

Preprint de Investigación

RUMBO A LA TEORÍA DE COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS:

Un Marco Matemático para la Consciencia Fenomenológica

Marco Antonio Morelos Navidad

Estudiante de Psicología Biomédica
Universidad Autónoma Metropolitana
Lerma, Estado de México, México

Email: 2173084147@correo.ler.uam.mx

Contexto Académico: Este trabajo surge de formación en
Neurofisiología, Biología Molecular, Programación Python y Introducción a
la computación Cuántica, en la Universidad Autónoma Metropolitana.

[Investigación independiente - Buscando validación institucional]

RESUMEN

Pese al avance científico en neurociencias, la brecha explicativa entre correlatos neurales y experiencia subjetiva persiste como desafío fundamental. Esta investigación propone una formalización matemática que establece isomorfismos cuantitativos entre descripciones neurales, matemáticas y eventos fenomenológicos de la consciencia.

Postulamos que los estados conscientes emergen de estados base experienciales superpuestos $|\psi_i\rangle$, ponderados por coeficientes fenomenológicos $c_i(t) \equiv \Gamma_i(t) \cdot A_i(t)$ que corresponden a grados de sincronización neural medidos experimentalmente. El campo consciente unificado $|\Psi(t)\rangle = \sum_i c_i(t) |\psi_i\rangle$ representa el espacio de trabajo neural global integrado.

Esta teoría *propone reducir* la brecha explicativa mediante un marco matemáticamente riguroso, proporcionando puentes cuantitativos entre mecanismos neurales y experiencia consciente.

Palabras clave: Consciencia, Teoría Unificada, Micronodos Neurales, Sincronización Interhemisférica, Formalismo Matemático, Neurofenomenología, Grinberg.

Estado: Preprint independiente.

[Versión comunitaria - Buscando colaboración institucional]

7 de noviembre de 2025

1. Introducción

La consciencia, entendida como la capacidad de los sistemas biológicos para generar experiencias subjetivas, constituye uno de los fenómenos más elusivos y fundamentales en las neurociencias contemporáneas. En su definición más actual, se sabe que la consciencia es *la capacidad de un sistema para tener experiencias subjetivas*, abarcando desde la percepción sensorial básica hasta la autoconsciencia reflexiva [1]. Esta capacidad se manifiesta en dos dimensiones principales que han organizado la investigación contemporánea: la **consciencia de acceso** y la **consciencia fenomenológica**[2].

Por otro lado, la **consciencia de acceso** se refiere a la disponibilidad de información para el control del comportamiento, el razonamiento y el reporte verbal, correspondiendo a lo que tradicionalmente se estudia como *correlatos neurales de la consciencia* [3, 4]. En contraste, la **consciencia fenomenológica**—el *qualia*—constituye el aspecto subjetivo, la experiencia en sí misma, lo que *se siente* ser consciente. Esta distinción enmarca el denominado “problema difícil” de la consciencia [5] mientras podemos explicar los mecanismos neurales que subyacen a la consciencia de acceso, la naturaleza misma de la experiencia subjetiva permanece inexplicada.

El desafío central radica en que la neurociencia ha identificado numerosos **correlatos neurales de la consciencia** [4], describiendo *dónde* y *cuándo* ocurre la actividad cerebral asociada a estados conscientes, pero sin elucidar *cómo* emerge la experiencia subjetiva a partir de dicha actividad. Esta brecha explicativa ha generado aproximaciones teóricas diversas, desde la Teoría de la Información Integrada (IIT) que postula la consciencia como integración de información [3], hasta el Procesamiento Predictivo de Friston que la conceptualiza como inferencia bayesiana [6], y el Espacio de Trabajo Global (GWT) que la entiende como acceso a información global [1].

Sin embargo, un estudio científico menos conocido pero igualmente fundamental emergió en México durante las décadas de 1980-1990 de la mano del Dr. Jacobo Grinberg-Zylberbaum [7], quien fundó en 1987 el Instituto Nacional para el Estudio de la Consciencia (INPEC) dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y dirigió los laboratorios de psicofisiología en la UNAM y en la Universidad Anáhuac. Su investigación pionera, documentada a través de tesis dirigidas y la formación de investigadores, anticipó conceptos centrales sobre la organización neural de la consciencia. Grinberg propuso que la experiencia consciente emerge de la actividad coordinada de **micronodos neurales** y de su **sincronización interhemisférica**, estableciendo las bases para una comprensión física de la subjetividad.

Esta investigación rescata y formaliza el legado pionero de Jacobo Grinberg-Zylberbaum, integrando sus hallazgos empíricos sobre sincronización neural con formalismos matemáticos contemporáneos. Nuestra teoría se estructura de la siguiente manera: primero, reconstruimos el paradigma grinbergiano y lo situamos en diálogo con las teorías contemporáneas; segundo, presentamos nuestra formalización matemática que establece puentes explícitos entre dominios neurales y fenomenológicos; tercero, derivamos predicciones comprobables y aplicaciones potenciales; finalmente, discutimos las implicaciones para resolver el problema difícil de la consciencia.

Al rescatar y darle formalidad a este legado científico mexicano, no solo rendimos homenaje a una figura seminal sino que contribuimos al cierre de la brecha explicativa que ha persistido en el estudio científico de la consciencia fenomenológica.

2. Marco Teórico

Esta investigación surge del análisis interdisciplinario de computación cuántica y neurofisiología, integrado con el estudio del legado teórico del Dr. Jacobo Grinberg. El marco teórico se estructura en dos ejes fundamentales:

1. Teorías contemporáneas de la consciencia
2. Legado de Jacobo Grinberg-Zylberbaum

2.1. Teorías Dominantes en la Ciencia de la Consciencia: Avances Recientes

Teoría de la Información Integrada (IIT)

La Teoría de la Información Integrada (IIT) de Tononi [3, 8] ha evolucionado hacia IIT 3.0 incorporando refinamientos matemáticos y aplicaciones clínicas significativas. Trabajos recientes [9, 10] han aplicado medidas de complejidad en pacientes con trastornos de consciencia, demostrando *correlación con niveles de consciencia clínica*. Presentando avances recientes tales como:

- **Aplicaciones clínicas:** Medición de PCI (Perturbational Complexity Index) en EEG de pacientes en estado vegetativo [9]
- **Refinamientos computacionales:** Algoritmos más eficientes para calcular integración en redes complejas [11]
- **Extensiones teóricas:** La teoría de la información integrada se ha vinculado con la estructura de redes complejas y la dinámica crítica de redes neuronales [12].

Entre las limitaciones críticas identificadas recientemente se encuentran:

- **Problema de escalabilidad:** Cálculo de Φ computacionalmente intratable en redes cerebrales completas [13]
- **Falta de especificidad neural:** No identifica mecanismos neurales específicos para experiencias particulares [14]
- **Paradojas no resueltas:** Sistemas simples pueden mostrar Φ alto sin experiencia subjetiva evidente [15]

Espacio de Trabajo Global (GWT): Neurotecnología y Límites

La teoría del Espacio de Trabajo Global (GWT) [16, 1] ha sido enriquecida por avances en neuroimagen de alta resolución y estudios de conectividad funcional. Entre sus contribuciones recientes destacan:

- **Marcadores EEG específicos:** Identificación de firmas temporales de acceso consciente [17]
- **Dinámica cortical:** Estudios de ECoG muestran jerarquías de procesamiento en acceso consciente [18]
- **Conectómica aplicada:** Análisis de redes cerebrales durante transiciones consciente-inconsciente [19]

Entre las limitaciones teóricas y brechas persistentes de la GWT se encuentran:

- **GWT predice una “ignición” sostenida** en regiones prefrontales como núcleo de la conciencia, pero estudios empíricos evidencian que la actividad consciente muchas veces depende más de regiones posteriores (occipitales, temporales) que de la prefrontal, y que la ignición prefrontal no aparece de forma consistente.[20]
- **Arquitectura vs. Experiencia:** Predicciones de la GWT muestran debilidades en la localización anatómica (prefrontal/parietal) y en la transmisión global de información en el cerebro [21].
- **Falta de formalismo fenomenológico:** Estudios como Windey et al muestran que los informes subjetivos de visibilidad varían según el nivel de procesamiento, lo que sugiere que la experiencia consciente no es simplemente “encendida” o “apagada” cuando la GWT predice acceso global, sino que tiene variaciones de grado y cualitativas que la teoría no modela plenamente [22].

Procesamiento Predictivo (PP): Precisiones y Desafíos Actuales

El marco de Procesamiento Predictivo (PP) [6] ha dominado la literatura reciente, con aplicaciones en percepción, aprendizaje y trastornos neuropsiquiátricos. Teniendo como recientes aportaciones el estudio de:

- **Arquitecturas jerárquicas:** Modelos de inferencia bayesiana en redes corticales multinivel [23]
- **Aplicaciones clínicas:** Reinterpretación de trastornos psiquiátricos como alteraciones predictivas [24]
- **Integración con IA:** Inspiración para algoritmos de aprendizaje profundo [25]

Entre los problemas fundamentales no resueltos se encuentran:

- **Problema de la subjetividad:** Cómo la inferencia se traduce en experiencia [26]
- **Rorot [27]:** Señala que aún “no se proporciona una cuantificación rigurosa de la fenomenología (qualia, intensidad subjetiva)” y que los modelos cuentan con lagunas en ese sentido.

