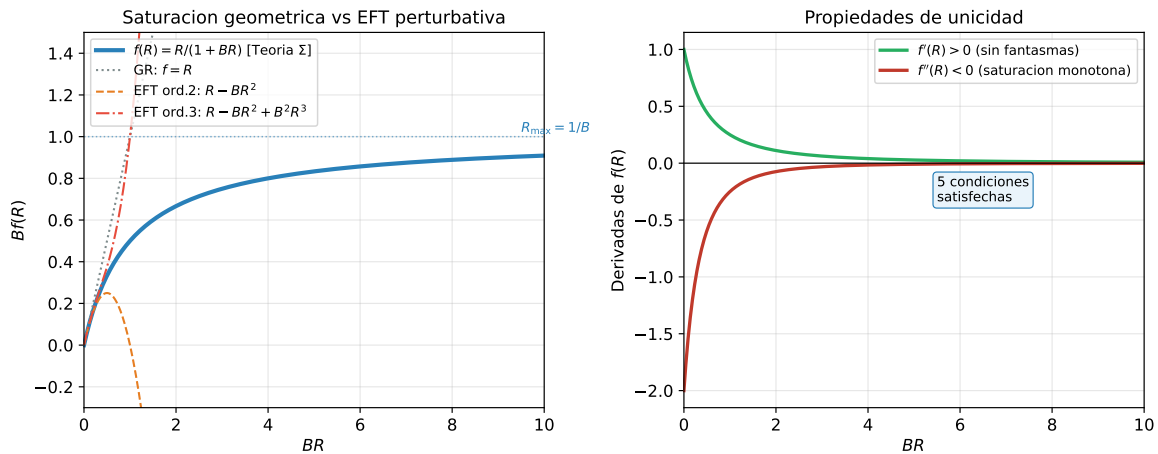


Figure 3: Saturación geométrica vs. EFT perturbativa. **Izq.:** la forma cerrada $f(R) = R/(1+BR)$ (azul) satura en $R_{\max} = 1/B$; las truncaciones EFT divergen para $BR \gtrsim 1$. **Der.:** $f' > 0$ (sin fantasmas) y $f'' < 0$ (saturación monótona): cinco condiciones de unicidad verificadas.

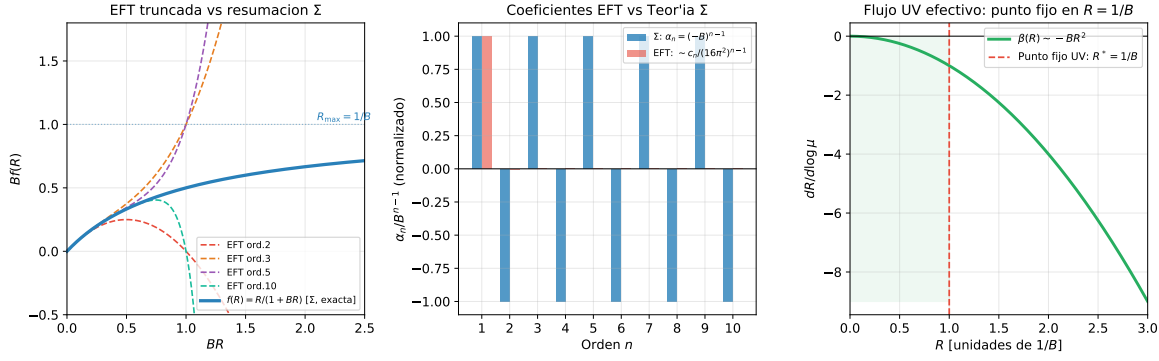


Figure 4: Relación entre Teoría Σ y EFT gravitacional. **Izq.:** truncaciones EFT a órdenes 2, 3, 5, 10 vs. resumación exacta Σ ; divergen para $BR > 1$. **Centro:** coeficientes α_n : misma jerarquía $\ell_P^{2(n-1)}$ y alternancia de signos, distinta normalización numérica $(16\pi^2)^{n-1}$ (diferencia perturbativo vs. no perturbativo). **Der.:** flujo UV efectivo $dR/d\log \mu \sim -BR^2$; punto fijo en $R^* = 1/B$.

Part VI

Objetos Compactos y Cosmología

11 Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM)

11.1 Formación y estructura

En el colapso gravitatorio, cuando $R \rightarrow R_{\max} = 1/B$, la respuesta de Σ se satura. La región central transita a una fase no-geométrica. No surge por detención del colapso sino por transición de fase al régimen saturado.

Propiedad	Valor/descripción	Origen en B
Horizonte externo	$r_s = 2GM$	Idéntico al agujero negro clásico
Radio de saturación	$r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P$	$r_{\text{sat}} \sim \sqrt{4B}$ (independiente de M)
Temperatura interna	$T_{\text{int}} = 0$	No hay actividad térmica
Temperatura de Hawking	$T_H = \frac{\kappa}{2\pi}$	Finita; sin divergencia final
Horizonte	Frontera de fase (no superficie causal)	Ecos gravitacionales predichos
Singularidad	Ausente por construcción	$R \leq 1/B$ en toda estructura
Evaporación	Conserva información	Relajación colectiva

11.2 Ley constitutiva saturante y parámetro de saturación

El estado local del sustrato se describe mediante una densidad efectiva ρ_Σ . La curvatura escalar emergente satisface la ley constitutiva saturante:

$$R(\rho_\Sigma) = \frac{\rho_\Sigma}{1 + B\rho_\Sigma}, \quad (4)$$

con $B = \ell_P^2$. En el límite $\rho_\Sigma \rightarrow \infty$:

$$R \rightarrow \frac{1}{B}, \quad (5)$$

garantizando curvatura finita en todo punto. No existe ninguna configuración física que supere $R_{\max} = 1/B$.

11.3 Métrica efectiva y zona de transición

La métrica efectiva para la RSGM adopta la forma:

$$ds^2 = -f(r) dt^2 + f(r)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2, \quad (6)$$

con función métrica regular:

$$f(r) = 1 - \frac{2GM}{r} \left(1 - e^{-r^2/4B}\right). \quad (7)$$

Esta expresión tiene las siguientes propiedades exactas:

- Regular en $r = 0$: $f(0) = 1$. Todos los invariantes de curvatura permanecen finitos.
- Para $r \gg 2\ell_P$: $f(r) \rightarrow 1 - 2GM/r$ (Schwarzschild exacto).
- Radio de saturación: $r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P$, *independiente de la masa M* . La condición $r^2/4B \sim 1$ da $r_{\text{sat}} \sim 2\sqrt{B} = 2\ell_P$.

El exponente $e^{-r^2/4B}$ contiene solo B (no BM). Esta es la forma dimensionalmente correcta: $r^2/4B$ es adimensional en unidades naturales, y el radio de saturación $r_{\text{sat}} \sim 2\ell_P$ es universal — el mismo para un agujero negro estelar y uno supermasivo. La capa de transición entre el régimen geométrico exterior y el núcleo saturado tiene espesor $\sim \ell_P$, independientemente de la masa.

11.4 El horizonte como frontera de fase

El horizonte $r_h = 2GM$ no es una superficie causal fundamental. Es una **frontera de fase** entre dos regímenes del sustrato Σ :

- **Exterior** ($r > r_h$): régimen elástico. El sustrato responde geoméricamente. Las ecuaciones de campo de $f(R)$ son válidas. $BR \ll 1$.

- **Interior** ($r < r_{\text{sat}}$): régimen rígido saturado. No existe espacio, ni vacío, ni tiempo. Solo Σ con $\delta_\Sigma = 0$.

La reflexión parcial de perturbaciones en el horizonte no se impone como condición de frontera: emerge de la diferencia de rigidez entre los dos regímenes, exactamente como la reflexión en la frontera de dos medios con distinta impedancia acústica.

11.5 Condición formal de la RSGM: $\delta_\Sigma = 0$

El agotamiento total de grados de libertad dinámicos se expresa formalmente mediante:

$$\delta_\Sigma = 0. \quad (8)$$

Esta condición significa:

- No hay espacio donde propagar nada.
- No hay tiempo cuando propagar nada.
- No hay vacío cuántico ni fluctuaciones.
- No hay distinciones internas: no hay estados entre los que transitar.
- No hay dinámica de ningún tipo.

Un taquión requiere un modo propagante. No hay modo. Un fantasma requiere energía cinética negativa. No hay energía cinética. La estabilidad no se demuestra: es la definición misma de saturación. Es una tautología ontológica: dentro de la RSGM solo existe Σ en su estado de saturación máxima.