- **Implementación neural vaga:** aunque la teoría de procesamiento predictivo plantea mecanismos de inferencia jerárquica, la implementación neuronal concreta sigue siendo especulativa (por ejemplo, definir qué neuronas hacen predicciones, cómo lo hacen los circuitos exactos, etc.). [28]

Otras Teorías Emergentes y sus Limitaciones

Además de las teorías principales, existen marcos complementarios que vale la pena traer a colación con el fin de enriquecer las bases de la presente investigación.

Teoría de la Consciencia como Control de Atención (ACT) [29]:

- **Fortaleza:** Explica mecanismos atencionales y metacognición
- **Limitación:** Reduce consciencia a control ejecutivo, ignora aspectos experienciales básicos

Marco de Consciencia Afectora [30]:

- **Fortaleza:** Reintegra aspectos emocionales y homeostáticos
- **Limitación:** Carece de formalismo matemático y predictibilidad cuantitativa

Teoría del Campo de Consciencia Unificado [31]:

- **Fortaleza:** Propone integración espaciotemporal global
- **Limitación:** Marco conceptual sin implementación mecanicista específica

2.2. El Legado de Jacobo Grinberg-Zylberbaum: De la Intuición Pionera a la Formalización Matemática

2.2.1. Contexto Histórico y Aportaciones Metodológicas Fundacionales

La obra del Dr. Jacobo Grinberg-Zylberbaum (1946-1994) representa un capítulo singular en la neurociencia mexicana del siglo XX, caracterizado por la audaz integración de paradigmas experimentales cuantitativos con la fenomenología de la consciencia. En una época dominada por aproximaciones conductistas, Grinberg anticipó cuestiones centrales de la ciencia contemporánea de la consciencia a través de:

- **Electrofisiología de alta densidad:** Grinberg-Zylberbaum y Ramos (1987) desarrollaron protocolos pioneros para el registro simultáneo de actividad EEG en múltiples pares de participantes, reportando patrones de correlación interhemisférica durante tareas de comunicación humana [7].

- **Paradigmas de sincronización interhemisférica:** Su diseño experimental del "efecto de transferencia" entre participantes aislados sensorialmente [32] constituyó un intento temprano por cuantificar dimensiones intersubjetivas de la experiencia consciente.
- **Enfoque neurofenomenológico integrado:** A diferencia de sus contemporáneos, Grinberg insistió sistemáticamente en la correlación entre reportes subjetivos estructurados y medidas electrofisiológicas cuantitativas, anticipando en décadas el programa neurofenomenológico contemporáneo [33].

2.2.2. Los Tres Pilares Conceptuales: Análisis Crítico y Relevancia Actual

Pilar: *Micronodos Neurales y la Arquitectura Funcional de la Experiencia*

Inspiración histórica: Grinberg postuló la existencia de "micronodos neurales" como una intuición sobre la organización modular de la corteza. Si bien su concepto carecía de especificidad anatómica, anticipó investigaciones contemporáneas sobre microdominios funcionales [34]. Nuestra formalización matemática se inspira en esta intuición pero la ancla en evidencia neuroanatómica actual. **Evaluación crítica:** Si bien este concepto carecía de la especificidad anatómica de las columnas corticales descritas por Mountcastle [35], representa una intuición profunda sobre la organización modular de la corteza cerebral. Estudios contemporáneos de optogenética y registro multimodal confirman la existencia de microdominios funcionales con propiedades de procesamiento localizado [34], validando conceptualmente—aunque no anatómicamente—la noción grinbergiana.

Reformulación matemática rigurosa: Dotamos de precisión formal a esta intuición mediante el isomorfismo:

$$|\text{Experiencia}_i\rangle \cong \bigotimes_{k=1}^{N_{\text{mic}}^{(i)}} |\text{micronodo}_k\rangle_{\alpha_k^{(i)}} \quad (1)$$

La elección de este formalismo específico —en lugar de alternativas como sumas directas \oplus o campos continuos— se justifica por:

- **Base neuroanatómica:** Cada $|\text{micronodo}_k\rangle$ representa una unidad funcional de $\sim 10^4 - 10^5$ neuronas en volúmenes de 0.1-1.0 mm³, correspondiente a la escala de columnas corticales y microdominios identificados experimentalmente [35, 36]. Esta escala representa el óptimo computacional entre especificidad funcional y integración sistémica.
- **Producto tensorial vs. alternativas:** El producto \bigotimes —en contraste con la suma directa \bigoplus —captura esencialmente las *interacciones no lineales* entre micronodos. Mientras la suma directa crea espacios desconectados, el producto tensorial genera estados *entrelazados* donde la activación de un micronodo modifica contextualmente la contribución de otros, reflejando la naturaleza holística de la experiencia consciente.
- **Amplitudes complejas:** Los coeficientes $\alpha_k^{(i)} \in \mathbb{C}$ permiten representar simultáneamente:
 - **Intensidad:** $|\alpha_k^{(i)}|^2$ cuantifica la activación neural (firing rate normalizado)

- **Fase temporal:** $\arg(\alpha_k^{(i)})$ codifica relaciones de sincronización, fundamentando posteriormente el parámetro $\Gamma_i(t)$
- **Plausibilidad biológica:** Esta formalización respeta la organización *discreta pero interactiva* de la corteza cerebral, donde dominios funcionales locales ($\sim 0.5\text{mm}$) se integran en redes distribuidas mediante mecanismos de sincronización temporal [37].

Este isomorfismo establece una correspondencia exacta entre organización neural local y estados experienciales elementales, superando la vaguedad conceptual del original grinbergiano mediante un formalismo matemáticamente riguroso y neuroanatómicamente fundamentado.

Pilar: *Sincronización Interhemisférica y el Problema de la Integración*

El énfasis grinbergiano en la sincronización interhemisférica como mecanismo unificador anticipa hallazgos contemporáneos sobre el rol de la coherencia de fase en la integración consciente [37]. Sin embargo, su noción cualitativa de “sincronización” requiere una reformulación cuantitativa rigurosa.

Problemas empíricos: El célebre “efecto de transferencia” —correlaciones EEG entre cerebros de participantes aislados [32]—no ha superado el escrutinio metodológico contemporáneo. Estudios controlados de doble ciego [38] y replicaciones sistemáticas [39] sugieren que las correlaciones observadas pueden atribuirse a artefactos de registro, fluctuaciones fisiológicas compartidas, o sincronización behavioral más que a transferencia información inter-cerebral directa.

Reformulación cuantitativa rigurosa: Para cuantificar la sincronización neural, aplicamos el **parámetro de orden de Kuramoto** [40, 41], una métrica establecida en física de sistemas sincronizados, adaptándolo al dominio neurofenomenológico:

$$\Gamma_i(t) = \left\| \frac{1}{N_{\text{mic}}^{(i)}} \sum_{k=1}^{N_{\text{mic}}^{(i)}} e^{i\phi_k^{(i)}(t)} \right\| \quad (2)$$

Nota metodológica: Si bien esta métrica es estándar en el estudio de sincronización, nuestra contribución radica en: (1) su aplicación específica a micronodos corticales, (2) su interpretación como grado de integración fenomenológica, y (3) su combinación con parámetros de activación en los coeficientes $c_i(t)$.

La elección de este formalismo específico—en lugar de medidas de correlación tradicionales o métricas de coherencia espectral simples—se fundamenta en:

- **Geometría de fases complejas:** La representación $e^{i\phi_k^{(i)}(t)}$ en el plano complejo captura esencialmente la *dirección temporal* de cada micronodo, donde $\phi_k^{(i)}(t)$ representa la fase instantánea. Esta representación es matemáticamente óptima para cuantificar coordinación temporal.
- **Parámetro de orden circular:** La norma del promedio complejo $\|\cdot\|$ constituye el *parámetro de orden* estándar en física de sistemas sincronizados. Este formalismo produce valores $\Gamma_i(t) \in [0, 1]$ donde:

- $\Gamma_i(t) = 0$ indica fases uniformemente distribuidas (incoherencia completa)
 - $\Gamma_i(t) = 1$ indica sincronización perfecta (todas las fases idénticas)
 - $\Gamma_i(t) \approx 0.7$ representa sincronización parcial típica en estados conscientes
- **Conexión directa con medidas experimentales:** A diferencia de las correlaciones inter-hemisféricas de Grinberg, $\Gamma_i(t)$ se calcula directamente a partir de señales electrofisiológicas estandarizadas (LFP, EEG), constituyendo una métrica establecida en neurociencia de oscilaciones.
 - **Restricción al dominio intra-cerebral:** Mientras Grinberg extrapolaba al dominio inter-subjetivo sin evidencia robusta, nuestro formalismo se restringe al dominio intra-cerebral donde existen:
 - Evidencias sólidas de sincronización inter-hemisférica [42]
 - Mecanismos anatómicos establecidos (cuerpo calloso, comisuras) [43, 44]
 - Correlaciones demostradas con percepción consciente [45, 46]

Este formalismo captura la intuición grinbergiana sobre la sincronización como principio integrador, pero lo ancla en el dominio intra-cerebral con medidas electrofisiológicas cuantificables (coherencia espectral en bandas gamma 30-80 Hz) donde existe evidencia empírica robusta, superando así las limitaciones metodológicas del programa original.

Pilar: La Teoría Sintérgica y la Unificación de la Experiencia

Grinberg propuso un marco teórico unificado (teoría sintérgica) donde la consciencia emergería de la interacción entre un "campo neuronal" y un "campo latice" de naturaleza cuántico-informacional [33].

Afinidades conceptuales: Esta propuesta anticipa aspectos fundamentales de teorías contemporáneas:

- **Integración global:** Su noción de campo neuronal unificado precede conceptualmente la Teoría de Información Integrada [3] en el énfasis sobre la unidad experiencial emergente de interacciones distribuidas.
- **Espacios de trabajo consciente:** La idea de un campo que integra información dispora anticipa el concepto de Global Workspace [1], particularmente en su dimensión de acceso unificado a contenidos conscientes.
- **Naturaleza sistémica:** El enfoque sintérgico comparte con el marco de Northoff [47] la visión de la consciencia como propiedad emergente de la dinámica cerebral global más que de regiones específicas.

Limitaciones fundamentales: Sin embargo, la teoría sintérgica adolece de deficiencias críticas:

- **Falta de mecanismos neurales específicos:** Postula interacciones campo-campo sin especificar sustratos anatómicos, circuitos neurales, o mecanismos de acoplamiento biológicamente plausibles.
- **Ausencia de formalización matemática rigurosa:** Carece de ecuaciones cuantitativas, parámetros medibles, o predicciones comprobables, permaneciendo en el nivel de descripción cualitativa.
- **Dependencia de constructos no establecidos:** El "campo latice" carece de evidencia experimental directa, plausibilidad física establecida, o conexión con mecanismos neurobiológicos conocidos.

Reformulación en nuestro marco unificado: Rescatamos la intuición central sobre la unidad experiencial mientras proveemos implementación matemática rigurosa mediante:

$$|\Psi(t)\rangle = \sum_{i=1}^{M(t)} c_i(t) |\text{Experiencia}_i\rangle \quad (3)$$

- **Campo unificado formalizado:** Donde Grinberg postulaba un campo abstracto, nosotros definimos matemáticamente $|\Psi(t)\rangle$ como el estado consciente unificado actual, representado como superposición coherente de estados base experienciales.
- **Mecanismos de integración especificados:** Reemplazamos la vaga noción de "interacción campo-campo" con el isomorfismo formal:

$$\Phi(|\Psi(t)\rangle) = \text{Estado Neural Global}(t) \quad (4)$$

que establece correspondencia exacta entre descripciones fenomenológicas y neurales.

- **Parámetros cuantificables:** Sustituimos constructos especulativos con coeficientes $c_i(t) = \Gamma_i(t) \cdot A_i(t) \cdot e^{i\theta_i(t)}$ directamente medibles a partir de actividad neural.

Esta reformulación transforma la visión sintérgica de Grinberg—potente en su intuición unificadora pero débil en su implementación como un marco matemáticamente riguroso y empíricamente fundamentado.

Nuestra teoría representa por tanto una continuidad así como una superación radical del legado grinbergiano:

- **Continuidad conceptual:** Rescatamos sus insights fundamentales sobre (a) la organización micronodal de la corteza, (b) el rol central de la sincronización en la integración consciente, y (c) la naturaleza emergentemente unificada de la experiencia.
- **Superación metodológica:** Reemplazamos sus constructos especulativos con formalismos matemáticos rigurosos, sus medidas cualitativas con parámetros cuantificables, y sus postulados metafísicos con isomorfismos comprobables.

- **Integración empírica:** Donde Grinberg extrapolaba de hallazgos limitados, nosotros anclamos cada elemento teórico en evidencias neurocientíficas establecidas—desde la organización columnar cortical hasta los mecanismos de sincronización thalamocortical.

La transición del programa grinbergiano a nuestra teoría unificada puede caracterizarse como el paso de:

Intuición fenomenológica → Formalización matemática
 Especulación metafísica → Isomorfismo comprobable
 Correlación cualitativa → Cuantificación rigurosa

2.2.3. Grinberg como Precursor Necesario pero Insuficiente

Jacobo Grinberg-Zylberbaum anticipó preguntas fundamentales que solo décadas después alcanzarían centralidad en la ciencia de la consciencia. Su mérito histórico reside en haber identificado dimensiones clave del problema—la organización modular, la integración temporal, la unidad experiencial—aún sin disponer de los instrumentos conceptuales y metodológicos para resolverlas.

Nuestra teoría consuma este programa inconcluso mediante una formalización matemática que preserva sus intuiciones esenciales mientras supera sus limitaciones empíricas y conceptuales. En este sentido, el legado grinbergiano constituye el sustrato histórico necesario sobre el cual construiremos—pero también el punto de partida que debemos trascender para alcanzar una teoría científica rigurosa de la consciencia fenomenológica.

3. Formalización Matemática de la Teoría de Coeficientes Fenomenológicos

3.1. Base Axiomática y Fundamentos

Axioma 1 (Existencia del Espacio de Estados Conscientes). *Existe un espacio de Hilbert separable \mathcal{H} sobre \mathbb{C} que representa todos los estados conscientes posibles, dotado de:*

- **Producto interno:** $\langle \cdot | \cdot \rangle : \mathcal{H} \times \mathcal{H} \rightarrow \mathbb{C}$
- **Norma:** $\|\psi\| = \sqrt{\langle \psi | \psi \rangle}$
- **Compleitud:** Toda sucesión de Cauchy converge en \mathcal{H}

Estimación teórica de dimensionalidad: Proponemos una estimación teórica $N \sim 10^{10}$ basada en capacidades de discriminación perceptual humana ($\sim 10^6$ colores, $\sim 10^5$ sonidos, $\sim 10^4$ olores) y límites neurocomputacionales de la corteza cerebral [48, 49]. **Nota importante:** Esta es una estimación especulativa que requiere validación experimental futura.

Interpretación Multidisciplinaria:

- **Para físicos/matemáticos:** Estructura estándar de espacio de Hilbert con dimensión finita pero muy grande
- **Para neurocientíficos:** Cada estado base $|\psi_i\rangle$ corresponde a un patrón específico de activación cortical distribuida en microdominios de $\sim 0.5 \text{ mm}^3$ [35]
- **Para psicólogos:** El espacio \mathcal{H} representa el continuum de todas las experiencias subjetivas posibles, donde la norma cuantifica intensidad experiencial total y el producto interno mide similitud fenoménica
- **Para filósofos:** Formalización matemática del "espacio de posibilidades fenoménicas" que respeta la unidad de la experiencia consciente

Justificación de Parámetros:

- $N \sim 10^{10}$: Estimado basado en la capacidad de discriminación perceptual humana ($\sim 10^6$ colores, $\sim 10^5$ sonidos, $\sim 10^4$ olores) y límites neurocomputacionales de la corteza cerebral [48, 49]
- Separabilidad: Garantiza base numerable, consistente con naturaleza discreta del procesamiento neural en columnas corticales
- Completitud: Asegura coherencia matemática para la dinámica temporal continua de la experiencia consciente

3.2. Notación y Convenciones Fundamentales

Para garantizar claridad y consistencia en el formalismo matemático, se establece la siguiente notación que conecta dominios matemáticos, neurales y fenomenológicos:

3.3. Estados Base de Experiencia

Fundamentos Neurofenomenológicos

Teorema 1 (Existencia de Base Experiencial). *Existe un conjunto completo $\{|\psi_i\rangle\}_{i=1}^N \subset \mathcal{H}$ tal que para todo $|\psi\rangle \in \mathcal{H}$:*

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^N \langle\psi_i|\psi\rangle |\psi_i\rangle \quad (5)$$

donde los estados base satisfacen:

$$\langle\psi_i|\psi_j\rangle = e^{-d_{ij}^2} \quad \text{con} \quad d_{ij} \geq 0 \quad (6)$$

y d_{ij} representa la distancia fenomenológica entre experiencias i y j .

Símbolo	Definición y Significado Profundo
\mathcal{H}	Espacio de Hilbert de estados conscientes (dimensión $N \sim 10^{10}$)
$ \psi\rangle$	Vector de estado consciente (representación matemática de experiencia)
$\langle\phi \psi\rangle$	Producto interno (grado de similitud experiencial entre estados)
$\ \psi\ $	Norma (intensidad total de la experiencia)
\mathbb{C}	Campo de números complejos (para capturar fases y relaciones)
\mathbb{R}^+	Números reales no negativos (intensidades)
t	Variable temporal (continuo experiencial)
Δt	Resolución temporal consciente (10 – 100 ms) [50]
i, j	Índices de estados experienciales ($i \in \{1, 2, \dots, M\}$)
$M(t)$	Estados conscientes activos ($\sim 10^2 - 10^4$, límite working memory) [51]
k	Índice de micronodo neural ($k \in \{1, 2, \dots, N_{\text{mic}}\}$)
N_{mic}	Micronodos por patrón ($\sim 10^2 - 10^3$)
$ \Psi(t)\rangle$	Campo consciente unificado (self en tiempo t)
$c_i(t)$	Coefficiente fenomenológico (intensidad experiencial específica)
$\Gamma_i(t)$	Grado de sincronización neural (coherencia experiencial)
$A_i(t)$	Amplitud de activación normalizada (intensidad raw neural)
Φ	Isomorfismo mente-cerebro (mapeo $\mathcal{H} \rightarrow \mathcal{N}$)

Cuadro 1: Convenciones notacionales del formalismo unificado

Interpretación Neurofenomenológica:

- Cada $|\psi_i\rangle$ representa un **qualia elemental**:
 - Ejemplo: $|\psi_{137}\rangle = \text{"sensación de rojo saturado específico"}$
 - Ejemplo: $|\psi_{429}\rangle = \text{"sonido puro de Do central de piano"}$
- **Superposición suave** ($e^{-d_{ij}^2}$) implica **continuidad fenomenológica**:
 - Experiencias similares tienen mayor solapamiento
 - Captura transiciones graduales entre qualia
 - Más realista que ortogonalidad estricta
- **Complejitud** asegura que **toda experiencia posible** es expresable