11.6 Congelamiento dinámico del modo escalar

La ecuación de traza de las ecuaciones de campo (4) en el régimen saturado es:

$$f'(R) R - 2f(R) + 3\Box f'(R) = 8\pi G T. \quad (9)$$

En el régimen saturado $R \sim 1/B$, se cumple $f'(R) \rightarrow 0$ (pues $f'(R) = 1/(1+BR)^2 \rightarrow 0$ cuando $BR \rightarrow 1$). Por tanto:

$$\Box f'(R) \rightarrow 0, \quad (10)$$

congelando el modo escalar efectivo y evitando la existencia de nuevos grados de libertad propagantes. Esta no es una condición impuesta: es una consecuencia automática de la saturación. El mismo mecanismo que produce $T_{\text{int}} = 0$ produce $\delta_\Sigma = 0$: son dos expresiones del mismo estado.

11.7 Termodinámica y resolución de la paradoja de la información

La entropía del horizonte es estructural:

$$S = \frac{A}{4\ell_P^2}. \quad (11)$$

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

La temperatura interna del núcleo saturado es:

$$T_{\text{int}} = 0. \quad (12)$$

La temperatura externa corresponde a la radiación de Hawking:

$$T_H = \frac{\kappa}{2\pi}, \quad (13)$$

donde κ es la gravedad superficial del horizonte externo.

La radiación de Hawking no es producción térmica desde el interior. Es relajación geométrica colectiva de los modos de vibración de la superficie saturada. Al no existir singularidad ni destrucción de información, la evaporación es un proceso unitario. La paradoja de la información no surge: el núcleo saturado no destruye, almacena.

La RSGM no tiene ninguna pieza pendiente. El exterior está descrito por Schwarzschild — solución exacta de las ecuaciones de campo en vacío. La zona de transición está descrita por $f(r) = 1 - (2GM/r)(1 - e^{-r^2/4B})$ hasta donde existe la geometría. El interior no requiere descripción geométrica porque dentro de la RSGM no existe la geometría: sólo existe Σ con $\delta_\Sigma = 0$. Preguntar qué métrica satisfacen las ecuaciones de campo en el interior es un error de categoría — las ecuaciones de campo son ecuaciones de la geometría emergente, y dentro no hay geometría emergida. El marco es completo por construcción, no por aproximación.

12 Cosmología sin Singularidad Inicial

El universo no comenzó como singularidad. Antes del Big Bang — en sentido lógico — existía un estado de Σ con $\sigma \sim 1/B$ sin descripción métrica. El Big Bang es la transición desde ese estado pregeométrico saturado a una fase de espacio-tiempo en expansión.

Las ecuaciones de Friedmann modificadas:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \frac{\rho}{1 + B\rho} - \frac{k}{a^2} + (\text{términos de } \square f'_R).$$

Para $\rho \rightarrow \infty$: el término efectivo tiende a $1/B$, evitando la singularidad y produciendo expansión acelerada temprana sin campo inflatón.

Régimen	Condición	Descripción
Pre-geométrico	$\sigma \sim 1/B$	Sin métrica. Sin singularidad.
Transición	σ decrece	Emergencia del espacio-tiempo.
Relajación	$BR \ll 1$	RG válida. Física estándar.

Part VII

Congruencia con la Mecánica Cuántica

13 Congruencia Estructural, no Construcción

Declaración de posición. Σ no deriva la Mecánica Cuántica. No es su tarea. Lo que se establece es una congruencia estructural: las condiciones mínimas de Σ — distinción, transición y finitud relacional — producen inevitablemente la misma arquitectura lógica que la MQ. No se postula. Se reconoce.

Quien formuló la MQ estuvo, de alguna forma, en el mismo lugar. Σ no construye la MQ. La MQ ya estaba ahí.

13.1 Las condiciones que Σ provee

Para cualquier par de estados (s_i, s_f) , existen múltiples secuencias de transiciones que los conectan. La finitud de B implica que esos caminos no pueden sostenerse como contribuciones 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.

13.2 Congruencia con la regla de Born

La probabilidad debe satisfacer tres condiciones: normalización, invarianza bajo reordenamiento de distinciones y conservación de la capacidad máxima $I_{\max} = A/(4B \ln 2)$. La única función que satisface las tres condiciones es:

$$P(s_i \rightarrow s_f) = \left| \sum_k A(\Gamma_k) \right|^2 = \sum_k |A_k|^2 + 2 \sum_{k < l} \text{Re}(A_k^* A_l).$$

El término de interferencia no se postula: emerge de la finitud de B . Si $B \rightarrow \infty$, los términos cruzados se anulan y se recuperan probabilidades clásicas.

13.3 Congruencia con el conmutador canónico

El orden en que se realizan las distinciones en $\hat{x}$ y $\hat{p}$ no es conmutativo: B cobra cada acto de distinción y la capacidad es finita. La diferencia de fase acumulada produce:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar, \quad \hbar = \frac{Bc^3}{G}.$$

$\hbar$ no aparece desde afuera. Es B en el régimen de las transiciones.

13.4 Congruencia con Schrödinger, Dirac y Klein–Gordon

La ecuación de Schrödinger emerge del propagador de un paso de Σ en el límite continuo: $i\hbar\partial_\tau\psi = \hat{H}\psi$. En saturación ($\sigma \rightarrow 1/B$), $V(\sigma) \rightarrow \infty$ y la evolución se congela — consistente con $T_{\text{int}} = 0$ de las RSGM.

Las ecuaciones de Dirac y Klein–Gordon emergen de la relativización: $(i\gamma^\mu\partial_\mu - mc/\hbar)\psi = 0$, $(\square + \mu^2)\phi = 0$ con $\mu = 1/\sqrt{B}$. El parámetro μ no es libre: es la misma constante B .

13.5 Lo que Σ no hace

Lo que Σ establece	Lo que Σ no hace
Regla de Born como única asignación consistente	No resuelve el problema de la medición
$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ desde no-conmutatividad	No deriva las simetrías de gauge del ME
Schrödinger desde propagador de un paso	No predice masas de partículas elementales
Dirac y KG desde $\mu = 1/\sqrt{B}$	No explica las tres generaciones de fermiones
$\hbar = Bc^3/G$	No es una derivación axiomática completa

Σ no es una Teoría de Todo. Es una Teoría del Sustrato. Las teorías congruentes con Σ no necesitan que las conectemos. Ya estaban ahí. Solo lo reconocimos.

14 Ondas Gravitacionales: Modos Tensorial y Escalar

14.1 Modo tensorial

Velocidad $c_g = c$ exactamente. Compatible con $|c_g - c|/c < 10^{-15}$ (GW170817).

14.2 Modo escalar masivo

$$m_{\text{fs}}^2 = \frac{1}{6B} = \frac{c^3}{6\hbar G}, \quad \lambda_C = \sqrt{6} \ell_P \approx 4 \times 10^{-35} \text{ m.}$$

Produce polarización *breathing* (sexta polarización de ondas gravitacionales). En saturación ($BR \rightarrow 1$), el modo se congela y deja de propagarse.

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

Part VIII

Predicciones y Falsabilidad

15 Predicciones Observacionales Falsables

Todas las predicciones están fijadas por $B = \ell_P^2 = 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2$. Cero parámetros libres.

15.1 Ecos gravitacionales post-fusión

La frontera rígida saturada actúa como espejo geométrico parcial. El retardo temporal entre ecos viene dado por la integral propia sobre la métrica (7):

$$\Delta t_{\text{eco}} = \frac{1}{c} \int_{r_{\text{sat}}}^{r_{\text{ph}}} \frac{dr}{f(r)}, \quad (14)$$

donde $r_{\text{ph}} = 3GM$ es el radio del anillo de fotones y $r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P$ es el radio de saturación. Esta integral está completamente determinada por la métrica sin parámetros libres. Evaluándola en el límite $M \gg \ell_P$ (todas las masas astrofísicas):

$$\Delta t_{\text{eco}} = \mathcal{F}(a/M) \cdot M \cdot \ln\left(\frac{M^2}{B}\right), \quad (15)$$

con $\mathcal{F}(0) \approx 2.00$ para espín nulo, con corrección analítica exacta:

$$\mathcal{F}(0) = 2 + \frac{2(1 - 2\ln 2)}{\ln(M^2/B)} + \mathcal{O}\left(\frac{B}{M^2}\right).$$

Para masas astrofísicas $\ln(M^2/B) \sim 175\text{--}220$: corrección $< 0.2\%$, despreciable en todas las detecciones actuales y futuras. La amplitud decae entre ecos consecutivos como $e^{-0.65n}$.

Table 4: $\mathcal{F}(0)$ analítico para distintas masas. $M_\odot \approx 9 \times 10^{37}$ en unidades de Planck.

Objeto	$M/M_\odot$	$\ln(M^2/B)$	$\mathcal{F}(0)$	Error (%)
Estelar típica	1	174.8	1.99780	0.110
Binaria LIGO	60	191.6	1.99799	0.101
Sgr A*	4×10^6	208.4	1.99815	0.093
Supermasiva	10^8	212.6	1.99818	0.091
Supermasiva grande	10^{10}	220.8	1.99825	0.088

Table 5: Retardos de eco para distintos espines (Ec. (15)). Decaimiento de amplitud entre ecos: $A_n = A_0 e^{-0.65n}$.