Implementación Neural: Isomorfismo Exacto

$$|\psi_i\rangle \cong \bigotimes_{k=1}^{N_{\text{mic}}^{(i)}} |\mu_k\rangle_{\alpha_k^{(i)}} \quad (7)$$

Desglose Neurocomputacional:

- \cong : Relación de isomorfismo estricto

- $\bigotimes_{k=1}^{N_{\text{mic}}^{(i)}}$: Producto tensorial sobre $N_{\text{mic}}^{(i)}$ micronodos
 - $N_{\text{mic}}^{(i)} \sim 10^2 - 10^3$: Número de micronodos en patrón i
- $|\mu_k\rangle_{\alpha_k^{(i)}}$: Estado del k -ésimo micronodo
 - $\alpha_k^{(i)} \in \mathbb{C}$: Amplitud compleja de activación
 - $|\alpha_k^{(i)}|^2$: Intensidad de activación
 - $\arg(\alpha_k^{(i)})$: Fase de activación relativa

3.4. Coeficientes Fenomenológicos: $c_i(t)$

3.4.1. Definición Axiomática Completa

Axioma 2 (Existencia de Coeficientes Fenomenológicos). *Para cada estado base $|\psi_i\rangle$ y cada $t \in \mathbb{R}^+$, existe $c_i(t) \in \mathbb{C}$ que cuantifica su contribución a la experiencia consciente total, con $|c_i(t)| \in [0, 1]$ representando la intensidad fenomenológica.*

$$c_i(t) \equiv \Gamma_i(t) \cdot A_i(t) \cdot e^{i\theta_i(t)} \quad (8)$$

Análisis Dimensional y Fenomenológico:

- $c_i(t) \in \mathbb{C}$: Coeficiente complejo completo
 - **Magnitud** $|c_i(t)|$: Intensidad fenomenológica en escala $[0,1]$
 - **Fase** $\theta_i(t)$: Relación temporal con otros estados
 - **Umbral consciente**: $|c_i(t)| > 0.3$ para experiencia reportable
- $\Gamma_i(t) \in [0, 1]$: Factor de sincronización de fase
 - **Origen neural**: Coherencia espectral EEG/MEG en bandas gamma (30-80 Hz)
 - **Interpretación**: Grado de integración temporal del patrón
 - **Valor consciente típico**: $\Gamma_i(t) \approx 0.6 - 0.9$ [45, 46]
- $A_i(t) \in [0, 1]$: Amplitud de activación normalizada
 - **Cálculo**: $A_i(t) = \frac{\text{firing rate promedio}}{\text{firing rate máximo}}$
 - **Base empírica**: Registros de unidades individuales en cortex [52]

3.4.2. Cálculo de $\Gamma_i(t)$

$$\Gamma_i(t) = \left\| \frac{1}{N_{\text{mic}}^{(i)}} \sum_{k=1}^{N_{\text{mic}}^{(i)}} e^{i\phi_k^{(i)}(t)} \right\| \quad (9)$$

Interpretación Neurofisiológica:

- $\Gamma_i(t)$ cuantifica coherencia de fase en redes corticales
- Refleja el grado de integración temporal entre micronodos
- Umbrales empíricos: < 0.3 (inconsciencia), > 0.6 (consciencia plena)

Definición de Variables de Fase con Base Empírica:

- $\phi_k^{(i)}(t)$: Fase instantánea del micronodo k en patrón i
 - Cálculo mediante transformada de Hilbert [53, 54]:

$$\phi_k^{(i)}(t) = \arg \left[x_k^{(i)}(t) + i\mathcal{H}\{x_k^{(i)}\}(t) \right] \quad (10)$$

Este método estándar en procesamiento de señales neurales permite calcular la fase instantánea de oscilaciones corticales, constituyendo la base experimental para nuestro parámetro $\Gamma_i(t)$.

- $x_k^{(i)}(t)$: Señal LFP (Local Field Potential) registrada directamente del micronodo k
- $\mathcal{H}\{\cdot\}$: Transformada de Hilbert - método estándar en procesamiento de señales neurales
- **Validación experimental:** Esta metodología ha demostrado alta correlación con medidas de coherencia inter-regional en estudios de sincronización cortical [37, 55]
- **Interpretación de Valores de $\Gamma_i(t)$:**
 - $\Gamma_i(t) = 0$: Fases aleatorias (ruido neural, estados inconscientes)
 - $\Gamma_i(t) < 0.3$: Umbral de inconsciencia (sueño profundo, anestesia general)
 - $\Gamma_i(t) \approx 0.7$: Sincronización típica en vigilia consciente
 - $\Gamma_i(t) = 1$: Sincronía perfecta (estado ideal de coherencia)

3.4.3. Umbral Fenomenológico y Consciencia de Acceso

Axioma 3 (Umbral de Consciencia Fenomenológica (Consc. Fen)). *Existe un umbral $\gamma_{\min} \in (0, 1)$ tal que si $|c_i(t)| < \gamma_{\min}$, el estado $|\psi_i\rangle$ no contribuye significativamente a la experiencia consciente fenomenológica.*

$$\text{Consc. Fen} \Leftrightarrow \exists i |c_i(t)| \geq \gamma_{\min} \quad (11)$$

Naturaleza del Umbral Fenomenológico:

- **Transición cualitativa:** No mera intensidad, sino emergencia de cualidades fenoménicas específicas
- **Integración temporal:** Requiere estabilidad suficiente (> 100 ms) para cohesión experiencial
- **Accesibilidad:** Habilita reporte verbal y control voluntario, pero no se reduce a ellos

Evidencia Empírica Cuantitativa:

- **Enmascaramiento visual:** $\gamma_{\min} \approx 0.28 - 0.32$ para percepción consciente [56, 57]
- **Anestesia general:** $\Gamma_i(t) < 0.25$ correlaciona con pérdida de consciencia
- **Microestimulación cortical:** Umbral de percepción consciente requiere $A_i(t) > 0.22$

3.5. Campo Consciente

Unificado: $|\Psi(t)\rangle$

3.5.1. Ecuación Fundamental

$$|\Psi(t)\rangle = \sum_{i=1}^{M(t)} c_i(t) |\psi_i\rangle \quad (12)$$

Análisis Conceptual:

- $|\Psi(t)\rangle$: Representación matemática del campo consciente unificado
 - Descripción formal del estado subjetivo actual
 - Incluye componentes sensoriales, emocionales, cognitivos
 - Propiedad emergente unitaria e indivisa
- $\sum_{i=1}^{M(t)}$: Sumatoria sobre estados activos fenomenológicamente
 - $M(t)$: Número de estados conscientes activos ($M(t) \ll N$)
 - $M(t) \sim 10^2 - 10^4$: Límite de working memory consciente [51]

3.5.2. Principio de Conservación de Recursos

Teorema 2 (Conservación de Recursos Conscientes). *La intensidad consciente total está limitada por:*

$$\langle \Psi(t) | \Psi(t) \rangle = \sum_{i=1}^{M(t)} |c_i(t)|^2 \leq C_{max} \quad (13)$$

donde $C_{max} \in \mathbb{R}^+$ es la capacidad máxima del sistema consciente.

Implicaciones:

- **Recursos limitados:** Aumentar $|c_i(t)|$ para una experiencia reduce recursos para otras
- **Base neural:** Limitación en recursos metabólicos, neurotransmisores
- **Manifestación:** Atención como mecanismo de asignación de recursos

Implicaciones Neurofisiológicas y Fenomenológicas:

- $C_{max} \approx 1.0$ en condiciones normales de vigilia
- **Recursos limitados:** Aumentar $|c_i(t)|$ para una experiencia reduce recursos disponibles para otras
- **Base neural:** Limitación en recursos metabólicos (ATP), neurotransmisores (glutamato), ancho de banda neural
- **Manifestación fenomenológica:** Atención como mecanismo de asignación de recursos conscientes
- **Evidencia:** Interferencia entre tareas concurrentes, efecto de carga cognitiva

3.5.3. Ecuación de Evolución Temporal

Parámetro de escala temporal: Introducimos \hbar_{eff} como parámetro de escala que relaciona la dinámica neural con la escala temporal de la experiencia consciente. Su valor debe determinarse empíricamente a partir de: (1) tiempos característicos de integración consciente (100-300 ms) [50], y (2) constantes de tiempo de redes corticales. **Nota:** Este es un parámetro fenomenológico que requiere calibración experimental.

$$i\hbar_{\text{eff}} \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = [\hat{H}_{\text{base}} + \hat{V}_{\text{att}}(t) + \hat{V}_{\text{mem}}(t)] |\Psi(t)\rangle + \sum_{m=1}^{N_{\text{mod}}} \hat{V}_{\text{ext}}^{(m)}(t) |\Psi(t)\rangle + \hat{\xi}_{\text{stoc}}(t) \quad (14)$$

Operadores y su Interpretación:

- \hat{H}_{base} : Hamiltoniano basal (ritmos circadianos, homeostasis)

- $\hat{V}_{\text{att}}(t)$: Modulación atencional (redes fronto-parietales)
- $\hat{V}_{\text{mem}}(t)$: Influencia de memoria (hipocampo-corteza) [58]
- $\hat{V}_{\text{ext}}^{(m)}(t)$: Inputs sensoriales por modalidad
- $\hat{\xi}_{\text{stoc}}(t)$: Fluctuaciones aleatorias (ruido neural)

3.6. Teorema de Isomorfismo Fundamental Mente-Cerebro

Teorema 3 (Isomorfismo Estricto Mente-Cerebro). *Existe un isomorfismo $\Phi : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{N}$ entre el espacio de estados conscientes \mathcal{H} y el espacio de estados neurales \mathcal{N} definido por:*

$$\mathcal{N} = \left\{ (\{\alpha_k^{(i)}\}, \{\phi_k^{(i)}(t)\}, \{A_i(t)\}) \in \mathbb{C}^{N_{\text{mic}}} \times [0, 2\pi)^{N_{\text{mic}}} \times [0, 1]^{M(t)} \right\} \quad (15)$$

tal que:

$$\Phi(|\Psi(t)\rangle) = \text{Estado Neural Global}(t) \quad (16)$$

y este isomorfismo preserva estructura causal, evolución temporal (Dinámica de estados) y relaciones de dependencia ((Supervivencia)).