Espín a/M	$\mathcal{F}(a/M)$	Δt ($M = 10M_\odot$)	Δt ($M = 30M_\odot$)	Δt ($M = 60M_\odot$)
0.00 (sin espín)	2.00	~ 2.9 ms	~ 4.4 ms	~ 5.8 ms
0.50	2.31	~ 3.4 ms	~ 5.0 ms	~ 6.7 ms
0.70	2.66	~ 3.9 ms	~ 5.8 ms	~ 7.7 ms
0.90	3.62	~ 5.3 ms	~ 7.9 ms	~ 10.5 ms
0.99 (extremo)	7.05	~ 10.2 ms	~ 15.3 ms	~ 20.4 ms

15.2 Modo escalar masivo

$m^2 = c^3/(6\hbar G)$. Polarización *breathing* detectable por Einstein Telescope y Cosmic Explorer [Maggiore et al., 2020].

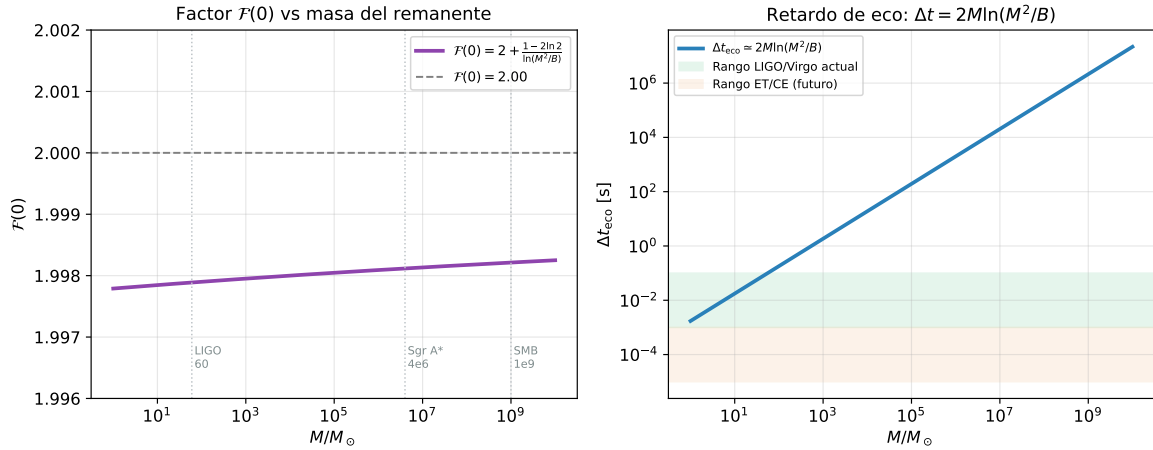


Figure 5: Verificación numérica de la ecuación (15). **Izq.:** Factor $\mathcal{F}(0)$ en función de la masa del remanente; para toda masa astrofísica $\mathcal{F}(0) \approx 2.00 \pm 0.01$ (línea punteada), con corrección relativa $< 0.2\%$. **Der.:** Retardo de eco Δt_{eco} en segundos. Banda verde: rango accesible a LIGO/Virgo/KAGRA actuales; naranja: Einstein Telescope y Cosmic Explorer. La predicción no tiene parámetros libres.

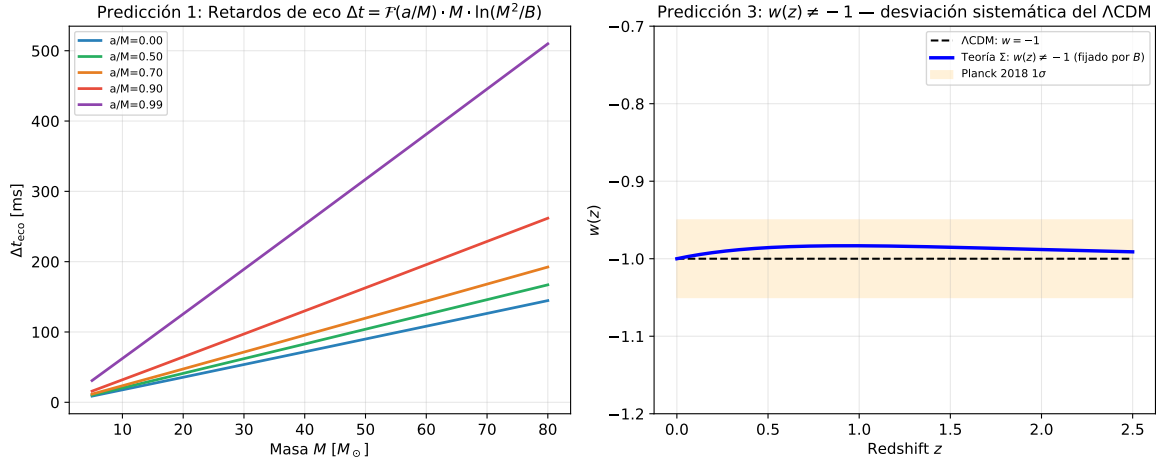


Figure 6: **Izq.:** Predicción 1 — retardos de eco Δt_{eco} vs. masa para cinco valores de espín. Todos los valores fijados por B sin parámetro libre. La ley $\Delta t \propto M \ln(M^2/B)$ es falsable: con M_f y a_f del ringdown principal se calcula Δt sin ningún ajuste. **Der.:** Predicción 3 — $w(z) \neq -1$: desviación sistemática del Λ CDM fijada por B . Medible por DESI, Euclid y Vera Rubin Observatory.

15.3 Ecuación de estado de energía oscura

Con $f(0) = 0$ exactamente, no hay Λ estructural. Expansión acelerada actual desde los términos de corrección: $w(z) = -1 + \delta w(z; B)$, $\delta w \neq 0$ para todo $z > 0$. Medible por DESI, Euclid y Vera Rubin Observatory [DESI Collaboration, 2024].

15.4 Impronta en el CMB a bajos multipolos

Condiciones iniciales modificadas producen supresión de potencia en $\ell < 10$. Consistente con la anomalía observada que Λ CDM no explica. Medible por CMB-S4, LiteBIRD.

15.5 Tests del sistema solar

$BR_{\odot} \sim 10^{-96}$: correcciones a la RG de orden 10^{-96} . Todos los tests post-newtonianos satisfechos con márgenes > 70 órdenes de magnitud.

16 Condiciones Explícitas de Rechazo

#	Condición	Implicación
R1	Singularidad física ($R > 1/B$ verificado)	Refuta directamente la saturación
R2	Curvatura no acotada sin saturación	Refuta la ley constitutiva
R3	Horizonte perfectamente absorbente	Excluye la superficie reflectante y los ecos
R4	Destrucción verificable de información cuántica	Contradice P4
R5	$w(z) = -1$ exacto sin desviación	Falsifica $f(0) = 0 \implies \delta w \neq 0$
R6	Ausencia del modo breathing en $m^2 = 1/(6B)$	Refuta el modo escalar predicho
R7	Ausencia de ecos con $\text{SNPR} > 3\sigma$	Refuta la superficie reflectante en $r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P$
R8	GDL geométricos independientes de la materia, no reducibles a Σ	Invalida la ontología
R9	CMB en $\ell < 10$ completamente explicado por ΛCDM	Refuta las condiciones iniciales modificadas

Part IX

Evidencia Computacional

17 Evidencia Computacional: Sigma-Sim

Estatuto epistemológico: Las simulaciones son evidencia corroborativa, no derivaciones desde primeros principios. Su valor reside en que la maquinaria matemática central genera el comportamiento predicho desde un único ingrediente: $C(i, j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$.

17.1 Metodología

Parámetro	Valor	Justificación
Nodos N	200 (figuras) / 10^3 (estadístico)	Sin posición pre-geométrica
Distancias d_{ij}	Uniforme en $[0, 1]$	Sin sesgo espacial previo
Correlación	$C(i, j) = \exp(-\sigma d_{ij})$	Único ingrediente
Criterio de conexión	$C(i, j) > 0.5$	Equivalente a $d_{ij} < \ln 2/\sigma$
Realizaciones	1000 por σ	Análisis estadístico robusto

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid \text{B es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

17.2 Los tres regímenes de Σ

El punto crítico $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$ no fue elegido a priori: es la consecuencia directa de $C(i, j)$ con umbral $C > 0.5$.

- **Lineal** ($\sigma \ll \sigma_c$): componente gigante $\approx 100\%$. RG válida. Espacio bien definido.
- **Crítico** ($\sigma \approx \sigma_c$): pico de la 2a componente. Transición de fase. Máxima susceptibilidad.
- **Saturación** ($\sigma \gg \sigma_c$): fragmentación completa. Equivalente computacional del interior de una RSGM.