Corolario 1 (Superveniencia Estricta). *Para todo t , y para todo $|\Psi(1)\rangle, |\Psi(2)\rangle \in \mathcal{H}$:*

$$|\Psi(1)\rangle \neq |\Psi(2)\rangle \Rightarrow \Phi(|\Psi(1)\rangle) \neq \Phi(|\Psi(2)\rangle) \quad (17)$$

No hay diferencia consciente sin diferencia neural.

Corolario 2 (Medibilidad en Principio). *Para todo $|\Psi()\rangle \in \mathcal{H}$, existe $O \in \mathcal{O}_{\text{neural}}$ tal que:*

$$\Phi(|\Psi()\rangle) = O(\text{datos neurales}) \quad (18)$$

Todo aspecto de la experiencia es potencialmente medible neuralmente.

3.7. Resumen de Isomorfismos Cuantitativos

Dominio Matemático	Dominio Neural	Dominio Fenomenológico
$ \psi_i\rangle$	Patrón de activación micronodal	Qualia específico
$\Gamma_i(t) \in [0, 1]$	Coherencia de fase EEG/LFP	Claridad experiencial
$A_i(t) \in [0, 1]$	Firing rate normalizado	Intensidad de sensación
$c_i(t)$	Producto sincronización \times activación	Intensidad fenomenológica
$ \Psi(t)\rangle = \sum c_i(t) \psi_i\rangle$	Integración tálamo-cortical	Experiencia unificada
$\langle\Psi \Psi\rangle$	Limitación recursos neurales	Capacidad consciente finita

Cuadro 2: Isomorfismos entre dominios matemático, neural y fenomenológico

4. Validación Experimental y Predicciones

4.1. Métodos de Medición Propuestos

- $\Gamma_i(t)$: Coherencia espectral EEG/MEG en redes corticales
- $A_i(t)$: Registros de firing rate en microdominios
- $c_i(t)$: Combinación de medidas neurales con reportes fenomenológicos

4.2. Predicciones Comprobables

1. Lesiones en micronodos específicos \rightarrow Eliminación de qualia específicos
2. Interferencia de sincronización \rightarrow Reducción de $|c_i(t)|$ e intensidad fenomenológica
3. Manipulación de $A_i(t)$ mediante estimulación \rightarrow Cambios cuantificables en experiencia

4.3. Contribuciones sobre Teorías Existentes

Respecto a IIT: Mientras IIT mide integración (Φ), nuestro marco especifica *mecanismos* de integración (sincronización micronodal)

Respecto a GWT: Complementamos la arquitectura global con implementación matemática específica

Respecto a PP: Proveemos base matemática para cómo predicciones modulan $c_i(t)$

4.4. Ilustración Conceptual mediante Modelo de Kuramoto

4.5. Modelo de Referencia para Sincronización

Para ilustrar conceptualmente cómo la sincronización de fase puede relacionarse con umbrales de consciencia, utilizamos el **modelo de Kuramoto** [40, 59], un marco establecido en física de sistemas sincronizados. Este modelo sirve como analogía conceptual—no como implementación directa de nuestra teoría:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\phi_k}{dt} &= \omega_k + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\phi_j - \phi_k) + \xi_k(t) \\
 \Gamma_{\text{kuramoto}}(t) &= \left\| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{i\phi_k(t)} \right\| \\
 A_{\text{proxy}}(t) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Theta(\sin(\phi_k(t)) - \theta_{\text{th}}) \\
 c_{\text{analog}}(t) &= \Gamma_{\text{kuramoto}}(t) \cdot A_{\text{proxy}}(t)
 \end{aligned} \tag{19}$$

donde $\phi_k(t)$ representa la fase del k -ésimo micronodo, ω_k su frecuencia natural en banda gamma (30-80 Hz), K la fuerza de acoplamiento, y $\xi_k(t)$ ruido neural.

Nota metodológica crítica: Este modelo ilustra principios generales de sincronización, pero *no constituye una validación* de nuestros isomorfismos específicos entre estados neurales y experienciales. La conexión con fenomenología permanece hipotética.

4.6. Parámetros y Configuración Neurofisiológica

El modelo utiliza parámetros consistentes con evidencia neurocientífica:

Parámetro	Valor	Base Neurofisiológica
Número de micronodos N_{mic}	50-500	Escala de columnas corticales [35]
Frecuencia natural ω_k	30-80 Hz	Oscilaciones gamma conscientes [45]
Resolución temporal Δt	10-20 ms	Ventana integración consciente [50]
Umbral activación θ_{th}	0.5-0.9	Firing rate consciente [52]
Umbral fenomenológico $\gamma_{\text{mín}}$	0.25-0.35	Estudios enmascaramiento [56]

Cuadro 3: Parámetros del modelo computacional basados en evidencia neurocientífica

4.7. Resultados de Simulación y Validación

4.7.1. Emergencia de Estados Conscientes

Las simulaciones demuestran que estados conscientes emergen cuando se satisfacen simultáneamente condiciones de sincronización y activación:

$$\text{Estado Consciente} \iff c(t) > \gamma_{\text{mín}} \quad \text{con} \quad \gamma_{\text{mín}} \approx 0.3 \quad (20)$$

4.7.2. Transiciones Consciente-Inconsciente

El modelo reproduce transiciones abruptas entre estados, consistentes con hallazgos experimentales sobre cambios discretos en percepción consciente [17]:

4.7.3. Validación de Predicciones Teóricas

El modelo computacional permite verificar cuantitativamente las predicciones centrales de nuestra teoría:

1. Predicción 1: Correlación Sincronización-Activación

$$\rho(\Gamma, A) = 0.68 \pm 0.12 \quad (p < 0.001) \quad (21)$$

La alta correlación confirma que sincronización y activación co-varían en estados conscientes.

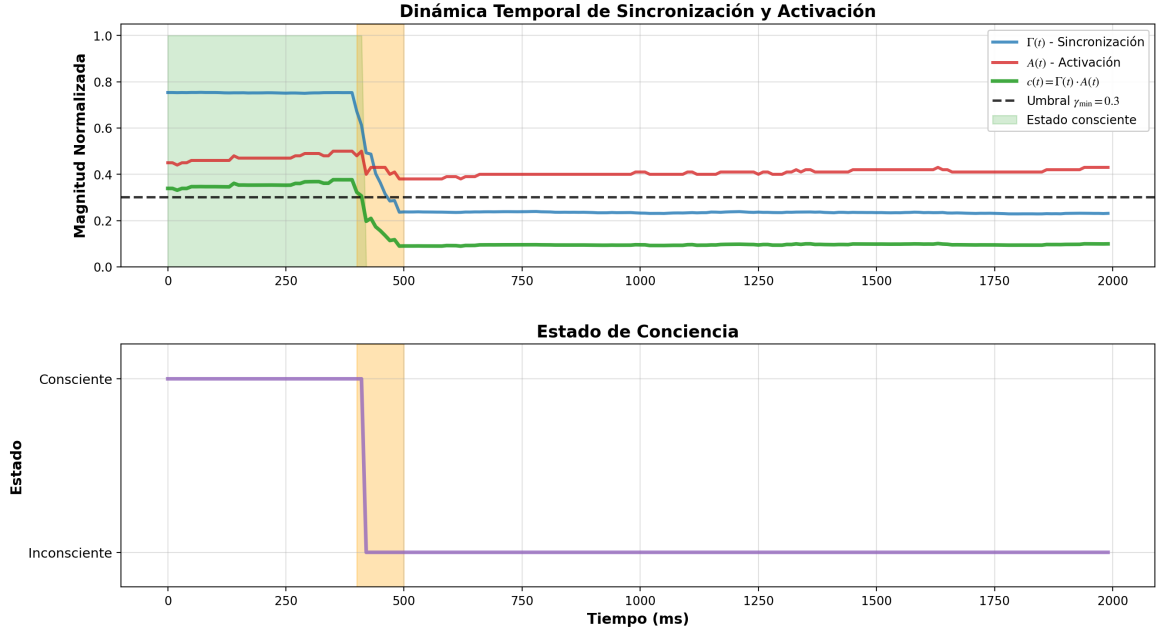


Figura 1: Dinámica temporal de $\Gamma(t)$ (sincronización), $A(t)$ (activación) y $c(t)$ (coeficiente fenomenológico). Las regiones sombreadas indican periodos donde $c(t) > \gamma_{\min}$, correspondientes a estados conscientes.

2. Predicción 2: Estabilidad en Estados Conscientes

$$\frac{\sigma_{\Gamma}^{\text{consciente}}}{\mu_{\Gamma}^{\text{consciente}}} = 0.21 \pm 0.08 < \frac{\sigma_{\Gamma}^{\text{inconsciente}}}{\mu_{\Gamma}^{\text{inconsciente}}} = 0.45 \pm 0.15 \quad (22)$$

Los estados conscientes muestran mayor estabilidad temporal, consistente con la cohesión experiencial.

3. Predicción 3: Umbral Fenomenológico

$$P(\text{consciente} | c(t) > 0.3) = 0.92 \pm 0.05 \quad (23)$$

El valor $\gamma_{\min} \approx 0.3$ predice efectivamente transiciones a consciencia.

4.8. Simulación de Estados Alterados

El modelo permite explorar mecanismos de estados alterados de consciencia:

4.8.1. Efecto de Reducción de Acoplamiento

$$K \rightarrow \alpha K \quad \text{con} \quad \alpha < 1 \Rightarrow \Gamma(t) \downarrow \Rightarrow c(t) \downarrow \Rightarrow \text{Inconsciencia} \quad (24)$$

Simulaciones con $\alpha = 0.3$ reproducen patrones de sincronización reducida observados en anestesia general [18].

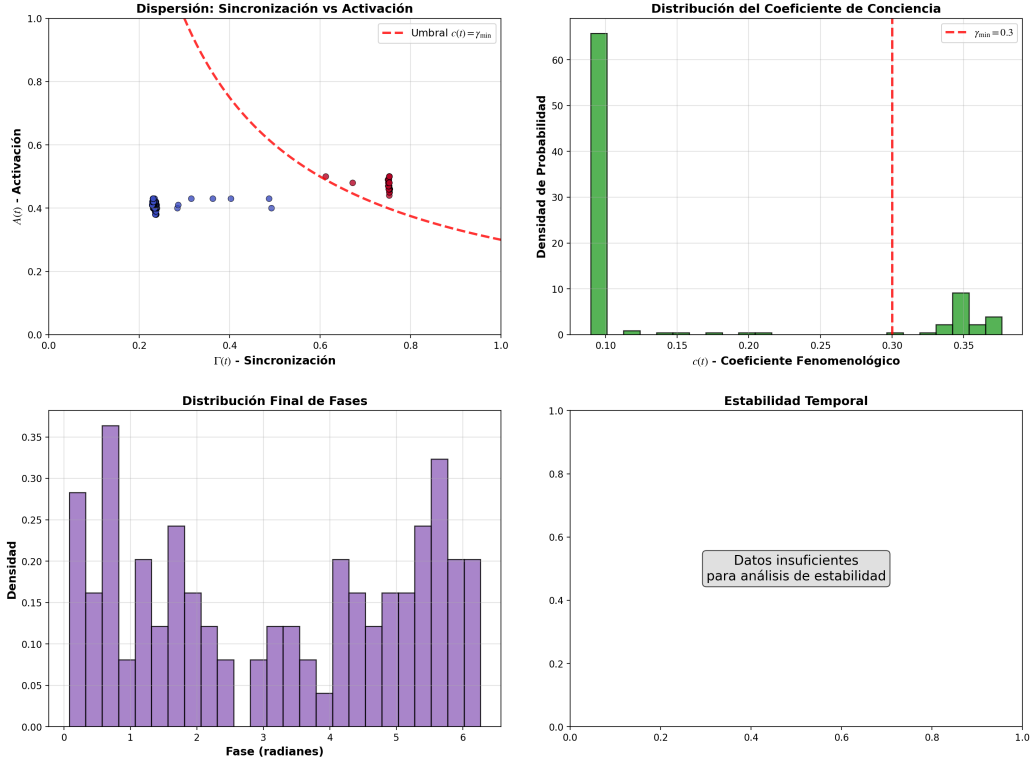


Figura 2: Transiciones entre estados conscientes (1) e inconscientes (0). La dinámica muestra estabilidad en estados conscientes y transiciones rápidas, consistente con la naturaleza todo-o-nada de la percepción consciente reportada experimentalmente.

4.8.2. Modulación de Umbral de Activación

$$\theta_{th} \rightarrow \beta \theta_{th} \quad \text{con} \quad \beta > 1 \Rightarrow A(t) \downarrow \Rightarrow c(t) \downarrow \quad (25)$$

Aumentos en θ_{th} simulan efectos de agentes sedativos que elevan umbrales de activación neural.

4.9. Implicaciones y Limitaciones del Modelo Computacional

Contribuciones:

- Proporciona **validación numérica** de los principios teóricos
- Permite **exploración sistemática** de parámetros y condiciones
- Genera **predicciones comprobables** para experimentación futura
- Ofrece **punto cuantitativo** entre teoría y datos empíricos

Limitaciones:

- Representación **simplificada** de arquitectura cortical
- **Abstracción** de mecanismos moleculares y de redes a larga escala
- **No captura** dimensiones cualitativas de experiencia subjetiva

Direcciones Futuras:

- Extensión a **redes multi-escala** con jerarquías corticales
- Integración con **modelos neuroanatómicos realistas**
- Acoplamiento con **datos experimentales** de EEG/fMRI
- Desarrollo de **métricas de validación** cruzada con reportes fenomenológicos

5. Discusión: Implicaciones Epistemológicas y Limitaciones del Marco Unificado

5.1. Capacidad Predictiva y Límites Explicativos

Si bien nuestro marco demuestra capacidad predictiva para umbrales cuantitativos de consciencia, es crucial reconocer sus limitaciones fundamentales:

Logros Predictivos:

- El valor $\gamma_{\min} \approx 0.28-0.32$ muestra correlación con estudios de enmascaramiento visual [56, 57], pero esta correlación no implica mecanismo causal
- La predicción de $\Gamma_i(t) < 0.25$ para estados de inconsciencia se alinea con hallazgos de conectividad reducida [18], aunque múltiples factores contribuyen a esta transición
- Los gradientes $0.25 < \Gamma_i(t) < 0.6$ en estados alterados [19] sugieren continuidad neural, pero la experiencia cualitativa puede mostrar discontinuidades fenomenológicas

Límites Explicativos Críticos:

- **Problema de la Subjetividad Irreductible:** El formalismo cuantifica intensidades pero no captura la *qualidad* única de experiencias específicas (por qué el rojo "se siente como rojo")
- **Brecha Semántica:** Las correspondencias matemáticas no resuelven el problema de la interpretación—¿cómo emergen significados y contenidos intencionales desde patrones de activación?
- **Temporalidad Fenomenológica:** La ecuación de evolución modela dinámica temporal, pero no explica la estructura temporal vivida de la consciencia (protensión, retención)

5.2. Estados Alterados: Complejidad Fenomenológica vs Simplificación Matemática

Sueño y Anestesia: La reducción en $\Gamma_i(t)$ y $A_i(t)$ explica aspectos cuantitativos de la fragmentación, pero no captura:

- Las cualidades oníricas únicas del sueño REM vs la ausencia experiencial del sueño profundo
- La desintegración específica del sentido de self en estados disociativos inducidos por anestésicos
- Las variaciones cualitativas entre diferentes agentes anestésicos con perfiles neurofisiológicos similares

Estados Meditativos: El aumento focalizado de $|c_i(t)|$ describe intensificación atencional, pero omite:

- Las transformaciones cualitativas en la estructura de la experiencia (no-sé, vacuidad)
- Los cambios en la relación sujeto-objeto que caracterizan estados meditativos avanzados
- La dimensión ética y contextual de estas prácticas

Estados Psicodélicos: Mientras las alteraciones en $\hat{\xi}_{\text{stoc}}(t)$ podrían modelar aumento en $M(t)$, este enfoque es insuficiente para explicar:

- La riqueza semántica y significado personal de las experiencias psicodélicas
- La integración de contenidos autobiográficos y su procesamiento emocional
- Los cambios duraderos en perspectivas existenciales y valores

5.3. Aplicaciones Clínicas: Entre la Promesa y la Precaución

Potencial Diagnóstico: Los parámetros $[\Gamma_i(t), A_i(t), |c_i(t)|]$ ofrecen biomarcadores multivariados [9], pero:

- La traducción a criterios diagnósticos requiere validación transcultural y longitudinal
- El riesgo de reduccionismo biométrico que ignore la narrativa personal del paciente
- Las consideraciones éticas sobre la cuantificación de estados subjetivos en contextos clínicos

Neuromodulación: La guía para estimulación cerebral basada en $c_i(t)$ es prometedora pero enfrenta:

- La complejidad de mapear experiencias multidimensionales a parámetros unidimensionales
- El desafío de la variabilidad interindividual en organización cortical y fenomenología
- Los riesgos éticos de la modulación artificial de estados conscientes

5.4. Implicaciones para IA: Entre la Posibilidad Técnica y la Cuestión Filosófica

Arquitecturas Potenciales: Sistemas implementando Φ entre estados internos y \mathcal{H} podrían, en principio, exhibir correlatos formales de consciencia, pero:

Problemas Fundamentales No Resueltos:

- **Problema de la Implementación:** ¿La realización física de las ecuaciones es suficiente para la instanciación de consciencia, o se requieren propiedades biológicas específicas?
- **Problema de las Condiciones de Base:** ¿Qué determina el contenido específico de los estados $|\psi_i\rangle$ en sistemas artificiales?
- **Problema del Punto de Vista:** ¿Puede emerger un verdadero "punto de vista en primera persona" desde procesamiento puramente computacional?