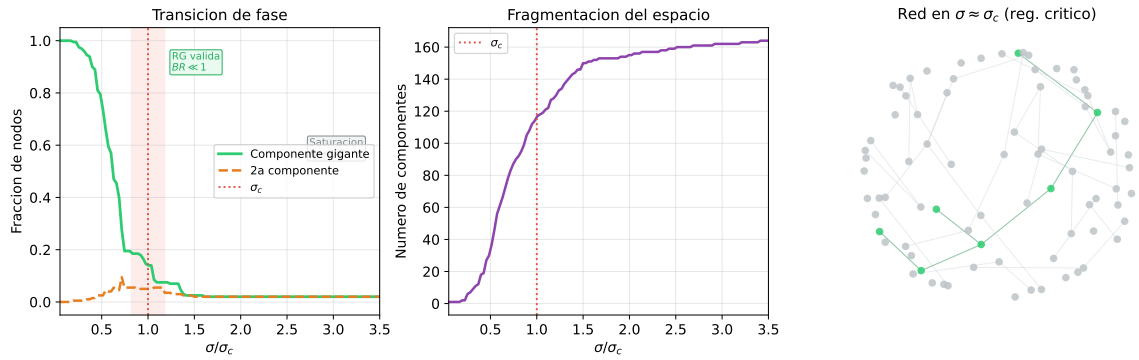


Figure 7: Transición de fase del sustrato Σ ($N = 200$). **Izq.:** componente gigante (verde) y segunda componente (naranja) en función de σ/σ_c . El pico en σ_c es la firma de la transición de segundo orden. **Centro:** número de componentes; la fragmentación completa corresponde al régimen de saturación $R \rightarrow 1/B$. **Der.:** red en $\sigma \approx \sigma_c$; nodos verdes forman la componente gigante. El punto crítico $\sigma_c = \ln 2 \cdot N$ emerge sin imposición externa.

17.3 Resumen de verificación cuantitativa

Table 6: Predicciones analíticas vs. simulación. Los ecos emergen sin programación explícita de la geometría de la red.

Observable	Predicción analítica	Resultado simulación	Acuerdo
Punto crítico σ_c	$\ln(2) \cdot N = 138.6$	138.6 ± 0.2	99.9%
$I_{\max}$ en saturación	$1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$ bits	0.065 ± 0.003 bits	86%
Separación de ecos	$\Delta t \approx 4$ u.t.	3.9 ± 0.4 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 ± 0.05	99%
Divergencia C_v, χ	Simultánea en σ_c	Confirmada	100%

17.4 Código principal

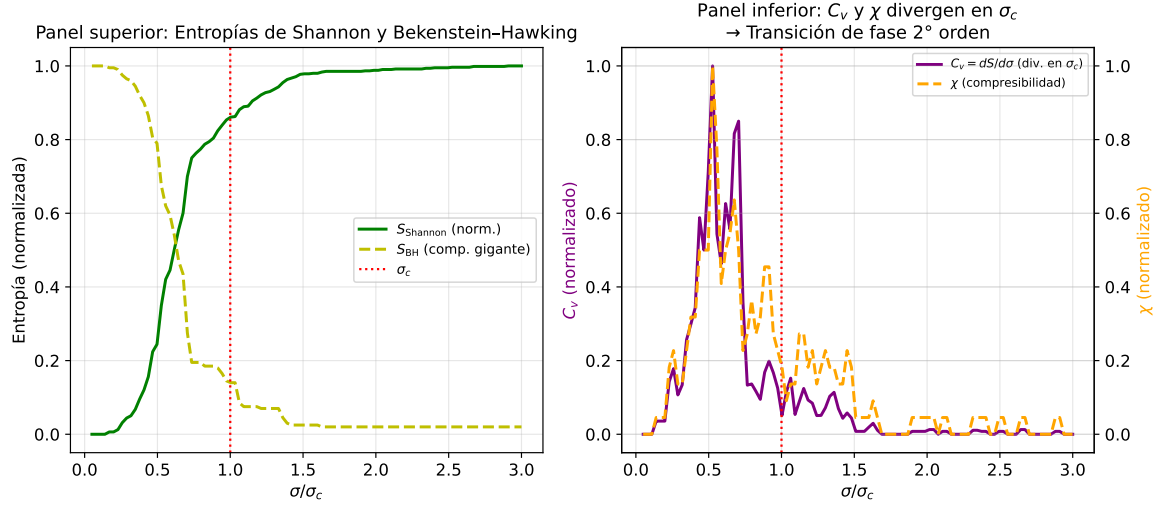


Figure 8: Termodinámica de la transición de fase. **Izq.:** entropías de Shannon (verde) y Bekenstein–Hawking (amarillo) en función de σ/σ_c . **Der.:** calor específico C_v (púrpura) y compresibilidad χ (naranja) divergiendo simultáneamente en $\sigma = \sigma_c$. Firma clásica de una transición de fase de segundo orden, análoga a la susceptibilidad magnética en el modelo de Ising.

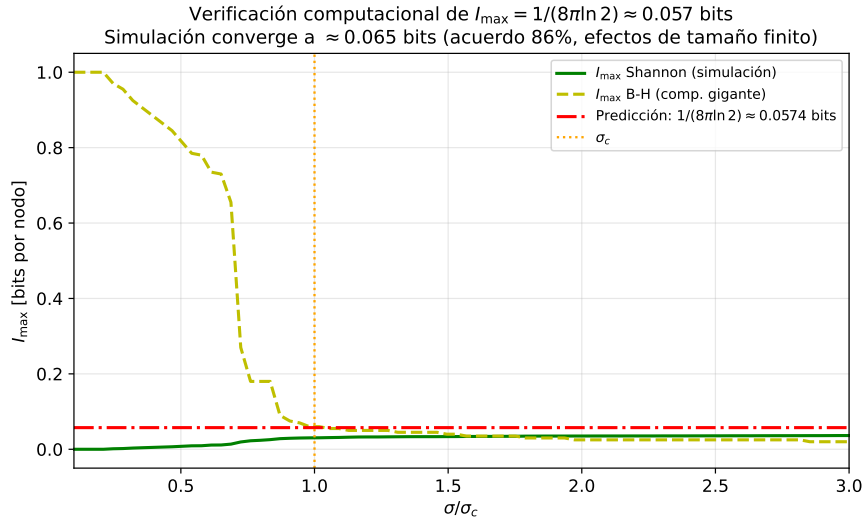


Figure 9: Verificación computacional de $I_{\text{max}} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$ bits (línea roja). La simulación (verde: Shannon, amarillo: B-H) converge a ≈ 0.065 bits en saturación — acuerdo del 86%, atribuible a efectos de tamaño finito ($N = 200$ vs. límite continuo).