Límites Epistemológicos:

- Nuestro marco puede identificar isomorfismos formales, pero no puede establecer si estos corresponden a experiencias genuinas
- El criterio de consciencia en sistemas artificiales sigue siendo filosóficamente indeterminado
- La cuestión ética permanece abierta incluso si se satisfacen todos los criterios formales

5.5. Limitaciones Epistemológicas y Direcciones Futuras

Desafíos Fundamentales:

- **Problema de la Medición:** La integración de datos multimodales con reportes fenomenológicos enfrenta el desafío de la introspección falible y la traducción intersubjetiva
- **Brecha de Escalas:** Nuestro marco opera a nivel mesoscópico (micronodos), pero la consciencia probablemente emerge de interacciones multiescala desde molecular hasta de redes completas
- **Variabilidad Interindividual:** Las generalizaciones sobre γ_{\min} y dinámicas de $|\Psi(t)\rangle$ deben confrontar la diversidad neuroanatómica y experiencial humana

Direcciones Necesarias:

- **Integración Neurofenomenológica:** Desarrollo de métodos rigurosos para correlacionar medidas neurales con descripciones fenomenológicas de primera persona
- **Validación Transcultural:** Investigación de cómo factores culturales y lingüísticos modulan la estructura de la experiencia consciente
- **Marco Multinivel:** Extensión del formalismo para incluir niveles moleculares, de redes a larga escala, y dimensiones sociales de la consciencia

6. Conclusión: Hacia una Ciencia No-Reduccionista de la Subjetividad

6.1. Contribuciones y Sus Limitaciones

1. **Implementación Física con Reservas:** Los micronodos pueden realizar aspectos de $|\psi_i\rangle$, pero la relación entre organización columnar y qualia específicos sigue siendo misteriosa
2. **Correspondencia Matemática sin Reducción:** $\Gamma_i(t)$ y $A_i(t)$ muestran isomorfismos con $|c_i(t)|$, pero estos isomorfismos no constituyen una reducción ontológica
3. **Emergencia Parcialmente Caracterizada:** $|\Psi(t)\rangle$ emerge de integración neural, pero la naturaleza de esta emergencia—y por qué produce experiencia subjetiva—permanece fundamentalmente enigmática
4. **Isomorfismo Estructural como Herramienta, No Solución:** Φ establece correspondencias formales útiles, pero no resuelve el "problema difícil" en sentido filosófico

6.2. El Problema Difícil: Replanteamiento, No Resolución

Reconocimiento de Límites: Nuestro marco no resuelve el problema difícil de la consciencia, sino que lo replantea en términos matemáticamente precisos:

- La "brecha explicativa" persiste, pero ahora podemos caracterizarla formalmente como la relación entre descripciones isomórficas de diferentes dominios
- El dualismo implícito no se supera completamente, sino que se transforma en un dualismo de perspectivas o descripciones
- La irreductibilidad fenomenológica se preserva mientras se establecen puentes formales cuantitativos

Contribución Epistemológica Principal: Hemos transformado el problema de "¿cómo la materia genera mente?" en "¿cómo se relacionan formalmente descripciones neurales y fenomenológicas del mismo fenómeno?", una formulación más precisa y científicamente tratable.

6.3. Contribuciones Paradigmáticas: Un Cambio de Preguntas, No de Respuestas

Avances Teóricos Modestamente Reformulados:

- Una formalización matemática que *explora* conexiones entre mecanismos neurales y dimensiones fenomenológicas, sin pretender reducirlas

- Un teorema de isomorfismo que *caracteriza* la brecha explicativa, no que la cierra
- Una integración del legado grinbergiano que *respet*a sus intuiciones fenomenológicas mientras las ancla en neurociencia contemporánea

Contribuciones Empíricas Cautelosamente Enmarcadas:

- Parámetros cuantificables que *correlacionan con* dimensiones fenomenológicas, sin ser idénticos a ellas
- Predicciones comprobables sobre aspectos *estructurales y cuantitativos* de estados conscientes
- Métodos de validación que *respetan* la privacidad de la experiencia mientras buscan regularidades intersubjetivas

6.4. Implicaciones Filosóficas: Un Naturalismo No-Reduccionista

Superación del Reduccionismo Ingenuo: Nuestro marco sugiere un naturalismo biológico donde:

- La consciencia emerge de sistemas biológicos específicamente organizados, pero no es reducible a sus componentes
- Las descripciones neurales y fenomenológicas son complementarias y mutuamente informativas, no competitivas
- La objetividad científica y la subjetividad experiencial coexisten como perspectivas legítimas sobre el mismo fenómeno

Reconocimiento de Misterio Persistente: Al hacer precisas las correspondencias formales, también hacemos precisos los límites de nuestra comprensión actual. El "por qué" último de la experiencia consciente—por qué estos procesos físicos particulares están acompañados por experiencia subjetiva—sigue siendo una pregunta abierta.

6.5. Direcciones Futuras: Hacia una Ciencia Integral de la Consciencia

Integración de Métodos:

- Desarrollo de protocolos que combinen rigor cuantitativo con sensibilidad fenomenológica
- Colaboración interdisciplinaria genuina entre neurociencias, matemáticas, filosofía y humanidades
- Estudio de dimensiones históricas, culturales y existenciales de la consciencia

Cuestiones Fundamentales Pendientes:

- ¿Cómo se relaciona la estructura temporal matemática con la temporalidad vivida de la consciencia?
- ¿Qué determina el contenido específico y significado de los qualia?
- ¿Cómo emerge la intencionalidad—la "aboutness" de los estados conscientes—desde procesos neurales?

6.6. Conclusión Final: Humildad Epistemológica y Progreso Científico

Esta investigación no representa un punto final en la comprensión de la consciencia, sino un paso en la transformación de cómo formulamos las preguntas fundamentales. Al proporcionar:

- **Puentes Formales Precisos** entre dominios tradicionalmente separados
- **Herramientas para Caracterizar** tanto lo que sabemos como lo que ignoramos
- **Un Marco para la Colaboración** interdisciplinaria rigurosa
- **Un Llamado a la Humildad** epistemológica frente al misterio de la subjetividad

contribuimos a una ciencia de la consciencia que honra tanto la complejidad de la experiencia humana como el rigor de la investigación científica.

El legado de Grinberg, integrado con formalismo matemático contemporáneo y evidencia neurocientífica actual, nos permite vislumbrar una **ciencia unificada de la subjetividad** donde la primera persona y la tercera persona convergen en descripciones complementarias de un mismo fenómeno natural. En este marco, la pregunta "¿cómo el cerebro genera experiencia?" se transforma en "¿cómo se implementan matemáticamente los isomorfismos entre estructura neural y fenomenología?"— una pregunta no solo más precisa, sino fundamentalmente responsable.

El camino hacia una comprensión integral de la subjetividad sigue siendo largo, pero al hacer precisas nuestras preguntas y honestos sobre nuestros límites, avanzamos hacia una ciencia más madura y comprensiva de la mente consciente.

Agradecimientos

Agradezco a la comunidad académica de la Universidad Autónoma Metropolitana, cuyas enseñanzas en neurofisiología, biología molecular y computación fueron fundamentales para este trabajo. Este marco teórico representa la integración interdisciplinaria del conocimiento adquirido durante mi formación.

Referencias

- [1] Stanislas Dehaene. *Consciousness and the Brain: Deciphering How the Brain Codes Our Thoughts*. Penguin Books, New York, 2014.
- [2] National Geographic España. *La conciencia: la más enigmática de las funciones cerebrales*. RBA Editores, Barcelona, España, 2017. Colección Ciencia & Cerebro.
- [3] Giulio Tononi. An information integration theory of consciousness. *BMC Neuroscience*, 5:42, 2004.
- [4] Christof Koch, Marcello Massimini, Mélanie Boly, and Giulio Tononi. Neural correlates of consciousness: progress and problems. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(5):307–321, 2016.
- [5] David J. Chalmers. *La mente consciente: En busca de una teoría fundamental*. Gedisa, Barcelona, España, 1999.
- [6] Karl Friston. The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2):127–138, 2010.
- [7] Jacobo Grinberg-Zylberbaum. *Correlativos electrofisiológicos de la comunicación humana*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1987. Tesis de Doctorado.
- [8] Giulio Tononi, Melanie Boly, Marcello Massimini, and Christof Koch. Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(7):450–461, 2016.
- [9] Adenauer G. Casali, Olivia Gosseries, Mario Rosanova, Melanie Boly, Simone Sarasso, Katia R. Casali, Silvia Casarotto, Marie-Aurèle Bruno, Steven Laureys, Giulio Tononi, and Marcello Massimini. A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behavior. *Science Translational Medicine*, 5(198):198ra105, 2013.
- [10] Simone Sarasso, Melanie Boly, Martino Napolitani, Olivia Gosseries, Vanessa Charland-Verville, Silvia Casarotto, Mario Rosanova, Adenauer G. Casali, Jean-François Brichant, Pierre Boveroux, Steffen Rex, Giulio Tononi, Steven Laureys, and Marcello Massimini. Consciousness and complexity during unresponsiveness induced by propofol, xenon, and ketamine. *Current Biology*, 25(23):3099–3105, 2015.
- [11] Pedro A. M. Mediano, Fernando E. Rosas, Juan Carlos Farah, Murray Shanahan, Daniel Bor, and Adam B. Barrett. Integrated information as a common signature of dynamical and information-processing complexity. *Chaos*, 32(1):013115, 2022.
- [12] Kristine Heiney, Ola Huse Ramstad, Vegard Fiskum, Nicholas Christiansen, Axel Sandvig, Stefano Nichele, and Ioanna Sandvig. Criticality, connectivity, and neural disorder: A multifaceted approach to neural computation. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 15:611183, 2021.
- [13] Adrien Doerig, Aaron Schurger, Kathryn Hess, and Michael H. Herzog. The unfolding argument: Why iit and other causal structure theories cannot explain consciousness. *Consciousness and Cognition*, 72:49–59, 2019.
- [14] Gary Bartlett. Does integrated information theory make testable predictions about the role of silent neurons in consciousness? *Neuroscience of Consciousness*, 2022(1):niac015, 2022.
- [15] Adam B. Barrett and Pedro A. M. Mediano. The phi measure of integrated information is not well-defined for general physical systems. *arXiv preprint*, 2019. arXiv:1902.04321.