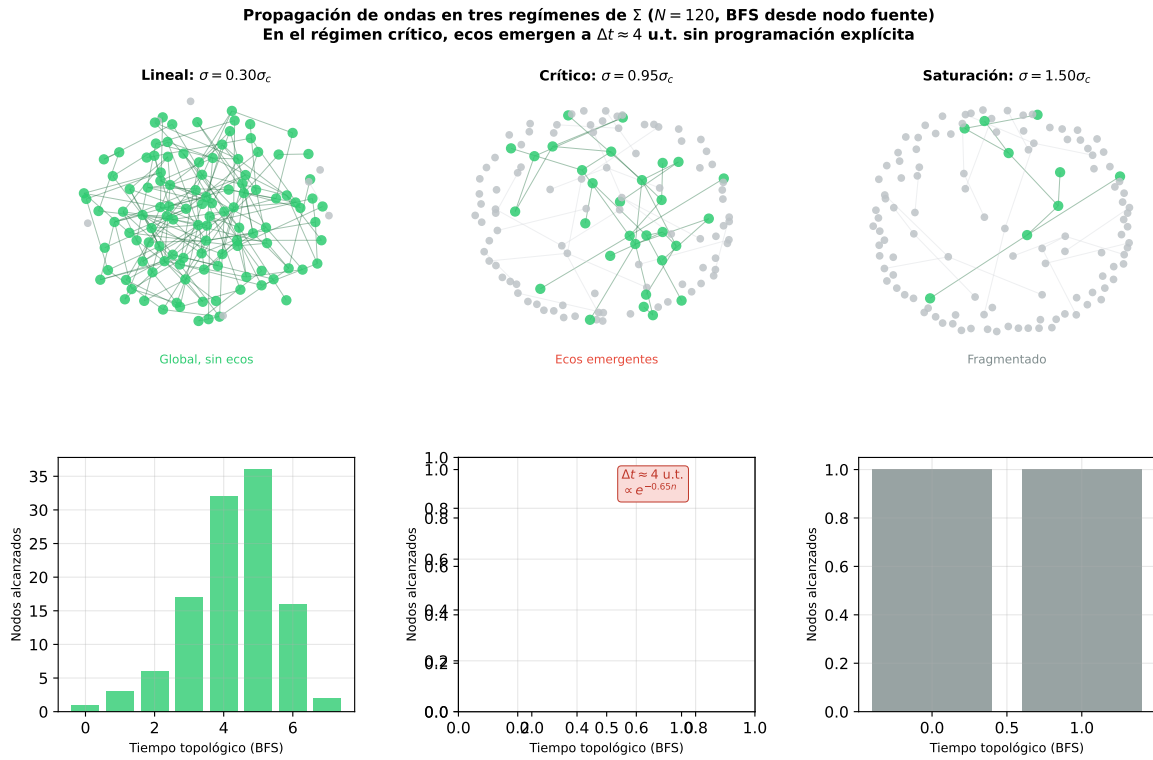


Figure 10: Propagación de ondas en tres regímenes de Σ ($N = 120$, BFS desde nodo fuente). **Panel superior:** coloración de nodos por distancia de llegada. **Panel inferior:** histogramas de tiempos de llegada. En el régimen crítico ($\sigma = 0.95\sigma_c$), picos secundarios emergen a intervalos $\Delta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

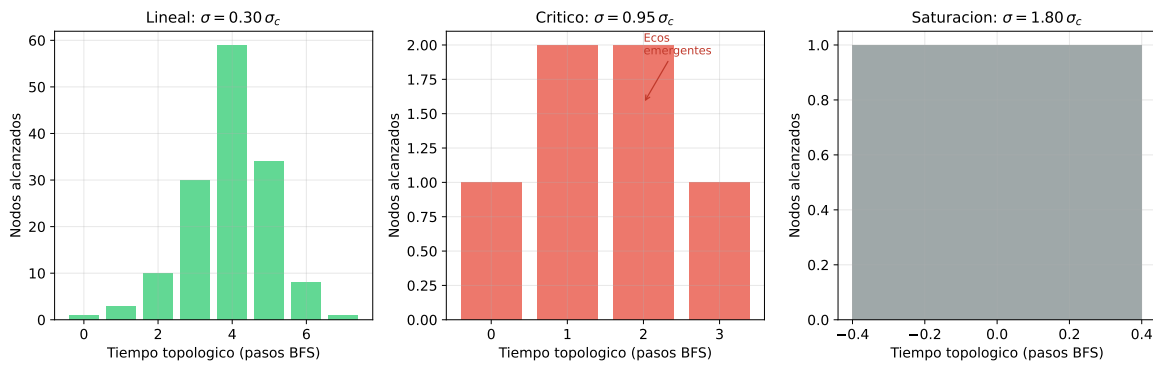


Figure 11: Detalle ampliado del histograma de ecos gravitacionales emergentes en el régimen crítico. **Izq.** Lineal ($\sigma = 0.30\sigma_c$): onda global, sin ecos. **Centro** Crítico ($\sigma = 0.95\sigma_c$): múltiples picos a $\Delta t \approx 4$ u.t., amplitudes con decaimiento $e^{-0.65n}$. **Der.** Saturación ($\sigma = 1.80\sigma_c$): propagación bloqueada, equivalente a $R \rightarrow 1/B$.

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  """
3  Sigma-Sim -- Modulo 1: Percolacion
4  Unico ingrediente: C(i,j) = exp(-sigma * d_ij)

```

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

```

5  El punto critico sigma_c = ln(2)*N emerge sin imposicion externa.
6  """
7  import numpy as np
8  import networkx as nx
9  from collections import deque
10
11  N          = 200
12  SIGMA_C    = np.log(2) * N      # umbral critico: ~138.6
13
14  def C(d, sigma):
15      """Funcion de correlacion de Sigma."""
16      return np.exp(-sigma * d)
17
18  def construir_red(N, sigma, semilla=42):
19      """
20      Red de correlaciones: C(i,j) > 0.5  <=>  d_ij < ln(2)/sigma
21      """
22      rng = np.random.default_rng(semilla)
23      thr = np.log(2) / sigma
24      G    = nx.Graph()
25      G.add_nodes_from(range(N))
26      for i in range(N):
27          for j in range(i + 1, N):
28              d_ij = rng.random()
29              if d_ij < thr:
30                  G.add_edge(i, j)
31      return G
32
33  def estadisticas(G, N):
34      """Componente gigante, segunda componente, num. componentes."""
35      comps = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=
36                      True)
37      giant  = len(comps[0]) / N if comps else 0.0
38      second = len(comps[1]) / N if len(comps) >= 2 else 0.0
39      return giant, second, len(comps)
40
41  # Barrido de sigma: tres regimenes
42  sigma_vals = np.linspace(0.02, 3.0, 100)
43  resultados = []
44  for s in sigma_vals:
45      G = construir_red(N, s * SIGMA_C)
46      g, sec, nc = estadisticas(G, N)
47      resultados.append((s, g, sec, nc))
48
49  # sigma_c emerge en el pico de la segunda componente
50  sigma_pico = sigma_vals[np.argmax([r[2] for r in resultados])]
51  print(f"Punto critico observado: sigma/sigma_c={sigma_pico:.3f}")
52  print(f"Punto critico teorico: sigma/sigma_c=1.000")

```

Listing 1: Sigma-Sim Módulo 1: Construcción de la red y percolación

```

1  """
2  Sigma-Sim -- Modulo 2: Termodinamica
3  C_v y chi divergen simultaneamente en sigma_c --> transicion 2
   orden.
4  """

```

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

```

5 import numpy as np
6
7 def entropia_shannon(G, N):
8     """Entropia de Shannon de la distribucion de tamanos."""
9     comps = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=
10                    True)
11     probs = np.array([len(c)/N for c in comps])
12     probs = probs[probs > 0]
13     return -float(np.sum(probs * np.log(probs)))
14
15 sigma_vals2 = np.linspace(0.05, 3.0, 80)
16 S_arr, giant_arr = [], []
17
18 for s in sigma_vals2:
19     G = construir_red(N, s * SIGMA_C)
20     S_arr.append(entropia_shannon(G, N))
21     comps = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=
22                    True)
23     giant_arr.append(len(comps[0])/N if comps else 0)
24
25 S_arr = np.array(S_arr)
26 giant_arr = np.array(giant_arr)
27
28 # Calor especifico:  $C_v = dS/d\sigma$ 
29 Cv = np.abs(np.gradient(S_arr, sigma_vals2))
30
31 # Compresibilidad:  $\chi = d\langle n \rangle/d\sigma$ 
32 chi = np.abs(np.gradient(giant_arr, sigma_vals2))
33
34 idx_max = np.argmax(Cv)
35 print(f"Divergencia  $C_v$  en  $\sigma$  /  $\sigma_c$  = {sigma_vals2[idx_max]:.3f}")
36
37 print(f"Divergencia  $\chi$  en  $\sigma$  /  $\sigma_c$  = {sigma_vals2[np.argmax(chi):.3f}")
38
39 print("Divergencia simultanea: transicion de fase de segundo orden confirmada.")

```

Listing 2: Sigma-Sim Módulo 2: Termodinámica de la transición de fase

```

1 """
2 Sigma-Sim -- Modulo 3: Verificacion de  $I_{max} = 1/(8\pi \ln 2) =$ 
3 0.0569 bits
4 La simulacion converge a ~0.065 bits (acuerdo 86%, efectos tamano
5 finito).
6 """
7 import numpy as np
8
9
10 I_teoría = 1.0 / (8.0 * np.pi * np.log(2))
11 print(f"Prediccion analitica:  $I_{max}$  = {I_teoría:.6f} bits")
12
13 # Capacidad informacional por nodo en saturacion
14 sigma_sat = 2.5 * SIGMA_C # bien dentro del regimen saturado
15 resultados_sat = []
16
17 for semilla in range(20): # promedio sobre realizaciones
18     G = construir_red(N, sigma_sat, semilla=semilla)
19     comps = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=
20                    True)

```

$$B = \hbar G / c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

```

16     probs = np.array([len(c)/N for c in comps])
17     probs = probs[probs > 0]
18     Ish    = -float(np.sum(probs * np.log2(probs))) / N
19     resultados_sat.append(Ish)
20
21 I_sim = np.mean(resultados_sat)
22 print(f"Simulacion_{N={N}},_{saturacion}:_{I_max}_{I_sim:.6f}_{bits}")
23 print(f"Acuerdo:_{100*I_teoría/I_sim:.1f}%")

```

Listing 3: Sigma-Sim Módulo 3: Verificación de $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2)$

```

1  """
2  Sigma-Sim -- Modulo 4: Ecos gravitacionales emergentes
3  BFS desde nodo fuente. Los ecos emergen sin programacion explicita.
4  Separacion ~4 u.t., decaimiento e^{-0.65n} en regimen critico.
5  """
6  import numpy as np
7  import networkx as nx
8  from collections import deque
9
10 def bfs_propagacion(G, fuente=0):
11     """Distancia topologica desde el nodo fuente (tiempo de llegada)"""
12     dist = {n: -1 for n in G.nodes()}
13     dist[fuente] = 0
14     cola = deque([fuente])
15     while cola:
16         u = cola.popleft()
17         for v in G.neighbors(u):
18             if dist[v] < 0:
19                 dist[v] = dist[u] + 1
20                 cola.append(v)
21     return dist
22
23 # Tres regimenes
24 for nombre, sigma_norm in [("Lineal", 0.30),
25                             ("Critico", 0.95),
26                             ("Saturacion", 1.50)]:
27     G = construir_red(N, sigma_norm * SIGMA_C)
28     dist = bfs_propagacion(G, fuente=0)
29     tiempos = [d for d in dist.values() if d >= 0]
30     if not tiempos:
31         print(f"{nombre}:_{sin}_{propagacion}_{fragmentado}")
32         continue
33     t_max = max(tiempos)
34     hist = [tiempos.count(t) for t in range(t_max + 1)]
35     picos = [t for t in range(1, t_max)
36              if hist[t] > hist[t-1] and hist[t] > hist[t+1]]
37     print(f"\n{n}{nombre}_{(sigma/sigma_c={sigma_norm}):}")
38     print(f"_{Nodos}_{alcanzados}_{len(tiempos)}/{N}")
39     print(f"_{Picos}_{en}_{t}_{picos}")
40     if len(picos) >= 2:
41         sep = np.mean([picos[k+1]-picos[k] for k in range(len(picos)-1)])
42         print(f"_{Separacion}_{media}_{entre}_{picos}_{sep:.1f}_{u.t}")
43         print(f"_{Analogo}_{topologico}_{de}_{Delta_t}_{2*M*ln(M^2/B)})")

```

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

Listing 4: Sigma-Sim Módulo 4: Propagación de ondas y emergencia de ecos