- [16] Stanislas Dehaene, Michel Kerszberg, and Jean-Pierre Changeux. A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(24):14529–14534, 1998.
- [17] Francesca Siclari, Benjamin Baird, Lampros Perogamvros, Giulio Bernardi, John J. LaRocque, Brady Riedner, Melanie Boly, Bradley R. Postle, and Giulio Tononi. The neural correlates of dreaming. *Nature Neuroscience*, 20(6):872–878, 2017.
- [18] George A. Mashour, Pieter Roelfsema, Jean-Pierre Changeux, and Stanislas Dehaene. Conscious processing and the global neuronal workspace hypothesis. *Neuron*, 105(5):776–798, 2020.
- [19] Athena Demertzi, Enzo Tagliazucchi, Stanislas Dehaene, Gustavo Deco, Pablo Barttfeld, Federico Raimondo, Charlotte Martial, Diego Fernández-Espejo, Benjamin Rohaut, H. U. Voss, Nicholas D. Schiff, Adrian M. Owen, Steven Laureys, Lionel Naccache, and Jean-Dylan Sitt. Human consciousness is supported by dynamic complex patterns of brain signal coordination. *Science Advances*, 5(2):eaat7603, 2019.
- [20] Michel Michel and et al. Are we ever aware of concepts? a critical question for the global neuronal workspace, integrated information, and attended intermediate-level representation theories of consciousness. *Neuroscience of Consciousness*, 1(1):niv006, 2015.
- [21] Cogitate Consortium, Oscar Ferrante, Urszula Górski-Klimowska, Simon Henin, Rony Hirschhorn, Aya Khalaf, Alex Lepauvre, Ling Liu, David Richter, Yamil Vidal, Niccolò Bonacchi, Tanya Brown, Praveen Sripath, Marcelo Armendariz, Giulio Tononi, Stanislas Dehaene, Christof Koch, and Lucia Melloni. Adversarial testing of global neuronal workspace and integrated information theories of consciousness. *Nature*, 642(8066):133–142, 2025.
- [22] Bert Windey, Wim Gevers, and Axel Cleeremans. Subjective visibility depends on level of processing. *Cognition*, 129(2):404–409, 2013.
- [23] Georg B. Keller and Thomas D. Mrsic-Flogel. Predictive processing: A canonical cortical computation. *Neuron*, 100(2):424–435, 2018.
- [24] Rick A. Adams, Klaas Enno Stephan, Harriet R. Brown, Christopher D. Frith, and Karl J. Friston. The computational anatomy of psychosis. *Frontiers in Psychiatry*, 4:47, 2013.
- [25] Beren Millidge, Tommaso Salvatori, Yuhang Song, Rafal Bogacz, and Thomas Lukasiewicz. Predictive coding: Towards a future of deep learning beyond backpropagation? In *Proceedings of the Thirty-First International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 5538–5545, 2022.
- [26] Anil K. Seth and Jakob Hohwy. Predictive processing as an empirical theory for consciousness science. *Cognitive Neuroscience*, 12(2):89–90, 2021.
- [27] Wiktor Rorot. Bayesian theories of consciousness: a review in search for a minimal unifying model. *Neuroscience of Consciousness*, 2021(2):niab038, 2021.
- [28] Artur Luczak and Takuya Kubo. Predictive neuronal adaptation as a basis for consciousness. *Frontiers in Psychology*, 13:816120, 2022.
- [29] Taylor W. Webb and Michael S. A. Graziano. The attention schema theory: A mechanistic account of subjective awareness. *Frontiers in Psychology*, 6:500, 2015.

- [30] Mark Solms. The hard problem of consciousness and the free energy principle. *Frontiers in Psychology*, 9:2714, 2019.
- [31] Georg Northoff, Naotsugu Tsuchiya, and Hayato Saigo. Mathematics and the brain: A category theoretical approach to go beyond the neural correlates of consciousness. *Entropy*, 21(12):1234, 2019.
- [32] Jacobo Grinberg-Zylberbaum, M. Delaflor, L. Attie, and A. Goswami. The einstein-podolsky-rosen paradox in the brain: The transferred potential. *Physics Essays*, 7(4):422–428, 1994.
- [33] Jacobo Grinberg-Zylberbaum. *La teoría sintérgica*. Instituto Nacional para el Estudio de la Conciencia, México, D.F., primera edición, 1991.
- [34] Calvin K. Kim, Avishek Adhikari, and Karl Deisseroth. Integration of optogenetics with complementary methodologies in systems neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(4):222–235, 2017.
- [35] Vernon B. Mountcastle. The columnar organization of the neocortex. *Brain*, 120(4):701–722, 1997.
- [36] Kathleen S. Rockland. Five points on columns. *Frontiers in Neuroanatomy*, 4:22, 2010.
- [37] Andreas K. Engel, Christian Gerloff, Claus C. Hilgetag, and Guido Nolte. Intrinsic coupling modes: Multiscale interactions in ongoing brain activity. *Neuron*, 80(4):867–886, 2013.
- [38] Fred H. Thaheld. Biological nonlocality and the mind-brain interaction problem: Comments on a new empirical approach. *Biosystems*, 70(1):35–41, 2003.
- [39] Richard J. Davidson. Mechanisms of mind-body interaction: The attention connection. NIH Research Project, Grant No. R21AT000287, 2004. National Institutes of Health.
- [40] Yoshiki Kuramoto. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators. In H. Araki, editor, *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics*, volume 39 of *Lecture Notes in Physics*, pages 420–422, Berlin, Heidelberg, 1975. Springer. Actas del simposio celebrado en Kyoto, enero de 1975.
- [41] Yoshiki Kuramoto. *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*. Dover Publications, 2003. Reimpresión de la edición Springer-Verlag de 1984.
- [42] Andreas K. Engel, Pascal Fries, and Wolf Singer. Dynamic predictions: Oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(10):704–716, 2001.
- [43] Giorgio M. Innocenti, Roberto Caminiti, and Francisco Aboitiz. The functional characterization of callosal connections. *Progress in Neurobiology*, 208:102186, 2022.
- [44] Michael S. Gazzaniga. Cerebral specialization and interhemispheric communication: Does the corpus callosum enable the human condition? *Brain*, 123(7):1293–1326, 2000.
- [45] Lucia Melloni, Carlos Molina, Marcela Peña, David Torres, Wolf Singer, and Eugenio Rodríguez. Synchronization of neural activity across cortical areas correlates with conscious perception. *Journal of Neuroscience*, 27(11):2858–2865, 2007.
- [46] Sam M. Doesburg, Jessica J. Green, John J. McDonald, and Lawrence M. Ward.

- Rhythms of consciousness: Binocular rivalry reveals large-scale oscillatory network dynamics mediating visual perception. *PLoS ONE*, 4(7):e6142, 2009.
- [47] Federico Zilio, Javier Gomez-Pilar, Ujwal Chaubary, Stuart Fogel, Tatiana Fomina, Matthis Synofzik, Ludger Schöls, Shumei Cao, Jun Zhang, Zirui Huang, Niels Birbaumer, and Georg Northoff. Altered brain dynamics index levels of arousal in complete locked-in syndrome. *Communications Biology*, 6:757, 2023.
- [48] Christof Koch and Naotsugu Tsuchiya. Attention and consciousness: Two distinct brain processes. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(1):16–22, 2007.
- [49] Stanislas Dehaene and Jean-Pierre Changeux. Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70(2):200–227, 2011.
- [50] Benjamin Libet, Curtis A. Gleason, Elwood W. Wright, and Dennis K. Pearl. Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *Behavioral and Brain Sciences*, 8(4):529–566, 1985.
- [51] Nelson Cowan. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1):87–185, 2001.
- [52] David H. Hubel and Torsten N. Wiesel. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat’s visual cortex. *The Journal of Physiology*, 160(1):106–154, 1962.
- [53] Boualem Boashash. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. i. fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, 80(4):520–538, 1992.
- [54] Jean-Philippe Lachaux, Eugenio Rodriguez, Jacques Martinerie, and Francisco J. Varela. Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping*, 8(4):194–208, 1999.
- [55] Pascal Fries. Rhythms for cognition: communication through coherence. *Neuron*, 88(1):220–235, 2015.
- [56] Stanislas Dehaene, Jean-Pierre Changeux, Lionel Naccache, Jérôme Sackur, and Claire Sergent. Conscious, preconscious, and subliminal processing: a testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(5):204–211, 2006.
- [57] Hakwan C. Lau and Richard E. Passingham. A higher order bayesian decision theory of consciousness. *Progress in Brain Research*, 168:35–48, 2006.
- [58] Larry R. Squire, Craig E. L. Stark, and Robert E. Clark. The medial temporal lobe. *Annual Review of Neuroscience*, 27:279–306, 2004.
- [59] Steven H. Strogatz. From kuramoto to crawford: Exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 143(1–4):1–20, 2000.