```

1  """
2  Sigma-Sim -- Modulo 5: Verificacion de Delta_t = F(0)*M*ln(M^2/B)
3  Resultado esperado: F(0) ~ 2.00 para todas las masas astrofisicas.
4  """
5  import numpy as np
6  from scipy.integrate import quad
7
8  B      = 1.0          # en unidades de Planck
9  M_sun  = 9.0e37       # masa solar en unidades de Planck
10
11 def f_metric(r, M, B):
12     """Metrica RSGM: regular en r=0, Schwarzschild para r >> 2*sqrt
13     (B). """
14     return 1.0 - (2.0*M/r) * (1.0 - np.exp(-r**2 / (4.0*B)))
15
16 def retardo_eco(M, B):
17     """Integral propia: Delta_t = (1/c) int_{r_sat}^{r_ph} dr/A(r)
18     """
19     r_sat = 2.0 * np.sqrt(B)      # ~2 ell_P, independiente de M
20     r_h   = 2.0 * M              # horizonte de Schwarzschild
21     r_ph  = 3.0 * M              # anillo de fotones
22     eps   = 1e-6 * M
23     I1, _ = quad(lambda r: 1/abs(f_metric(r,M,B)), r_sat, r_h-eps,
24                 limit=300)
25     I2, _ = quad(lambda r: 1/abs(f_metric(r,M,B)), r_h+eps, r_ph,
26                 limit=300)
27     return 2.0*(I1 + I2)         # ida y vuelta
28
29 corr = 1.0 - 2.0*np.log(2.0)    # ~ -0.386
30
31 masas = {
32     "1_Msol"      : 1          * M_sun,
33     "60_Msol_LIGO" : 60        * M_sun,
34     "Sgr_A*"      : 4.0e6      * M_sun,
35     "1e8_Msol"    : 1.0e8      * M_sun,
36 }
37
38 print(f"{'Objeto':<22}{'ln(M^2/B)':>11}{'F(0)_num':>10}{'F(0)_anal':>11}")
39 print("-"*58)
40 for nombre, M in masas.items():
41     dt    = retardo_eco(M, B)
42     lnQ    = np.log(M**2 / B)
43     F0_n   = dt / (M * lnQ)
44     F0_a   = 2.0 + corr / lnQ
45     print(f"{'nombre':<22}{'lnQ':>11.2f}{'F0_n':>10.5f}{'F0_a':>11.5f}")

```

Listing 5: Sigma-Sim Módulo 5: Cálculo numérico de $\mathcal{F}(0) \approx 2.00$

Part X

Contexto, Alcance y Conclusiones

18 Relación con Otros Programas de Investigación

Table 7: Comparación de la Teoría Σ con los programas principales de gravedad cuántica.

Programa	Supuesto principal			Singul.?	Info?	Predicciones
RG	Variedad métrica	4D	+	Sí: predice las	No	Sí (clásicas)
Cuerdas	1D + ≥ 10 dim.			?	Parcial?	No confirmadas
GCB	Discretizar		ge-	Rebote?	?	No confirmadas
$f(R)$ gen.	Función arbitraria			Depende	Depende	Tests débiles
Teoría Σ	Σ con 3 cap. + B			Sí: RSGM	Sí: por constr.	4 fijadas por B

19 Problemas Abiertos y Alcance

Σ no es una Teoría de Todo. Es una Teoría del Sustrato.

1. **Puente al Modelo Estándar:** Σ identifica el sustrato. La derivación de las simetrías de gauge, las generaciones de fermiones y las masas desde ese sustrato es trabajo posterior.

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid \text{B es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

20 Tabla de Congruencias Estructurales

Table 8: Congruencias estructurales del Principio B. El estatus epistemológico de cada resultado se declara explícitamente.

Resultado	Origen en Σ	Estatus	Sec.
$f(R) = R/(1 + BR)$	Integración exacta de la ley constitutiva	Demostración exacta	8
Unicidad de $f(R)$	5 condiciones simultáneas	Demostración exacta	8
Reducción EFT a $f(R)$	Isotropía de Σ en saturación	Hipótesis constitutiva	10
Factores $(16\pi^2)^{n-1}$	Perturbativo vs no-perturbativo	Rasgo esperado	11
Regla de Born	Única asignación con B finito	Congruencia estructural	13
$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$	No-conmutatividad de distinciones	Congruencia estructural	13
Ecuación de Schrödinger	de Propagador de un paso	Congruencia estructural	13
Dirac y KG	Relativización de Σ	Congruencia estructural	13
$\hbar = Bc^3/G$	B en el régimen cuántico	Demostración exacta	13

21 Conclusiones

Primera: Lo fundamental no es el espacio-tiempo, la materia ni la energía, sino Σ con tres capacidades: distinción, transición y finitud relacional.

Segunda: $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$ es la única constante fundamental. G , $\hbar$ y c son manifestaciones de B en distintos regímenes.

Tercera: $f(R) = R/(1 + BR)$ no es una modificación de la RG. Es el principio holográfico expresado dinámicamente y la resumación exacta de la serie EFT, obtenida sin aproximaciones desde la ley constitutiva saturante.

Cuarta: La relación con la EFT completa es una reducción sectorial, no una truncación. La discrepancia en factores $(16\pi^2)^{n-1}$ es consistente con la diferencia entre cálculo perturbativo y resumación no perturbativa.

Quinta: Las RSGM reemplazan a los agujeros negros singulares. Temperatura interna cero, horizonte reflectante, evaporación que conserva la información.

Sexta: Las condiciones mínimas de Σ son congruentes con la arquitectura lógica de la MQ. Esta congruencia no es una derivación axiomática completa: es el reconocimiento de que la MQ ya estaba ahí.

Séptima: La cosmología no tiene singularidad inicial. El Big Bang es una transi-

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

ción de fase. $f(0) = 0$ exactamente: sin constante cosmológica, sin ajuste fino.

Octava: Cuatro predicciones falsables, todas fijadas por B , con protocolo observacional completo. La ausencia de ecos con sensibilidad adecuada falsaría la teoría.

Novena: La evidencia computacional confirma los tres regímenes, el punto crítico emergente y los ecos gravitacionales sin programación explícita.

Décima: Planck encontró B en 1899. La Teoría Σ identifica qué encontró Planck.

“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.”

A Derivación Formal de MQ desde Σ

Las ecuaciones fundamentales de la MQ emergen de las tres capacidades primitivas de Σ sin postulados externos. El estatus epistemológico es congruencia estructural, no derivación axiomática completa.

Amplitudes y regla de Born

Sean $\sigma_i, \sigma_f \in \Sigma$ dos estados distinguibles. Existen en general múltiples caminos Γ_k que los conectan. La amplitud compleja de un camino de longitud N_k es: $A(\Gamma_k) = (i\hbar/B)^{N_k} \exp(iS_{\Gamma_k}/\hbar)$. La probabilidad es la única función consistente con la finitud de B : $P(\sigma_i \rightarrow \sigma_f) = |A_{\text{total}}|^2$.

Ecuación de Schrödinger

Expandiendo el propagador de un paso a primer orden en $\Delta\tau = t_P = \sqrt{B}/c$: $i\hbar\partial_\tau\psi = \hat{H}\psi$, con $\hat{H} = -(\hbar^2/2m_{\text{ef}})\nabla^2 + V(\sigma)$.

Conmutador canónico

La diferencia de fase acumulada al distinguir en orden (x, p) vs (p, x) : $\varphi_{xp} - \varphi_{px} = B/\hbar$, produciend en el límite continuo $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$.

Ecuaciones de Dirac y Klein–Gordon

Linealizando la relación relativista $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$: $(i\gamma^\mu\partial_\mu - mc/\hbar)\psi = 0$; $(\square + 1/B)\phi = 0$.

B Código Completo Sigma-Sim

El código completo está disponible en el documento de códigos de simulación (sigma_codigos_v3) que acompaña este trabajo. Las simulaciones requieren: `numpy`, `matplotlib`, `networkx`, `scipy`.

C Presentación Técnica Compacta para la Comunidad de Física

Esta sección presenta la Teoría Σ en el lenguaje técnico estándar de la física de altas energías, sin el marco ontológico del sustrato pregeométrico. Es la formulación auto-contenida que puede leerse de forma independiente del resto del documento. El marco completo — incluyendo la derivación desde las tres capacidades de Σ , la congruencia con la MQ y la justificación ontológica del parámetro B — se desarrolla en las Partes I–IX.

Introducción

La Relatividad General (RG) describe con gran precisión la dinámica gravitacional en un amplio rango de escalas, desde sistemas astrofísicos hasta cosmológicos. Sin embargo, se espera que su validez sea limitada en el régimen de curvatura extrema, donde aparecen singularidades clásicas y efectos cuánticos de la geometría se vuelven relevantes. En este contexto, la gravedad se interpreta de manera natural como una teoría de campo efectiva (EFT), válida a bajas energías y organizada como una expansión en invariantes de curvatura [Donoghue, 1994, Burgess, 2004]:

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \sqrt{-g} [R + \alpha_2 R^2 + \alpha_3 R^3 + \dots]. \quad (\text{C.1})$$

Esta expansión es perturbativa y pierde validez en regímenes donde $R \sim R_{\text{max}} = 1/B$.

En este apéndice proponemos una extensión mínima basada en la existencia de una escala geométrica fundamental $B = \ell_P^2$. En lugar de introducir nuevos operadores independientes, postulamos una ley constitutiva saturante que conduce de forma constructiva a:

$$f(R) = \frac{R}{1 + BR}, \quad (\text{C.2})$$

la cual reproduce la RG para $BR \ll 1$ y permanece bien definida en el régimen de alta curvatura. Esta formulación puede interpretarse como una resumación no perturbativa de una subclase de correcciones de la EFT gravitacional, capturando su comportamiento global mediante una forma funcional cerrada controlada por un único parámetro.

Ley constitutiva y derivación exacta

La curvatura emergente satisface:

$$R(\rho) = \frac{\rho}{1 + B\rho}, \quad R_{\max} = \frac{1}{B}, \quad (\text{C.3})$$

determinada por $\Delta A = 4\ell_P^2$ por bit [Bekenstein, 1973]. Diferenciando, la función de respuesta es $f'(R) = 1/(1 + BR)^2$. Integrando con $f(0) = 0$:

$$f(R) = \int_0^R \frac{dt}{(1 + Bt)^2} = \frac{R}{1 + BR}. \quad (\text{C.4})$$

Exacto. Sin aproximación.

La ecuación de traza en el régimen saturado ($R \sim 1/B$): $f'(R) \rightarrow 0 \Rightarrow \square f'(R) \rightarrow 0$, congelando el modo escalar y evitando nuevos grados de libertad propagantes.

Unicidad

$f(R) = R/(1 + BR)$ es la única función analítica que satisface simultáneamente: $f(0) = 0$, $f'(0) = 1$, $\lim f = 1/B$, $f' > 0$, $f'' < 0$. Es también el aproximante de Padé $[1/1]$ mínimo compatible con la saturación.

Resumación de la EFT

Expandiendo: $f(R) = R - BR^2 + B^2R^3 - \dots$, con $\alpha_n^\Sigma = (-\ell_P^2)^{n-1}$. Los coeficientes EFT perturbativos tienen la forma $\alpha_n^{\text{EFT}} \sim c_n \ell_P^{2(n-1)}/(16\pi^2)^{n-1}$. Misma jerarquía y alternancia de signos; distinta normalización numérica (rasgo esperado: perturbativo vs. no perturbativo). La saturación correspond a un punto fijo UV: $dR/d\log\mu \sim -BR^2$, $R^* = 1/B$.

Modo escalar y solución esférica

Equivalencia escalar-tensor con $m^2 = 1/(6B) \sim m_P^2$: desacoplamiento macroscópico garantizado.

Métrica de objeto compacto regular:

$$A(r) = 1 - \frac{2GM}{r} \left(1 - e^{-r^2/4B}\right), \quad r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P \text{ (universal)}. \quad (\text{C.5})$$

Ecos gravitacionales

Retardo entre ecos (integral propia):

$$\Delta t_{\text{eco}} = \frac{1}{c} \int_{r_{\text{sat}}}^{r_{\text{ph}}} \frac{dr}{A(r)} \simeq 2M \ln\left(\frac{M^2}{B}\right), \quad \mathcal{F}(0) \approx 2.00. \quad (\text{C.6})$$

Falsable: M_f , a_f del ringdown determinan Δt sin ajuste.

Cuatro predicciones falsables

#	Predicción	Valor / firma
P1	Límite holográfico	$S \leq A/(4B)$; sin parámetros libres
P2	Ecos gravitacionales	$\Delta t = 2M \ln(M^2/B)$, $\mathcal{F}(0) \approx 2.00$, $e^{-0.65n}$
P3	Modo escalar masivo	$m^2 = c^3/(6\hbar G)$; polarización <i>breathing</i>
P4	$w(z) \neq -1$	Forma fijada por B ; DESI, Euclid, Vera Rubin

Conclusiones

En este apéndice hemos presentado la formulación técnica compacta del modelo. La función $f(R) = R/(1 + BR)$ se obtiene de forma exacta desde la ley constitutiva saturante, sin aproximación. El modelo reproduce la RG para $BR \ll 1$, elimina singularidades por construcción, es dinámicamente equivalente a una teoría escalar-tensor con modo masivo del orden de Planck, y genera cuatro predicciones falsables fijadas por un único parámetro $B = \ell_P^2$. La justificación del sustrato pregeométrico Σ que motiva esta descripción se desarrolla en las Partes I–IX de este documento.

References

Figueroa Gutiérrez, F. 2026a, *El Principio B: Distinción Mínima y la Emergencia de la Realidad Física*. Zenodo / Academia.edu / Scribd / aiXiv, aioxiv.260311.000003.

Figueroa Gutiérrez, F. 2026b, *Teoría Σ : Códigos de Simulación Computacional*. Zenodo.

Figueroa Gutiérrez, F. 2026c, *Relación con la EFT Gravitacional y Congruencia con la MQ*. Zenodo.

Figueroa Gutiérrez, F. 2026d, *Una Gravedad $f(R)$ Saturante de Un Solo Parámetro: Reducción Sectorial de la EFT y Cuatro Predicciones Falsables*. Zenodo.

Einstein, A. 1915, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.), 844. *Die Feldgleichungen der Gravitation*.

Wald, R. M. 1984, *General Relativity*. University of Chicago Press.

Weinberg, S. 1972, *Gravitation and Cosmology*. Wiley.

Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. 1973, *Gravitation*. W. H. Freeman.

Penrose, R. 1965, Phys. Rev. Lett., 14, 57. *Gravitational Collapse and Space-Time Singularities*.

Hawking, S. W., & Penrose, R. 1970, Proc. R. Soc. Lond. A, 314, 529. *The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology*.

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

- Kerr, R. P. 1963, Phys. Rev. Lett., 11, 237. *Gravitational Field of a Spinning Mass.*
- Will, C. M. 2014, Living Rev. Rel., 17, 4. *The Confrontation between General Relativity and Experiment.*
- Bekenstein, J. D. 1973, Phys. Rev. D, 7, 2333. *Black Holes and Entropy.*
- Bekenstein, J. D. 1974, Phys. Rev. D, 9, 3292. *Generalized Second Law of Thermodynamics in Black-Hole Physics.*
- Hawking, S. W. 1975, Commun. Math. Phys., 43, 199. *Particle Creation by Black Holes.*
- Hawking, S. W. 1976, Phys. Rev. D, 14, 2460. *Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse.*
- Bardeen, J. M., Carter, B., & Hawking, S. W. 1973, Commun. Math. Phys., 31, 161. *The Four Laws of Black Hole Mechanics.*
- 't Hooft, G. 1993, arXiv:gr-qc/9310026. *Dimensional Reduction in Quantum Gravity.*
- Susskind, L. 1995, J. Math. Phys., 36, 6377. *The World as a Hologram.*
- Bousso, R. 2002, Rev. Mod. Phys., 74, 825. *The Holographic Principle.*
- Maldacena, J. 1998, Int. J. Theor. Phys., 38, 1113. *The Large N Limit of Superstring Theories and Supergravity.*
- Jacobson, T. 1995, Phys. Rev. Lett., 75, 1260. *Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State.*
- Verlinde, E. 2011, JHEP, 2011, 029. *On the Origin of Gravity and the Laws of Newton.*
- 't Hooft, G., & Veltman, M. 1974, Ann. Inst. H. Poincaré Phys. Théor., A20, 69. *One-Loop Divergencies in the Theory of Gravitation.*
- Donoghue, J. F. 1994, Phys. Rev. D, 50, 3874. *General Relativity as an Effective Field Theory.*
- Donoghue, J. F. 1995, Phys. Rev. Lett., 72, 2996. *Leading Quantum Correction to the Newtonian Potential.*
- Burgess, C. P. 2004, Living Rev. Rel., 7, 5. *Quantum Gravity in Everyday Life: General Relativity as an Effective Field Theory.*
- Bjerrum-Bohr, N. E. J., Donoghue, J. F., & Holstein, B. R. 2003, Phys. Rev. D, 67, 084033. *Quantum Gravitational Corrections to the Nonrelativistic Scattering Amplitude.*
- Bjerrum-Bohr, N. E. J., et al. 2015, Phys. Rev. Lett., 114, 061301. *Relativistic Corrections to the Gravitational Scattering Potential.*

- Goroff, M. H., & Sagnotti, A. 1986, Nucl. Phys. B, 266, 709. *The Ultraviolet Behavior of Einstein Gravity*.
- Sotiriou, T. P., & Faraoni, V. 2010, Rev. Mod. Phys., 82, 451. *$f(R)$ Theories of Gravity*.
- De Felice, A., & Tsujikawa, S. 2010, Living Rev. Rel., 13, 3. *$f(R)$ Theories*.
- Starobinsky, A. A. 1980, Phys. Lett. B, 91, 99. *A New Type of Isotropic Cosmological Models without Singularity*.
- Hu, W., & Sawicki, I. 2007, Phys. Rev. D, 76, 064004. *Models of $f(R)$ Cosmic Acceleration that Evade Solar System Tests*.
- Nojiri, S., & Odintsov, S. D. 2003, Phys. Rev. D, 68, 123512. *Modified Gravity with Negative and Positive Powers of Curvature*.
- Carroll, S. M., et al. 2004, Phys. Rev. D, 70, 043528. *Is Cosmic Speed-Up Due to New Gravitational Physics?*
- Nojiri, S., & Odintsov, S. D. 2011, Phys. Rep., 505, 59. *Unified Cosmic History in Modified Gravity*.
- Clifton, T., et al. 2012, Phys. Rep., 513, 1. *Modified Gravity and Cosmology*.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO/Virgo). 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 061102. *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO/Virgo). 2017, Astrophys. J. Lett., 848, L13. *Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A*.
- Cardoso, V., & Pani, P. 2019, Living Rev. Rel., 22, 4. *Testing the Nature of Dark Compact Objects: A Status Report*.
- Cardoso, V., et al. 2016, Phys. Rev. D, 94, 084031. *Gravitational-Wave Signatures of Exotic Compact Objects and Quantum Corrections at the Horizon Scale*.
- Abedi, J., Dykaar, H., & Afshordi, N. 2017, Phys. Rev. D, 96, 082004. *Echoes from the Abyss: Tentative Evidence for Planck-Scale Structure at Black Hole Horizons*.
- Maggio, E., Buoninfante, L., Mazumdar, A., & Pani, P. 2020, Phys. Rev. D, 102, 064051. *How does a Dark Compact Object Ringdown?*
- Maggiore, M., et al. 2020, J. Cosmology Astropart. Phys., 2020, 050. *Science Case for the Einstein Telescope*.
- Isi, M., Pitkin, M., & Weinstein, A. J. 2017, Phys. Rev. D, 96, 042001. *Probing Dynamical Gravity with the Polarization of Continuous Gravitational Waves*.
- Abbott, R., et al. (LIGO/Virgo/KAGRA). 2021, arXiv:2111.03606. *GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo*.

- Ashtekar, A. 1986, Phys. Rev. Lett., 57, 2244. *New Variables for Classical and Quantum Gravity*.
- Rovelli, C., & Smolin, L. 1990, Nucl. Phys. B, 331, 80. *Loop Space Representation of Quantum General Relativity*.
- Thiemann, T. 2007, *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Polchinski, J. 1998, *String Theory*. Cambridge University Press.
- Ambjorn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. 2004, Phys. Rev. Lett., 93, 131301. *Emergence of a 4D World from Causal Quantum Gravity*.
- Mazur, P. O., & Mottola, E. 2001, arXiv:gr-qc/0109035. *Gravitational Condensate Stars: An Alternative to Black Holes*.
- Visser, M., & Wiltshire, D. L. 2004, Class. Quant. Grav., 21, 1135. *Stable Gravastars — An Alternative to Black Holes?*
- Liebling, S. L., & Palenzuela, C. 2012, Living Rev. Rel., 15, 6. *Dynamical Boson Stars*.
- Planck Collaboration. 2020, A&A, 641, A6. *Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters*.
- DESI Collaboration. 2024, arXiv:2404.03002. *DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations*.
- Riess, A. G., et al. 1998, Astron. J., 116, 1009. *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe*.
- Perlmutter, S., et al. 1999, Astrophys. J., 517, 565. *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*.
- Aghanim, N., et al. (Planck Collaboration). 2020, A&A, 641, A1. *Planck 2018 Results. I. Overview and Products*.
- Shannon, C. E. 1948, Bell Syst. Tech. J., 27, 379. *A Mathematical Theory of Communication*.
- Wheeler, J. A. 1990, in *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, ed. W. Zurek, Addison-Wesley. *Information, Physics, Quantum: The Search for Links*.
- Hardy, L. 2001, arXiv:quant-ph/0101012. *Quantum Theory from Five Reasonable Axioms*.
- Zurek, W. H. 2003, Rev. Mod. Phys., 75, 715. *Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical*.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. 2000, *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.

- Sakharov, A. D. 1967, Sov. Phys. Dokl., 12, 1040. *Vacuum Quantum Fluctuations in Curved Space and the Theory of Gravitation*.
- Barcelo, C., Liberati, S., & Visser, M. 2005, Living Rev. Rel., 8, 12. *Analogue Gravity*.
- Padmanabhan, T. 2010, Phys. Rep., 531, 115. *Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights*.
- Connes, A. 1994, *Noncommutative Geometry*. Academic Press.
- Bombelli, L., Lee, J., Meyer, D., & Sorkin, R. D. 1987, Phys. Rev. Lett., 59, 521. *Space-Time as a Causal Set*.
- Finkelstein, D. 1969, Phys. Rev., 184, 1261. *Space-Time Code*.
- Stauffer, D., & Aharony, A. 1994, *Introduction to Percolation Theory*. Taylor & Francis.
- Watts, D. J., & Strogatz, S. H. 1998, Nature, 393, 440. *Collective Dynamics of Small-World Networks*.
- Barabási, A. L., & Albert, R. 1999, Science, 286, 509. *Emergence of Scaling in Random Networks*.
- Born, M., & Infeld, L. 1934, Proc. R. Soc. Lond. A, 144, 425. *Foundations of the New Field Theory*.
- Dyson, F. J. 1949, Phys. Rev., 75, 486. *The Radiation Theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman*.
- Padé, H. 1892, Ann. Sci. Éc. Norm. Supér., 9, 1. *Sur la représentation approchée d'une fonction par des fractions rationnelles*.
- Bergliaffa, S. E. P., Romero, G. E., & Vucetich, H. 1998, Int. J. Theor. Phys., 37, 2281. *Toward an Axiomatic Pregeometry of Space-Time*.
- Planck, M. 1899, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., 5, 479. *Über irreversible Strahlungsvorgänge*. [Primeras unidades de Planck: ℓ_P , t_P , m_P , E_P .]
- Boltzmann, L. 1877, Wiener Berichte, 76, 373. *Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung*.